

## Badanie wpływu strefy ścinania i rozstawu strzemion na wytrzymałość belek z drutobetonu

### A study on the influence of $a/d$ ratio and stirrup spacing on shear behaviour of Steel Fiber Reinforced SCC

**Słowa kluczowe:** samozagęszczający się beton, wytrzymałość na ścinanie, zniszczenie tnące, zniszczenie giętno-tnące, sztywność

**Key words:** SCC, ultimate shear strength, shear failure, flexural-shear failure, stiffness

#### 1. Wstęp

Samozagęszczający się beton (SCC) został po raz pierwszy zastosowany w 1988 roku przez Okamura i Ouchi w 1999 r. Beton ten, z powodu dużej urabialności i trwałości, może być zaliczony do betonów wysokiej wytrzymałości. Kiedy naprężenie główne w belce żelbetowej przekracza wytrzymałość na rozciąganie w strefie ścinania betonu, pojawiają się ukośne zarysowania prowadzące do zniszczenia przez ścinanie, (1). Zniszczenie tnące jest nagłe i typu kruchego. Drutobeton jako materiał kompozytowy charakteryzuje się polepszonymi własnościami przy zarysowaniu z powodu zdolności włókien do przenoszenia sił w poprzek powierzchni zarysowania (2). Włókna stalowe używane są do polepszenia nośności na ścinanie betonu, częściowo zastępując strzemiona w elementach żelbetowych. Zmniejsza to zagęszczenie zbrojenia w krytycznych przekrojach, takich jak połączenia belek ze słupami (3, 4). Dodatek włókien stalowych w belce żelbetowej może podwyższyć jej wytrzymałość na ścinanie i, jeśli dodatek włókien jest wystarczający, zniszczenie typu kruchego może zastąpić zniszczenie plastyczne z równoczesną redukcją rozwartości rys (5). W ten sposób własności mechaniczne po zarysowaniu kruchych betonów wysokiej wytrzymałości mogą być polepszone (6).

Głównymi parametrami, jakie wpływają na wytrzymałość na ścinanie żelbetowej belki są: proporcja długości ścinania do efektywnej wysokości przekroju ( $a/d$ ), wytrzymałość na ściskanie betonu ( $f_c$ ), zbrojenie podłużne na rozciąganie i rozstaw strzemion ( $S_y$ ). Dla drutobetonu znaczenie mają ponadto takie parametry jak objętościowy udział włókien ( $V_f$ ) oraz rodzaj użytych włókien. Ich materiał i kształt również wpływają na odporność na ścinanie (7). Użycie włókien w SCC jest jednak ograniczone głównie przez niezbędną urabialność materiału (8).

Samozagęszczający się beton zbrojony włóknami (SFSCC) łączy zalety samozagęszczającego się betonu (SCC) i betonu zbrojone-

#### 1. Introduction

Self-Compacting Concrete (SCC) was first developed in 1988 by Okamura and Ouchi, 1999 and SCC can also be classified into High Performance Concrete (HPC) due to the high workability and durability. Generally, diagonal cracks in a Reinforced Concrete (RC) beam occurs when the principal tensile stress of concrete exceeds the tensile strength of concrete within the shear span causing shear failure (1). Of all the different types of failure in concrete, shear failure is a sudden and brittle failure. Steel Fiber Reinforced Concrete (SFRC) is a composite material that is characterized by enhanced post-cracking behavior due to the capacity of fibers, if they are present in sufficient amount, to bridge the crack faces (2). Steel fibers are used to increase the shear capacity of concrete and to partially replace the lateral ties (stirrups) in RC structural members. This relieves reinforcement congestion at critical sections such as beam-column junctions (3, 4). The addition of steel fibers to an RC beam can increase its shear strength, and if sufficient amount of steel fibers are added a brittle shear failure can be modified to a ductile behavior, also with reduced crack widths (5). The post-crack performance of brittle high strength concretes can be improved (6).

The principal parameters that influence shear behavior of reinforced concrete beam are: shear span-to effective depth ratio ( $a/d$ ), concrete compressive strength ( $f_c$ ), longitudinal tensile reinforcement ( $I_l$ ) and spacing of stirrups ( $S_y$ ). When fibers are also included, parameters like fiber volume fraction ( $V_f$ ) or fiber type (material, dimensions, shape, etc.), also affect the shear performance (7). However, the fibre content to be used in SCC is mainly restricted by the workability properties (8).

SFRSCC combines the advantages of both SCC and FRC. However, research work on the study of SFRSCC beams; especially on the shear behavior of SFSCC is limited. This paper presents the

go włóknami (SFC). Mimo to, badania nad tym materiałem, zwłaszcza nad jego wytrzymałością na ścinanie, są nieliczne. Niniejsza praca przedstawia wyniki badań ścinania dla belek z drutobetonu. Podstawowym celem badań jest zrozumienie mechanizmu ścinania dla różnych proporcji a/d i różnych rozstawów strzemion, zarówno dla betonów średnio jak i wysoko wytrzymałych. Badania mają określić ilościowo wpływ dodatku włókien i rozstawu strzemion na własności mechaniczne belek z SFSCC.

## 2. Istotność badań

Samozagęszczający się beton jest betonem o wysokim stopniu urabialności, nie wymagającym żadnego dodatkowego zagęszczenia w trakcie betonowania. Zwykły beton jest uważany za kruchy materiał o bardzo małej wytrzymałości na rozciąganie i niewielkiej nośności na ścinanie. Zniszczenia na ścinanie żelbetu przebiega nagle, w sposób kruchy. Dodatek włókien stalowych do mieszanki betonu, poprawia plastyczność i nośność materiału, polepszając tym samym nośność na ścinanie. Druty stalowe tworzą dodatkowe połączenia zarysowanych powierzchni i redukują propagację zarysowania. Eliminuje to możliwość nagłego zniszczenia betonu i zwiększa wytrzymałość na ścinanie. Trudno jest jednak dokładnie przewidzieć wzrost tej wytrzymałości z uwagi na złożony mechanizm współdziałania drutu stalowego ze złożoną strukturą betonu. Model prognozujący wytrzymałość na ścinanie SFSCC potrzebny jest projektantom do zastosowania w przypadkach, gdy ścinanie jest dominujące. Prace na ten temat są nieliczne. Dostępne w literaturze modele dla wibrobetonu wymagają uzupełnienia o podobne badania dla samozagęszczającego się betonu.

## 3. Użyte materiały i metody

**3.1.1. Cement:** Użyto zwykłego cementu portlandzkiego klasy 53 zgodnie z normą hinduską 12269 (9). Ciężar właściwy cementu wynosił 2,94, powierzchnia właściwa 225 m<sup>2</sup>/kg a czasy początkowe i końcowe wiązania wynosiły odpowiednio 45 min i 560 min.

