

## Wpływ dodatku szklanych włókien o jednakowej długości i mieszanych na właściwości betonu

### The influence of hybrid glass fibres addition on stress – strain behaviour of concrete

#### 1. Wprowadzenie

Zmieszanie jednego rodzaju włókien z innymi lub zmieszanie włókien o różnej długości jest powszechnie znaną metodą wytwarzania betonu zbrojonego włóknami hybrydowymi. W takim betonie, różne rodzaje włókien, takie jak stalowe, szklane, węglowe, często polipropylenowe wykorzystywane są do poprawy wytrzymałości w zakresie sprężystym oraz przenoszenia pewnych obciążeń po wystąpieniu rys w materiale (1). W betonie zwykłym mikrospeknięcia występują nawet przed poddaniem konstrukcji obciążeniu, co może być spowodowane skurczem suszenia oraz innymi przyczynami, związanymi ze zmianami objętości betonu. Dodanie do betonu krótkich włókien zmniejsza ilość spękań powstających w wyniku skurczu suszenia i zwiększa wytrzymałość na zginanie elementów betonowych (2,3). W obciążonej konstrukcji betonowej, mikrospeknięcia zwiększają stopień rozwarcia i ulegają propagacji, co może prowadzić do trwałej deformacji betonu (4, 5). Mikro-włókna, lub włókna krótkie, losowo rozproszone w betonie przeciwdziałają zwiększeniu rozwarcia mikrorys i zwiększają wytrzymałość takiego betonu (6–8). Dodatkowo, drobne włókna rozproszone w betonie przyczyniają się do mostkowania mikrorys, a tym samym poprawiają właściwości mechaniczne betonu (9, 10). Zwiększenie objętości włókien powoduje poprawę wytrzymałości i elastyczności betonu. Jednakże, zbyt duży dodatek włókien może stwarzać pewne problemy, związane z tworzeniem konglomeratów w mieszance betonowej, jej zbrzylenie się oraz pogorszenie urabialności, czemu może towarzyszyć spadek wytrzymałości i jednorodności betonu. W pewnej objętości, krótsze włókna będą równomierniej rozproszone, co będzie zwiększać prawdopodobieństwo ich układania się w pobliżu mikrospekkań. Początkowo włókna te mogą przyczyniać się do opóźnienia zwiększania się rozwarcia rys, jednak pod dalszym działaniem obciążenia rozciągającego zostaną wyrwane i mikrorysy przejdą w makrorysy. Natomiast długie włókna będą mostkowały rysy i zmniejszały odkształcenia betonu po ich wystąpieniu, a więc wraz ze wzrostem długości włókien poprawia się także wytrzymałość na rozciąganie (11, 12). Zastosowanie mieszanki krótkich i długich włókien daje

#### 1. Introduction

The combination of one kind of fibres with another kind of fibres or one length with another length of fibres is commonly known as hybrid fibre concrete. In hybrid fibre concrete, different fibres such as steel, glass, carbon and polypropylene are used to improve pre-peak strength and post-peak toughness (1). In conventional concrete, micro-cracks exist, even before the structure is loaded, because of the drying shrinkage and other causes of volume change. Use of short fibres in concrete matrix reduces the drying shrinkage cracks and increases the flexural toughness of concrete elements (2, 3). When the structure is loaded, the micro-cracks open up and propagate which may lead to inelastic deformation in concrete (4, 5). Micro or short randomly dispersed fibres in concrete help to resist the opening of micro-cracks and enhance the pre-crack strength (6 – 8). Moreover, the small fibres dispersed and distributed spatially in concrete help to bridge the internal micro-cracks, thus improve concrete mechanical properties (9, 10). Higher the volume of fibres, higher will be the strength and toughness of the composite. However, the addition of higher volume of fibres leads to practical problems such as bundling, balling and reduction in workability, hence, researchers have observed reduction in strength and toughness. In a given volume, the shorter fibres, closer will be their spacing and they will be as near as possible to the micro-cracks. These fibres may initially contribute to delay the widening the cracks but may be pulled out after micro-cracks will be transformed into macro-cracks. Thus long fibres bridge the cracks and improves the post-peak deformations of concrete, as the length of fibres increase the resistance post-peak deformations will increase (11, 12). Combination of short and long fibres gives the synergy effect (13, 14). Earlier research shows that mixing of different lengths of polyvinyl alcohol fibres in different combinations of volume fractions improve average first crack stress and also improve post peak ductility of concrete, compared to mono type fibres reinforced concrete (15 – 17).

efekt synergii (13, 14). Dotychczasowe wyniki badań wykazały, że zmieszanie ze sobą włókien poliwinylowych o różnych długościach i różnym udziale objętościowym wpływa korzystnie na początkowe naprężenia występujące w rysach, a także poprawia elastyczność betonu po ich wystąpieniu, w porównaniu do betonu zbrojonego włóknami o jednej długości (15-17).

### **Znaczenie badań**

W pracy stosowano włókna o różnych długościach, a wytworzony beton oznaczono jako beton zbrojony włóknami jednej długości, w celu odróżnienia go od betonu zbrojonego włóknami hybrydowymi. Tak jak w projektowaniu mieszanki betonowej, dobór kruszyw o różnych wymiarach pozwala na uzyskanie prawidłowego rozkładu wielkości ziaren kruszywa, zapewniającego korzystne właściwości betonu, takiego samego zjawiska można oczekiwać w przypadku włókien. W przypadku odpowiedniego rozkładu długości włókien, w wyniku efektu synergii można oczekiwać poprawy wytrzymałości oraz elastyczności betonu. W związku z tym w pracy zastosowano różne proporcje włókien szklanych o długościach 150  $\mu\text{m}$ , 6 mm i 20 mm.

## **2. Materiały**

Zastosowano cement portlandzki zwykły klasy 53 zgodnie z normą indyjską IS: 12269 (18). Ciężar właściwy cementu wynosił 3,11  $\text{g/cm}^3$ , wodożądność – 33%, początek czasu wiązania – 48 min, koniec czasu wiązania – 125 min. Pył krzemionkowy przechowywano prawidłowo, zgodnie z normą indyjską IS 15388 (19), a jego ciężar właściwy wynosił 2,3  $\text{g/cm}^3$ . Zastosowano kruszywa zgodne z normą indyjską IS 383 (20). Kruszywo drobne [piasek] uzyskano z pobliskiej rzeki. Gęstość nasypowa, ciężar właściwy oraz moduł rozdrobnienia piasku wynoszą kolejno 1,41  $\text{g/cm}^3$ , 2,68  $\text{g/cm}^3$  oraz 2,43. Jako kruszywo grube zastosowano granit łamany. Otrzymano je z lokalnego przedsiębiorstwa zajmującego się kruszeniem surowców, a maksymalna średnica ziaren wynosiła 20 mm. Gęstość nasypowa kruszywa grubego, jego ciężar właściwy i moduł rozdrobnienia wynosiły odpowiednio 1,46  $\text{g/cm}^3$ , 2,78  $\text{g/cm}^3$  oraz 7,1. Do badań użyto wody pitnej, zarówno do przygotowania mieszanki jak i do dojrzewania próbek betonowych. We wszystkich mieszankach zastosowano domieszkę Conplast SP 430 firmy FOSROC, zgodną z normą indyjską 9103 (21).

Niektóre podstawowe właściwości włókien szklanych zastosowanych w badaniach były następujące: powierzchnia właściwa – 105  $\text{m}^2/\text{kg}$ , wytrzymałość na rozciąganie – 1700 MPa, moduł sprężystości – 73 GPa, ciężar właściwy – 2,6  $\text{g/cm}^3$ , długość włókien 6 mm, 20 mm, a średnica – 13,5  $\mu\text{m}$ . Mikrowłókna uzyskano przez rozdrobnienie włókien o długości 20 mm i przesianie przez sito o średnicy oczka 150  $\mu\text{m}$ . Nadziarno uzyskane na sicie 90  $\mu\text{m}$  (22) stosuje się aby opóźnić reakcję pucolanową z matrycą cementową. Zatem w badaniach zastosowano włókna o trzech długościach: mikrowłókna o długości 150  $\mu\text{m}$ , oraz włókna o długości 6 mm i 20 mm.

