

## Badania doświadczalne wpływu włókien hybrydowych na zachowanie się belek żelbetowych przy zginaniu

### Experimental investigation on influence of hybrid fibers in flexural behavior of reinforced concrete beams

R. Shanthi Vengadeshwari<sup>1\*</sup>, H.N. Jagannatha Reddy<sup>2</sup>, R. Prabhakara<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Civil Engineering, Dayananda Sagar College of Engineering, Bangalore, Karnataka, India, Orcid:0000-0002-5510-9383

<sup>2</sup>Department of Civil Engineering, Bangalore Institute of Technology, Bangalore, Karnataka, India, Orcid:0000-0002-2681-0357

<sup>3</sup>BGI & Principal BRCE, Bangalore, Karnataka, India, Orcid:0000-0002-3999-097

\*corresponding author: R. Shanthi Vengadeshwari, e-mail: shanthi-cvl@dayanandasagar.edu

#### Streszczenie

Dodatek włókien jest obiecującym rozwiązaniem, poprawiającym zachowanie belek żelbetowych przy zginaniu. Wpływa na poprawę właściwości tych belek w zakresie obciążenia szczytowego, plastyczności i absorpcji energii. Nieefektywne włókna mono w betonie działają bardzo efektywnie, gdy są połączone poprzez hybrydyzację i przyczyniają się do zwiększenia wytrzymałości. Hybrydyzacja włókien zapewnia poprawę właściwości mieszanki betonowej i stwardniałego betonu. Dla zapewnienia optymalnych właściwości użytkowych ważniejszy jest synergiczny efekt włókien. Wprowadzenie dwóch rodzajów włókien do matrycy betonowej skutecznie mostkuje rysy. W celu zbadania wpływu hybrydyzacji włókien na zginanie, przygotowano belki żelbetowe, przeprowadzono doświadczenia i porównano wyniki z belkami kontrolnymi. W niniejszej pracy zamierzano ocenić i porównać wpływ włókien stalowych i bazaltowych, w postaci mono i hybrydowej, na przebieg zginania, a mianowicie pierwsze obciążenie przy pęknięciu, zachowanie się pod wpływem obciążenia, plastyczność, szerokość pęknięcia i wytrzymałość na zginanie belek żelbetowych. Do oceny właściwości mechanicznych betonu zbrojonego włóknami klasy M40, wybrano udziały objętościowe włókien wynoszące 0,25%, 0,5% i 0,75%. Połączenie włókien bazaltowych z włóknami stalowymi, w znacznym stopniu poprawia właściwości poprzez synergiczne działanie. Na podstawie ogólnej oceny właściwości mechanicznych ustalono, że połączenie włókien bazaltowych i stalowych w ilości odpowiednio 0,25% i 0,75%, dało najlepsze wyniki. Optymalne udziały objętościowe tych włókien zastosowano do wykonania belek. Tam, gdzie było to możliwe, wyniki prób zginania były weryfikowane z normami indyjskimi.

**Słowa kluczowe:** włókna mono, włókna hybrydowe, optymalna frakcja objętościowa, właściwości mechaniczne, przewidywania normowe, parametry zginania

#### Summary

Addition of fiber is a promising solution, to enhance the flexural behaviour of reinforced cement concrete [RCC] beams. It improves the peak load, ductility and energy absorption characteristics of RCC. Ineffective mono fibers in the concrete perform very effectively, when combined through the hybridization and contribute towards the strength. Fiber hybridization offers appreciable improvement in fresh and hardened properties of concrete. To achieve optimum performance, synergetic effect of fibers is more important. Incorporation of two fibers in concrete matrix, bridges the cracks effectively. Hence to investigate the effect fiber hybridization in the flexural performance, RCC beams were cast, experimented and the results were compared with the control beams. In the present study, it is intended to evaluate and compare the impact of steel and basalt fibers in mono form and hybrid form, on the flexural parameters such as first crack load, load response behaviour, ductility, crack width and flexural strength of RCC beams. To evaluate the mechanical properties of M40 grade fiber reinforced concrete, volume fractions chosen were 0.25%, 0.5% and 0.75%. Comparatively addition of basalt fibers with steel fibers, improves synergetic response to a considerable extent. From overall assessment of the mechanical properties, it was established that the combination of basalt and steel fibers at 0.25% and 0.75% respectively, produced optimum results. Optimum volume fraction of fibers identified is used in the casting of RCC beams. Wherever possible, flexural parameters were cross checked, with Indian Standards.

**Keywords:** mono fibers, hybrid fibers, optimum volume fraction, mechanical properties, code predictions, flexural parameters

## 1. Wprowadzenie

Modyfikacja wytrzymałości na ściskanie, zginanie i na rozciąganie przy rozłupywaniu oraz modułu sprężystości, odgrywa dużą rolę w zachowaniu konstrukcji. Beton ma na ogół dużą wytrzymałość przy ściskaniu, lecz małą na rozciąganie. W przypadku, gdy beton poddawany jest zginaniu, po stronie rozciągania dodaje się zbrojenie stalowe, aby wykorzystać wzajemnie uzupełniające się oddziaływania. Włókna i domieszki mineralne są dodawane w celu zmiany właściwości betonu konstrukcyjnego. Włókna, które są odpowiedzialne za mechanizm zatrzymywania pęknięć, zwiększają wytrzymałość, a tym samym zmieniają zachowanie strukturalne (1). Beton niewzmocniony włóknami ulega zniszczeniu, gdy przekroczona zostaje wytrzymałość na zginanie. Natomiast beton z włóknami przenosi obciążenie, nawet po osiągnięciu ugięcia, które powoduje pęknięcie betonu zwykłego. W przypadku włókien o dużej wytrzymałości, do których należą węglowe, bazaltowe i szklane, dostępna jest bogata literatura (2). Dostępne są jednak tylko ograniczone publikacje na temat stosowania włókien bazaltowych, w formie mono- i hybrydowej.

Włókna stalowe, zwane również włóknami strukturalnymi, należą do grupy makro-włókien. Zastosowanie włókien stalowych ma umiarkowany wpływ na urabialność betonu. Stwierdzono, że powstawanie kulistych form z włókien nasila się przede wszystkim z powodu braku mieszania. Wpływ włókien stalowych na wytrzymałość na ściskanie, zginanie i na rozciąganie przy rozłupywaniu, jest większy. Ponadto wykazują one większą odporność na propagację pęknięć. Do czynników, które wpływają na beton zbrojony włóknami stalowymi [BZWS] należą: kształt włókien, ich procentowy dodatek i współczynnik kształtu (3). Duży moduł sprężystości włókien stalowych, który zwiększa ich właściwości wiążące, poprawia plastyczność, a także absorpcję energii.

Włókna bazaltowe, które są mikro-włóknami, mają stosunkowo dużą wytrzymałość na rozciąganie, w porównaniu z włóknami stalowymi (4). Inne właściwości włókien bazaltowych, które czynią je bardziej korzystnymi od włókien stalowych w betonie zbrojonym (5), należą: większa odporność na agresywne środowisko, a przede wszystkim na korozję. Włókna bazaltowe poprawiają również właściwości konstrukcyjne, a mianowicie absorpcję energii i odporność na uderzenie. W przypadku ich stosowania w ilości 0,3 do 0,5 % objętościowo, odnotowuje się lepsze wyniki (4), przy czym optymalny dodatek różni się w zależności od rodzaju betonu (6,7). W skrócie można podsumować, że włókna bazaltowe są bardziej przyjazne dla środowiska i zgodne z zasadami zrównoważonego rozwoju, niż inne włókna syntetyczne.

Zachowanie konstrukcyjne zbrojonego betonu cementowego [ZBC] może być poprawione przez dodanie włókien. W większości belek z betonu cementowego zbrojonego włóknami, stosowane są włókna stalowe. Stwierdzono, że belki z włóknami stalowymi wykazują znaczną poprawę w zakresie obciążenia przy pierwszym pęknięciu, a także przy obciążeniu szczytowym i lepszą sztywność (8). Zwiększenie wytrzymałości na zginanie jest proporcjonalne do zawartości włókien. Wytrzymałość włókien po pęknięciu jest odpo-

## 1. Introduction

Modification in compressive strength, flexural strength, split tensile strength and the modulus of elasticity, play the significant role in the performance of the structure. Concrete generally is strong in compression and weak in tension. In case concrete is subjected to flexure, steel reinforcement will be added on the tension side, to exploit complementary action between them. Materials such as fibers and mineral admixtures are added, to change the properties of structural concrete. Fibers which are accountable for the crack arrest mechanism, increase the toughness and in turn change the structural behaviour (1). When concrete is not reinforced with fibers, there is failure, when the flexural capacity is exceeded. However, in fibered concrete, load is resisted, even after the fracture deflection of the plain concrete. It is observed that for the influence high strength fibers like carbon, basalt and glass fibers, great amount of literature is available (2). However, limited resources are available on the application of basalt fiber, in mono and hybrid form.