**3.1.2. Popioły lotne:** W badaniach użyto popiołów lotnych z elektrociepłowni Ramagundam (NTPC) z sita 90 μm zgodnie z normą hinduską 3812:1981 (10). Ciężar właściwy wynosił 2,2 a powierzchnia właściwa 450 m<sup>2</sup>/kg. Popioły zawierały 63,99% krzemionki oraz 92,7% tlenków żelaza, glinu i krzemu. Wartość pH wynosiła 10, a strata spalania 2.12.

**3.1.3. Drobne kruszywo (FA):** W badaniach użyto drobnego kruszywa rzecznoego zgodnie ze strefą 2 normy hinduskiej 383 (11), o ciężarze właściwym 2,65 i gęstości objętościowej 1,45 g/cm<sup>3</sup>.

**3.1.4. Grube kruszywo (CA):** Użyto kruszywa granitowego o wymiarze nominalnym 20 mm, pochodzącego z lokalnej wytwórni kruszywa, spełniającego wymogi normy hinduskiej 383 (11), o ciężarze właściwym 2,8 i gęstości objętościowej 1,5 g/cm<sup>3</sup>.

**3.1.5. Woda:** Użyto wody pitnej, zarówno do mieszanki zarobowej jak i do pielęgnacji próbek.

results of an experimental study conducted on the shear behavior of steel fibre reinforced SCC beams. The main objective of this study is to understand the shear behavior of SFRSCC for different a/d ratios and for different stirrups spacing for one medium and one high grade concretes. The hybrid effect of steel fibers and stirrups on the mechanical behavior of SCC beams is brought out.

## 2. Research significance

Self-Compacting Concrete (SCC) is a highly flowable and viscous concrete which does not require any external compaction during casting and placing. Generally, concrete is considered as brittle material with a very low tensile strength and shear capacity. The shear failure in reinforced concrete is sudden and occurs without any notice. The addition of steel fibers to concrete mix, enhances the ductility and toughness and thus increases the shear capacity. Steel fibers help to bridge the cracks and reduce the crack propagation. This eliminates the possibility of sudden failure in concrete and also increases the shear strength. However, it is difficult to accurately predict the increase in shear strength as the interaction between the steel fibers and the concrete mix is complex. The development of an accurate model for predicting the shear strength of SFRSCC is needed to enable designers to use this for building applications where shear becomes dominant. The work available in the literature for predicting the shear behaviour of SCC/SFRSCC is scant and the available models in the literature on vibrated concretes needs to be complemented/supplemented for SCC based on experimental work.

## 3. Materials used and methods

**3.1.1. Cement:** Cement used in the study was 53 Grade Ordinary Portland cement conforming to IS: 12269 (9). The specific gravity of cement was 2.94, the specific surface area was 225 m<sup>2</sup>/g and the initial and final setting times were 45 min and 560 min respectively.

**3.1.2. Fly ash:** The fly ash used in the experiments was obtained from Ramagundam thermal power station (NTPC) was sieved by 90 micron sieve and confirmed to IS 3812:1981 (10). The specific gravity was 2.2 and specific surface area of 450 m<sup>2</sup>/g. The fly ash had a silica content of 63.99%, silica+ alumina +iron oxide content of 92.7%, pH value was 10 and the loss on ignition was 2.12.

**3.1.3. Fine aggregate (FA):** The fine aggregate used in the present study was conforming to Zone-2 according to IS: 383 (11). It was obtained from a nearby river source. The specific gravity was 2.65, while the bulk density of sand was 1.45 gram/c.c.

**3.1.4. Coarse aggregate (CA):** Crushed granite was used as coarse aggregate. Coarse aggregates of 20 mm nominal size was obtained from a local crushing unit which was well graded aggregate according to IS: 383 (11). The specific gravity was 2.8, while the bulk density was 1.5 gram/c.c.

**3.1.5. Water:** Potable water was used in the experimental work for both mixing and curing of specimens.

**3.1.6. Pył krzemionkowy (12):** Amorficzny (nie-krystaliczny) polimorficzny dwutlenek krzemu, krzemionka, to bardzo drobnopowierzchnisty proszek, otrzymywany jako produkt uboczny produkcji krzemu i żelazo-krzemnu w postaci kulistych cząstek o przeciętnej średnicy 150 nm. Pył krzemionkowy to bardzo drobny materiał złożony z kulistych cząstek o średnicy mniejszej niż 1  $\mu\text{m}$  przy średniej ok. 0.15  $\mu\text{m}$ . Jest to około sto razy mniej niż wymiar przeciętnej cząstki cementu. Gęstość objętościowa wahała się w granicach od 130 do 600  $\text{kg/m}^3$ . Ciężar właściwy był w granicach od 2,2 do 2,3 a powierzchnia właściwa od 15000 do 30000  $\text{m}^2/\text{kg}$ .

**3.1.7. Superplastyfikator (SP):** Bardzo wydajny dodatek redukujący ilość wody zarobowej (HRWR) zgodny z normą ASTM C494 (13), powszechnie zwany superplastyfikatorem, został użyty do polepszenia lepkości i urabialności mieszanki o obniżonym stosunku w/c, bez wpływu na wytrzymałość materiału na ściskanie. Wspomniane dodatki, wymieszane z kruszywem, znacznie obniżają lepkość, tworząc cienką warstewkę wokół cząstek cementu. W badaniach zastosowano dodatek CHRYSO FLUID OPTIMA P-77 (na bazie polikarboksyłowego eteru) otrzymany z Chryso Chemicals, Indie.

**3.1.8. Drut stalowy (14):** Użyto karbowanego drutu (z APEX ENCON PROJECTS PVT.LTD, New Delhi, Indie) o średnicy nominalnej 0.5 mm i długości 30 mm. Wytrzymałość na rozciąganie i moduł sprężystości wynosiły odpowiednio 850 MPa and 210 GPa.

**3.1.9. Zbrojenie rozciągane:** Jako zbrojenia na rozciąganie użyto prętów zbrojeniowych o średnicach 12 i 16 mm ze stali Fe 500 zgodnie z normą hinduską 1786 (15), o granicy plastyczności  $F_y = 500 \text{ MPa}$  i długości 1160 mm. Na strzemiona i górne zbrojenie ścisane użyto prętów z miękkiej stali o średnicy 6 mm i granicy plastyczności  $F_y = 290 \text{ MPa}$ .