## **Research significance**

In this investigation combination of different length of mono fibres are considered and named as graded fibre concrete to distinguish from hybrid fibre concrete. Inspiration is obtained from concrete mix proportioning where aggregates of different sizes are combined to obtain well graded aggregate. Similar synergy with well graded fibres of different lengths may improve strength and ductility of concrete. In the present work three lengths of glass fibres 150  $\mu\text{m}$ , 6 mm and 20 mm length are combined in different proportions to form graded glass fibres.

## **2. Materials**

Ordinary Portland Cement (OPC) of 53 grade conforming to IS12269 (18) was used. Properties of cement are: specific gravity - 3.11  $\text{g/cm}^3$ , standard consistency – 33%, initial setting time – 48 min., final setting time – 125 mins. Silica fume according to IS 15388 (19) has the specific gravity 2.3  $\text{g/cm}^3$ . Aggregates conforming to IS 383 (20) were used. The fine aggregate was obtained from a nearby river source. The bulk density, specific gravity, and fineness modulus of the sand were 1.41  $\text{g/cm}^3$ , 2.68  $\text{g/cm}^3$ , and 2.43 respectively. Crushed granite was used as coarse aggregate. The coarse aggregate was obtained from a local crushing unit having 20 mm nominal size. The bulk density, specific gravity and fineness modulus of the coarse aggregate were 1.46  $\text{g/cm}^3$ , 2.78  $\text{g/cm}^3$  and 7.1 respectively. Potable water was used in the experimental work both as mixing and as samples curing water. Conplast SP430 of FOSROC chemicals, of properties according to IS 9103 (21), was used in all mixes. Some of the typical properties of glass fibres used in the present study were the following: specific surface area = 105  $\text{m}^2/\text{kg}$ , tensile strength = 1700 MPa, modulus of elasticity = 73 GPa, specific gravity = 2.6  $\text{g/cm}^3$ , length of fibres 6 mm, 20 mm and diameter was 13.5  $\mu\text{m}$ . Micro-length fibres are made by pounding 20 mm length fibres and passed through 150  $\mu\text{m}$  sieve. The fibres retained on 90  $\mu\text{m}$  sieve (22) is used as micro-length fibres in order to decrease their pozzolanic activity with cement matrix. Thus in this investigation there are three length of fibres viz. micro-fibres of 150  $\mu\text{m}$  length and fibres of 6 mm as well as of 20 mm length.

## **3. Experimental programme**

### **3.1. Mix compositions**

M50 mix was designed according to IS 10262 (23) and the proportions are given in the Table 1.

### **3.2. Volume proportion of fibers**

The parameters in this study are: volume % of fibres, length of fibres and graded fibres. Volume % of fibres used in this study are 0.10%, 0.15% and 0.20%. Scheme of experimental program is given in Table 2. There are total 21 parameters 7 with each percentage volume of fibres.

Tablica 1 / Table 1

SKŁAD MIESZANKI BETONU KLASY M50 [C40/50]

MIX PROPORTIONS FOR M50 GRADE OF CONCRETE

Mieszanka Mix	Kruszywo grube Coarse aggregate kg/m <sup>3</sup>	Kruszywo drobne Fine aggregate kg/m <sup>3</sup>	Woda Water kg/m <sup>3</sup>	Cement Cement kg/m <sup>3</sup>	Pył krzemionkowy Silica fume kg/m <sup>3</sup>	SP430 lit/m <sup>3</sup>	W/B
M50	1190	810	180	450	40	2.0	0.37

### 3. Program badań

#### 3.1. Skład mieszanki

Mieszankę betonową M50 [C40/50] zaprojektowano zgodnie z normą indyjską IS 10262 (23), a udziały poszczególnych składników w metrze sześciennym betonu podano w tablicy 1.

#### 3.2. Udziały objętościowe włókien

Czynnikami zmiennymi w doświadczeniach były: udziały objętościowe włókien, długość włókien oraz zawartość mieszanych

Tablica 2 / Table 2

UDZIAŁY OBJĘTOŚCIOWE WŁÓKIEN W BETONIE M50 [C40/50]

VOLUME PROPORTIONS FOR M50

Oznaczenie zestawu Mix label	V <sub>f</sub> %	Długość włókien szklanych Glass fibres length		
		150 μm	6 mm	20 mm
V0	0.00	-	-	-
AV1	0.10 (A)	100%	-	-
AV2		-	100%	-
AV3		-	-	100%
AV4		33.33%	33.33%	33.33%
AV5		40.00%	30%	30%
AV6		40.00%	40.00%	20.00%
AV7		40.00%	20.00%	40.00%
BV1	0.15 (B)	100%	-	-
BV2		-	100%	-
BV3		-	-	100%
BV4		33.33%	33.33%	33.33%
BV5		40.00%	30%	30%
BV6		40.00%	40.00%	20.00%
BV7		40.00%	20.00%	40.00%
CV1	0.20 (C)	100%	-	-
CV2		-	100%	-
CV3		-	-	100%
CV4		33.33%	33.33%	33.33%
CV5		40.00%	30%	30%
CV6		40.00%	40.00%	20.00%
CV7		40.00%	20.00%	40.00%

A pan mixer of 100 kg capacity was used for mixing the concrete. Prisms of size 100 x 100 x 200 mm were cast for each fibres addition, with proper compaction and vibration. After the completion of casting all the specimens were cured in moulds at 20°C and 90% RH and demoulded after 24 h. Demoulded samples were cured for 28 days in tap water at 20°C, until just prior to testing. There were three specimens for each tested composition to obtain average value.

#### 3.3. Testing

For strength measurement the Tinius Olsen Testing Machine of 2000 kN capacity was used. The prism is fitted with LVDTs over a gauge length of 100 mm. Load cell and LVDTs are connected to the DAC. The axis of the specimen was carefully aligned at the center of the loading frame and specimen is subjected to gradual increase of load and deformations are recorded till failure.

## 4. Results and discussions

#### 4.1. Stress-strain behaviour

Stresses and strains are computed for each specimen from the load deformation data. There are three specimens for each parameter and the best fit stress-strain diagram is plotted. The main variable in the study is length of fibres; there are specimens with mono-fibres and graded fibres, as presented in Table 2. Stress-strain diagram for specimens with mono-fibres and with graded-fibres are shown separately for each percentage volume of fibres. These stress-strain diagrams are given on Figs. 5 to 10.

#### 4.2. Pre-peak stress-strain behaviour

The compressive strength of fibre concrete specimens is almost similar to behaviour of plain concrete specimens, which is continuously nonlinear. The general stress-strain behaviour of fibre concrete specimens shows that there is initial linearity for a small region of about 10 to 15% of ultimate strength and it continues to be nonlinear right up to the ultimate strength. The descending region is nearly linear in most of the specimens. The influence of fibres on improvement of ultimate strength and strain at ultimate strength is noticed. The stress-strain curves of specimens with mono-fibres only for 0.10%, 0.15% and 0.20% volume of fibres given in Fig. 5, 7 and 9 respectively show that specimens with micro-length

włókien, o różnych długościach. Zastosowane udziały objętościowe włókien wynosiły: 0,10%, 0,15% i 0,20%. W tabelicy 2 podano udziały objętościowe włókien w betonie oraz ich rodzaje. Zastosowano 21 zestawów z dodatkiem włókien, przy czym w 7 grupach był ten sam udział objętościowy włókien.

Składniki betonu uśredniono za pomocą mieszarki o pojemności miski wynoszącej 100 kg. Formowano beleczki o wymiarach 100 x 100 x 200 mm, zachowując odpowiednie warunki zagęszczania i wibrowania. Przechowywano je w formach w temperaturze 20°C i w powietrzu o wilgotności większej od 90% przez 24 godziny, po czym próbki wyjmowano z form i przechowywano przez 28 dni w czystej wodzie, po czym badano ich właściwości. Z każdego zestawu badano po trzy próbki, a wyniki uśredniono.

### 3.3. Badania

Wytrzymałość mierzono w maszynie Tinius Olsen, o zakresie obciążeń do 2000 kN. Belkę układano na różnicowych czujnikach przemieszczeń, na długości pomiarowej 100 mm. Głowica pomiarowa siły i czujniki przemieszczeń połączone są z przetwornikiem cyfrowo-analogowym. Oś próbki starannie dopasowywano do środka ramy obciążeniowej, próbkę poddawano stopniowemu wzrostowi obciążenia, a wyniki rejestrowano aż do zniszczenia próbki.

