

## Wzmocnienie betonu poprzez zastosowanie hybrydowych elementów SIFCON

### Strengthening of concrete by using hybrid SIFCON sections

Dalya H. Hameed<sup>a</sup>, Shakir A. Salih<sup>b</sup>, Galib M. Habeeb<sup>a</sup>

<sup>a</sup> University of Babylon, Babylon, Iraq

<sup>b</sup> University of Technology, Baghdad, Iraq;

\*Corresponding author: D.A. Hameed, e-mail: Eng\_dalya86@yahoo.com

#### Streszczenie

Fibrobeton SIFCON [ang. Slurry Infiltrated Fibrous Concrete] jest najnowszym rodzajem betonu wysokiej wartości zbrojonego włóknami, który wykonuje się poprzez penetrację ułożonych w formie włókien stalowych specjalnie zaprojektowanym zaczynem lub zaprawą cementową. Badania wykazały, że SIFCON jest perspektywicznym materiałem budowlanym o dużej plastyczności i dużej wytrzymałości. Na potrzeby niniejszego badania przeanalizowano zastosowanie SIFCON-u jako warstwy wzmacniającej dla konwencjonalnych elementów betonowych. Zaprezentowano skutki umiejscowienia warstwy fibrobetonu SIFCON: dół, góra i dół oraz dół i boki [płaszczyzna] oraz grubości: 15 mm, 25 mm i 35 mm, jak również udziału objętościowego włókien stalowych: 6,0%, 7,5% oraz 9,0% na wytrzymałość na zginanie, wytrzymałości i plastyczność belek hybrydowych. Zwiększenie grubości warstwy SIFCON i udziału objętościowego włókien stalowych poprawia nośność, wytrzymałości i plastyczności elementów zespolonych. Wytrzymałość na zginanie niszczące została zwiększona nawet o 1148%. Wartości współczynnika ciągliwości osiągnęły nawet 2,54. Z drugiej strony, energia pęknięcia przy zginaniu najbardziej zwiększyła się w przypadku elementów hybrydowych, wzmacnianych górną i dolną. Wynik był 33 razy większy niż dla belek kontrolnych.

**Słowa kluczowe:** SIFCON, fibrobeton infiltrowany zaczynem cementowym, element hybrydowy, wzmocnienie betonu

#### Summary

Slurry infiltrated fibrous concrete [SIFCON] is a recent form of superior performance fiber reinforced concrete made by penetrating steel fiber bed, with an exceptionally designed cement-based slurry. Researches have demonstrated that SIFCON is an imaginative building material, having both extensive ductility and high strength. In the current investigation, the use of SIFCON has been investigated as a strengthening layer for conventional concrete section. The effects of the SIFCON layer position: bottom, top & bottom, and jacket, thickness: 15 mm, 25 mm, and 35 mm, and steel fiber volume fraction: 6.0%, 7.5%, and 9.0% on ultimate flexural load, toughness, and ductility of hybrid prisms were reported. The results showed that the increase in the thickness of the SIFCON layer and the steel fiber volume fraction improve load-bearing capacity, toughness, and ductility of the composite sections. The ultimate flexural load was improved by up to 1148%. Ductility factors were increasing up to 2.54. On the other hand, toughness enhanced greatly in the case of the top and bottom hybrid sections. It was 33 times higher than of control prisms.

**Keywords:** SIFCON, slurry infiltrated fiber concrete, hybrid section, strengthening of concrete

#### 1. Wprowadzenie

SIFCON jest wysokiej wartości kompozytem, który posiada wyjątkowo dużą wytrzymałość i ciągliwość. Produkuje się go poprzez umieszczenie włókien w szalunku, a następnie infiltrację sieci włókien zaczynem cementowym. Infiltracja odbywa się zazwyczaj pod

#### 1. Introduction

SIFCON is considering as a type of high-performance cementing composite, which exhibits outstanding strength and ductility. It is manufactured by first placing fibers in formwork molds and then infiltrating the fiber network with cement slurry. The infiltration is

wpływem grawitacji. Może być też wspomagana przez wibracje lub poprzez torkretowanie pod ciśnieniem. Dzięki temu można uzyskać znacznie większy udział objętościowy włókien, w porównaniu do konwencjonalnego betonu, zbrojonego włóknami. SIFCON ma do dziesięciu razy większą wytrzymałość na rozciąganie i tysiąc razy większą wytrzymałość niż zwykły beton niezbrojony (1).

Nakłady na utrzymanie niezbędnej infrastruktury pochłaniają znaczną część budżetu krajowego. Rozwój nowoczesnych, trwałych i ekonomicznych metod naprawy i modernizacji stanowi nieustanną potrzebę, ze względu na zniszczenie takich konstrukcji. Dlatego w dzisiejszych czasach koniecznym działaniem staje się wzmacnianie konstrukcji, przedłużające ich użyteczność. Istnieje wiele metod wzmacniania przyjętych na przestrzeni lat. System wzmocnienia dobiera się w zależności od specyficznych wymagań eksploatacyjnych konstrukcji. Wznoszenie nowego budynku na miejsce uszkodzonego najczęściej skończy się nadmiernym zwiększeniem nakładów finansowych i w przypadku, gdy możliwe jest wykonanie wzmocnienia lub renowacji, stanowić będzie marnotrawstwo zasobów naturalnych (2). Wzmocnienie i modernizacja wielu budynków żelbetowych ma zasadnicze znaczenie dla poprawy ich plastyczności i wytrzymałości w warunkach obciążeń sejsmicznych (3).

Zachowanie się konwencjonalnych belek żelbetowych, z zastosowaniem wzmocnień z fibrobetonu SIFCON pod obciążeniem zginającym, zostało zbadane w pracy Balaji i Thirugnanam (4). Autorzy stwierdzili, że maksymalna nośność takich belek była wyższa o 50% w stosunku do belek wzorcowych, bez warstw wzmacniających z SIFCON. Również zdolność absorpcji energii i współczynnik plastyczności uległy poprawie odpowiednio o 90% i 185%. Nie wykazano różnic w zachowaniu pomiędzy belkami zespolonymi z SIFCON w warstwie górnej i dolnej, a belkami, w których SIFCON stanowił wyłącznie warstwę dolną.

Betonowa belka wzmocniona warstwą SIFCON [8% udział objętościowy] przy dolnej powierzchni osiągnęła większą o 53,5% wytrzymałość na obciążenie zginające niż zwykła belka. Ponadto uszkodzenie elementu zespolonego wynikało głównie z wyciągania włókien, a nie ich przejścia w stan plastyczny (5).

Parthiban i in. (6) doszli do wniosku, że wytrzymałość na zginanie betonu niezbrojonego może być znacznie zwiększona przez połączenie z SIFCON. Poprawa plastyczności i wytrzymałości pod obciążeniem statycznym wynikała z zastosowania laminatów SIFCON. Zarówno plastyczność jak i wytrzymałość zwiększyły się odpowiednio o około 25% i 45%, w przypadku kompozytu betonowego zbrojonego włóknami z dodatkiem laminatów SIFCON. Zauważono również pozytywny efekt w postaci zmniejszenia ugięcia, mniejszej liczby pęknięć i ich rozwarcia, wraz ze zwiększaniem grubości warstwy SIFCON.

Wpływ zastosowania różnego udziału objętościowego fibrobetonu SIFCON: 20%, 30%, 40% i 50% w zespolonych belkach żelbetowych wzmacnianych SIFCON na pracę w warunkach zginania, badali również Jayashree i in. (7). Stwierdzono, że gdy objętość SIFCON wzrasta z 20% do 50%, największy moduł sprężystości

generalnie osiągnięte przez przepływanie pod wpływem grawitacji z pomocą zewnętrznej wibracji, lub przez torkretowanie pod ciśnieniem. Dzięki temu można uzyskać znacznie większy udział objętościowy włókien, w porównaniu do konwencjonalnego betonu zbrojonego włóknami. SIFCON ma do dziesięciu razy większą wytrzymałość na rozciąganie i tysiąc razy większą wytrzymałość niż zwykły beton niezbrojony (1).