## 3.2. Program badań

W badaniach użyto 16 belek o obniżonej nośności na ścinanie, wykonanych z samozagęszczającego się betonu klasy M30 i M70 (liczby oznaczają wytrzymałość na ściskanie). Wytrzymałość na ściskanie betonów zweryfikowano na standardowych próbkach sześciennych o wymiarze 150 mm. Wytrzymałość na rozłupywanie określono na standardowych próbkach walcowych 150  $\times$   $\varnothing$  300 mm. Wytrzymałość na zginanie określono na próbkach 100  $\times$  100  $\times$  500 mm. Do badań zastosowano drutobeton o zawartości włókien 0,5% objętości betonu; jest to wartość optymalna z uwagi na urabialność drutobetonu i jego wytrzymałość (16). Wymiary belek użytych w badaniach ustalono na 100  $\times$  100  $\times$  1200 mm z rozpiętością przęsła 1100 mm. Wszystkie belki poddano trójpunktowemu obciążeniu. Tablica 1 przedstawia szczegóły belek o różnych proporcjach a/d, rozstawie strzemion i objętościowym udziale włókien stalowych.

### 3.2.1. Zbrojenie

Szczegóły wymiarów belek i ich zbrojenia dla proporcji a/d równej 2 i 2.5, betonów klasy M30 i M70 oraz dwu różnych rozstawów strzemion pokazano na rysunkach 1-4. W próbkach z betonu M30 użyto

**3.1.6. Silica Fume (12):** It is an amorphous (non-crystalline) polymorph of silicon dioxide, silica. It is an ultrafine powder collected as a by-product of the silicon and ferrosilicon alloy production and consists of spherical particles with an average particle diameter of 150 nm. Micro Silica or silica fume is an ultrafine material with spherical particles less than 1  $\mu\text{m}$  in diameter, the average being about 0.15  $\mu\text{m}$ . This makes it approximately 100 times smaller than the average cement particle. The bulk density varied from 130 to 600  $\text{kg/m}^3$ . The specific gravity of silica fume was generally in the range of 2.2 to 2.3. Specific surface area of silica fume typically ranged from 15 000 to 30 000  $\text{m}^2/\text{kg}$ .

**3.1.7. Super plasticizer (SP):** High Range Water Reducing (HRWR) admixture conforming to ASTM C494 (13) commonly called as super plasticizers was used for improving the flow or workability for decreased water-cement ratio without sacrifice in the compressive strength. These admixtures, when they disperse in cement agglomerates significantly, decrease viscosity of the paste forming a thin film around the cement particles. In the present investigation, water-reducing admixture CHRYSO FLUID OPTIMA P-77 (poly carboxylic ether based) obtained from Chryso Chemicals, India was used.

**3.1.8. Steel fiber (14):** Crimped Steel fiber (from APEX ENCON PROJECTS PVT.LTD, New Delhi, India) with nominal diameter of the fiber 0.5 mm and cut length 30 mm with aspect ratio of 60 were used. The Tensile strength and modulus of elasticity of this fiber is 850 MPa and 210 GPa.

**3.1.9. Tension reinforcement:** TMT bars of diameter 12 mm  $\varnothing$  16 mm and grade Fe 500 conforming to IS: 1786 (15) whose yield strength  $F_y = 500 \text{ N/mm}^2$  of length 1160 mm were used as tension reinforcement and  $\varnothing$  6 mild steel bars whose yield strength  $F_y = 290 \text{ MPa}$  was used as stirrups (shear reinforcement) and also for top compression reinforcement.

## 3.2. Experimental program

In the present study, a total of 16 shear deficient beams were designed and casted for two grades of SCC M30 and M70 (M30 and M70 indicates the characteristic strengths of concrete is 30 MPa and 70 MPa respectively). For compressive strength, standard cube moulds of 150 mm  $\times$  150 mm  $\times$  150 mm made of cast iron were used. For split tensile strength, standard cylinder moulds of 150 mm  $\times$   $\varnothing$  300 mm made of cast iron were used. For flexural strength 100  $\times$  100  $\times$  500 mm of standard prism moulds were used. In the present study dosage of steel fibers is take as 0.5% by volume of concrete, as it was found in the literature that 0.5% content of steel fibers is an optimum as far as the workability of the mixes and the strength of hardened concrete for self-compacting concrete is concerned (16). The dimensions of the beam were fixed as 100 $\times$ 200 $\times$ 1200 mm with a clear span of 1100 mm. All beams were tested under three-point loading. Table 1 shows the details of beams with different a/d ratio, spacing of stirrups and percentage of steel fiber per volume of concrete.

jako podłużnego zbrojenia rozciąganego dwu prętów  $\varnothing$  12 mm, na zbrojenie ściskane dwu prętów  $\varnothing$  6 mm z miękkiej stali oraz na strzemiona dwu prętów  $\varnothing$  6 mm. Podobnie, dla próbek z betonu M70 użyto prętów zbrojeniowych 2  $\varnothing$  16 i 1  $\varnothing$  12 na rozciąganie, 2  $\varnothing$  6 na ściskanie oraz 2  $\varnothing$  6 na strzemiona.

### 3.3. Skład mieszanki

Skład samozagęszczającego się betonu zaprojektowano metodą Rational Mix (17), tablica 2. Wykonano próbne mieszanki zmieniając dozowanie superplastyfikatora. Własności świeżego betonu oszacowano jako spełniające wymagania EFNARC (18).

### 3.4. Właściwości mieszanki betonu niezbrojonego i ze zbrojeniem włóknami stalowymi

Rysunek 5 przedstawia przeprowadzone badania urabialności betonu.

Szczegóły właściwości świeżego betonu M30 i M70, zbrojonego włóknami i niezbrojonego, pokazano w tab. 3. Przyjęto jako optimum 0,5% karbowanych stalowych włókien. Z danych w tablicy 3 widać, że dodatek włókien stalowych zmniejszył urabialność betonu, która mimo to odpowiadała wymogom EFNARC.

### 3.5. Własności samozagęszczającego się betonu niezbrojonego i z drutem stalowym

Szczegółowe własności betonu klasy M30 i M70 w wieku 28 dni, zbrojonego włóknami stalowymi i bez zbrojenia, przedstawiono w tablicy 4. Wszystkie pomiary wykonano zgodnie ze specyfikacjami normy indyjskiej 516 (19).

## 4. Wyniki badań i ich analiza

Na końcu wymaganego 28-dniowego okresu pielęgnacji, belki poddano pomiarom na maszynie Tinius Olsen (TOTM) z kontrolowaną prędkością obciążenia. Rejestrowano ugięcie belki w środku przęsła, obciążenie odpowiadające powstaniu zarysowania oraz maksymalne obciążenie uzyskiwane w próbie. Uzyskane wyniki przedstawiono w postaci wykresów obciążenie-przemieszczenie. Obliczono wytrzymałość na ścinanie oraz wytrzymałość i sztywność belek z betonów M30 i M70 zbrojonych włóknami i niezbrojonych. Tablice 5 i 6 przedstawiają wyznaczone wielkości dla różnych proporcji strefy ścinanej  $a/d = 2$  i  $2,5$ .