Steel fiber which is also called as structural fiber, is a macro fiber. Workability of the concrete is moderately affected while using steel fibers. It is reported that the fiber balling is increased, primarily due to the lack of mixing. The impact of steel fibers on compressive strength, flexural strength and split tensile strength is greater. Also they have greater resistance to crack progression. Parameters which effect on steel fiber reinforced concrete [SFRC] are shape of the fiber, percentage addition and aspect ratio (3). High modulus of elasticity of steel fibers, which increases its bond characteristics, improves the ductility and energy absorption also.

The basalt fiber which is a micro fiber, has a relatively higher tensile strength compared to steel fibers (4). Other properties of basalt fibers, which make them preferable to steel fibers in reinforced concrete (5), are their greater resistance to aggressive environments and higher corrosion resistance. Basalt fibers also improve the structural parameters, namely energy absorption and impact resistance. When they are used in 0.3 to 0.5% by volume, better results are reported (4). But optimum dosage varies, based on the type of concrete (6, 7). It can be summarized that basalt fiber have environmental compatibility and sustainability, in comparison to other synthetic fibers.

Structural behavior of reinforced cement concrete [RCC] can be made better, by the inclusion of fibers. In most of the RCC beams with fiber reinforcement, steel fibers are used. It is reported that the steel fiber beams, demonstrate significant improvement in the first crack load, peak load and better stiffness properties (8). The augmentation in flexural strength is in proportion with the fiber content. Post cracking strength of fibers, is responsible for the improvement in strength and ductility, of fiber-reinforced concrete. Also crack sizes and spacing get lessened. Steel fibers reduce the congestion of reinforcement without affecting the strength aspect (9). Structural integrity of concrete elements, is maintained when fibers are used in blended form (10). Efficiency of basalt fiber in the improvement of the mechanical properties of concrete, is proved in the literature. But its use in the behavior of structural elements

wiedzialna za poprawę wytrzymałości i plastyczności elementów wzmocnionych tymi włóknami. Również rozmiary pęknięć i odstępów między nimi ulegają zmniejszeniu. Włókna stalowe zmniejszają zagęszczenie zbrojenia, bez wpływu na wytrzymałość (9). Integralność mikrostrukturalna elementów betonowych jest zachowana, gdy włókna są stosowane w postaci mieszanej (10). Efektywność włókien bazaltowych w poprawie właściwości mechanicznych betonu jest potwierdzona w publikowanych pracach. Jednak, ich wpływ na zachowanie się elementów konstrukcyjnych wymaga jeszcze wielu badań, zarówno w formie mono jak i hybrydowej, z włóknami stalowymi. Wyniki badań doświadczalnych wykazały, że dodanie włókien hybrydowych poprawiło wytrzymałość na zginanie i plastyczność belek zbrojonych z betonu cementowego.

## 2. Znaczenie badań

W niniejszej pracy przedstawiono badania doświadczalne zachowania się belek betonowych wzmocnionych włóknami hybrydowymi, poddanych obciążeniu zginającemu. Tam, gdzie było to możliwe, parametry zginania były sprawdzane krzyżowo, z normami indyjskimi. Wyniki doświadczeń zawierają konstruktywny wgląd w skuteczność włókien hybrydowych, w betonie konstrukcyjnym.

## 3. Program doświadczalny

### 3.1. Materiały

Materiały użyte w tym badaniu do osiągnięcia wytrzymałości betonu 40 MPa stanowią cement portlandzki klasy 53, piasek rzeczny zgodny ze strefą II, kruszywo grube o wymiarach 20 mm i 12,5 mm, w stosunku objętościowym 60:40, aby uzyskać lepsze zagęszczenie. W celu uzyskania odpowiedniej urabialności zastosowano superplastyfikator Auramix 400, oparty na eterze polikarboksylianowym [PCE].

Zastosowano również włókna stalowe - Dramix 3D, o średnicy 0,75 mm i długości 60 mm oraz włókna bazaltowe o średnicy 17 mm i długości 24 mm. Wybrane frakcje objętościowe  $[V_f]$  wynosiły 0,25%, 0,5% i 0,75%.

## 4. Optymalny udział objętościowy włókien

Z literatury wynika, że w przypadku zastosowania włókien w udziale objętościowym od 0,2% do 1,0% nastąpiła poprawa właściwości mechanicznych (11–16) i z tego względu w niniejszych badaniach uwzględniono frakcje objętościowe wynoszące 0,25%, 0,5% i 0,75%. Optymalny udział objętościowy określono przez porównanie właściwości mieszanki i betonu stwardniałego. W oparciu o optymalne udziały objętościowe, stwierdzone dla włókien bazaltowych i stalowych, przeprowadzono hybrydyzację włókien. Badano wpływ włókien bazaltowych i stalowych na właściwości mechaniczne betonu, dla wszystkich trzech frakcji objętościowych. Wyniki badań przedstawiono w formie graficznej na rys. 1 i 2. W celu określenia optymalnego udziału objętościowego porównano

needs to be studied intensively, both in mono form and hybrid form, with steel fibers. The experimental evidence of this research showed that, adding hybrid fibers improved the mechanical response i.e., flexural strength and the ductility of the RCC beams.

## 2. Research significance

An experimental study on the behaviour of hybrid fibre reinforced RC beams, subjected to flexural loading is presented in this research paper. Wherever possible, flexural parameters were cross checked with Indian Standards. The results from experiments offer constructive insights, into the effectiveness of hybrid fibres, in structural concrete.

## 3. Experimental program

### 3.1. Materials

Materials used in this investigation to attain a concrete strength of 40 MPa were 53 grade Portland cement, river sand conforming to zone II, coarse aggregates of 20 mm and 12.5 mm down size in 60:40 ratio by volume, to achieve better interlocking. To achieve adequate workability, polycarboxylic ether [PCE] based super plasticizer Auramix 400 was used.

Steel fibres - Dramix 3D chosen were of diameter 0.75 mm and length 60 mm. 17 mm diameter and 24 mm long basalt fibres were also used. Volume fractions  $[V_f]$  chosen were 0.25%, 0.5% and 0.75%.

## 4. Optimum volume fraction

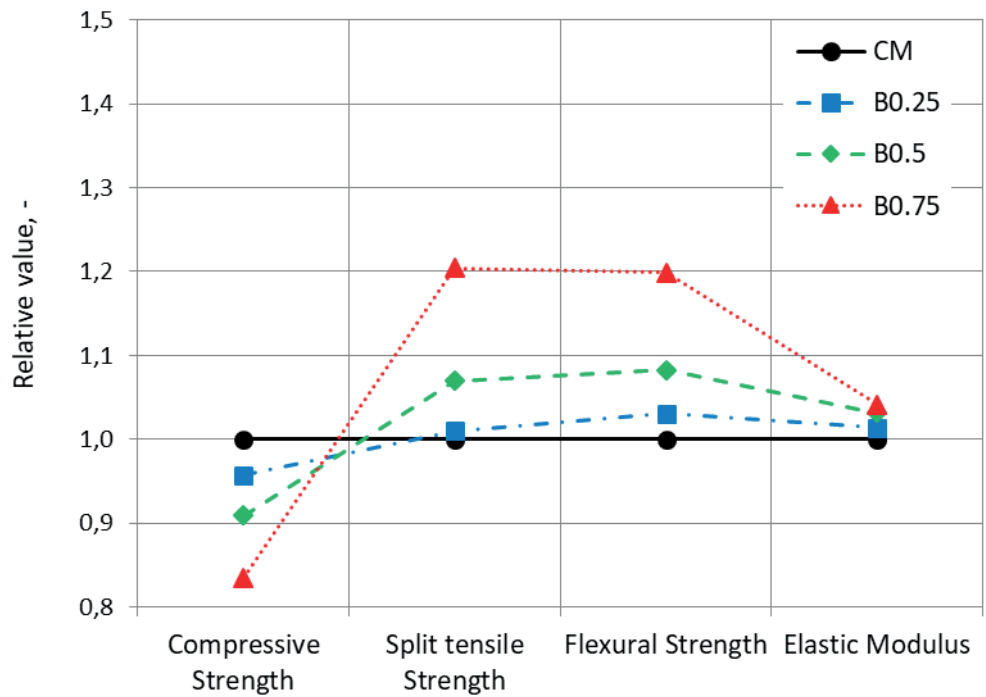
It was evident from the literature that when fibres were used between 0.2% and 1.0% volume fraction, there was an increase in the mechanical properties (11-16). Hence, volume fractions namely 0.25%, 0.5% and 0.75% were considered in the present study. Optimum volume fraction was identified, by comparing the fresh and hardened properties of concrete. Based on the optimum volume fractions identified for both basalt and steel fibres, fibre hybridization was done. The effect of basalt and steel fibres, on the mechanical properties of concrete, were studied for all the three volume fractions. Graphical depiction of the results for the tests is presented in Figs. 1 and 2, for better understanding. Mechanical properties of the mono fibered concretes were compared with the control concrete, to identify the optimum volume fraction.