## 4. Wyniki doświadczeń i ich omówienie

### 4.1. Zależność naprężenie-odkształcenie

Naprężenia i odkształcenia obliczano dla każdej próbki na podstawie uzyskanych odkształceń pod obciążeniem. W każdym zestawie badano po trzy próbki, po czym wyznaczano przebieg zależności naprężenie-odkształcenie. Główną zmienną w badaniach była długość stosowanych włókien, w niektórych zestawach były to włókna o tej samej długości, a w innych włókna mieszane, jak podano w tabelicy 2. Krzywe naprężenie-odkształcenie dla próbek z włóknami o jednakowej długości oraz próbek z włóknami mieszanymi pokazano osobno dla danego udziału objętościowego włókien. Krzywe te pokazano na rysunkach 5 do 10.

### 4.2. Zależność naprężenie-odkształcenie w zakresie sprężystym

Próbki fibrobetonu podczas ściskania zachowują się podobnie jak próbki betonu zwykłego, wykazując brak liniowości. Krzywa zależności naprężenie-odkształcenie dla próbek z fibrobetonu początkowo przebiega liniowo w niewielkim zakresie od około 10 do 15% wytrzymałości granicznej, jednak dalej przebiega już nieliniowo, aż do osiągnięcia wytrzymałości granicznej. Odcinek krzywej biegnący w dół jest prawie liniowy dla większości próbek. Wpływ włókien na poprawę granicznej wytrzymałości i odkształcenie przy wytrzymałości granicznej jest niezauważalny. Obserwacje krzywych naprężenie-odkształcenie dla próbek zawierających tylko włókna jednej długości o udziałach objętościowych 0,10%, 0,15% i 0,20% pokazanych odpowiednio na rysunkach 5, 7 i 9

fibres have attained higher ultimate strength than the specimens with fibres of 6 mm and 20 mm length. Improvement in strength is noticed from 80% of ultimate strength. It may be understood that as load reached ultimate strength, micro-fibres present in the matrix might have contributed to arresting the propagation of cracks and also allowed to form more number of micro-cracks. A typical observation is that the stress-strain values for all the three type of fibres, irrespective of their length and percentage volume of fibres content, are very close up to a strain of 0.002.

Ultimate strength and strain at ultimate strength for each specimen is noted from the stress-strain diagram and given in column 2 and 3 of Table 3 respectively. Variation of ultimate strength with volume fraction for mono glass fibres and graded glass fibres is shown in Figs. 1 and 2. As volume of fibres is increasing the ultimate strength is increasing too.

Compared to 20 mm or 6 mm length fibres, micro-length fibres (small length fibers) contributed to improvement in ultimate strength. Improvement in ultimate strength is less in graded fibres than in mono fibres. Thus it can be understood that mono micro-length fibres have contributed to improvement in strength compared to graded fibres.

Variation of ultimate strain with volume fraction for mono fibres and graded fibres are shown in Figs. 3 and 4. As the volume of fibres increases strain at ultimate strength is increasing also. For the same percentage volume of fibres the fibres of 20 mm length have higher contribution than 6 mm or micro-length fibers in improvement of strain at ultimate strength. In the case of graded fibers the improvement in strain at ultimate strength is noticed when the percentage of longer fibres content is higher. The combination of 40% micro-length fibres + 20% of 6 mm length + 40% of 20 mm length have shown improvement in strain at ultimate strength as the percentage of volume of fibres increases, compared to any other series of graded fibers. This shows the advantages of improvement in strength and strain can be obtained when micro-length fibres are combined with 20 mm length fibres. The presence of 6 mm length fibres in the graded fibres is not clearly understood. Irrespective of their length and percentage volume, stress corresponding to 0.002 strain is taken from the stress-strain diagram for all the specimens and the secant modulus are given in column 4 of Table 3.

### 4.3. Post-peak stress-strain behaviour

It is noted from Figs. 5, 7 and 9, that for any percentage volume of mono fibres the strain at failure for micro-length fibres specimens is lower compared to those with 6 mm and 20 mm fibres. As length of fibres increased strain at failure increased. This shows that the presence of 6 mm and 20 mm length fibres in specimens will improve strain at failure. The plots in Figs. 6, 8 and 10 are showing that the strain at failure for the specimens with 20% of 20 mm fibres have given the lowest strain at failure and the specimens with 40% of micro-length fibres + 30% of 6 mm length fibres + 30% of 20 mm length fibres have given the highest strain at failure for 0.10%, 0.15% and 0.20% volume of fibres. The specimens with



wykazały, że próbki zawierające mikrowłókna miały większą wytrzymałość graniczną w porównaniu do próbek zawierających włókna o długości 6 mm i 20 mm. Poprawa wytrzymałości była widoczna w zakresie od 80% wytrzymałości granicznej. Można to rozumieć w ten sposób, że przy obciążeniu odpowiadającemu wytrzymałości granicznej, mikrowłókna w matrycy cementowej mogą się przyczyniać do zmniejszenia propagacji rys, ale mogą powodować również tworzenie się większej ilości mikrospęknięć. Stwierdzono, że wartości naprężenie-odkształcenie dla wszystkich trzech rodzajów włókien, niezależnie od ich długości oraz udziału procentowego, są bardzo zbliżone aż do wielkości odkształcenia wynoszącej 0,002.

Wytrzymałość maksymalna oraz odkształcenie przy wytrzymałości maksymalnej w przypadku wszystkich próbek odczytano z krzywych naprężenie-odkształcenie i podano odpowiednio w kolumnach 2 i 3 w tabeli 3. Zależność wytrzymałości maksymalnej od udziału objętościowego włókien szklanych o jednej długości i włókien mieszanych pokazano kolejno na rysunkach 1 i 2. Wytrzymałość maksymalna rośnie wraz ze wzrostem udziału objętościowego włókien.

W porównaniu do włókien o długości 20 mm lub 6 mm, mikrowłókna o najmniejszej długości równej 150  $\mu\text{m}$  przyczyniły się do poprawy wytrzymałości granicznej. Wzrost wytrzymałości granicznej jest mniejszy w przypadku włókien mieszanych niż włókien o jednej długości. Zatem można uważać, że mikrowłókna o jednej długości przyczyniają się do poprawy wytrzymałości, w porównaniu do włókien mieszanych.

Zależność odkształcenia przy granicznej wytrzymałości od udziału objętościowego włókien o jednej długości i włókien mieszanych pokazano kolejno na rysunkach 3 i 4. Odkształcenie przy granicznej wytrzymałości rośnie wraz ze wzrostem udziału objętościowego włókien. W przypadku takiego samego udziału objętościowego włókna o długości 20 mm przyczyniają się do poprawy wielkości odkształcenia przy granicznej wytrzymałości w większym stopniu niż włókna o długości 6 mm, lub mikrowłókna. W przypadku włókien mieszanych wzrost wielkości odkształcenia przy granicznej wytrzymałości jest zauważalny kiedy udział procentowy dłuższych włókien jest większy. Zastosowanie mieszanki 40% mikrowłókien + 20% włókien o długości 6 mm + 40% włókien o długości 20 mm zwiększyło odkształcenia przy granicznej wytrzymałości i był to najlepszy wynik ze wszystkich badanych zestawów zawierających włókna mieszane. To pokazuje, że korzystny wpływ na wytrzymałość oraz odkształcenie można osiągnąć mieszając mikrowłókna z włóknami o długości 20 mm. Wpływ dodatku włókien o długości 6 mm w mieszaniu włókien o różnych długościach nie jest w zbyt wyraźny. Niezależnie od długości włókien i ich udziału z krzywych naprężenie-odkształcenie dla wszystkich próbek odczytano naprężenie odpowiadające odkształceniu o wartości 0,002 i na tej podstawie w kolumnie 4 tabeli 3 obliczono moduł Younga.