### 4.1. Wpływ rozstawu strzemion na nośność ścinania belek z drutobetonu

Z danych zamieszczonych w tablicach 5 i 6 wynika, że wraz ze wzrostem rozstawu strzemion nośność belki i wytrzymałość na ścinanie maleją. Ze wzrostem rozstawu strzemion z 180 mm do 360 mm dla proporcji  $a/d = 2$  wytrzymałość na ścinanie belki maleje o 10,27% przy braku włókien stalowych i o 15,49% dla belki z drutobetonu. Podobnie, gdy rozstaw strzemion rośnie z 225 mm do 450 mm dla  $a/d = 2,5$  wytrzymałość na ścinanie maleje o 15,6% gdy nie ma włókien stalowych i o 11,4% dla belki

Tabela 1 / Table 1

### WYMIARY BELEK

#### DETAILS OF THE BEAMS CAST

Oznaczenie Beam designation	a/d	Rozstaw strzemion Stirrups spacing mm	Zawartość włókien Fiber content kg/m <sup>3</sup>
SCC30-180	2	180	0
SCC30-360	2	360	0
SFSCC30-180	2	180	38
SFSCC30-360	2	360	38
SCC70-180	2	180	0
SCC70-360	2	360	0
SFSCC70-180	2	180	38
SFSCC70-360	2	360	38
SCC30-225	2.5	225	0
SCC30-450	2.5	450	0
SFSCC30-225	2.5	225	38
SFSCC30-450	2.5	450	38
SCC70-225	2.5	225	0
SCC70-450	2.5	450	0
SFSCC70-225	2.5	225	38
SFSCC70-450	2.5	450	38

### 3.2.1. Reinforcement details

The dimensions and typical reinforcement detail for both  $a/d$  ratios 2 and 2.5 and for both grades of SCC M30 & M70 are shown in Figs 1 to 4. The stirrups spacing was varied in the shear span, with two types of stirrups spacing for each of the  $a/d$  ratios. M30 grade SCC beams consist of 2  $\varnothing$  12 TMT bars as longitudinal reinforcement, 2  $\varnothing$  6 mild steel bars as top compression reinforcement and two legged  $\varnothing$  6 bar was used as stirrup reinforcement. Similarly, for M70 grade SCC beams 2  $\varnothing$  16 + 1  $\varnothing$  12 is the longitudinal reinforcement. 2  $\varnothing$  6 mild steel bars are used in compression and two legged  $\varnothing$  6 bar was used as stirrup reinforcement.

### 3.3. Mix proportions

Self-Compacting Concrete (SCC) mix was designed using Rational Mix design method (17). The details of mix proportions are presented in Table 2. Trial mixes were carried out by varying the super plasticizer dosage and binder content. The fresh properties were evaluated and were found to be satisfying the EFNARC specifications (18).

### 3.4. Fresh properties without and with steel fibers

Figure 5 shows the various tests conducted on workability of SCC.

The details of Fresh Properties for M30 and M70 grades SCC without and with steel fiber are shown in Table 3. 0.5% of crimped steel fibers is taken as the optimum content. It can be seen from Table 3 that, addition of steel fibers has reduced the flow properties but are satisfying the EFNARC specifications.

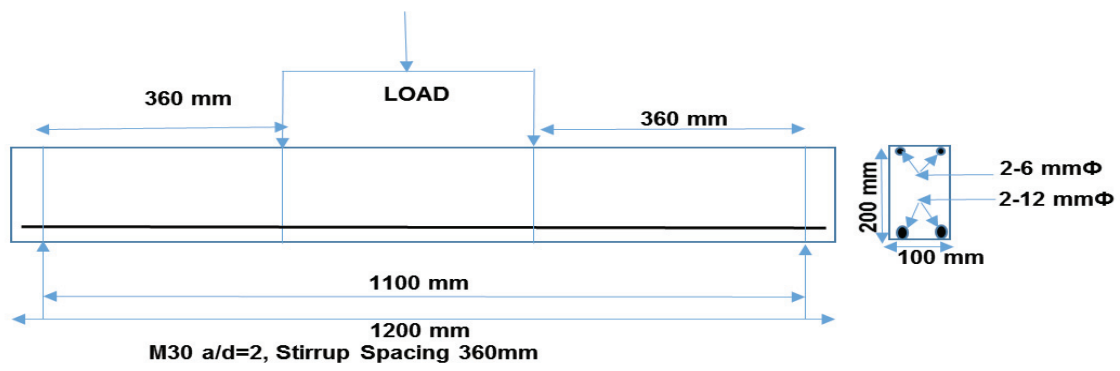


Fig. 1(a)

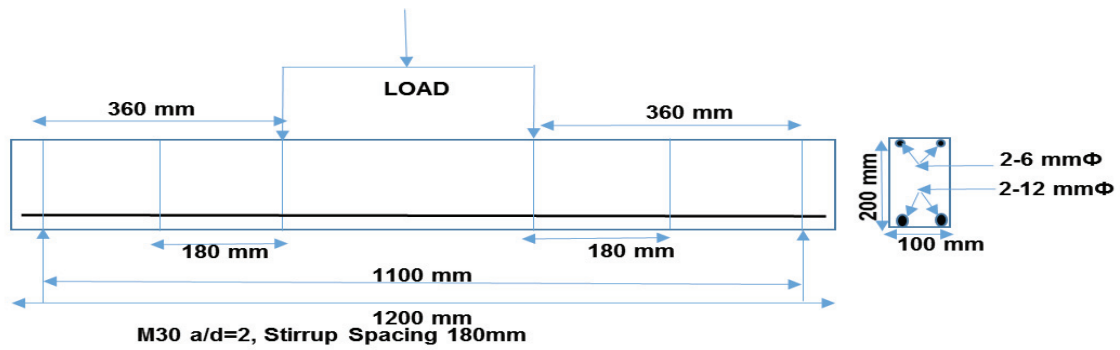


Fig. 1(b)