Wydatek na utrzymanie niezbędnych struktur stanowi znaczącą część budżetu państwa. Rozwój nowoczesnych, trwałych i ekonomicznych metod naprawy i modernizacji jest pilną potrzebą, ze względu na zniszczenie takich struktur. Dlatego w dzisiejszych czasach koniecznym działaniem staje się wzmacnianie struktur, przedłużające ich użyteczność. Istnieje wiele metod wzmacniania przyjętych na przestrzeni lat. System wzmocnienia dobiera się w zależności od specyficznych wymagań eksploatacyjnych struktur. Wznoszenie nowego budynku na miejsce uszkodzonego najczęściej skończy się nadmiernym zwiększeniem nakładów finansowych i w przypadku, gdy możliwe jest wykonanie wzmocnienia lub renowacji, stanowić będzie marnotrawstwo zasobów naturalnych (2). Wzmocnienie i modernizacja wielu budynków żelbetowych ma zasadnicze znaczenie dla poprawy ich plastyczności i wytrzymałości w warunkach obciążeń sejsmicznych (3).

Zachowanie się konwencjonalnych belek żelbetowych, z zastosowaniem wzmocnień z fibrobetonu SIFCON pod obciążeniem zginającym, zostało zbadane w pracy Balaji i Thirugnanam (4). Autorzy stwierdzili, że maksymalna nośność takich belek była wyższa o 50% w stosunku do belek wzorcowych, bez warstw wzmacniających z SIFCON. Również zdolność absorpcji energii i współczynnik plastyczności uległy poprawie odpowiednio o 90% i 185%. Nie wykazano różnic w zachowaniu pomiędzy belkami zespolonymi z SIFCON w warstwie górnej i dolnej, a belkami, w których SIFCON stanowił wyłącznie warstwę dolną.

Betonowa belka wzmocniona warstwą SIFCON [8% udział objętościowy] przy dolnej powierzchni osiągnęła większą o 53,5% wytrzymałość na obciążenie zginające niż zwykła belka. Ponadto uszkodzenie elementu zespolonego wynikało głównie z wyciągania włókien, a nie ich przejścia w stan plastyczny (5).

Parthiban et al (6) concluded that the ultimate flexural load of an un-reinforced concrete could be enhanced obviously by the combination with SIFCON. An improvement in ductility and strength under static loading resulted from the addition of SIFCON laminates. Both yielding and ultimate loads increased by about 25% and 45% respectively in the case of fiber-reinforced concrete composite, with the addition of SIFCON laminates. Also, there was a positive effect observed due to decreasing deflection, number of cracks, and cracks width when the depth of SIFCON increased.

The influence of a different volume fraction of SIFCON: 20%, 30%, 40%, and 50% in SIFCON-reinforced concrete [RC] composite beams on flexural behavior were also studied by Jayashree, et al (7). They reported that when the volume of SIFCON increases from 20% to 50%, the highest modulus of elasticity and the highest peak load were accomplished for 40% SIFCON. The 40% of SIFCON enhanced the ultimate flexural load and modulus of elasticity by 60% and 69%, as compared to the reference beam respectively.

i największe obciążenie szczytowe osiągnięto dla 40% udziału SIFCON. 40% udział kompozytu SIFCON zwiększył wytrzymałość na zginanie niszczące i moduł sprężystości odpowiednio o 60% i 69% w porównaniu z belką wzorcową.

Hybrydowe belki zespolone z warstwą SIFCON, stanowiącą tylko 0,2 grubości belki, miały znacznie większą wytrzymałość na zginanie oraz plastyczności niż zwykłe belki betonowe. Zwiększenie grubości warstwy SIFCON do około połowy wysokości belki daje wytrzymałość i plastyczność porównywalną z belkami wykonanymi z samego fibrobetonu SIFCON. Średnie maksymalne obciążenie dla belki zespolonej z warstwą SIFCON wynosiło 45,8 kN, w porównaniu do 24,3 kN dla belek z betonu wzorcowego (8).

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań mających na celu określenie wpływu fibrobetonu SIFCON na właściwości hybrydowych belek betonowych. Zbadano reakcję na zginanie belek z betonu zwykłego i SIFCON w kilku położeniach na przekroju belki przy obciążeniu czteropunktowym. Zbadano obciążenie niszczące przy zginaniu, krzywe obciążenie-ugięcie, wytrzymałości, plastyczności, i rodzaj zniszczenia.

## 2. Program badawczy

### 2.1. Materiały i składy mieszanek

#### 2.1.1. Beton zwykły

Wszystkie wykorzystane w badaniach próbki zostały wykonane z betonu klasy M25. Skład mieszanki został określony zgodnie z wytycznymi podanymi w amerykańskiej normie ACI 211.1-02 (9). Użyto cementu portlandzkiego. Zastosowanym kruszywem gruboziarnistym był płukany żwir, o gęstości właściwej 2,69 i nasiąkliwości 0,52%. Maksymalna wielkość kruszywa wynosiła 9,5 mm. Drobne kruszywo stanowił naturalny piasek o zawartości siarczanów 0,41%, przesiany przez sito 1,18 mm. Skład chemiczny cementu i składy mieszanek przedstawiono odpowiednio w tablicach 1 i 2.

#### 2.1.2. SIFCON

Tablica 2 / Table 2

### SKŁAD MIESZANKI BETONOWEJ CONCRETE MIX PROPORTIONS

Mieszanka / Mix	Cement, kg/m <sup>3</sup>	Piasek Sand, kg/m <sup>3</sup>	Żwir Gravel, kg/m <sup>3</sup>	w/c	Włókna stalowe Steel fiber, % by vol. of concrete	Superplastyfikator / HRWR, % masy cementu / % of cement mass
Zwykły / Normal	425	718	966	0.4	-	-
SIFCON1	900	900	-	0.3	6.0	1.6
SIFCON2	900	900	-	0.3	7.5	1.6
SIFCON3	900	900	-	0.3	9.0	1.6

Hybrid composite beams with the SIFCON layer constituting only 0.2 of the beam depth had presented deflection-hardening behavior and shown much higher flexural load and ductility, than plain concrete beams. Increasing the height of the SIFCON layer to about half of the depth of the beam, resulting in strength and ductility comparable with neat SIFCON beams. The average maximum load for the composite beam with SIFCON was 45.8 kN, in contrast with 24.3 kN for plain concrete beams (8).

In the current research, experimental work has been made to investigate the influence of SIFCON as hybrid concrete prisms sections. The flexural behavior under four-point load for prisms with SIFCON at several positions of the prisms, was investigated. The properties like ultimate flexural load, load-deflection curves, toughness, ductility, and failure pattern were investigated.

## 2. Experimental program

### 2.1. Materials and mix proportions

#### 2.1.1. Normal concrete

All beam specimens used in investigations were cast using M25 concrete. The mix proportions were determined according to the procedures given in American standard ACI 211.1-02 (9). Ordinary Portland cement was used. The coarse aggregate used was cleaned and rounded gravel, of specific gravity 2.69, and absorption 0.52%. The maximum size of aggregate was 9.5 mm. The fine aggregate was natural rounded sand with 0.41% sulfate content.