It was found from Figs. 1 and 2 that, for BFRC there was proportional enhancement in split tensile and flexural strength, as well as elastic modulus with the volume fraction. However, while considering the compressive strength, only for the volume fraction of 0.25%, the target compressive strength was achieved. Similarly from Fig. 2, it was understood that for all volume fractions of SFRC, the improvement in compressive strength was lower; however, there was tremendous increase in split tensile and flexural strength,

właściwości mechaniczne betonów z jednym rodzajem włókien, z betonem kontrolnym.

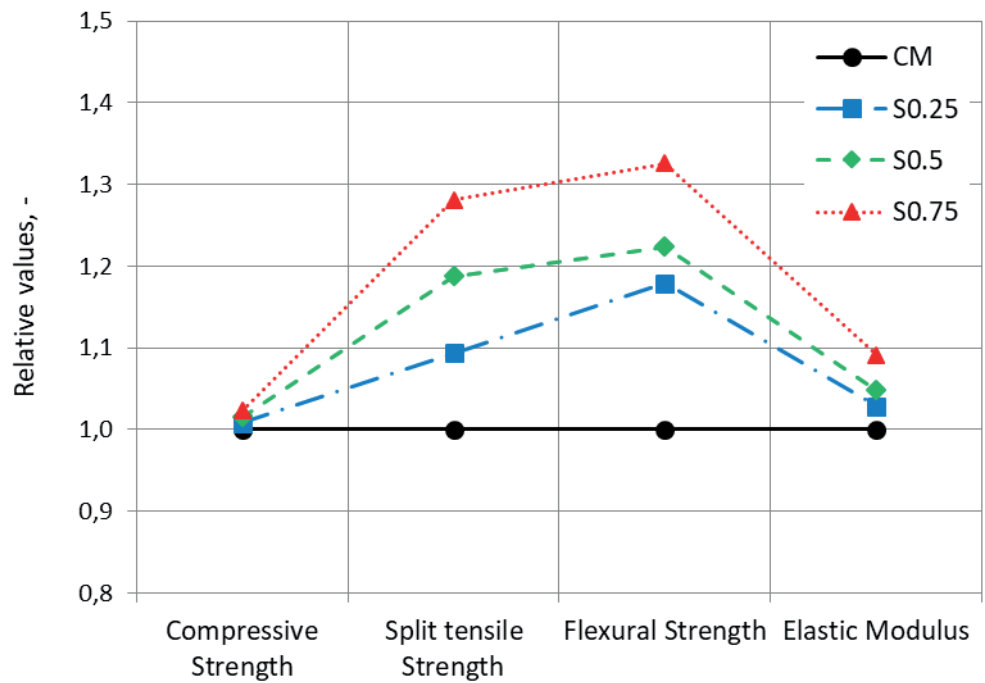
Na rys. 1 i 2 pokazano, że w przypadku BZWS nastąpił proporcjonalny wzrost wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu, wytrzymałości na zginanie i modułu sprężystości, wraz ze zwiększeniem udziału objętościowej włókien stalowych. Jednak biorąc pod uwagę wytrzymałość na ściskanie, tylko dla frakcji objętościowej 0,25%, osiągnięto docelową wytrzymałość na ściskanie. Podobnie z rys. 2 wynika, że dla wszystkich frakcji objętościowych BZWS, poprawa wytrzymałości na ściskanie była mniejsza. Jednak nastąpił ogromny wzrost wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu, wytrzymałości na zginanie i modułu sprężystości. Na podstawie ogólnej oceny stwierdzono, że 0,25% i 0,75% to optymalne udziały objętościowe, odpowiednio dla BZWB i BZWS.

Hybrydyzacja włókien zapewnia znaczną poprawę właściwości świeżego i stwardniałego betonu. Dla zapewnienia optymalnych właściwości użytkowych ważny był synergiczny efekt włókien. W niniejszej pracy przygotowano trzy hybrydowe mieszanki z włóknami, uwzględniając optymalne udziały objętościowe ustalone dla włókien bazaltowych i stalowych. We wszystkich trzech mieszankach dodano włókna bazaltowe w ilości 0,25%, a udział objętościowy włókien stalowych wynosił 0,25%, 0,5% i 0,75%. Wszystkie badania przeprowadzone w celu oceny właściwości mieszanek z jednym rodzajem włókien, zostały powtórzone w celu opracowania optymalnej kombinacji dla mieszanki hybrydowej. W celu określenia optymalnego udziału objętościowego dla hybrydyzacji włókien, dokonano ogólnej oceny mieszanek hybrydowych z włóknami, przez porównanie z mieszanką kontrolną i sporządzono wykres radialny, pokazany na rys. 3 Stwierdzono, że właściwości mechaniczne były najbardziej korzystne, gdy włókna bazaltowe i stalowe połączone w udziałach objętościowych, wynoszących odpowiednio 0,25% i 0,75%.



Rys. 1. Właściwości mechaniczne BZWS

Fig. 1. Mechanical properties of BFRC

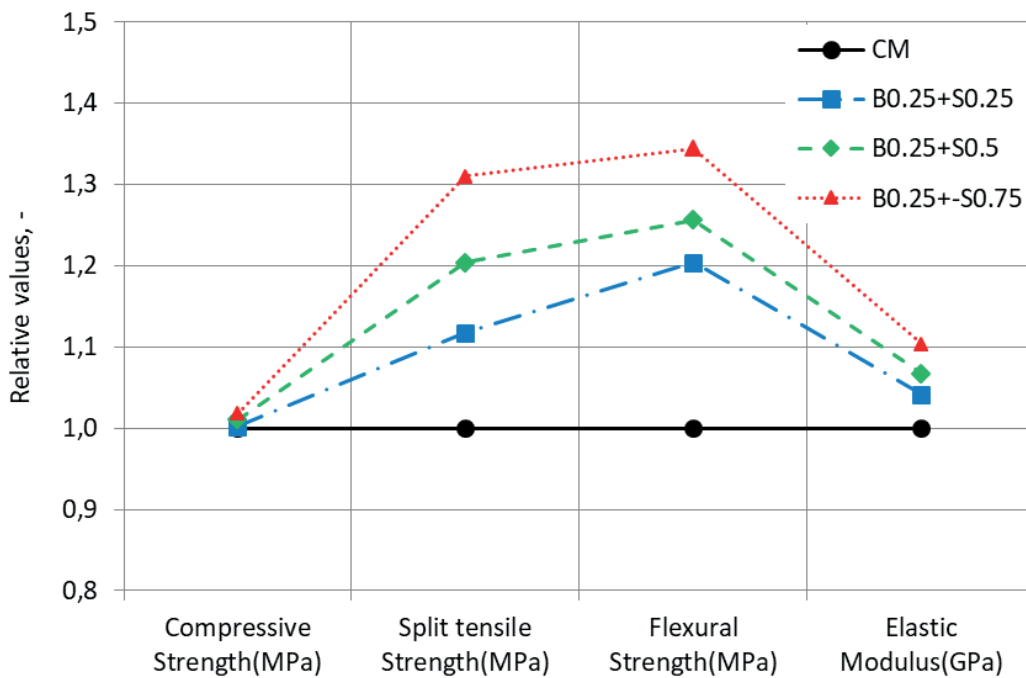


Rys. 2. Właściwości mechaniczne betonu z włóknami stalowymi

Fig. 2. Mechanical properties of SFRC

as well as elastic modulus. Therefore from overall assessment it was concluded that 0.25% and 0.75% were the optimum volume fractions for BFRC and SFRC, respectively.