Rys. 1. Szczegóły zbrojenia betonu M30 dla  $a/d = 2$

Fig. 1. Details of reinforcement for M30 mix with  $a/d = 2$

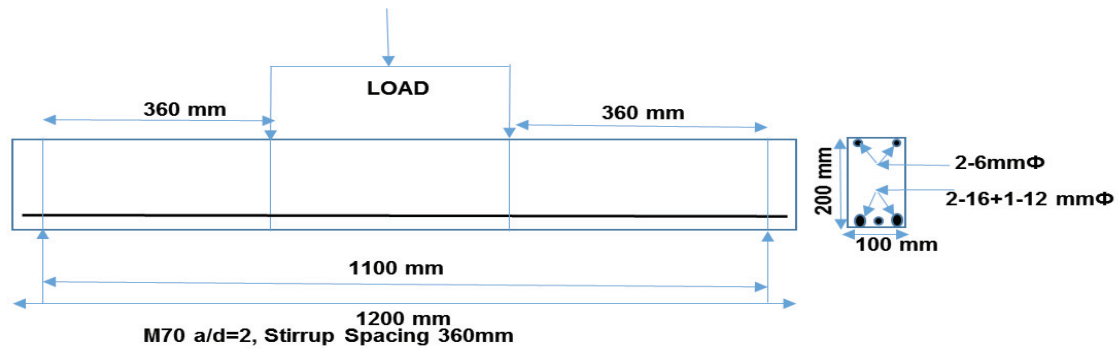


Fig. 2(a)

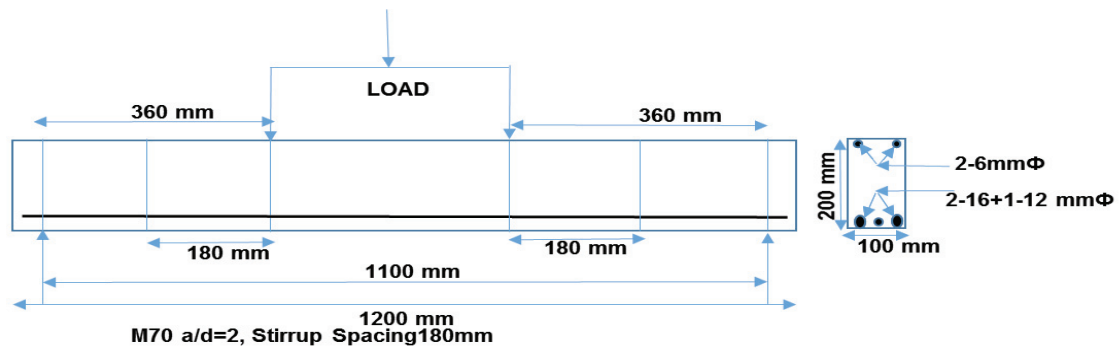


Fig. 2(b)

Rys. 2. Szczegóły zbrojenia betonu M70 dla  $a/d = 2$

Fig. 2. Details of reinforcement for M70 mix with  $a/d = 2$

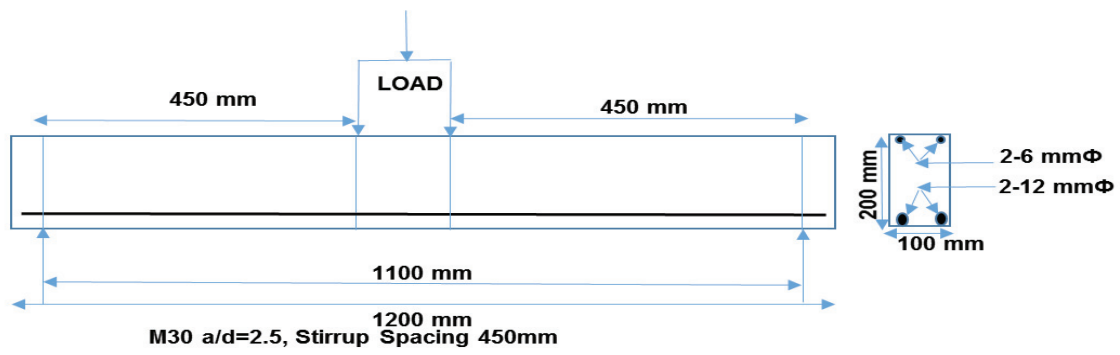


Fig. 3(a)

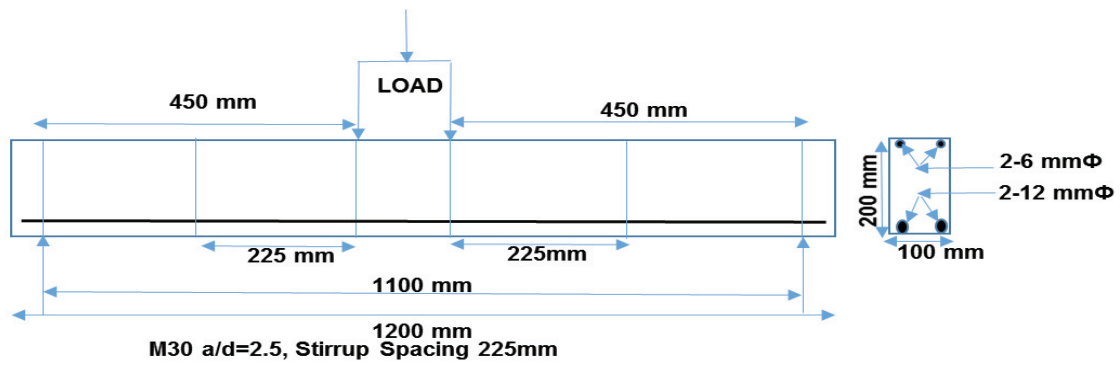


Fig. 3(b)

Rys. 3. Szczegóły zbrojenia betonu M30 dla  $a/d = 2,5$

Fig. 3. Details of reinforcement for M30 Mix with  $a/d = 2.5$

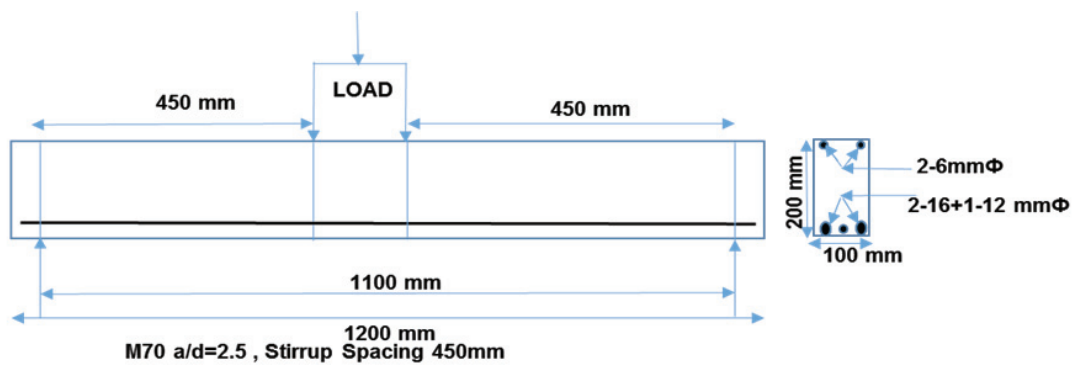


Fig. 4(a)