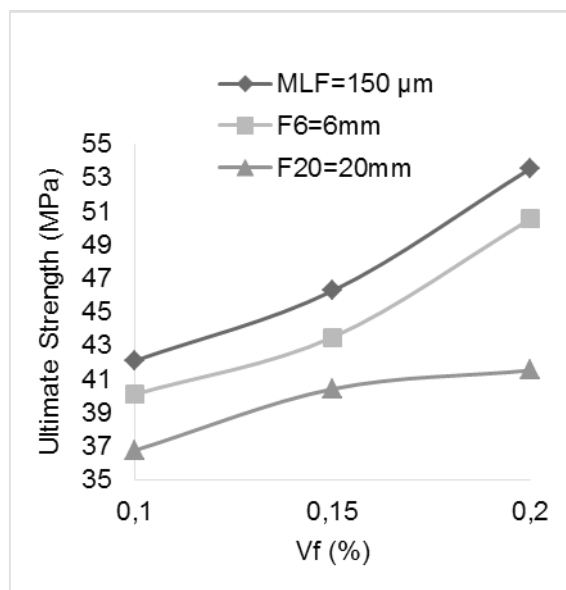


Fig 1. Peak-stress as a function of mono fibres content

Rys. 1. Zależność wytrzymałości maksymalnej od udziału objętościowego włókien o jednakowej długości

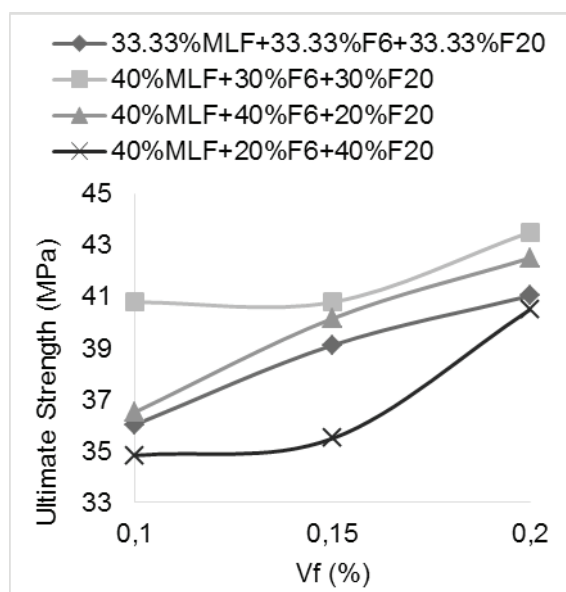


Fig. 2. Peak-stress as a function of graded fibres content

Rys. 2. Zależność wytrzymałości maksymalnej od udziału objętościowego włókien mieszanych

equal percentage volume of fibres have shown a better post peak behavior, compared to the other two types of graded fibres namely 40% of micro-length fibres + 40% of 6 mm length fibres + + 20% of 20 mm fibres and 40% of micro-length fibres + 20% of 6 mm fibres + 40% of 20 mm length fibres. The specimen with graded fibers of 40% micro-length fibers + 30% of 6 mm fibres + 30% of 20 mm fibres have shown overall better performance.

For each specimen the post peak strain energy is computed by tacking area under stress-strain diagram after peak. Variation of strain energy with percentage volume of fibres for mono-fibres and graded fibres are given in Figs. 11 and 12. As the content of fibres

### 4.3. Zależność naprężenie-odkształcenie w fazie osłabienia materiału

W przypadku wszystkich udziałów objętościowych włókien w próbkach z włóknami jednorodnymi, na podstawie rysunków 5, 7 i 9 stwierdzono, że odkształcenie przy zniszczeniu w przypadku próbek z mikrowłóknami jest mniejsze w porównaniu do włókien o długościach 6 mm i 20 mm. Odkształcenie niszczące rośnie wraz ze wzrostem długości włókien. To pokazuje, że dodatek włókien o długościach 6 mm i 20 mm w próbkach zwiększa odkształcenie niszczące. Na rysunkach 6, 8 i 10 odkształcenie niszczące w przypadku próbek z 20% dodatkiem włókien o długości 20 mm było najmniejsze, a dla próbek zawierających 40% mikrowłókien + 30% włókien o długości 6 mm + 30% włókien o długości 20 mm odkształcenie było największe w przypadku wszystkich udziałów objętościowych włókien to jest 0,10%, 0,15% i 0,20%. Zachowanie próbek o takim samym udziale procentowym włókien w fazie osłabienia materiału było lepsze w porównaniu do pozostałych dwóch rodzajów włókien mieszanych, a mianowicie próbek z udziałem 40% mikrowłókien + 40% włókien o długości 6 mm + 20% włókien o długości 20 mm oraz z 40% udziałem mikrowłókien + 20% włókien o długości 6 mm + 40% włókien o długości 20 mm. Próbki z włóknami mieszany zawierające 40% mikrowłókien + 30% włókien o długości 6 mm + 30% włókien o długości 20 mm miały lepsze właściwości.

Energię odkształcenia w fazie osłabienia obliczono dla wszystkich próbek na podstawie powierzchni pod krzywą naprężenie-odkształcenie, po osiągnięciu maksimum. Zależność energii odkształcenia od udziału objętościowego włókien dla włókien o jednej długości oraz włókien mieszanych pokazano na rysunkach 11 i 12. Energia odkształcenia w fazie osłabienia rośnie wraz ze wzrostem udziału objętościowego włókien. Próbki z włóknami o jednej długości w przypadku długości 20 mm miały największą energię odkształcenia w fazie osłabienia, a próbki z mikrowłóknami najmniejszą. Wynika stąd, że wzrost długości włókien przyczynia się do znacznego zwiększenia energii odkształcenia w fazie osłabienia, a zatem włókna o długości 6 mm spowodują wzrost energii odkształcenia w fazie osłabienia w porównaniu do próbek zawierających mikrowłókna. Na rysunku 12 pokazano zależność energii odkształcenia w fazie osłabienia od udziału objętościowego włókien mieszanych. Wzrost udziału objętościowego włókien przyczynia się do przyrostu energii odkształcenia w fazie osłabienia w przypadku wszystkich próbek z włóknami mieszany, przy czym próbka z udziałem 40% mikrowłókien + 30% włókien o długości 6 mm + 30% włókien o długości 20 mm miała największą energię odkształcenia w fazie osłabienia, a próbka z udziałem 40% mikrowłókien + 20% włókien o długości 6 mm + 40% włókien o długości 20 mm miała najmniejszą energię odkształcenia w fazie osłabienia. To wyraźnie pokazuje, że mieszanie włókien o różnych długościach jest korzystne ze względu na poprawę energii odkształcenia w fazie osłabienia, lub wartość odkształcenia w przypadku betonu zbrojonego włóknami szklanymi. Porównując energię odkształcenia w fazie osłabienia w przypadku próbek z włóknami o długości 20 mm i z włóknami mieszany z udziałem 40% mikrowłókien + 30% włókien o długo-

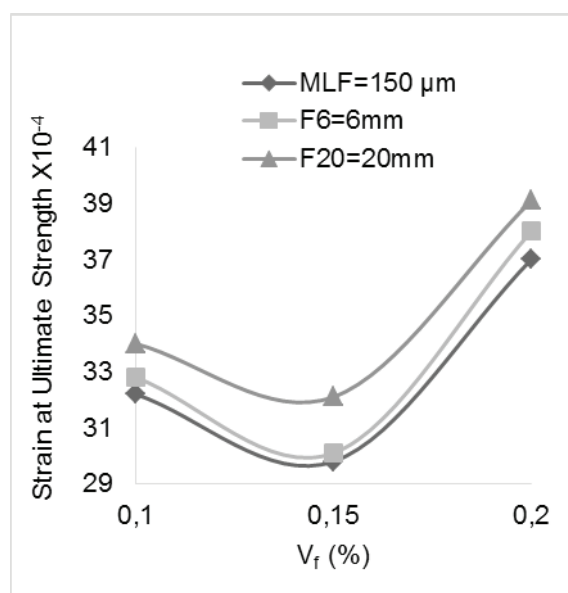


Fig. 3. Strain at ultimate stress as a function of mono fibres content

Rys. 3. Zależność odkształcenia przy maksymalnej wytrzymałości od udziału objętościowego włókien o jednakowej długości