Fibre hybridization offered appreciable improvement in fresh and hardened properties of concrete. To achieve optimum performance, synergistic effect of fibres was more important. In this study three



Rys. 3. Właściwości mechaniczne mieszanek hybrydowych

Fig. 3. Mechanical properties of hybrid mixes

Z ogólnej oceny wynika, że optymalne udziały objętościowe wyniosły 0,25% i 0,75% dla włókien bazaltowych i stalowych. Kombinacja określona dla włókien hybrydowych wynosi 0,25% bazaltu i 0,75% stali. Te trzy udziały objętościowe zostały użyte do przygotowania belek z betonu cementowego, wzmocnionego włóknami.

## 5. Wykonanie belek żelbetowych

### 5.1. Wymiary

Wszystkie belki ze zbrojonego betonu cementowego [ZBC] użyte w doświadczeniach zostały wykonane przy użyciu betonu klasy M40 i miały wymiary 150x200x2000 mm. Długość efektywna belek wynosiła 1,8 m.

### 5.2. Profil zbrojenia

Belki ZBC zostały zaprojektowane ze zbrojeniem zgodnie z normą IS 456:2000, dla pomiarów zginania. Jako zbrojenie zastosowano walcowane pręty o dużej granicy plastyczności [DGP]. Pręty były gatunku Fe-415 zgodnie z normą IS 1786:2008. Współczynnik zbrojenia belek wynosił 1,58%. Do zbrojenia podłużnego użyto prętów o średnicy 2-16 mm, a jako pręty górnej warstwy zbrojenia, zastosowano pręty o średnicy 2-10 mm. Strzemiona składały się z 2 odnóg z prętów o średnicy 8 mm, rozmieszczonych w odległości 125 mm.

### 5.3. Próbkki przygotowane do badań doświadczalnych

Aby zbadać wpływ włókien na zginanie, przygotowano osiem belek. Spośród nich, sześć zostało wzmocnionych optymalnym dodatkiem włókien. Wszystkie próbki poddano próbie obciążenia dwupunktowego.

hybrid fibred mixes were prepared by considering optimum volume fractions, identified for basalt and steel fibres. In all the three mixes basalt fibres were added at 0.25%, volume fraction of steel fibres were varied as 0.25%, 0.5% and 0.75%. All the tests conducted to evaluate the properties of the mono fibred mixes were repeated, to finalize the optimum combination for hybrid fibred mix. To identify optimum volume fraction for fibre hybridization, overall assessment of the hybrid fibred mixes were done, by comparison with the control mix and the radial graph was drawn, as shown in Fig. 3. It was identified that the mechanical properties were most favorable when basalt and steel fibres were combined at 0.25% and 0.75% volume fractions respectively.

From the overall assessment, the optimum volume fractions identified were 0.25% and 0.75%, for basalt and steel fibres. Combination identified for hybrid fibres were 0.25% for basalt and 0.75% for steel. These three volume fractions were used to cast the fibre reinforced RCC beams.

## 5. Casting of RC beams

### 5.1. Dimensions

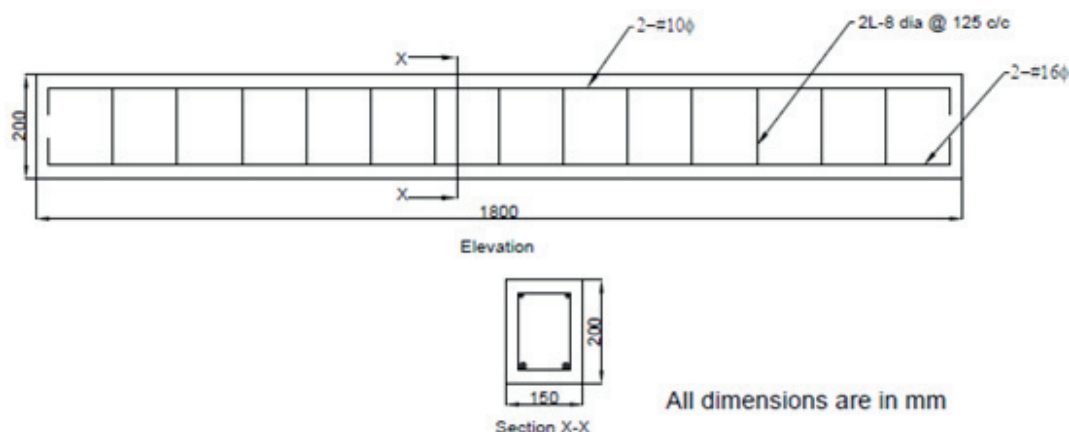
All the RCC beams used for the experimental investigation, were cast using M40 grade concrete, with dimensions of 150x200x2000 mm. Effective span of beams was 1.8 m.

### 5.2. Reinforcement profile

RCC beams were designed according to IS 456:2000, under flexure as under reinforced section. High yield strength deformed [HYSD] bars were used as reinforcement. The bars were of Fe-415 grade, in the compliance with IS 1786:2008. Reinforcement ratio of beams was 1.58%. For longitudinal reinforcement 2-16 mm diameter bars were used and 2-10 mm diameter bars were used, for hanger bars. Stirrups were of 2 legged 8 mm diameter bars, spaced at 125 mm c/c.

### 5.3. Specimen cast for experimental investigation

To learn the effect of fibers in flexure, eight beams were made. Out of these, six were reinforced with the optimum fibre volume fraction. All the specimens were tested under two point loading. For each group, two specimens were tested and average of the parameters was estimated for comparison. In Table 1, loads at cracking  $P_{cr}$ , service  $P_w$  and maximum load  $P_{max}$  of the beams and



Rys. 4. Schemat belek ze zbrojonego betonu cementowego [ZBC]

Fig. 4. Details of RCC beam

towego. Dla każdej grupy zbadano dwie próbki i wyznaczono średnie wyniki, dla celów porównawczych. W tabelicy 1 zestawiono obciążenia przy pęknięciu  $P_{cr}$ , eksploatacyjne  $P_w$  i maksymalne  $P_{max}$  belek oraz odpowiadające im ugięcia  $\Delta$  i szerokości pęknięć  $W$ . Wraz z każdą próbką belki wykonano kostki pomocnicze w celu sprawdzenia osiągnięcia 28. – dniowej wytrzymałości na ściskanie.

corresponding deflections  $\Delta$  as well as crack widths  $W$  are listed. Along with each beam specimen, companion cubes were cast to ascertain the achievement of 28 days compressive strength.

## 6. Analiza wyników badań doświadczalnych

### 6.1. Obciążenie i moment rysujący

Podczas doświadczeń zanotowano obciążenie rysujące, przy którym stwierdzono pierwszą rysę, wywołaną zginaniem. Pojawienie się pierwszego pęknięcia nastąpiło przy większych obciążeniach dla wszystkich belek z włóknami w porównaniu do belki kontrolnej. Przypisano to działaniu mostkującemu włókien, które

## 6. Analysis of experimental results

### 6.1. Cracking load and moment

During the experiment, the cracking load at which the first flexural crack was observed, was noted. Appearance of first crack was at higher loads for all fibred beams, than the control beam. This was attributed to the fibre bridging action, which prevented the crack formation. The beam reinforced with hybrid fibres exhibited the maximum first crack load, which was 1.6 times higher than the control beams. In the basalt fibred beams, first crack appeared little earlier. Hence it was concluded that though all the fibred beams

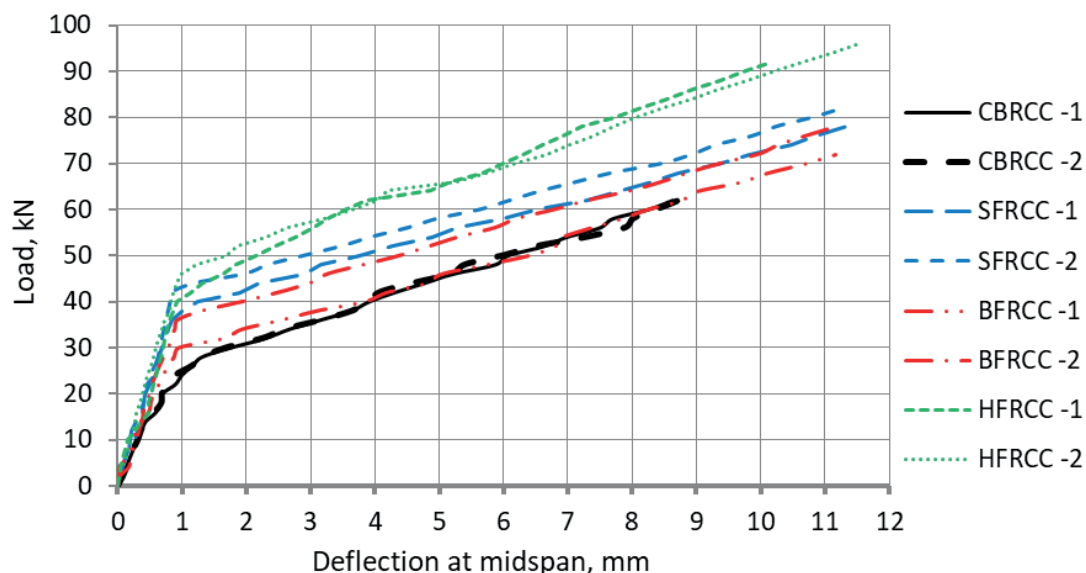
Tablica 1 / Table 1

PEKNIĘCIA, OBCIĄŻENIA EKSPLOATACYJNE I MAKSYMALNE ORAZ ZWIĄZANE Z NIMI UGIĘCIA I SZEROKOŚCI RYS  
CRACKING, SERVICE AND MAXIMUM LOADS AND RELATED DEFLECTIONS & CRACK WIDTHS