Tablica 1 / Table 1

### SKŁAD CHEMICZNY CEMENTU CHEMICAL COMPOSITION OF CEMENT

Składnik / Component	Zawartość / Content, %
CaO	63.50
SiO <sub>2</sub>	19.53
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.09
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.84
MgO	1.23
SO <sub>3</sub>	2.71
Straty prażenia / Loss on ignition	2.35
Części nierozpuszczalne / Insoluble residue	0.71

Do zaformowania warstwy z SIFCON użyto stalowych włókien z zakończeniami haczykowatymi, o średnicy 0,6 mm i stosunku długości do średnicy 50. Udział objętościowy włókien wynosił 6,0%, 7,5% i 9,0%. Zaprawę do wypełnienia przestrzeni pomiędzy włóknami wykonano z równych ilości cementu i piasku. Stosunek woda/cement wyniósł 0,30. W celu poprawy konsystencji zaprawy, aby przyspieszyć i ułatwić infiltrację zaprawy pomiędzy włókna, zastosowano dodatek superplastyfikatora w ilości 1,6% w stosunku do masy cementu.

## 2.2. Przygotowanie próbek

Wszystkie badane próbki miały wymiary 100×100×400 mm. Schematyczne przekroje poprzeczne próbek przedstawiono w tablicy 3. Grubość warstw fibrobetonu SIFCON wynosiła 15 mm, 25 mm i 35 mm dla każdego przypadku elementu hybrydowego i udziału objętościowego włókien stalowych. We wszystkich przypadkach wymiary przekroju poprzecznego były stałe: 100 mm x 100 mm. Oba rodzaje betonu były formowane w tym samym czasie. Drewniane formy posiadały płytki stalowe, które usuwano po zakończeniu formowania, w celu ujednolicenia betonu zwykłego z fibrobetonem SIFCON jeszcze stanie świeżym. Rysunek 1 przedstawia formy i proces formowania. Próbki rozformowano po 24 godzinach, a następnie dojrzewały przez 27 dni. Cztery serie badawcze zostały wykonane w zależności od położenia warstw SIFCON. Tablica 4 zawiera szczegółowe informacje na temat próbek.

## 2.3. Metody

Przyjęto czteropunktowy, swobodnie podparty układ obciążeń zginających zgodnie z normą BS EN 12390-5 (10). Maszyna wytrzymałościowa rejestrowała ugięcie belek w punkcie środkowym. Krzywe obciążenie-ugięcie zostały oznaczone dla belek wzorcowych - niewzmocnionych oraz wzmocnionych w warunkach obciążenia. Obserwacje wizualne służyły do monitorowania pierwszych pęknięć. Przyłożone obciążenie było stopniowo zwiększane z szybkością 200 N/s, aż do zniszczenia.

## 3. Wyniki i dyskusja

### 3.1. Obciążenie i zależność obciążenie-ugięcie

Rysunki 2a do 3c pokazują właściwości każdej z badanych belek i porównują je z belkami wzorcowymi. Zauważono, że warstwy wzmacniające mają duży wpływ na reakcję badanych belek, co zostało omówione poniżej.

#### 3.1.1. Belki z dolną warstwą wzmacniającą SIFCON

Rysunki 2a, 2b i 2c przedstawiają krzywe obciążenie-ugięcie belek z dolnymi warstwami SIFCON odpowiednio dla 6,0%, 7,5% i 9,0 % udziału włókien stalowych. Stwierdzono, że w miarę zwiększania udziału włókien stalowych, poprawiła się nośność wzmocnionych belek. Największa uzyskana wartość obciążenia wynosiła 61,9 kN dla 9% dodatku włókien stalowych i 35 mm grubości warstwy SIFCON. Poprawa nośności wyniosła 429% w stosunku do próbki

It was screened on a 1.18 mm sieve. The chemical composition of cement and mix proportions are shown in Table 1 and Table 2 respectively.

### 2.1.2. SIFCON

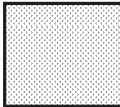
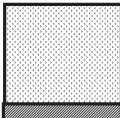
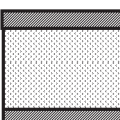
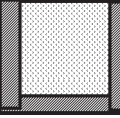


Hook-end steel fibers with 0.6 mm diameter and aspect ratio of 50 were used to cast the SIFCON layer. The fiber volume fraction was 6.0%, 7.5% and 9.0%. Cement and sand in equal proportions were used for making cement mortar. The water/cement ratio was equal to 0.30. Superplasticizer in the content of 1.6% in respect to cement mass was used to increase the flowability of the cement-based mortar to filled easy infiltration of cement mortar into the fiber matrix.

## 2.2. Test specimens and cast procedures

All test specimens were 100×100×400 mm, the schematic cross-sections of the specimens are shown in Table 3. The thicknesses of the SIFCON layers were 15 mm, 25 mm, and 35 mm for each case of the hybrid section and steel fiber volume fraction. For all the cases, the dimensions of the cross-section were constant [100mm x 100 mm]. The two types of concrete were cast at the same time. The wooden molds have steel plates, which can be removed after cast completion, to unify the normal concrete and SIFCON together in a fresh condition. Figure 1 shows the molds

Tablica 3 / Table 3

SZCZEGÓŁOWE INFORMACJE DOTYCZĄCE GEOMETRII PRÓBEK  
DETAILS OF SPECIMENS GEOMETRY

Nr próbki Sample No.	Opis matrycy Description of matrix	Przekrój poprzeczny Cross-section 100×100 mm
1	Belka z betonu zwykłego Normal concrete prism	
2	Element hybrydowy z dolną warstwą SIFCON Hybrid section with bottom SIFCON layer	
3	Element hybrydowy z górną i dolną warstwą SIFCON Hybrid section with top and bottom SIFCON layers	
4	Płaszcz hybrydowy z SIFCON Hybrid section jacketing with SIFCON layers	
Beton zwykły Normal concrete		SIFCON 



Rys. 1. Formy i sposób formowania próbek

Fig. 1. Molds and casting procedures

Tablica 4 / Table 4

SZCZEGÓŁY SIFCON

DETAILS OF SIFCON

Włókna stalowe Steel fiber %	Grubość warstwy SIFCON SIFCON layer thickness, cm	Położenie Location
0	-	-
6	1.5	Dół, góra i dół, dół i boki [płaszczyz] Bottom, Top & bottom, Jacket
	2.5	
	3.5	
7.5	1.5	Dół, góra i dół, dół i boki [płaszczyz] Bottom, Top & bottom, Jacket
	2.5	
	3.5	
9	1.5	Dół, góra i dół, dół i boki [płaszczyz] Bottom, Top & bottom, Jacket
	2.5	
	3.5	

wzorcowej. Ponadto, większy dodatek włókien stalowych daje większe ugięcie przy obciążeniu niszczącym, w którym największe ugięcie w połowie rozpiętości osiągnęło 2,76 mm. Większa wytrzymałość daje większą energię pęknięcia przy zginaniu. Potwierdzają to również wyniki wcześniejszych prac (11). Może być to przydatne w celu zwiększenia użyteczności budynków, ponieważ zauważalne ugięcia powodują niepokój u mieszkańców (12).

### 3.1.2. Belki z górną i dolną warstwą SIFCON

Rysunki 3a, 3b i 3c przedstawiają krzywe obciążenie-ugięcie belek z dolnymi i górnymi warstwami SIFCON, odpowiednio dla 6,0%, 7,5% i 9,0% udziału włókien stalowych. Stwierdzono tę samą tendencję, jak w przypadku belek z warstwą dolną. Gdy udział

and casting procedures. The concretes were demolded after 24 hours and water cured for 27 days. Four test series were taken depending on the location of the SIFCON layers. Table 4 gives the details of the specimens.

### 2.3. Test setup

A four-point, simply supported flexural loading system according to BS EN 12390-5 (10) was adopted. The testing machine recorded the deflection of the prism, at the midpoint. The load-deflection curves are drawn for control, unstrengthened and strengthened prisms under loading conditions. Visual and magnify examination was used to monitor the first crack loads. The applied load was increased gradually with an interval of 200 N/s, up to failure.