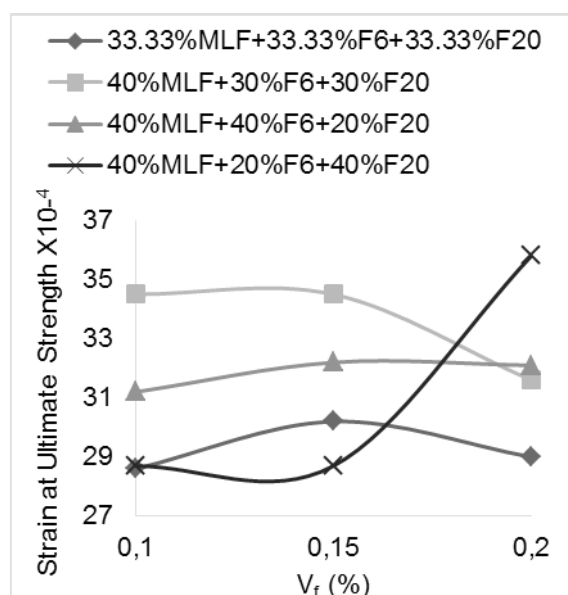


Fig. 4. Strain at ultimate stress as a function of graded fibres content

Rys. 4. Zależność odkształcenia przy maksymalnej wytrzymałości od udziału objętościowego włókien mieszanych

increases the post-peak strain energy capacity is increasing too. The specimens with 20 mm mono-fibres have the highest post peak strain energy capacity and the micro-length fibres have the lowest strain energy capacity. Hence, as the length of fibres is increasing there is a marked increase in post-peak strain energy capacity, thus the 6 mm fibres have higher impact on post-peak strain energy capacity, compared to micro-length fibres. In Fig. 12 post-peak strain energy capacity of samples with increasing content of graded fibres is given. As the volume of fibres increases the post-peak strain energy capacity increases for all the specimen with graded fibres. The specimen with 40% of micro-length fibres +

Tablica 3 / Table 3

## ZESTAWIENIE WYNIKÓW

## SUMMARY OF RESULTS

Oznaczenie zestawu Mix Designation (1)	Wytrzymałość maksymalna Ultimate Strength, $\sigma_u$ (MPa) (2)	Odształcenie przy maksymalnej wytrzymałości Strain at ultimate strength, $\epsilon_u$ ( $\times 10^{-4}$ ) (3)	Moduł Younga Young's Modulus, E (GPa) (4)	Całkowita energia odkształcenia Total Strain Energy Capacity ( $\times 10^{-2}$ N/mm) (5)
V0	33.56	22.5	16.25	9.78
AV1	42.1	32.2	17.24	14.35
AV2	40.1	32.8	16.28	15.09
AV3	36.76	33.0	15.56	17.36
AV4	36.02	28.6	16.27	17.08
AV5	40.8	34.5	17.08	24.02
AV6	36.51	31.2	15.24	14.10
AV7	34.83	28.7	16.24	16.39
BV1	46.26	29.8	19.27	18.20
BV2	43.5	30.1	18.23	19.10
BV3	40.42	32.1	17.12	23.12
BV4	39.12	30.2	16.72	22.58
BV5	40.8	34.5	17.08	27.54
BV6	40.16	32.2	17.42	16.25
BV7	35.49	28.7	15.62	19.18
CV1	53.54	37.8	19.25	21.52
CV2	50.54	38.0	18.74	24.24
CV3	41.53	30.1	18.25	25.08
CV4	41.05	29.0	18.25	26.14
CV5	43.53	31.6	18.73	31.99
CV6	42.52	32.1	16.73	24.79
CV7	40.52	35.8	18.29	29.46

ści 6 mm + 30% włókien o długości 20 mm, w przypadku których udział objętościowy włókien był taki sam, można stwierdzić, że energia odkształcenia w fazie osłabienia jest większa w próbkach z włóknami mieszanymi, niż w próbkach z włóknami o jednej długości. Zatem w próbkach z włóknami mieszanymi, w których 30% udziału miały włókna o długości 20 mm, włókna te nie były jedyną przyczyną wzrostu energii odkształcenia w fazie osłabienia, bowiem dodatek 40% mikrowłókien i 30% włókien o długości 6 mm także przyczynił się do wzrostu energii odkształcenia w tej fazie.

#### 4.4. Obserwacje mikrostruktury

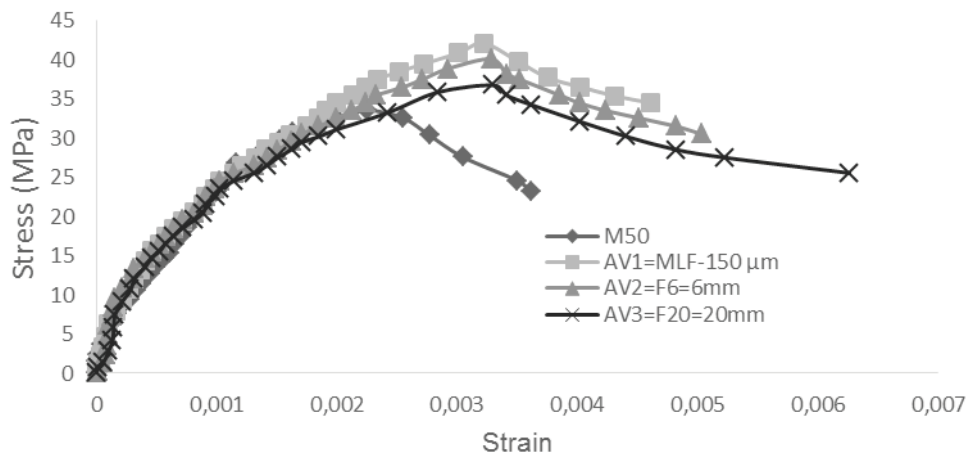
Elektronowy mikroskop skaningowy zastosowano do obserwacji rozproszenia włókien w matrycy cementowej. Na rysunku 13 pokazano włókna o długości 150  $\mu\text{m}$ , które są równomiernie rozproszone w matrycy cementowej. Zatem mogą one poprawiać zdolność przenoszenia naprężeń na granicy włókno-matryca cementowa.

Powierzchnię przelamu betonu zbrojonego włóknami szklanymi obserwowano pod polaryzacyjnym mikroskopem optycznym. Przekrój obserwowanej próbki miał wymiary 4 cm x 4 cm w celu dokładnego określenia rozkładu włókien, mostkowania pęknięcia, wyrwania włókna oraz rozerwania włókien.

30% of 6 mm fibres + 30% of 20 mm fibres has caused the highest strain energy capacity and the one with 40% micro-length fibers + 20% of 6 mm fibres + 40% of 20 mm fibres has caused the lowest post-peak strain energy capacity. This clearly shows that there is a benefit of combining the fibres with different lengths for improving the post peak strain energy capacity or deformation capacity of fibre concrete. It may be noted by comparing the post-peak strain energy capacity of 20 mm length mono-fibres and the graded fibers composed of 40% micro-length fibres + 30% of 6 mm fibres + 30% of 20 mm fibres for the same volume content, the post-peak strain energy capacity is higher for graded glass fibres than for mono glass fibres. Hence the graded fibres, containing 30% of 20 mm length fibres, was not the only reason to improve the post-peak strain energy capacity, the addition of 40% of micro-length fibres and 30% of 6 mm length fibres contributed to increase the post-peak strain energy capacity.

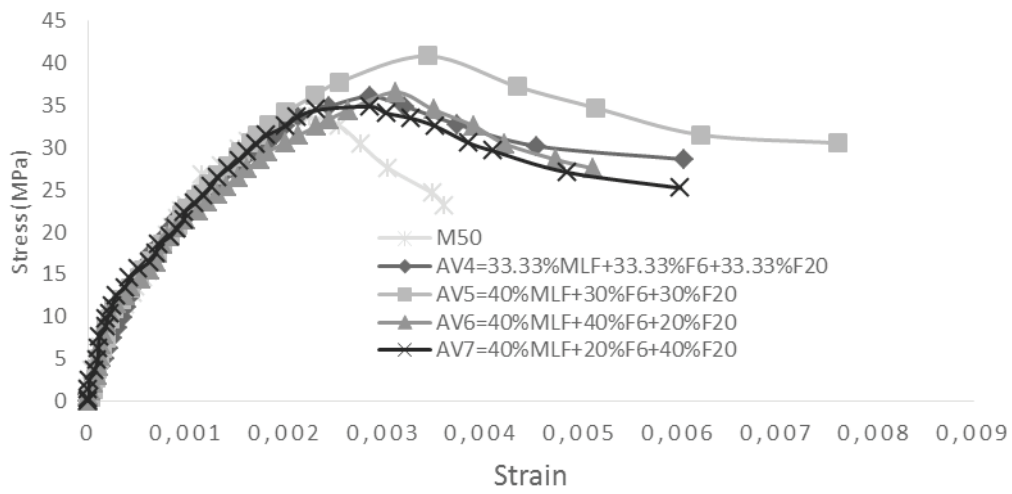
#### 4.4. Microstructural observation

Scanning electron microscope (SEM) was used to study the dispersion of fibres in cement matrix [Fig. 13]. It can be observed that the fibres are dispersed randomly and closely in the cement