S.No	Specimen Próbka	Cube Compressive strength Wytrzymałość na ściskanie badana na próbkach sześciennych, MPa	Load / Obciążenie P, kN, Crack width / Szerokość rysy W, mm, Mid span deflection / Odkształcenie w środku belki $\Delta$ , mm								
			$P_{cr}$	$\Delta_{cr}$	$W_{cr}$	$P_w$	$\Delta_w$	$W_w$	$P_{max}$	$\Delta_{max}$	$W_{max}$
1	CBRCC-1	52.87	30	1.765	0.04	42	4.315	0.12	62	8.634	0.37
2	CBRCC-2	52.42	32	2.253	0.03	44	4.604	0.13	64	9.014	0.38
	CBRCC	Average / Średnia	31	2.009	0.04	43	4.459	0.13	63	8.824	0.38
3	SFRCC-1	50.68	40	1.245	0.03	52	4.276	0.09	78	11.346	0.39
4	SFRCC-2	51.95	46	1.977	0.04	56	3.945	0.11	82	11.283	0.38
	SFRCC	Average / Średnia	43	1.611	0.04	54	4.111	0.1	80	11.314	0.39
5	BFRCC-1	48.79	34	1.929	0.02	48	5.719	0.08	72	11.159	0.29
6	BFRCC-2	49.33	40	1.945	0.02	52	4.845	0.08	78	11.187	0.25
	BFRCC	Average / Średnia	37	1.937	0.02	50	5.282	0.08	75	11.173	0.27
7	HFRCC-1	53.67	48	1.839	0.02	62	3.867	0.17	92	10.175	0.39
8	HFRCC-2	52.98	52	1.867	0.03	64	4.205	0.11	96	11.525	0.31
	HFRCC	Average / Średnia	50	1.853	0.03	63	4.036	0.14	94	10.85	0.35

CB – control beam / belka wzorcowa; SF – steel fibres / włókna stalowe; BF – basalt fibres / włókna bazaltowe; HF – hybrid fibres / włókna hybrydowe

zapobiegało tworzeniu się pęknięć. Belka wzmocniona włóknami hybrydowymi wykazywała maksymalne obciążenie pierwszej rysy, które było 1,6 razy większe, niż w przypadku belek kontrolnych. W belkach z włóknami bazaltowymi pierwsza rysa pojawiła się nieco wcześniej. W związku z tym stwierdzono, że chociaż wszystkie belki z włóknami wykazywały większą siłę pęknięcia niż belki kontrolne, stosowanie włókien stalowych miało większy wpływ na obciążenie, powodujące powstanie pierwszej rysy.



Rys. 5. Wykres ugięcia pod obciążeniem belek ze zbrojonego betonu cementowego

Fig. 5. Combined load deflection graph for RCC beams

### 6.2. Reakcja na obciążenie ugięcia

W tym badaniu zmierzono ugięcia krótkotrwale. Dla każdego obciążenia wzrastającego, zanotowano przemieszczenia w połowie rozpiętości. Z reakcji ugięcia pod obciążeniem przedstawionego na rys. 5 wynika, że do momentu pojawienia się pierwszej rysy zależność obciążenia z ugięciem, była prawie liniowa. Nachylenie obszaru po pojawieniu się rysy było mniejsze, niż przed pojawieniem się tej rysy. Ze względu na mostkujące działanie włókien, w obszarze nieelastycznym, zarówno belki z włóknami stalowymi jak i bazaltowymi, wykazywały wzrost wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie oraz sztywność. Włókna stalowe przenosiły naprężenia znacznie przekraczające poziom pęknięć. Stwierdzono znaczną poprawę wytrzymałości i plastyczności betonu w belkach z betonu cementowego zbrojonego włóknami, w których włókna stalowe i bazaltowe zostały zmieszane, w ustalonych optymalnych proporcjach. Belki kontrolne ugięły się bardziej niż belki z włóknami. Wynikało to ponownie z wpływu włókien na mostkowanie pęknięć.

### 6.3. Ugięcie przy obciążeniu eksploatacyjnym

Właściwości elementu konstrukcyjnego najlepiej oszacować, przy obciążeniu eksploatacyjnym. Z punktu widzenia kryteriów eksploatacyjnych, ugięcie przy obciążeniu eksploatacyjnym jest ważną właściwością. Ugięcia pod obciążeniem eksploatacyjnym obliczono, aby upewnić się, czy spełniają one warunki, określone w normach. Oszacowano ugięcia pod obciążeniem eksploatacyjnym. Efektywny moment bezwładności został obliczony zgodnie z normą IS 456: 2000 oraz ACI 318-14. Wyniki te są zestawione w tabelicy 2.

Stwierdzono, że ugięcia przy obciążeniu eksploatacyjnym, oszacowane przez normy indyjską IS i amerykańską ACI, były zgodne. W sumie stwierdzono, że belki z włóknami miały mniejsze ugięcia niż belka kontrolna, co było spowodowane zawartością włókien

showed a higher cracking load than the control beams, presence of steel fibres had more influence, on the first cracking load.

### 6.2. Load deflection response

In this experimental study, short term deflections were measured. For each incremental load, the mid-span displacements were noted. From the load deflection response in Fig. 5, it is evident that till the first crack load, the relation between loads and deflection was nearly linear. Slope of the post cracking region was lower than that of the pre-cracking stage. Because of the bridging action of fibres, in the inelastic region, both steel and basalt fibred beams, exhibited enhancement in strength, ductility and stiffness. Steel fibres carried stresses well, beyond the cracking. Strength and ductility of concrete was found to be greatly improved in HFRCC beams, in which steel and basalt fibres were blended, in the identified optimum proportions. Control beams deflected more than the fibred beams. This was again due to the effect of fibres, in bridging the cracks.

### 6.3. Deflection at service load

Performance of the structural member is best estimated at service load. From the serviceability criteria point of view, deflection at service load is an important property. Service load deflections are calculated to make sure whether it satisfies the serviceability criteria stipulated in the code books. The deflections at service load were estimated. Effective moment of inertia was calculated as per IS 456: 2000 and ACI 318-14. The values are tabulated in Table 2.

It was noted that the deflections at service load estimated by IS and ACI Codes, were consistent. On the whole it was concluded that fibred beams deflected lower than the control beam which happened due to the fibres, present in the matrix. Compared to the control beam the SFRCC and HFRCC beams deflected 7.8% and 9.4% lower. But BFRCC beams deflected 18.4% more than

w matrycy. W porównaniu z belką kontrolną belki z betonu cementowego zbrojonego włóknami hybrydowymi oraz stalowymi, wykazały mniejsze ugięcia o 7,8% i 9,4%. Jednak belki zbrojone mono włóknem bazaltowym ugięły się o 18,4% bardziej, niż belka kontrolna. Belki z włóknami bazaltowymi miały mniejszą sztywność przy obciążeniu powodującym powstanie rys, niż belki z włóknami stalowymi.