## 3. Results and discussions

### 3.1. Loading and load-deflection behavior

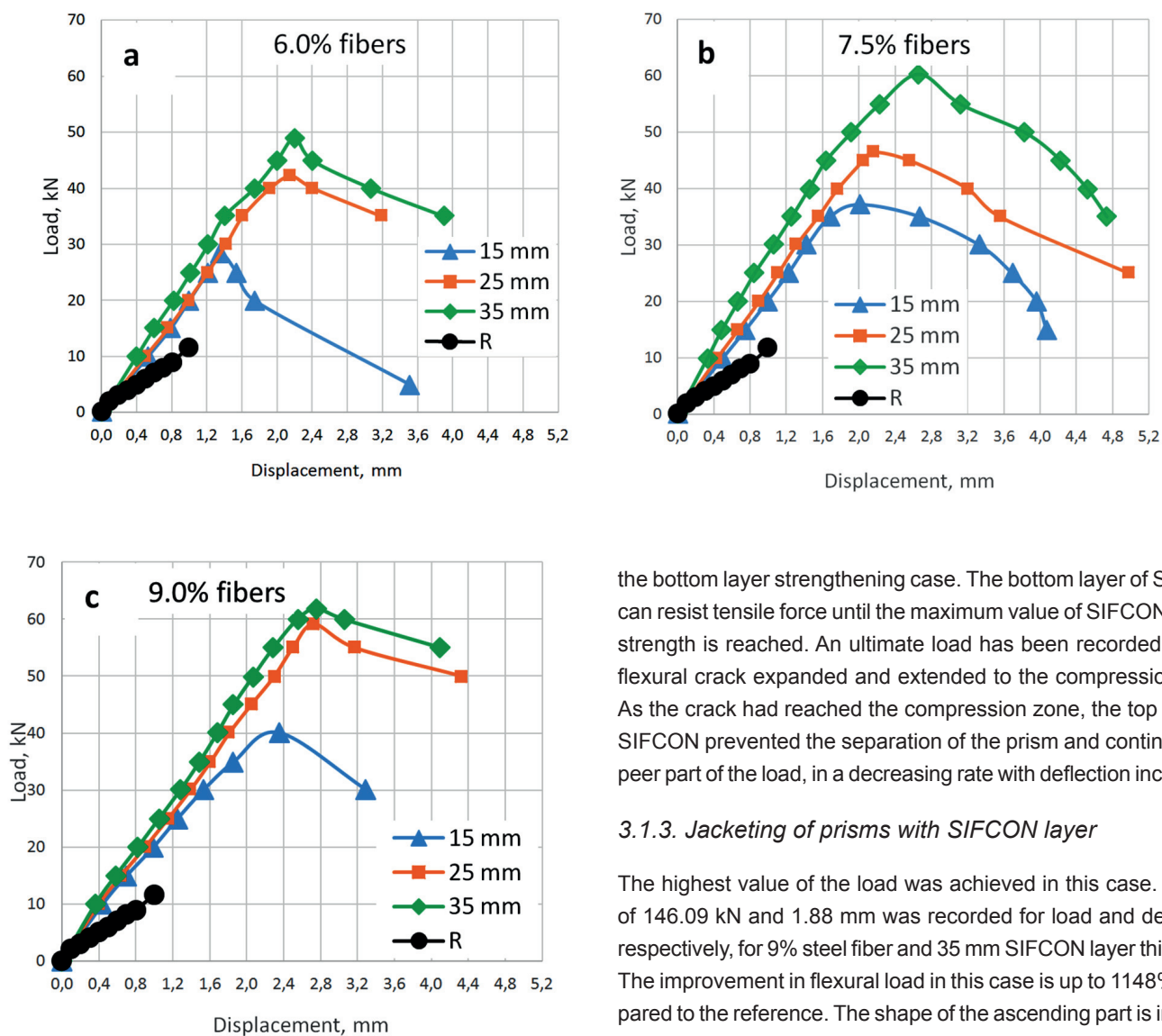
Figures 2a to 3c show the properties of each tested prisms and compare them with reference prisms. It was noted that the strengthening layers affect the behavior of the tested prisms significantly, as discussed below.

#### 3.1.1. Beams with bottom SIFCON layer

Figures 2a, 2b, and 2c show the load-deflection curves of the beams with bottom SIFCON layers, for 6.0, 7.5, and 9.0 % of steel fibers respectively. It was observed that as a percent of the steel fiber increases, the load-carrying capacity of strengthened prisms improved. The maximum load obtained was 61.9 kN for 9% steel fiber content and 35 mm SIFCON layer thickness. The improvement in the load-carrying capacity reached 429%, compared to the reference. In addition, the higher percentage of steel fiber gives higher deflection at failure load, where the maximum mid-span deflection reached 2.76 mm. This is because a higher flexural load results in more toughness consequently. This is also concluded by previous works, as the general trend (11). This behavior can be useful to extend the serviceability of buildings as the noticeable deflections cause distress to habitants (12).

#### 3.1.2. Beams with top and bottom SIFCON layers

Figures 3a, 3b, and 3c show the load-deflection curves of the beams with bottom and top SIFCON layers for 6.0, 7.5, and 9.0 % of steel fibers respectively. The same trend, as in the case of beams with the bottom layer was observed: as the volume fraction of steel fiber and layer thickness increased the deflection and higher load were achieved, up to the failure. The maximum value of load was 113.57 kN with a maximum deflection of 3.43 mm for specimens strengthened with 9% steel fiber and 35 mm thickness. Compared to the reference, the enhancement in flexural load is up to 870%. The descending part of the load-deflection curve is smoother than



Rys. 2. Krzywe obciążenie-ugięcie dla belek betonowych wzmocnionych dolną warstwą SIFCON, zawierającą różne udziały objętościowe włókien

Fig. 2. Load-deflection curves for concrete prisms strengthened using the bottom layer of SIFCON, containing different volumetric dosages of fibers

objętościowy włókna stalowego i grubość warstwy zwiększały się, zwiększało się również ugięcie i obciążenie, w momencie zniszczenia. Maksymalna wartość obciążenia wyniosła 113,57 kN przy maksymalnym ugięciu 3,43 mm dla próbek wzmocnionych z 9% udziałem włókien stalowych i 35 mm grubości. W porównaniu z belką wzorcową, zwiększenie wytrzymałości na zginanie wynosi do 870%. Opadająca część krzywej obciążenie-ugięcie jest gładka niż w przypadku wzmocnienia warstwą dolną. Dolna warstwa SIFCON może przenosić siłę rozciągającą do momentu osiągnięcia maksymalnej wytrzymałości na rozciąganie warstwy SIFCON. Obciążenie niszczące zostało zarejestrowane w postaci jednego pęknięcia wywołanego zginaniem, rozciągającego się do obszaru ściskania. Ze względu na to, że pęknięcie dotarło do strefy ściskania, górna warstwa SIFCON zapobiegła rozdzieleniu się belki i w dalszym ciągu przenosiła część obciążenia, malejącą