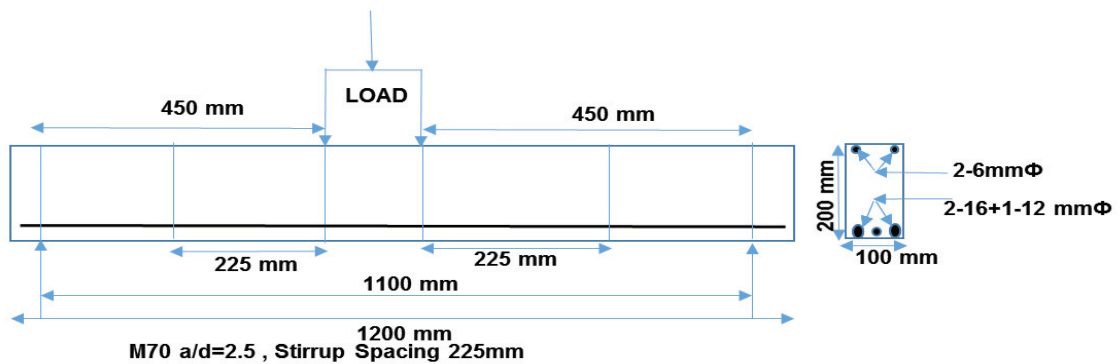


Fig. 4(b)

Rys. 4. Szczegóły zbrojenia betonu M70 dla  $a/d = 2,5$

Fig. 4. Details of reinforcement for M70 Mix with  $a/d = 2.5$



a) Slump flow

b) J-ring

c) V-funnel

Rys. 5. Badania urabialności SCC

Fig. 5. Tests on workability of SCC

Tablica 2 / Table 2

PROPORCJE SKŁADNIKÓW DLA BETONÓW M30 I M70

MIX PROPORTIONS OF M30 AND M70 GRADE SCC

Beton Mix	Cement kg/m <sup>3</sup>	Popioły lotne Fly ash kg/m <sup>3</sup>	Pył krzemionkowy Silica fume kg/m <sup>3</sup>	Kruszywo grube CA kg/m <sup>3</sup>	Kruszywo drobne FA kg/m <sup>3</sup>	Woda Water kg/m <sup>3</sup>	W/b	SP kg/m <sup>3</sup>
M30	350	324	0	746	945	203	0.30	5.73
M70	600	226	48	780	874	247	0.28	6.03

z drutobetonu klasy M30. Potwierdza to wniosek, że obecność włókien stalowych zwiększa wytrzymałość na ścinanie, niezależnie od rozstawu strzemion.

W przypadku betonu klasy M70, wraz ze wzrostem rozstawu strzemion ze 180 mm do 360 mm przy proporcji  $a/d = 2$ , wytrzymałość na ścinanie maleje o 23% dla betonu i o 15% dla drutobetonu. Dodatek włókien stalowych poprawia wytrzymałość na ścinanie pozwalając na zwiększenie rozstawu strzemion ze 180 mm do 360 mm przy proporcji  $a/d = 2$ . Podobnie, rozstaw strzemion może być zwiększony z 225 mm do 450 mm dla  $a/d = 2,5$  dla obu klas betonu samo-zagęszczającego się.

Rysunki 6 i 7 przedstawiają zmianę wytrzymałości na ścinanie przy zmieniającym się rozstawie strzemion dla obu klas betonu niezbrojonego i drutobetonu.

#### 4.2. Wpływ proporcji $a/d$ na nośność ścinania belki z różnym rozstawem strzemion

Z danych w tablicach 5 i 6 wynika, że gdy proporcja długości strefy ścinania do użytecznej wysokości przekroju ( $a/d$ ) rośnie, maleje zarówno nośność belki jak i jej wytrzymałość na ścinanie. Może to być przypisane większej strefie z naprężeniami rozciągania, powodującymi diagonalne zarysowania i w konsekwencji spadek nośności na ścinanie belki. Dodatek włókien stalowych poprawia plastyczność materiału zmieniając zniszczenie typu kruchego w zniszczenie

Tablica 3 / Table 3

WŁASNOŚCI MIESZANKI M30 I M70 ZBROJONEGO WŁÓKNAMI I BEZ ZBROJENIA  
FRESH PROPERTIES OF M30& M70 GRADE SCC WITH AND WITHOUT FIBER

Klasa betonu/Grade of Concrete	M30		M70		EFNARC 2005	
	0%	0.5%	0%	0.5%	Min.	Max.
Zawartość włókien/Dosage of Fibers						
Rozpływ stożka/Slump Test, mm	750	620	720	680	550	800
Rozpływy stożka/T <sub>50</sub> Slump flow, sec	3	6	2.5	4	2	6
Lejność/V funnel, sec	6	6.58	10.5	11.8	6	12
Lejność/V funnel @ T <sub>5</sub> min, sec	7.5	8.38	12	14	6	15
Pierścień/J-ring, sec	3	8	3	7	0	10

#### 3.5. Hardened properties of self compacting concrete without and with steel fiber

The details of hardened properties of M30 and M70 grades of SCC without and with steel fiber at the age of 28 days are shown in Table 4. All the tests were done as per IS: 516 (19) specifications.

#### 4. Results and discussions

At the end of the required curing period of 28 days, the beams were tested for three point loading under the Tinius Olsen Testing Machine (TOTM) under load rate control. The deflection at center of beam, initial crack load and ultimate crack loads were recorded during the testing of beam. From the recorded data, the load vs deflection graphs were plotted. The load at the initial crack and the ultimate shear strength were calculated. The toughness and stiffness were evaluated for M30 and M70 grades of SCC without and with steel fibers. Tables 5 and 6 show the ultimate shear strength,

Tablica 4 / Table 4

## WŁASNOŚCI BETONU 28-DNIOWEGO KLASY M30 I M70

## HARDENED PROPERTIES OF M30 AND M70 GRADES OF SCC FOR 28 DAYS

Zawartość włókien stalowych Dosage of steel fibers	M30			M70		
	Wytrzymałość na ściskanie Compressive strength MPa	Wytrzymałość na rozłupywanie Split tensile strength MPa	Wytrzymałość na zginanie Flexural Strength MPa	Wytrzymałość na ściskanie Compressive strength MPa	Wytrzymałość na rozłupywanie Split tensile strength MPa	Wytrzymałość na zginanie Flexural strength MPa
0%	39.67	4.17	3.98	78.25	5.04	5.34
0.5%	48.76	4.34	4.87	86.66	5.85	6.41