#### 6.4. Współczynnik plastyczności i ciągliwości

Konstrukcja powinna poddać się znacznemu, nieelastycznemu odkształceniu, bez utraty wytrzymałości. Powszechnie ciągliwość jest mierzona jako wskaźnik przemieszczenie-naprężenie. Jest on obliczany jako stosunek przemieszczenia przy maksymalnym obciążeniu, do przemieszczenia przy obciążeniu granicznym. Ugięcie przy maksymalnym obciążeniu  $\Delta_u$  zostało wykorzystane z wyników doświadczalnych, natomiast ugięcie przy obciążeniu granicznym  $\Delta_y$  zostało zmierzone metodą bilinearną. Następnie za pomocą równania [1] oceniono ciągliwość przy przemieszczeniu  $\mu_d$ .

$$\mu_d = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad [1]$$

Obliczone wskaźniki ciągliwości zostały potwierdzone przy użyciu równań empirycznych, zaproponowanych odpowiednio przez Prabhakara (17) i Pam (18). Równania empiryczne podano poniżej.

$$\mu_d = 9.5(f_{cu})^{-0.3}(\rho/\rho_b)^{-0.75} \quad [2]$$

$$\mu_d = 5(f_{cu})^{-0.15}(\rho/\rho_b)^{-0.3} \quad [3]$$

Z tablicy 3 wynika, że wzór Pam zbyt wysoko oszacował wskaźnik ciągliwości, podczas gdy przewidywanie za pomocą równania Prabhakara, było bliższe wynikom otrzymanym z metody bilinearnej. W porównaniu z belką kontrolną, wskaźniki ciągliwości belek zbrojonych włóknami stalowymi i bazaltowymi, były większe odpowiednio o 57,3% i 46.0%. Jednak w przypadku belek z hybrydowymi włóknami poprawa była o 60,7% większa. Badania Pam (18) wykazywały, że absolutne minimum ciągliwości przy zginaniu, które należy zapewnić wszystkim belkom żelbetowym, wynosi 3,3. Również J. A. Apeh i O. G. Okoli (19) ich wskaźnik plastyczności nie może być przeceniony. W Nigerii dział zajmujący się stalą jest obecnie przeciążony recyklingiem przeznaczonym na złom metalu, otrzymanym głównie z miejskich odpadów stałych, które znalazły zastosowanie w przemyśle budowlanym. Badania oceniły wskaźnik plastyczności prostokątnych belek betonowych, zbrojonych prętami otrzymanych ze złomowanego metalu. Uzyskano to projektując belkę, wykonując próbki i oceniając ich właściwości pod obciążeniem doświadczalnie i analitycznie, kładąc nacisk na zmiany wskaźnika plastyczności. Osiemnaście [100 mm x 200 mm x 1000 mm] wspomniano, że wskaźnik plastyczności w zakresie od 3 do 5 rozważany jest jako podstawowy dla belek ze zbrojonego betonu [BZB]. Wszystkie badane belki spełniały wyżej wspomniane ograniczenia.

Tablica 2 / Table 2

PREDICTION OF DEFLECTION AT SERVICE LOAD

PRZEWIDYWANE UGIĘCIA POD OBCIĄŻENIEM EKSPLOATACYJNYM

S.No. Nr próbki	Specimen Próbka	$\Delta_w$ , mm		
		Exp Wynik doświadczalny	IS	ACI
1	CBRCC-1	4.315	3.805	4.104
2	CBRCC-2	4.604	3.808	4.108
3	SFRCC-1	4.276	3.818	4.122
4	SFRCC-2	3.945	3.811	4.112
5	BFRCC-1	5.719	3.829	4.137
6	BFRCC-2	4.845	3.826	4.133
7	HFRCC-1	3.867	3.800	4.097
8	HFRCC-2	4.205	3.804	4.103

the control beam. Basalt fibred beams had lower stiffness at cracking load than the steel fibred beams.

#### 6.4. Ductility

Structure need to undergo excessive inelastic deformation, without loss of resistance. Commonly ductility is measured in terms of displacement ductility index. It is computed as the ratio between the displacement at maximum load and that at yield load. Deflection at maximum load  $\Delta_u$  was taken from the experimental results, while the deflection at yield load  $\Delta_y$  was measured using bilinear method. Then the displacement ductility was evaluated using Eq. [1]

$$\mu_d = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad [1]$$

Ductility indices calculated were validated using the empirical Eq. [2] and [3], proposed by Prabhakara (17) and Pam (18), respectively. The empirical equations are mentioned below.

$$\mu_d = 9.5(f_{cu})^{-0.3}(\rho/\rho_b)^{-0.75} \quad [2]$$

$$\mu_d = 5(f_{cu})^{-0.15}(\rho/\rho_b)^{-0.3} \quad [3]$$

From the Table 3 it is understood that the Pam's expression overestimated the ductility index, whereas the prediction by Prabhakara's equation was closer to the results, obtained from the bilinear method. Compared to CBRCC, the control beam the ductility indices of SFRCC and BFRCC beams were 57.3% and 46.0% higher. However, in HFRCC beams the improvement was 60.7% higher. Pam (18) suggested that the absolute minimum level of flexural ductility to be provided in all reinforced concrete beams as 3.3. Also Apeh and Okoli (19) their ductility index cannot be over-emphasized. In Nigeria, the steel sector is now sustained through the recycling of scrap metal, obtained mainly from municipal solid wastes which find application in the construction Industry. The study evaluated the ductility index of a rectangular concrete beam reinforced with rebars, milled from scrap metal. This was achieved by designing the beam, produced samples and assessed its behavior under load experimentally and analytically, with emphasis on the deflection



Tablica 3 / Table 3

## DUCTILITY INDICES

## WSKAŹNIKI CIĄGLIWOŚCI

S.No. Nr próbki	Specimen Próbka	Bilinear Method Metoda bilinearna			Prabhakara's Equation Równanie Prabhakara	Pam's Equation Równanie Pam
		$\Delta_u$ , mm	$\Delta_y$ , mm	$\mu_d$ , -		
1	CBRCC-1	8.634	2.8	3.08	3.70	5.86
2	CBRCC-2	9.014	3.1	2.91	3.70	5.89
3	SFRCC-1	11.346	2.5	4.54	3.69	5.78
4	SFRCC-2	11.283	2.3	4.91	3.70	5.84
5	BFRCC-1	11.159	2.6	4.29	3.68	5.76
6	BFRCC-2	11.187	2.5	4.47	3.69	5.83
7	HFRCC-1	10.175	2.2	4.63	3.69	5.83
8	HFRCC-2	11.525	2.3	5.01	3.70	5.84

**6.5. Zdolność do pochłaniania energii**

Absorpcja energii jest mierzona przez powierzchnię pod krzywą ugięcie – obciążenie. Na podstawie tych krzywych obliczono absorpcję energii, którą zamieszczono w tabeli 4. Wszystkie belki wzmocnione włóknami wykazywały większą zdolność absorpcji energii, niż belka kontrolna. Belki ZWSBC i ZBaWCC wykazały 78,3% i 56,2% większą absorpcję energii, niż belki kontrolne. W belkach ZWSBaCC uzyskano znaczną poprawę, na poziomie 97,6%. To udowodniło synergiczny efekt, uzyskany przez mieszanie włókien.

**6.6. Efektywna sztywność przedgraniczna  $K_y$** 

Efektywna sztywność przedgraniczna próbek płyt, została obliczona jako stosunek obciążenia granicznego  $P_y$  do ugięcia, w punkcie obciążenia granicznego  $\Delta_y$  (20). Tablica 5 przedstawia sztywność przedgraniczną wszystkich belek. Okazało się, że ze względu na zdolność włókien do mostkowania, wszystkie belki z włóknami miały większą sztywność, niż belki kontrolne.

Tablica 4 / Table 4

## ABSORPCJA ENERGII PRZEZ BELKI ZBROJONE Z BETONU CEMENTOWEGO [ZCC]

## ENERGY ABSORPTION OF RCC BEAMS

S.No. Nr próbki	Specimen Próbka	Energy Absorption / Absorpcja energii, kN/mm
1	CBRCC-1	349.0
2	CBRCC-2	373.5
3	SFRCC-1	626.9
4	SFRCC-2	661.4
5	BFRCC-1	529.8
6	BFRCC-2	599.4
7	HFRCC-1	649.9
8	HFRCC-2	778.0

ductility index. Eighteen (100 mm x 200 mm x 1000 mm) mentioned that ductility indices in the range of 3 to 5 is considered essential for RCC beams. All RCC beams tested, satisfied the above mentioned limitation.

**6.5. Energy absorption capacity**

Energy absorption is measured by the area under the load-deflection curve. From the load-deflection curves, the energy absorption was calculated and presented in Table 4. All the fiber reinforced beams exhibited higher energy absorption capacity, than the control beam. SFRCC and BFRCC beams showed 78.3% and 56.2% more energy absorption, than the control beams. In HFRCC beams a substantial improvement of 97.6 % was obtained. This proved the synergetic effect, obtained by blending fibers.