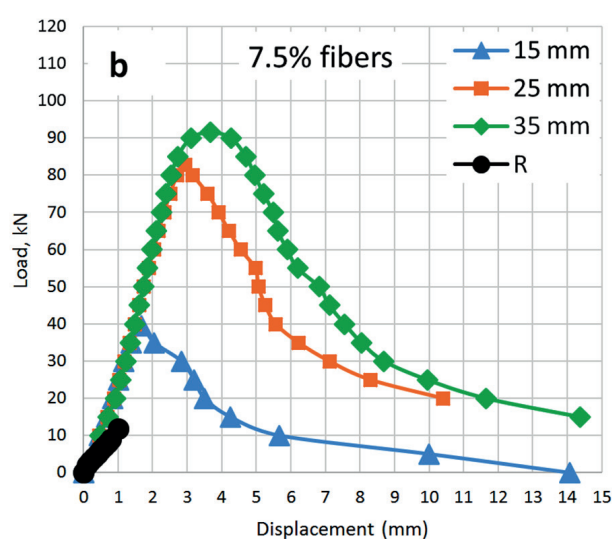
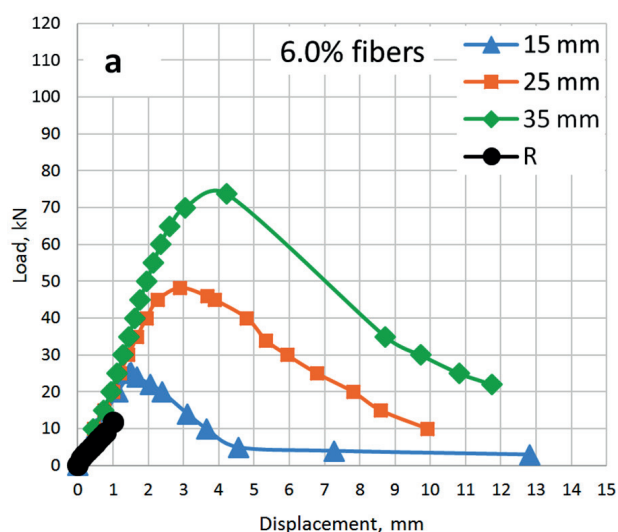
the bottom layer strengthening case. The bottom layer of SIFCON can resist tensile force until the maximum value of SIFCON tensile strength is reached. An ultimate load has been recorded as one flexural crack expanded and extended to the compression area. As the crack had reached the compression zone, the top layer of SIFCON prevented the separation of the prism and continued to peer part of the load, in a decreasing rate with deflection increment.

### 3.1.3. Jacketing of prisms with SIFCON layer

The highest value of the load was achieved in this case. A value of 146.09 kN and 1.88 mm was recorded for load and deflection respectively, for 9% steel fiber and 35 mm SIFCON layer thickness. The improvement in flexural load in this case is up to 1148%, compared to the reference. The shape of the ascending part is irregular for 6% steel fiber for all SIFCON layer thickness, while taking the form of smooth S in both 7.5% and 9%. This is due to the increase in the bonding area between steel fibers and matrix and thus with matrix density enhancement. The steel fibers in SIFCON have the effect of cracks bridging so, as the percent of SIFCON increased within the hybrid section, the effect of arresting cracks propagation increased. As the cracks have to take another path, which needs more energy for further propagation, which has resulted in higher load-carrying capacity. The load-deflection curve of jacketing by SIFCON layers for 6.0%, 7.5%, and 9% of steel fibers respectively, are shown in Figures 4a, 4b, and 4c.

### 3.2. Mode of failure

The propagation of cracks was monitored during the test. Specimens in all the cases: bottom, top and bottom, and jacketing, for all the thicknesses investigated: 15 mm, 25 mm, and 35 mm, showed no debonding between normal concrete and SIFCON layers and acted as one unit throughout the tests. No sudden failure modes were noted, although larger ultimate load levels were reached.



ze zwiększaniem się ugięcia.

### 3.1.3. Belki z dolną i bocznymi warstwami [płaszczem] SIFCON

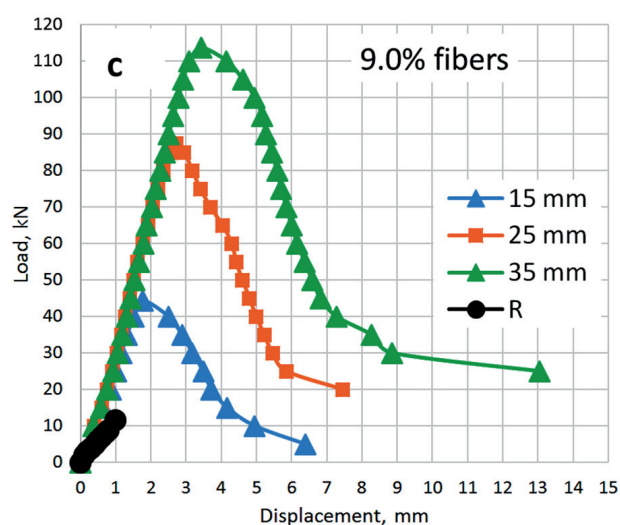
W tym przypadku uzyskano największe obciążenia niszczące. Wartości 146,09 kN i 1,88 mm odnotowano odpowiednio dla obciążenia i ugięcia, dla 9% udziału włókien stalowych i 35 mm grubości warstwy SIFCON. Poprawa wytrzymałości na zginanie w tym przypadku wynosi do 1148%, w porównaniu do belki wzorcowej. Kształt części wznoszącej krzywej jest nieregularny dla 6% udziału włókien, a jednocześnie przyjmuje postać gładkiego S zarówno przy 7,5% jak i 9% udziale włókien. Wynika to ze zwiększenia powierzchni wiązania włókien stalowych z matrycą, i zwiększenia gęstości matrycy. Włókna stalowe w warstwie SIFCON wykazują efekt mostkowania pęknięć, więc z uwagi na wzrost udziału SIFCON w elemencie hybrydowym zwiększył się efekt powstrzymywania propagacji spękań. Pęknięcia muszą przejść inną drogą, zwiększając zapotrzebowanie na energię celem dalszej propagacji, co prowadzi do większej nośności. Krzywe obciążenie-ugięcie belek hybrydowych z płaszczem SIFCON, odpowiednio dla 6,0%, 7,5% i 9% udziału objętościowego włókien stalowych, pokazano na rysunkach 4a, 4b i 4c.

### 3.2. Przebieg zniszczenia

Propagacja spękań była monitorowana podczas badania. Próbki we wszystkich przypadkach: z warstwą SIFCON na dole, górze i dole, dla płaszcza oraz dla wszystkich badanych grubości: 15 mm, 25 mm i 35 mm, nie wykazywały odspojenia wiązania pomiędzy zwykłym betonem a warstwami SIFCON i stanowiły jedną całość podczas badań. Nie odnotowano nagłego przebiegu zniszczenia, chociaż osiągnięto większe poziomy obciążenia niszczącego.

#### 3.2.1. Dolna warstwa SIFCON

Dla wszystkich udziałów objętościowych włókien stalowych, układ pęknięć był podobny dla próbek o tej samej grubości warstwy SIFCON. Jak pokazano na rysunku 5, beleczki o grubości 15 mm ulegają zniszczeniu wskutek zginania. Zwiększenie grubości war-



Rys. 3. Krzywe obciążenie-ugięcie dla belek betonowych wzmocnionych dolną i górną warstwą SIFCON, o różnym udziale objętościowym włókien

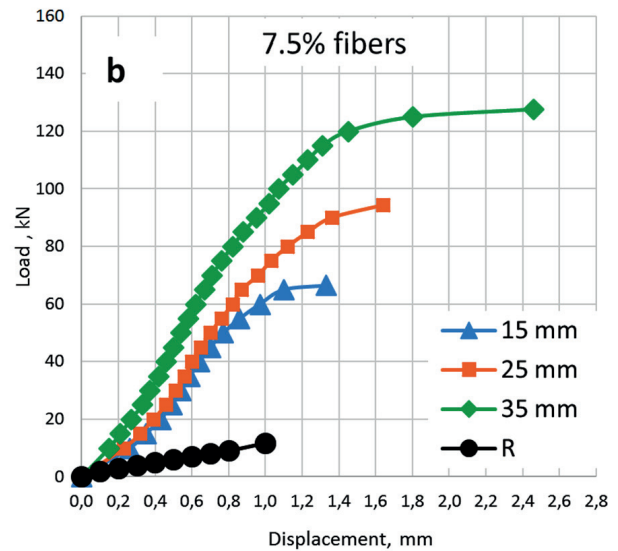
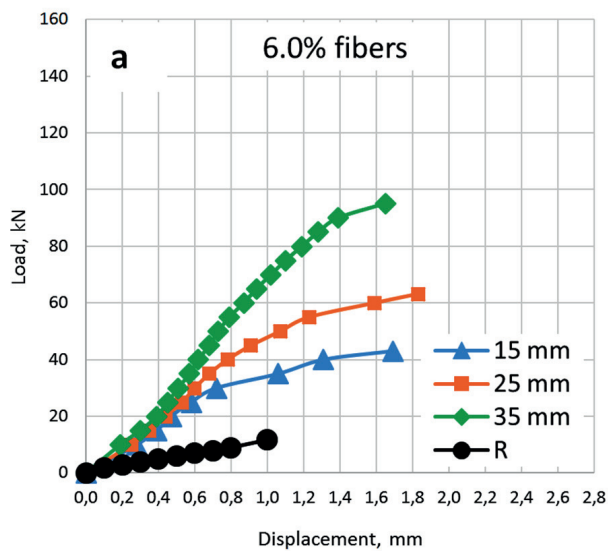
Fig. 3. Load-deflection curves for concrete prisms strengthened using bottom and top layers of SIFCON, containing different volumetric dosages of fibers