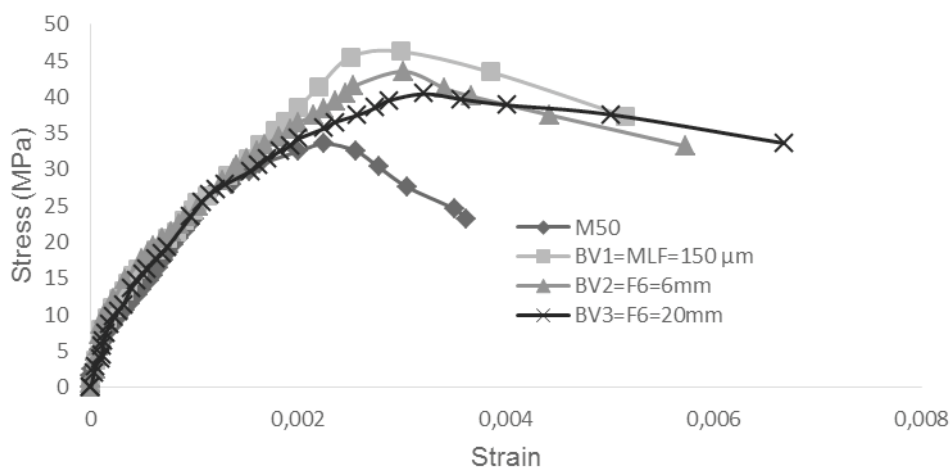
Rys. 5. Krzywe naprężenie-odkształcenie próbek z udziałem objętościowym  $V_f = 0,10\%$  włókien o jednakowej długości

Fig. 5. Stress-strain curves of concrete with mono glass fibres;  $V_f = 0.10\%$



Rys. 6. Krzywe naprężenie-odkształcenie próbek z udziałem objętościowym  $V_f = 0,10\%$  włókien mieszanych

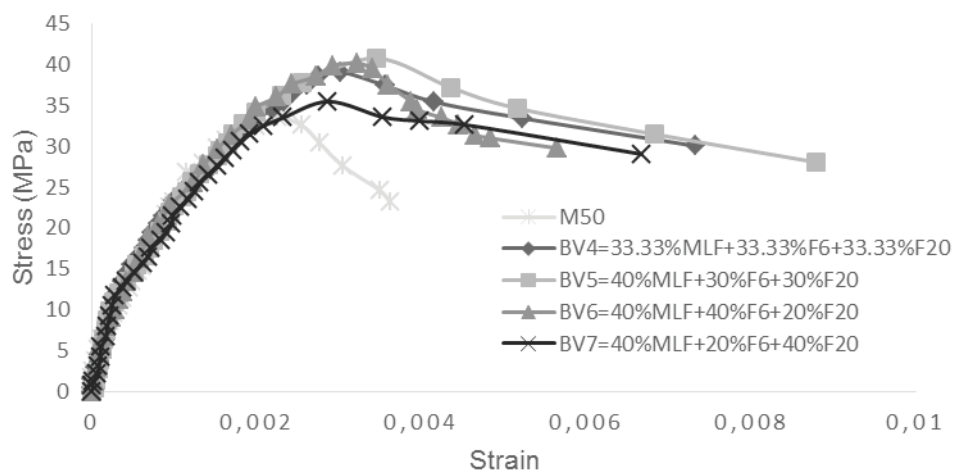
Fig. 6. Stress-strain curves of concrete with graded glass fibres;  $V_f = 0.10\%$



Rys. 7. Krzywe naprężenie-odkształcenie próbek z udziałem objętościowym  $V_f = 0,15\%$  włókien o jednakowej długości

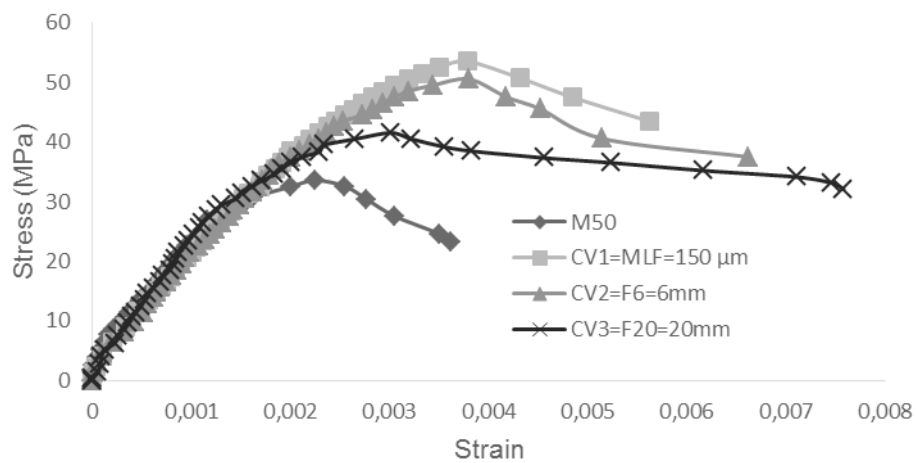
Fig. 7. Stress-strain curves of concrete with mono glass fibres;  $V_f = 0.15\%$





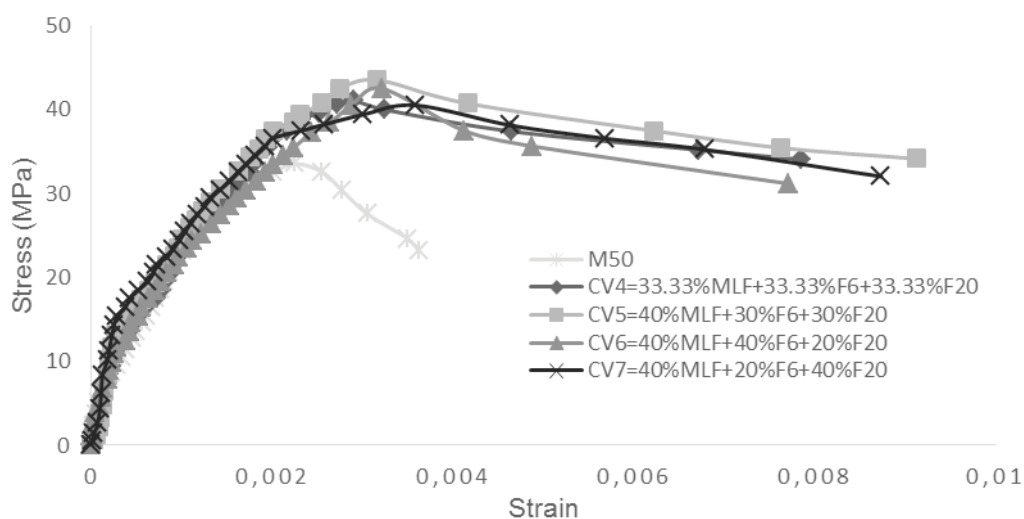
Rys. 8. Krzywe naprężenie-odkształcenie próbek z udziałem objętościowym  $V_f = 0,15\%$  włókien mieszanych

Fig. 8. Stress-strain curves of concrete with graded glass fibres;  $V_f = 0.15\%$



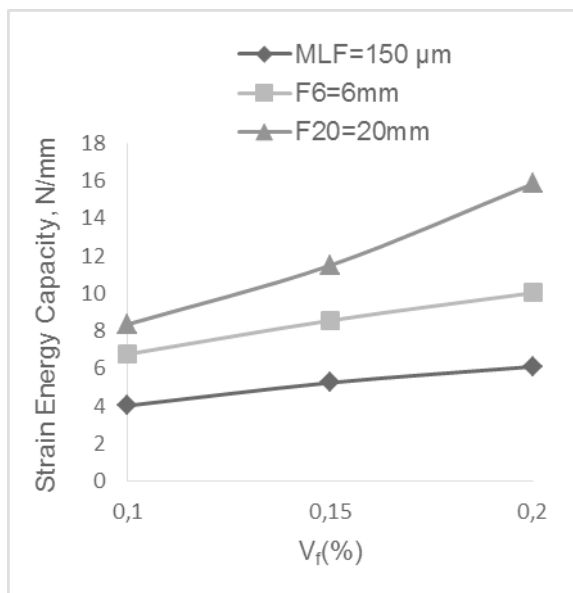
Rys. 9. Krzywe naprężenie-odkształcenie próbek z udziałem objętościowym  $V_f = 0,20\%$  włókien o jednakowej długości