**6.6. Effective pre-yield stiffness,  $K_y$** 

The effective pre-yield stiffness of the slab specimens is computed, as the ratio of yield load –  $P_y$  to the deflection at yield load point –  $\Delta_y$  (20). Table 5 shows the pre-yield stiffness of all the beams. It was evident that due to the bridging capability of fibers, all the fibered beams had higher stiffness values, than the control beams.

Compared to the control beam, SFRCC, BFRCC and HFRCC beams exhibited 62%, 41% and 100% higher stiffness, respectively. Steel fibers have higher modulus of elasticity. Hence the inclusion of steel fibres in SFRCC & HFRCC beams showed higher stiffness, than the BFRCC beams. Presence of basalt fibers in hybrid form had higher effect on the stiffness than in mono form, which proved the synergetic effect. Therefore the stiffness of HFRCC beams, surpassed all the other beams.

**6.7. Analysis of crack width**

The crack widths at typical load points, are listed in Table 1. In CBRCC beam, first crack appeared at 31 kN load. In all the fiber reinforced beams the first crack appeared at a higher load, than

Tablica 5 / Table 5

## PORÓWNANIE EFEKTYWNEJ SZTYWNOŚCI PRZEDGRANICZNEJ

## COMPARISON OF EFFECTIVE PRE-YIELD STIFFNESS

S.No. Nr próbki	Specimen Próbka	$P_y$ , kN	$\Delta_y$ , mm	$K_y$ , kN/mm
1	CBRCC-1	44	2.8	15.71
2	CBRCC-2	46	3.1	14.84
3	SFRCC-1	56	2.5	22.40
4	SFRCC-2	62	2.3	26.96
5	BFRCC-1	52	2.6	20.00
6	BFRCC-2	58	2.5	23.20
7	HFRCC-1	66	2.2	30.00
8	HFRCC-2	72	2.3	31.30

W porównaniu z belką kontrolną, belki zbrojone włóknami stalowymi, bazaltowymi oraz hybrydowymi, wykazują odpowiednio o 62%, 41% i 100% większą sztywność. Włókna stalowe mają większy moduł sprężystości. Dlatego też zastosowanie włókien stalowych w belkach zbrojonych włóknami stalowymi oraz hybrydowymi, spowodowało większą sztywność belek niż w przypadku belek zbrojonych włóknami bazaltowymi. Zawartość włókien bazaltowych w formie hybrydowej, miała większy wpływ na sztywność niż w formie mono, co udowodniło efekt synergiczny. Dlatego sztywność belek ze zbrojeniem hybrydowym, przewyższała wszystkie inne belki.

### 6.7. Analiza szerokości rysy

Szerokości rys w typowych punktach obciążenia są podane w tabelcy 1. W belce kontrolnej pierwsza rysa pojawiła się przy obciążeniu 31 kN. We wszystkich belkach wzmocnionych włóknami, pierwsza rysa pojawiła się przy większym obciążeniu, niż w przypadku belek kontrolnych. Dla belek z włóknami stalowymi, bazaltowymi i hybrydowym, obciążenia pierwszej rysy wynosiły odpowiednio 43 kN, 37 kN i 52 kN. Włókna odgrywają główną rolę w zatrzymywaniu pęknięć. Średnie obciążenie rysujące w belkach kontrolnych wynosiło 31 kN, przy szerokości pierwszego pęknięcia 0,03 mm. W przypadku belek z włóknami stwierdzono, że szerokości rys o tej samej wielkości powstawały w zakresie 40 – 45 kN. Synergiczne działanie włókien przyczyniło się do poprawy mechanizmu zatrzymywania pęknięć. Zostało to udowodnione przez pojawienie się pierwszej rysy przy obciążeniu 50 kN w belkach z włóknem hybrydowym, o jej szerokości 0,03 mm.

### 6.8. Przewidywanie szerokości rysy przy obciążeniu eksploatacyjnym

Szerokość pęknięć przy obciążeniu użytkowym, została obliczona za pomocą równań podanych w normach IS 456:2000 i ACI 318-14. Wartości te są zestawione w tabelcy 6.

Wykazano, że szerokość rysy przy obciążeniu eksploatacyjnym oszacowana przez normy IS i ACI, była zgodna. Ogólnie rzecz

Tablica 7 / Table 7

#### PRZEWIDYWANIE MOMENTU GRANICZNEGO PREDICTION OF THE ULTIMATE MOMENT

S.No. Nr próbki	Specimen Próbka	$M_u$ , kN/m		
		Exp Wynik doświadczalny	IS	ACI
1	CBRCC-1	18.6	21.62	23.21
2	CBRCC-2	19.2	21.59	23.19
3	SFRCC-1	23.4	21.49	23.11
4	SFRCC-2	24.6	21.57	23.17
5	BFRCC-1	21.6	21.37	23.01
6	BFRCC-2	23.4	21.40	23.04
7	HFRCC-1	27.6	21.67	23.24
8	HFRCC-2	28.8	21.63	23.21

the control beams. For SFRCC, BFRCC and HFRCC beams the first crack loads were 43 kN, 37 kN and 52 kN, respectively. Fibres played a principal role in arresting cracks. Average cracking loads in control beams was 31 kN with a first crack width of 0.03 mm. For the fibred beams, it was found that the crack widths of the same magnitude, were formed at the range of 40 – 45 kN. Synergetic effect of the fibres helped in improvement of the crack arresting mechanism. This was proved by the appearance of the first crack at 50 kN load in HFRCC beams, with a crack width of 0.03 mm.

### 6.8. Prediction of crack width at service load

The width of cracks at service load was calculated using equations stipulated in IS 456:2000 and ACI 318-14. The values are listed in Table 6.

It is illustrated that the crack width at service load estimated by IS and ACI Codes, was consistent. On the whole it was concluded that in the crack width in fibred beams happened to satisfy the code provisions. However, from the values in Table 6, the conclusion was that both IS and ACI codes overestimated the crack width, at service loads. BFRCC beams had lower quantity of crack width, among all the fibred beams.

Tablica 6 / Table 6

#### SZEROKOŚĆ RYSY POD OBCIĄŻENIEM EKSPLOATACYJNYM CRACK WIDTH AT SERVICE LOAD

S.No. Nr próbki	Specimen Próbka	$W_w$ , mm		
		Exp Wynik doświadczalny	IS	ACI
1	CBRCC-1	0.12	0.178	0.179
2	CBRCC-2	0.13	0.177	0.179
3	SFRCC-1	0.09	0.177	0.180
4	SFRCC-2	0.11	0.177	0.179
5	BFRCC-1	0.08	0.176	0.180
6	BFRCC-2	0.08	0.176	0.180
7	HFRCC-1	0.17	0.178	0.179
8	HFRCC-2	0.11	0.178	0.179

### 6.9. Maximum moment carrying capacity, $M_u$

The maximum load carried by the beams during experiments, was considered to evaluate ultimate resistance. Theoretical values of ultimate moment were predicted using equations from IS 456:2000 and from ACI 318-14 and compared with the experimental results. The values are presented in Table 7. It was evident that the ultimate moments evaluated by IS and ACI Codes, were consistent.

### 6.10. Peak load

SFRCC, BFRCC & HFRCC beams carried 27.0%, 19.0% and 49.2% higher load respectively, than the control specimen. HFRCC beams had combined fibres of different sizes and configurations, which had helped in the enhancement of peak load. Also the

biorąc stwierdzono, że szerokość pęknięcia w belkach z włóknami, spełnia wymagania przepisów norm. Jednak z wartości podanych w tablicy 6 wynika, że zarówno normy IS jak i ACI przeszacowały szerokość rys, pod obciążeniami eksploatacyjnymi. Belki z włóknami bazaltowymi miały najmniejszą ilość rys, ze wszystkich belek z włóknami.

### 6.9. Maksymalna zdolność przenoszenia momentów, $M_u$

W celu oceny nośności uwzględniono maksymalne obciążenie przenoszone przez belki, podczas doświadczeń. Teoretyczny moment graniczny przewidziano przy zastosowaniu równań z IS 456:2000 i ACI 318-14 i porównano z wynikami doświadczałnymi. Wartości te są przedstawione w tablicy 7. Okazało się, że momenty graniczne, oszacowane przez normy IS i ACI, są zgodne.

### 6.10. Obciążenie szczytowe

Belki zbrojone włóknami bazaltowymi, stalowymi i hybrydowymi przenosiły odpowiednio 27.0%, 19,0% i 49,2% więcej obciążenia, niż próbka kontrolna. W belkach z włóknem hybrydowym połączono włókna o różnych rozmiarach i konfiguracjach, co przyczyniło się do zwiększenia obciążenia szczytowego. Również wpływ włókien stalowych był wyraźniejszy w przypadku włókien bazaltowych. Udowodniło to synergiczny efekt, uzyskany dzięki mieszanii włókien.