#### 3.2.1. Bottom SIFCON Layer

For all steel fibers percent, the behavior of cracks was similar for the specimens of the same thickness. As shown in Figure 5, prisms with 15 mm thickness have the flexural failure. Increasing the thickness of the SIFCON layer turns the cracks to a diagonal, flat, and discontinues, which indicates shear deficiency (13). SIFCON increases the flexural load capacity therefore the failure of prisms turns to the shear failure.

#### 3.2.2. Top and bottom SIFCON layers

All specimens, in this case, fail in a ductile manner. Flexural cracks are developed in the prisms midspan widened, and extended from the bottom to the compression zone of the prism, under increasing load. Figure 6 shows the failure mode of top and bottom SIFCON



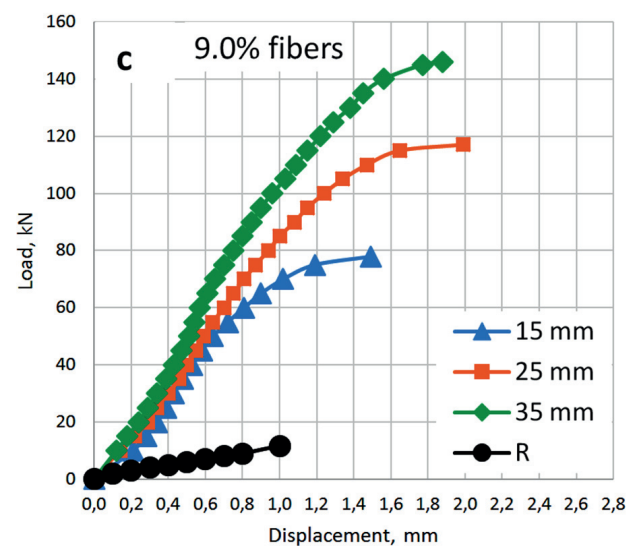
stwy SIFCON-u sprawia, że pęknięcia stają się ukośne, płaskie i znikają, co wskazuje na niedostatecznie dużą wytrzymałość na ścinanie (13). SIFCON zwiększa wytrzymałość na zginanie, dlatego zniszczenie beleczek zmienia się w zniszczenie przez ścinanie.

### 3.2.2. Górna i dolna warstwa SIFCON

Wszystkie próbki, w tym przypadku, ulegają zniszczeniu plastycznemu. Pęknięcia powstają w połowie długości belek wskutek zginania i rozciągają się od dołu do strefy ściskania belki. Rysunek 6 przedstawia sposób zniszczenia próbek z górną i dolną warstwą SIFCON. Plastikny sposób niszczenia może zapobiec nagłemu zniszczeniu i dać więcej czasu w przypadku konieczności ewakuacji z zagrożonego budynku.

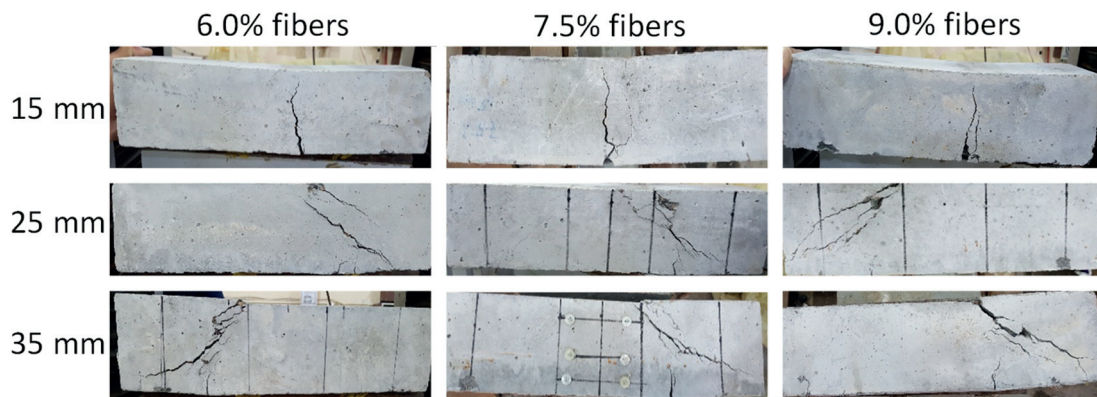
### 3.2.3. Belki z płaszczem SIFCON

Rysunek 7 przedstawia układ pęknięć beleczek wzmocnionych płaszczem SIFCON. Wystąpiło opóźnienie w powstawaniu pęknięć i szczelin. Propagacja pęknięć wskutek zginania od strefy rozciąganej była powolna, ze względu na efekt mostkowania w płaszczu SIFCON. Zmniejszenie odkształcalności i opóźnienie powstawania



Rys. 4. Krzywe obciążenie-ugięcie dla beleczek betonowych wzmocnionych dolną i górną warstwą SIFCON, o różnym udziale objętościowym włókien

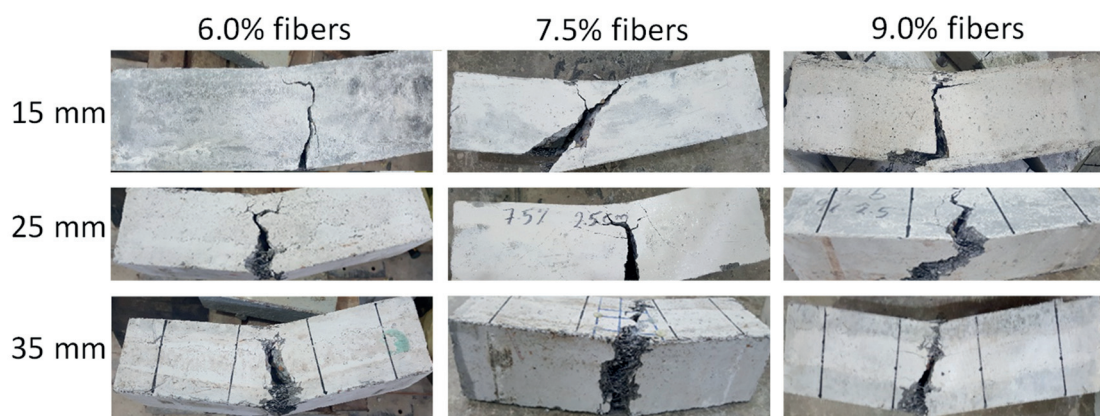
Fig. 4. Load-deflection curves for concrete prisms strengthened using bottom and top layers of SIFCON, containing different volumetric dosages of fibers