Fig. 9. Stress-strain curves of concrete with mono glass fibres;  $V_f = 0.20\%$



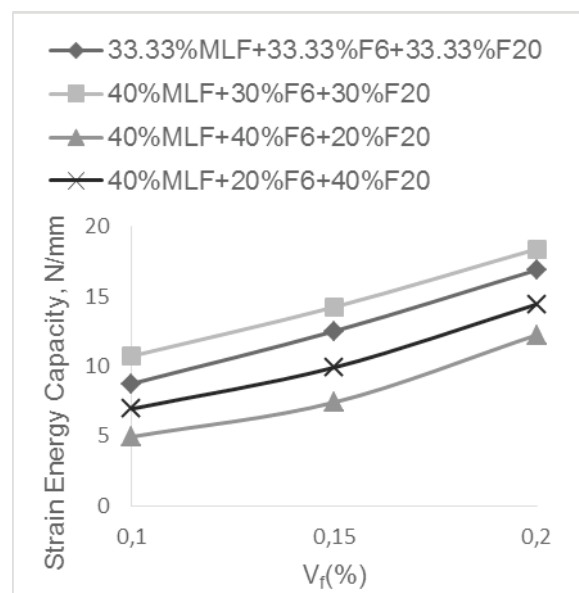
Rys. 10. Krzywe naprężenie-odkształcenie próbek z udziałem objętościowym  $V_f = 0,20\%$  włókien mieszanych

Fig. 10. Stress-strain curves of concrete with graded glass fibres;  $V_f = 0.20\%$



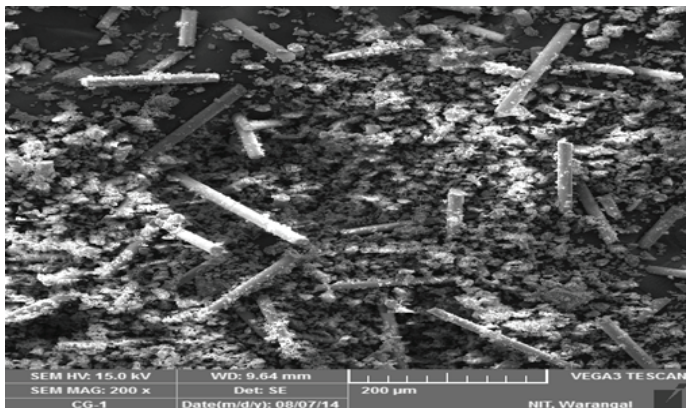
Rys. 11. Właściwości betonu w fazie osłabienia w przypadku próbek z włóknami o jednakowej długości

Fig. 11. Post peak performance of concrete with mono fibres



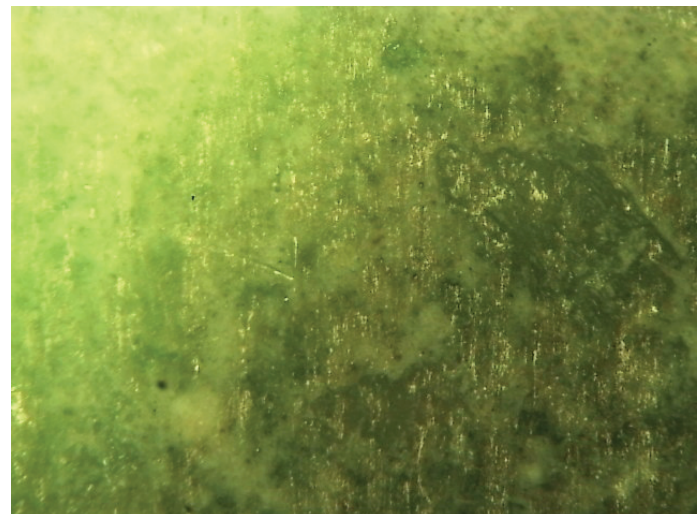
Rys. 12. Właściwości betonu w fazie osłabienia dla próbek z włóknami mieszanymi

Fig. 12. Post peak performance of concrete with graded fibres



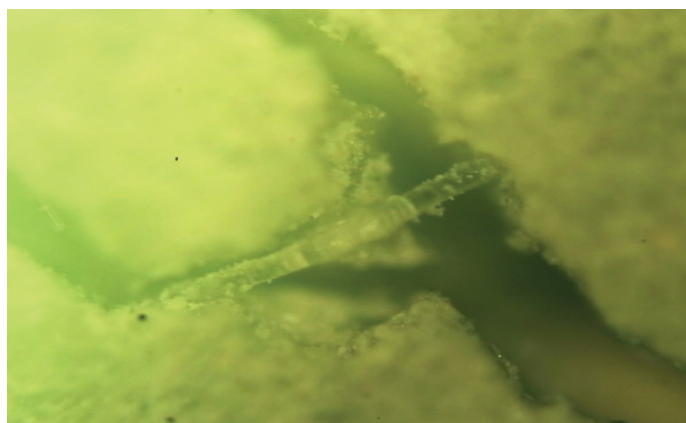
Rys. 13. Mikrostruktura matrycy cementowej z włóknami szklanymi

Fig 13. SEM-image of glass fibres distribution in cement matrix



Rys. 14. Rozkład włókien obserwowany pod mikroskopem optycznym [powiększenie 100x]

Fig. 14. Glass fibres distribution under light microscope [100x magnification]



Rys. 15. Mostkowanie rysy za pomocą włókna szklanego pod mikroskopem optycznym [powiększenie 100x]

Fig. 15. Glass fibre bridging crack, light microscope, magnification 100x

matrix. Hence it may enhance the stress transfer capacity of the fibres matrix interface.

The surface of a specimen fracture of glass fibre concrete has been examined by light microscope. The polished section of the specimen 4 x 4 cm to study the fiber distribution, fiber bridging cracks, fiber pull out and fiber fracture was used. Low magnification (100x) images of the short and long fibres are shown in Figs.14 to 17. The polished section of untested specimen is shown in Fig.14. White spots in this image are the fibres, relatively uniformly dispersed in the cement matrix. Fibre bridging crack, pull out and fracture of fibre can be noticed from the images given Figs.15, 16 and 17 respectively.

Obrazy krótkich i długich włókien przy małym powiększeniu [100x] pokazano na rysunkach 14 do 17. Próbki o wielkości 4 cm x 4 cm, wycięte z niebadanych próbek, przygotowano w formie zgładów. Badany fragment, który obserwowano pod mikroskopem optycznym pokazano na rysunku 14. Białe punkty na obrazie to poprawnie rozproszone włókna w matrycy cementowej. Inne fragmenty o wymiarach 4 cm x 4 cm wycięto z próbki badanej. Na rysunkach 15, 16 i 17 pokazano kolejno mostkowanie rysy, wyrwane włókno oraz pęknięcie włókna.

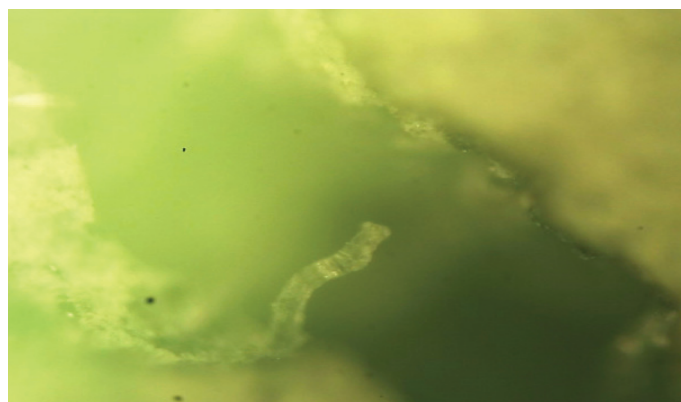
## 5. Wnioski

Zbadano wpływ włókien o jednakowej długości [mikrowłókna = 150  $\mu$ m, włókna o długości 6 mm oraz włókna o długości 20 mm], włókien mieszanych [mikrowłókna 150  $\mu$ m + włókna o długości 6 mm + włókna o długości 20 mm] oraz w przypadku ich zawartości [0,10%, 0,15% i 0,20% jako udział objętościowy w betonie] na zależność naprężenie-odkształcenie betonu zbrojonego włóknami szklanymi, a uzyskane wyniki pozwalają na wyciągnięcie następujących wniosków.