## 7. Wnioski

Belki zbrojone z betonu cementowego, wzmocnione włóknami stalowymi i bazaltowymi w formie mono i hybrydowej, były badane w warunkach zginania, aby poznać wpływ włókien, na właściwości użytkowe. Na podstawie wyników doświadczalnych można wyciągnąć następujące wnioski.

1. Wytrzymałość przy pierwszej rysie dla belek zbrojonych włóknami bazaltowymi, stalowymi i hybrydowymi okazała się odpowiednio o 38,7%, 19,4% i 61,3% większa, niż dla kontrolnych belek zbrojonych, bez włókien.
2. Ugięcie we wszystkich belkach z włóknami było mniejsze w porównaniu z belkami kontrolnymi. Szczególnie w przypadku belek z włóknem hybrydowym, odnotowano o 9,4% mniejsze ugięcie niż w przypadku belek kontrolnych.
3. W belkach zbrojonych włóknami bazaltowymi, stalowymi i hybrydowymi plastyczność była odpowiednio o 57.0%, 46.0% i 60,7% większa, niż w belce kontrolnej.
4. Zdolność absorpcji energii wszystkich belek z włóknami była większa niż belki kontrolnej. W belkach zbrojonych włóknami bazaltowymi, stalowymi i hybrydowymi, absorpcja energii była odpowiednio o 78.0%, 56,3% i 97,6% większa, niż w belkach kontrolnych.
5. Wyniki doświadczenia wykazały, że sztywność belek z włóknami uległa poprawie, w stosunku do belek kontrolnych. W belkach zbrojonych włóknami bazaltowymi, stalowymi i hybrydowymi nastąpił jej przyrost o 61,5%, 41,4% i 100,6%, w stosunku do belek kontrolnych.

effect of steel fibres was more pronounced, in the presence of basalt fibers. This proved the synergetic effect obtained due to the blending fibres.

## 7. Conclusions

RCC beams reinforced with steel and basalt fibres, in both mono form and hybrid form, were tested in flexure to understand the fiber efficiency in performance enhancement. Based on the experimental results, following major conclusions can be drawn.

1. The first crack strength of SFRCC, BFRCC and HFRCC beams were found to be 38.7%, 19.4% and 61.3% higher, than that of the control RCC beams respectively.
2. Deflection in all the fibred beams was lower, compared to the control beam. Especially in HFRCC beams there was 9.4% lower deflection reported, than that of control beams.
3. In SFRCC, BFRCC and HFRCC beams the ductility was 57.0%, 46.0% and 60.7% higher than that of control beam respectively.
4. Energy absorption capacity of all the fibred beams was higher than the control beam. In SFRCC, BFRCC and HFRCC beams the energy absorption was 78.0%, 56.3% and 97.6% higher, than that of control beams.
5. The experimental results revealed that stiffness of the fibred beams had been improved in relation to the control beams. There was 61.5%, 41.4% and 100.6% increment in SFRCC, BFRCC and HFRCC beams, than control beams.
6. Compared to control beams, first crack appeared at a higher load in all the fibre reinforced beams. In HFRCC beams first crack was noted at the highest value which was 61.3% higher than the control beams. Observing the crack pattern, it was evident that the addition of fibres in the matrix formed a close network, which prevented the propagation of scratch .
7. SFRCC, BFRCC and HFRCC beams carried 27.0%, 19.0% and 49.2% higher load than of the control beam.

6. W porównaniu z belkami kontrolnymi, pierwsze pęknięcie pojawiło się przy większym obciążeniu, we wszystkich belkach wzmocnionych włóknami. W belkach z włóknami hybrydowym pierwsza rysa wystąpiła przy największej wartości, która była o 61,3% większa niż w belkach kontrolnych. Przebieg zarysowania wykazał, że dodatek włókien w matrycy utworzył ścisłą sieć, która uniemożliwiła propagację rys..
7. Belki zbrojone włóknami bazaltowymi, stalowymi i hybrydowymi przenosiły o 27,0%, 19,0% i 49,2% większe obciążenia niż belka kontrolna.
16. T. A. Söylev, T. Özturan, Durability, physical and mechanical properties of fiber-reinforced concretes at low-volume fraction. *Constr. Build. Mater.* **73**, 67–75 (2014). doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.058>.
17. M. Ramappa Prabhakara K.U., R. Muthu, Investigations on ultimate flexural strength and ductility behaviour of HSC beams,” *Indian Concr. J.* **10**(80), 40–50 (2006).
18. J. C. M. Ho, A. K. H. Kwan, H. J. Pam. “Effects of using high-strength concrete on flexural ductility of reinforced concrete beams. *HKIE Trans. Hong Kong Inst. Eng.* **9**(1), 14–21 (2002). doi: <https://doi.org/10.1080/1023697X.2002.10667863>.
19. J. A. Apeh and O. G. Okoli, Evaluation of Ductility Index of Concrete Beams Reinforced with Rebars Milled from Scrap Metals. *Concr. Res. Lett.* **7**(2), 56–68 (2016).
20. T.M. Almusallam, H.M. Elsanadedy, Y.A.Al-Salloum, Effect of longitudinal steel ratio on the behaviour of RC beams strengthened with FRP Composites. *J. Compos. Constr.* **19**(1), 04014028 (2015).

## Literatura / References

1. R. Shanthi Vengadeshwari, H. N. Jagannatha Reddy, Fibers in Structural Concrete - - A Critical Review. *Int. J. Mod. trends Eng. Res.* **3**(9), 16-20 (2016).
2. R. Shanthi Vengadeshwari, H. N. Jagannatha Reddy, Comparative investigation on effect of fibers in the flexural response of post tensioned beam. *Asian J. Civ. Eng.* **20**(4), 527–536 (2019). doi: <https://doi.org/10.1007/s42107-019-00121-5>.
3. R. N. Swamy, Fiber- reinforced cement and concrete: Prospects and challenges. *Indian Concr. J.* **70**(10), 517–518 (1996).
4. J. Branston, S. Das, S. Y. Kenno, C. Taylor, Mechanical behaviour of basalt fibre reinforced concrete. *Constr. Build. Mater.* **124**, 878–886 (2016). doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.009>.
5. P. R. Ramakrishnan V. A new construction material, non-corrosive basalt bar reinforced concrete Special Publication. *Spec. Publ.*, **229**, 253–270 (2005).
6. C. T. D.P. Dias, Fracture toughness of geopolymeric concretes reinforced with basalt fibers. *Cem. Concr. Compos.* **27**(1), 49–54 (2005).
7. E. a. T. Ayub, Mechanical properties of high-performance concrete reinforced with basalt fibers. *Procedia Eng.* **77**, 131–139 (2014).
8. M. Shukla, Behavior of Reinforced Concrete Beams with Steel Fibres under Flexural Loading. *Int. J. Earth Sci. Eng.* **4**(6), 843–846 (2011).
9. W. Kim, Evaluation of flexural strength prediction of reinforced concrete beams with steel. *J. Struct. Integrity Maint.* **1**(4), 156–166 (2016).
10. H. A. Elsharkawy, T. Elafandy, A. W. EL-Ghandour, and A. A. Abdelrahman, Behavior of post-tensioned fiber concrete beams. *HBRC J.* **9**(3) 216–226 (2013). doi: <https://doi.org/10.1016/j.hbrcj.2013.08.006>.
11. P. Iyer, S. Kenno, and S. Das, Mechanical Properties of Fiber-Reinforced Concrete Made with Basalt Filament Fibers. *J. Mater. Civ. Eng.* **27**, 4015015 (2015). doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001272](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001272).
12. A. L. Paul Archbold, Ana Caroline da Costa Santos, The Influence of Basalt Fibres on the Mechanical Properties of Concrete. *Civil Eng. Res. Ireland* **2016**, 1-5 (2016).
13. A. B. Kizilkanat, N. Kabay, V. Akyüncü, S. Chowdhury, A. H. Akça, Mechanical properties and fracture behavior of basalt and glass fiber reinforced concrete: An experimental study. *Constr. Build. Mater.* **100**, 218–224 (2015). doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.006>.
14. P.A. Patel, A.K. Desai, J.A. Desai, Evaluation of engineering properties for polypropylene fiber reinforced concrete. *Int. J. Adv. Eng. Techn.* **3**(1), 42–45 (2013).
15. A. S. Parveen, Structural behavior of fibrous concrete using polypropylene fibers, *Int. J. Mod. Eng. Res.* **3**, 1279–1282 (2013).