Rys. 5. Obrazy pęknięć belek betonowych wzmocnionych dolną warstwą SIFCON

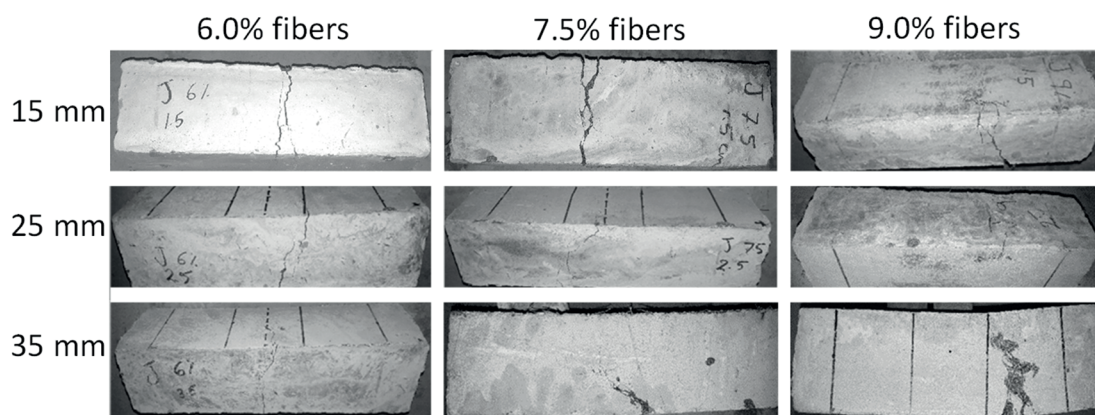
Fig. 5. Crack patterns of concrete beams enforced with a bottom layer of SIFCON





Rys. 6. Obrazy zniszczenia belek betonowych wzmocnionych górną i dolną warstwą SIFCON

Fig. 6. Crack patterns of concrete beams enforced with a top and bottom layers of SIFCON



Rys. 7. Obrazy pęknięć belek betonowych wzmocnionych płaszczem z SIFCON-u

Fig. 7. Crack patterns of concrete beams enforced by jacketing with SIFCON

pęknięć i szczelin może poprawić trwałość elementu konstrukcyjnego (14). Ponadto, zachowanie to prowadzi do zwiększenia sztywności i poprawy przydatności do użycia.

### 3.3. Wytrzymałość

Wytrzymałość obliczono na podstawie krzywej obciążenie-ugięcie, aż do obciążenia niszczącego (15). Pola pod krzywymi obciążenie-ugięcie pokazano w tabelicy 5. W każdym przypadku wytrzymałość poprawia się wraz ze zwiększaniem udziału objętościowego włókien stalowych i grubości warstw SIFCON. Maksymalna wytrzymałość osiągnięta w przypadku wzmocnienia górą i dołem była około 33 razy większa niż w przypadku belki betonu zwykłego. Zwiększenie udziału objętościowego włókien stalowych wzmacnia efekt mostkowania włókien, a tym samym poprawia właściwości elementu hybrydowego (11). Ogólnie rzecz biorąc, pod wpływem przyłożonych obciążeń w zwykłym betonie następuje szybka propagacja mikropęknięć. W SIFCON, zawarte w nim włókna stalowe zatrzymują propagację mikropęknięć, dzięki czemu zwiększa się wytrzymałość materiału. Jeśli chodzi o odporność na pęknięcie przy zginaniu, zwykły beton wykazuje kruche pęknięcie, bezpośrednio po przekroczeniu maksymalnego obciążenia. Z drugiej strony, SIFCON utrzymuje obciążenie nawet przy większym ugięciu niż ugięcie, przy którym pęka beton zwykły. Badanie pękniętych ele-

layers specimens. This case can prevent sudden failure and give more time to save lives.

#### 3.2.3. Jacketing with SIFCON layer

Figure 7 shows the crack patterns of prisms, strengthened by jacketing with SIFCON. There was a delay in the figuration of cracks and opening. The growth of flexural cracks from the tension face was slow, due to the effect of SIFCON bridging along the jacketing hybrid section. The deformability reduction and delay in the formation of crack and opening, can improve the durability of the structural element (14). Also, this behavior leads to increased stiffness and enhancement of the serviceability.

### 3.3. Toughness

The toughness was calculated from the load-deflection curve up to the ultimate load (15). The areas under the load-deflection curves are shown in Table 5. For each case of strengthening the toughness is improved with the increase of both steel fibers volume fraction and the thickness of the SIFCON layers. The maximum toughness achieved in the top and bottom hybrid section case, which was approximately 33 times higher than for the plain concrete. The increasing of steel fibers volume fraction enhances the bridging

Tablica 5 / Table 5

## WYTRZYMAŁOŚĆ I PLASTYCZNOŚĆ BELEK

## TOUGHNESS AND DUCTILITY OF THE BEAMS

Próbka wzorcowa Reference sample	Wytrzymałość Toughness = 5.68 kN.mm				Współczynnik plastyczności Ductility factor = 0	
Grubość warstwy Layer thickness, mm	Dół / Bottom		Góra i dół / Top & Bottom		Płaszcz / Jacketing	
	Wytrzymałość Toughness, kN.mm	Współczynnik plastyczności Ductility factor, -	Wytrzymałość Toughness, kN.mm	Współczynnik plastyczności Ductility factor, -	Wytrzymałość Toughness, kN.mm	Współczynnik plastyczności Ductility factor, -
	6 % włókien stalowych / 6 % of steel fiber					
15	20.4	1.09	17.9	1.15	26.0	1.31
25	43.0	1.34	57.7	1.28	44.3	1.48
35	50.4	1.57	114.4	1.46	69.9	2.26
	7,5 % włókien stalowych / 7.5 % of steel fiber					
15	34.0	1.35	32.0	1.22	38.2	1.63
25	48.1	1.45	122.4	1.35	66.6	2.10
35	67.8	1.62	146.1	1.44	92.9	2.42
	9 % włókien stalowych / 9 % of steel fiber					
15	41.0	1.30	39.1	1.32	44.0	2.23
25	79.3	1.44	118.5	1.57	85.6	2.36
35	79.6	1.48	190.8	1.71	109.1	2.54

mentów hybrydowych pokazuje, że uszkodzenie warstw SIFCON przebiega raczej na skutek wyciągania włókien lub odspojenia, niż ich zerwania. Dlatego też, w przeciwieństwie do zwykłego betonu, próbki elementów hybrydowych nie pękają natychmiast po powstaniu pierwszej rysy. Ma to wpływ na zwiększenie wytrzymałości (16). Dla każdego udziału objętościowego włókien stalowych, wytrzymałość próbek o grubości warstwy 15 mm dla jednej – dolnej warstwy jest stosunkowo wyższa niż dla dwóch – górnej i dolnej warstwy. Może to być spowodowane małą grubością warstwy wierzchniej, która nie jest w stanie wytrzymać obciążenia i pęka, w miarę jak dochodzi do zarysowania. Tak więc zachowanie się próbek z jedną warstwą – dolną i dwoma warstwami – górną i dolną jest stosunkowo podobne przy małej grubości warstwy.

Duża wytrzymałość sprawia, że takie elementy hybrydowe są odpowiednio do zastosowań obejmujących obciążenia wybuchowe, udarowe i sejsmiczne.