Tablica 5 / Table 5

WŁASNOŚCI MECHANICZNE DLA  $a/d=2$ INITIAL CRACK STRENGTH, ULTIMATE SHEAR STRENGTH, TOUGHNESS AND STIFFNESS FOR  $a/d=2$ 

Oznaczenie Designation	Naprężenie zarysowania First crack shear strength MPa	Obciążenie maksymalne Ultimate load kN	Wytrzymałość na ścinanie Ultimate shear strength, $v_u$ MPa	Ugięcie Deflectionmm	Energia zniszczenia Toughness MPa	Sztywność Stiffness MPa
SCC30-360*	1.76	86.77	2.41	4.12	207.43	17.68
SCC30-180	1.98	95.67	2.66	4.18	234.27	18.23
SFSCC30-360	2.16	102.35	2.84	5.21	328	20.17
SFSCC30-180**	2.29	117.92	3.28	6.90	364.1	22.52
SCC70-360	2.10	93.67	2.60	3.54	212.2	28.07
SCC70-180	2.16	115.7	3.21	4.92	365.7	29.17
SFSCC70-360	2.41	138.83	3.86	5.40	483.46	31.47
SFSCC70-180	3.52	159.75	4.44	5.90	525.03	36.47

\*SCC30-360- SCC M30 grade and 360 mm stirrup spacing/beton M30 z rozstawem strzemion 360 mm.

\*\*SFSCC30-180-SCC M30 grade with 0.5 %, steel fiber and 180 mm stirrup spacing/drutobeton M30 z rozstawem strzemion 180 mm.

plastyczne giętno-tnące. Przy stałym rozstawie strzemion dodatk drutu stalowego zwiększa odporność belki na zarysowanie i jej nośność, w wyniku włączenia do współpracy włókien przed i po zarysowaniu. Wraz ze wzrostem klasy betonu, odporność na zarysowanie i nośność rosną wskutek wzrostu wytrzymałości na ścinanie belki. Rysunek 8 przedstawia zmianę wytrzymałości na ścinanie w zależności od proporcji  $a/d$ .

#### 4.2. Krzywe obciążenie – ugięcie

Rysunki 9(a) i 9(b) przedstawiają krzywe obciążenie-przemieszczenie dla belek z betonu i drutobetonu klasy M30 i proporcji  $a/d = 2$  i  $a/d = 2,5$ .

Belka SCC30-360 wykazuje niższą nośność ( $F_u = 86,77$  kN) i kruchy typ zniszczenia w porównaniu z belką z drutobetonu. Nośność i ugięcia belki rosną odpowiednio o 18% i 26.4% .

Gdy proporcja rozpiętości strefy ścinania do wysokości użytecznej przekroju ( $a/d$ ) rośnie z 2 do 2,5, nośność i wytrzymałość na ścinanie maleją. Belka SCC30-225 wykazuje mniejszą nośność i kruche zniszczenie w porównaniu do SFSCC30-225. Dodatek

deflection, toughness and stiffness of two grades of SCC without and with steel fiber, for  $a/d=2$  and 2.5 respectively.

#### 4.1. Effect of spacing of stirrups on shear behaviour of SFCC beams

It can be observed from Tables 5 and 6 that as the spacing of stirrups increases, ultimate load and ultimate shear strength decreases. With increase in the stirrup spacing from 180 mm to 360 mm for  $a/d = 2$ , the ultimate shear strength decreased by 10.27% without fibers and decreased by 15.49% with presence of fibers. Similarly, as the spacing of stirrups increased from 225 mm to 450 mm for  $a/d = 2.5$  the ultimate shear strength decreased by 15.6% without fibers and by 11.4 % in the presence of steel fiber for M30 grade. This confirms the fact that presence of fibers enhances the shear strength. This is true for both spacings.

In the case of M70 Mix with increase in the spacing of stirrups from 180 to 360 mm for  $a/d = 2$ , the ultimate shear strength decreased by 23% without fibers and by 15% with the presence of fibers. Addition of fibers enhanced the shear strength enabling increased



Tablica 6. / Table 6

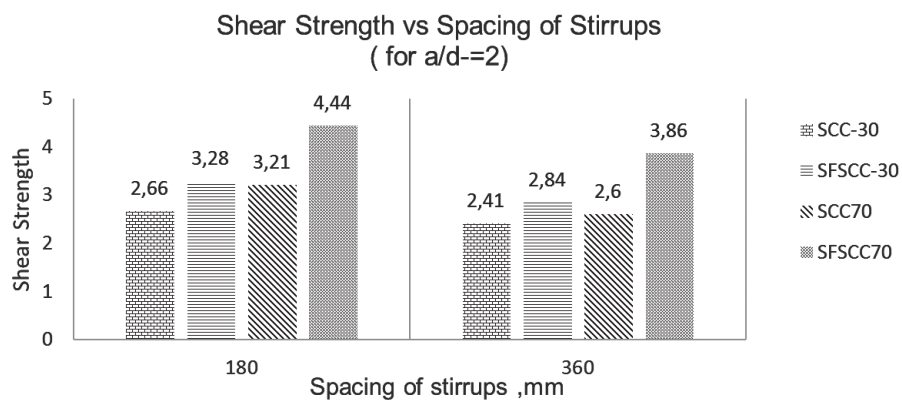
WŁASNOŚCI MECHANICZNE DLA  $a/d = 2,5$

INITIAL CRACK STRENGTH, ULTIMATE SHEAR STRENGTH, TOUGHNESS AND STIFFNESS FOR  $a/d = 2.5$

Oznaczenie Designation	Naprężenie zarysowania First crack shear strength MPa	Obciążenie maksymalne Ultimate load kN	Wytrzymałość na ściananie Ultimate shear strength $v_u$ MPa	Ugięcie Deflection mm	Energia zniszczenia Toughness MPa	Sztywność Stiffness MPa
SCC30-450*	1.60	71.2	1.98	4.25	187.9	14.47
SCC30-225	1.79	82.32	2.29	4.59	213.4	15.89
SFSCC30-450	2.04	91.2	2.53	5.45	300.59	17.65
SFSCC30-225	2.41	101.46	2.82	6.60	438.25	20.57
SCC70-450	2.03	88.77	2.47	4.02	188	23.31
SCC70-225	2.04	100.69	2.80	5.08	318.92	24.49
SFSCC70-450	2.16	117.48	3.26	5.59	393.08	26.47
SFSCC70-225**	2.78	128.15	3.56	5.97	446	27.97