1. Wraz ze wzrostem udziału objętościowego włókien rośnie wytrzymałość graniczna, odkształcenie przy wytrzymałości granicznej, odkształcenie niszczące oraz energia odkształcenia w fazie osłabienia betonu.
2. Próbki z dodatkiem mikrowłókien miały większą wytrzymałość graniczną niż próbki z włóknami o długości 6 mm i 20 mm. W przypadku włókien mieszanych wzrost wytrzymałości granicznej jest mniejszy w porównaniu do próbek z dodatkiem włókien o jednakowej długości.
3. W przypadku takich samych udziałów objętościowych, włókna o długości 20 mm zapewniają zmniejszenie odkształcenia przy granicznej wytrzymałości w większym stopniu niż włókna o długości 6 mm, lub mikrowłókna. W przypadku włókien mieszanych zmniejszenie odkształcenia towarzyszącego granicznej wytrzymałości jest zauważalne gdy udział objętościowy włókien dłuższych jest większy.
4. Próbka z włóknami szklanymi mieszanymi, z udziałami: 40% mikrowłókien + 30% włókien o długości 6 mm + 30% włókien o długości 20 mm miała lepsze właściwości.
5. Energia odkształcenia w fazie osłabienia jest większa w przypadku włókien mieszanych w porównaniu do próbek z włóknami o jednakowej długości.

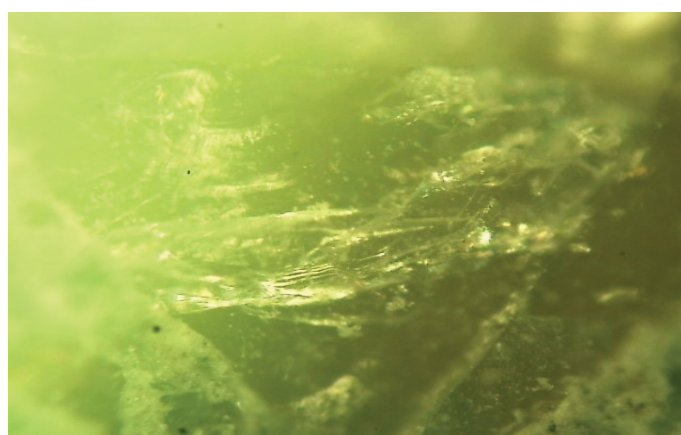
## References / Literatura

1. D. D. L. Chung, "Dispersion of Short Fibers in Cement", J. Mat. Civil Eng., **17**, 4, 379-388 (2005).
2. A. Bentur, S. Mindess, "Fibre Reinforced Cementitious Composites", Second edition published 2007 by Taylor & Francis, 2 Park Square, Milton Park, Abingdon, Oxon OX14 4RN.
3. N. Banthia, A. Moncef, K. Chokri, J. Sheng, "Uniaxial tensile response of Micro-fiber reinforced cement composites", Canadian J. Civil Eng., **21**, 999-1011 (1994).



Rys. 16. Wyrwane włókno szklane pod mikroskopem optycznym [powiększenie 100x]

Fig. 16. Glass fibre pull, light microscope, magnification 100x



Rys. 17. Zniszczenie włókien szklanych pod mikroskopem optycznym [powiększenie 100x]

Fig. 17. Glass fibre fracture, light microscope, magnification 100x

## 5. Conclusions

Influence of the mono glass fibres (micro-length fibres of 150  $\mu$ m, of 6 mm length fibres, and of 20 mm fibres), graded glass fibres – length of 150  $\mu$ m + 6 mm + 20 mm and content of 0.10%, 0.15% and 0.20% by volume of concrete on the stress-strain behavior of fibre concrete was studied and the following observations are reported.

1. Ultimate strength, strain at ultimate strength, failure strain and post-peak strain energy absorption capacity are increasing with the increase of fibres content.
2. Specimens with micro-length fibres have given higher ultimate strength than the specimens with the fibres of 6 mm and 20 mm length. In the case of graded fibres improvement in ultimate strength is lower in comparison to the fibres of equal length.
3. For the same content the effect of 20 mm length fibres was higher than those of 6 mm or micro-length fibers in improvement of concrete strain at ultimate strength. In the case of graded fibres the improvement in concrete strain at ultimate strength is noticed when the content of longer fibres is higher.



4. Y. Akkaya, A. Peled, S. P. Shah, "Parameters related to fiber length and processing in cementitious composites", *Mat. Struct.*, **33**, 4, 515-524 (1999).
  5. Shashi Kant Sharma, Aditya Anupam Kumar, G. D. Ransinchung R. N, Praveen Kumar, "Micro Fiber Cement Paste and Mortar Overlays", *Inter. J. Pavement Res. Techn.*, **6**, 6, 765-722 (2013).
  6. N. Banthia, M. Azzabi, M. Pigeon, "Restrained shrinkage cracking in fibre-reinforced cementitious composites", *Materials and Structures*, **27**, pp. 405-413, 1993.
  7. Yilmaz Akkaya, Surendra P. Shah, B. Ankenman, "Effect of Fiber Dispersion on Multiple Cracking of Cement Composites", *J. Eng. Mech.*, **127**, 4, 311-337 (2001).
  8. R. Barhum, V. Mechtcherine, "Influence of short dispersed and short integral glass fibres on the mechanical behaviour of textile-reinforced concrete", *Mat. Struct.*, **46**, 557-572 (2013).
  9. ACI Committee 544, "Report on Fiber Reinforced Concrete (ACI 544.1R-96)", American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA, 2009.
  10. T. Desai, R. Shah, A. Peled, B. Mobasher, "Mechanical Properties of Concrete Reinforced with AR-Glass Fibers", *Brittle Matrix Composites*, **7**, 224-232 (2003).
  11. ACI Committee 549, "Report on Glass Fiber Reinforced Concrete Premix (ACI 549.3R-09)", American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA 2009.
  12. N. Banthia, R. Gupta, "Hybrid fiber reinforced concrete (HYFRC): fiber synergy in high strength matrices, *Mat. Struct.*, **73**, 707-716 (2004).
  13. J. S. Lawler, D. Zampini, Surendra P. Shah, "Microfiber and Macrofiber Hybrid Fiber-Reinforced concrete", *J. Mat. Civil Eng.*, **17**, 5, 595-604 (2005).
  14. A. Sivakumar, Manu Santhanam, "Mechanical properties of high strength concrete reinforced with metallic and non-metallic fibres", *Cem. Concr. Comp.*, **29**, 603-608, (2007).
  15. L. R. Betterman, C. Ouyang, S. P. Shah, "Fiber-Matrix Interaction in Microfiber-Reinforced Mortar", *Advan. Cem. Mat.*, **2**, 53-61 (1995).
  16. B. N. Skourup, L. E. Robertson Associates, Ece Erdogan, "Characteristics of PVA Fiber-Reinforced Mortars" ASCE, Structures Congress, Vol. 2, pp.1622-1631, 2009.
  17. Shaikh Faiz Uddin Ahmed, Hirozo Mihashi, "Strain hardening behaviour of lightweight hybrid polyvinyl alcohol (PVA) fiber reinforced cement composites", *Mat. Struct.*, **44**, 1179-1191 (2011).
  18. IS: 12269 - 2013, "Indian Standard Ordinary Portland Cement, 53 Grade – Specification", Bureau of Indian Standards, New Delhi 2013.
  19. IS: 15338 – 2003 "Indian Standard Specification for Silica Fume", Bureau of Indian Standards, New Delhi 2003.
  20. IS: 383 – 1970 (Reaffirmed 2002), "Indian Standard Specification for Coarse and Fine Aggregates from Natural Sources for Concrete", Bureau of Indian Standards, New Delhi 2002.
  21. IS: 9103 - 1999, "Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete", Bureau of Indian Standards, New Delhi 1999.
  22. Khmiri, M. Chaabouni, B. Samet, "Chemical behaviour of ground waste glass when used as partial cement replacement in mortars", *Constr. Build. Mat.*, **44**, pp. 74-80, 2013.
  23. IS: 10262 - 2009, "Indian Standard Concrete Mix Proportioning - Guidelines", Bureau of Indian Standards, New Delhi 2009.
4. The concrete specimens with graded fibres, namely containing 40% of micro-length fibres + 30% of 6 mm + 30% of 20 mm length fibres have shown overall better performance.
  5. The post-peak strain energy capacity is higher for graded fibres than for mono fibres.