### 3.4. Plastyczność

Współczynnik plastyczności to stosunek maksymalnego ugięcia przy dowolnym poziomie obciążenia, do ugięcia przy pierwszym pęknięciu (17). Jak pokazano w tablicy 5, plastyczność próbek z jedną dolną i dwiema - górną i dolną warstwą SIFCON była zbliżona. Najlepsze wyniki uzyskano w przypadku płaszcz [trzy warstwy] – aż do 2,54. Ogólnie rzecz biorąc, plastyczność wzrosła wraz ze zwiększaniem się powierzchni SIFCON, w przekroju poprzecznym belek hybrydowych. Losowo zorientowane włókna przecinające pęknięty element wstrzymały propagację pęknięć i rozdzielenie elementu dzięki czemu wzrosła plastyczność elementu hybrydowego. Przy zwiększonej wytrzymałości, dobra plastyczność może zapewnić belce znacznie większe szanse

effect of fibers and thus improves the properties of the hybrid section (11). Generally, there is a quick propagation of microcracks under applied loads in normal concrete. In SIFCON, the steel fibers included in it, would arrest the propagation of microcracks so, the strength of the material is increasing. Regarding toughness, normal plain concrete defeat suddenly when the maximum load was exceeded. On the other hand, SIFCON keeps on supporting loads even at the higher deflection, than the fracture deflection of normal concrete. Examination of broken hybrid section samples shows that failure of SIFCON layers takes place because of fibers pull out or the debonding, rather than fiber breaking. Therefore, unlike normal plain concrete, hybrid section specimens do not break immediately, after the formation of the first crack. This has the effect of improving the toughness (16). For all steel fibers contents, the toughness of samples with 15 mm layer thickness for one – bottom layer is relatively higher than for two – top and bottom layers. This may be attributed to small thickness of a layer on the top, which cannot sustain the load and break as the crack reached it. So, the behavior of samples of one – bottom and two – top and bottom are relatively similar, at small layer thickness.

The high toughness makes these hybrid sections suitable material for application involving blast, impact, and seismic loading.

### 3.4. Ductility

The ductility factor is the ratio of maximum deflection at any load level to the first yield deflection (17). As shown in Table 5 the ductility of samples with one bottom, and two – top and bottom layers of SIFCON were converging. The best results were obtained in the jacketing [three layers] case with ductility up to 2.54. Generally, the ductility increased as the SIFCON area increased

na przetrwanie, gdy jest ona przeciążona, narażona na działanie silnego trzęsienia ziemi lub przypadkowego uderzenia (18).

#### 4. Wnioski

1. Fibrobeton SIFCON może być stosowany w elementach hybrydowych z betonu zwykłego w różnym położeniu w obrębie elementu, w celu poprawy właściwości tego elementu.
2. Maksymalną wytrzymałość na zginanie dla wzmocnionej belki można osiągnąć w przypadku trzech warstw tworzących płaszczyzn wokół belki. W przypadku 9% udziału objętościowego włókien stalowych, wartości te wynoszą odpowiednio 565%, 901% i 1149% belki odniesienia, odpowiednio dla grubości warstw wynoszących 15 mm, 25 mm i 35 mm.
3. Największą wytrzymałość uzyskano dla elementów hybrydowych wzmocnianych górną i dolną. Jest to odpowiednio 1915%, 2396% i 3259% wartości belki wzorcowej odpowiednio przy 6%, 7,5% i 9% zawartości włókien stalowych.
4. Wielkość przenoszenia obciążenia, wytrzymałość i plastyczność elementu hybrydowego zwiększają się wraz ze wzrostem udziału objętościowego włókien stalowych i grubości warstwy SIFCON.
5. Plastyczność elementów hybrydowych z SIFCON i betonu zwykłego wzrasta znacznie w porównaniu z belkami wzorcowymi. Najlepszą plastyczność uzyskano w przypadku zastosowania płaszczyzny - około 2,54 dla 35 mm warstwy SIFCON i 9% udziału włókien stalowych.
6. Żadna z badanych hybrydowych belek nie wykazała przedwczesnego zniszczenia kruchej.

#### Literatura / References

1. A.E. Naaman and J.R. Homrich, Tensile stress-strain properties of SIFCON, ACI Mater. J. 86, 244-251(1989)
2. L.C. Hollaway, M.B. Leeming, Strengthening of reinforced concrete structures using Externally-bonded FRP composites in structural and civil engineering. CRC Press, England, 1999.
3. A.E. Naaman, H.W. Reinhardt, High performance fiber reinforced cement composites 2, London Press, 1995.
4. S. Balaji, G. S. Thirugnanam, Behaviour of Reinforced Concrete Beams with SIFCON at Various Locations in the Beam, KSCE J. Civil Eng. 22, 161-166 (2018).
5. C. Koya, Retrofitting of RC Beams with Externally Bonded Laminates- A Comparative Study, Int. J. Innovative Res. Sci. Eng. Technol. 6, 74-79 (2017).
6. K. Parthiban, K. Saravanaramohan, G. Kavimukilan, Flexural behavior of slurry infiltrated fibrous concrete (SIFCON) composite beams, Asian J. Appl. Sci. 4, 232-239 (2014).
7. S.M. Jayashre, R. Rakul Bharatwaj, M. Helen Santhi, Flexural Behavior of SIFCON Beams, Int. J. Eng. Res. Technol. 2, 1-6 (2013).
8. C. Lin, O. Kayali, E. Morozov, D. Sharp, Integrated Plain and Slurry Infiltrated Fibre Concrete (Ip-Sifcon) Composite Beams, 16<sup>th</sup> Int. Conference on Composite Structures, 2011.

in the cross-section of the hybrid prisms. The randomly oriented fibers crossing the cracked section resisted the propagation of cracks and separation of the section and therefore the ductility of the hybrid section was improved. As the toughness enhancement, a good ductility would provide the beam with a much better chance of survival when it is overloaded, subjected to attack by a severe earthquake or accidental impact (18).

#### 4. Conclusions

1. SIFCON can be used in a hybrid section with normal concrete in different locations of a section to improve a specified property of this section.
2. The maximum ultimate flexural load for the strengthened beam can be achieved in the jacketing case. For 9% addition of the steel fibers, the values are 565%, 901%, and 1149 % of reference prism for 15 mm, 25 mm, and 35 mm thickness respectively.
3. The best result for toughness was obtained in the case of the top and bottom hybrid section. They are 1915, 2396, and 3259% of control prism for 6%, 7.5%, and 9% steel fibers content respectively.
4. The load-carrying capacity, toughness, and ductility of the hybrid section increase with increasing steel fibers volume percent and the thickness of the SIFCON layer.
5. The ductility of SIFCON and normal concrete hybrid section increase significantly, compared to the reference prisms. The best ductility results could be achieved in the jacketing case which is about 2.54 for 35 mm SIFCON layer and 9% steel fibers.
6. All hybrid prisms show no premature brittle failure.

9. ACI Committee 211.1, "Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete", ACI Manual of Concrete Practice, part 1, pp.1-25, 2002.
10. British Standard Institution "BS EN 12390-5: Testing hardened concrete. Flexural strength of test specimens. " British Standard" (2009).
11. M. Abdul Rahim, Z. Ghazaly, R. Santiago, S. Shahidan, The Behaviours Of Steel Fiber as Main Reinforcement In High Performance Slurry Infiltrated Fiber Reinforced Concrete, Key Eng. Mater. 594-595, 34-38, (2014).
12. B. Taranath, Structural Analysis and Design of Tall Buildings: Steel and Composite Construction, Taylor and Francis, New York, NY, 2012.
13. K. Parthiban, K. Saravanarajamohan, G. Kavimukilan, Flexural Behaviour of Slurry Infiltrated Fibrous Concrete (SIFCON) Composite Beams, Asian J. Appl. Sci. 7, 232-239, (2014).
14. G. Martinola, A. Meda, G. Plizzari, Z. Rinaldi, Strengthening and repair of RC beams with fiber reinforced concrete, Cem. Concr. Comp. 32, 731-739, (2010).
15. JCI Standards for Test Method of Fiber Reinforced Concrete: Method of test for flexural strength and flexural toughness of fiber reinforced concrete, Japan Concrete Inst., Japan, 45-51, 1983.
16. A. Gilani, Various Durability Aspects Of Slurry Infiltrated Fiber Concrete, PhD thesis in civil engineering, Middle East Technical University, Ankara, Turkey, 2007.
17. R. Park, Ductility evaluation from laboratory and analytical testing, 9<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo, 605-616, 1988.
18. A. K. H. Kwan, J. C. M. Ho, H. J. Pam, Flexural strength and ductility of reinforced concrete beam, Struct. Build. 152, 361-369 (2002)