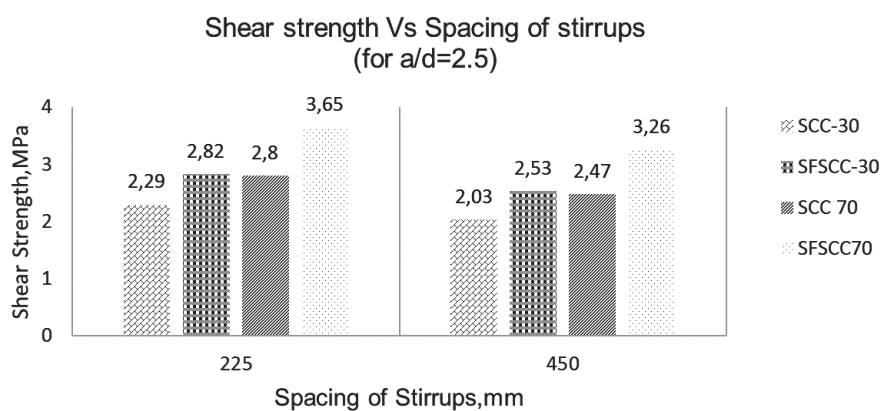
\*SCC30-450-SCC M30 grade and 450 mm stirrup spacing/ beton M30 z rozstawem strzemion 450 mm.

\*\*SFSCC70-225 -SCC M70 grade with steel fiber and 225 mm stirrup spacing / drutobeton M70 z rozstawem strzemion 225 mm.



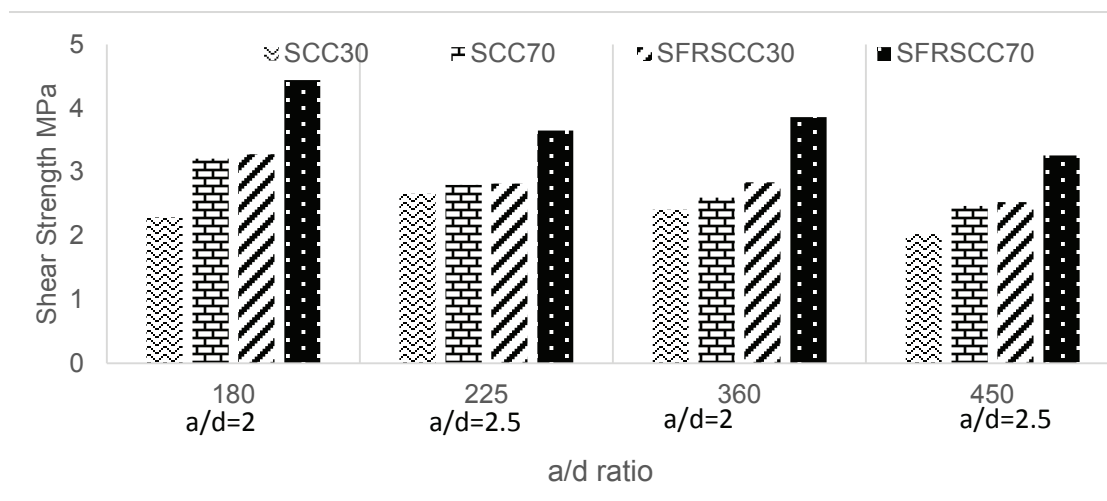
Rys. 6. Wytrzymałość na ścinanie w funkcji rozstawu strzemion dla  $a/d = 2$

Fig. 6. Shear strength Vs spacing of stirrups for (M30 & M70,  $a/d = 2$ )



Rys. 7. Wytrzymałość na ścinanie w funkcji rozstawu strzemion dla  $a/d = 2,5$

Fig. 7. Shear strength Vs spacing of stirrups for (M30& M70,  $a/d = 2.5$ )



Rys. 8. Wytrzymałość na ścinanie w funkcji  $a/d$

Fig. 8. Shear strength Vs  $a/d$

drutu stalowego zwiększył nośność o 23,2% i maksymalne ugięcie o 43,8%. Podobnie, belka SCC30-450 posiadała niższą nośność ( $F_u = 71,27$  kN) przy w pełni kruchym typie zniszczenia z gwałtowną utratą nośności. Podobna belka z drutobetonu posiadała nośność większą o 28,08% a ugięcia większe o 28,2%.

Na rysunku 10 przedstawiono krzywe obciążenie-ugięcie dla belek z betonu i drutobetonu klasy M70 i proporcjach  $a/d = 2$  i 2,5.

Belka SCC70-360 wykazuje zarówno niższą nośność ( $F_u = 93,67$  kN) jak i kruchy typ zniszczenia, z gwałtowną utratą nośności. Analogiczna belka z drutobetonu wykazuje nośność większą o 48,2% i ugięcia większe o 52,54%. Podobne zależności odnotowano dla belki z mniejszym rozstawem strzemion, 180 mm. Dodatek włókien stalowych zwiększył nośność belki o 38,07% i ugięcia o 19,91%.

Wzrost proporcji długości strefy ścinania do użytecznej wysokości przekroju,  $a/d$ , z wartości 2 do 2,5 powoduje spadek nośności. Belka SCC70-450 wykazała niższą nośność ( $F_u = 88,7$  kN) i kruchy typ zniszczenia.

Dodatek włókien stalowych (SFSCC70-450) powiększa nośność belki o 32,4% i maksymalne ugięcia o 39,05%. Podobne zależności odnotowano dla belki z mniejszym rozstawem strzemion 225 mm. Dodatek włókien stalowych powodował wzrost nośności o 38,07% i maksymalnych ugięć o 19,91%.

Z powyższych obserwacji wynika, że dodanie stalowych włókien znacznie poprawia plastyczność belki i zmienia typ zniszczenia z kruchego na plastyczny. Belki nie wzmacniane włóknami stalowymi szybko tracą nośność po pierwszym zarysowaniu.

## 5. Porównanie wyników badań z modelami istniejącymi w literaturze

Wyniki badań wytrzymałości na ścinanie dla samozagęszczającego się betonu niezbrojonego i zbrojonego włóknami stalowymi

stirrups spacing from 180 mm to 360 mm for  $a/d = 2$ . Similarly, the spacing of stirrups can be increased from 225 to 450 mm for  $a/d = 2.5$  in case of both lower and higher grade SCC.

Figs 6 and 7 show the variation of shear strength with spacing of stirrups for SCC with grades M30 and M70 for both non fibrous and fibrous SCC.

### 4.2. Effect of $a/d$ ratios on shear behavior of SCC beams for different stirrup spacing

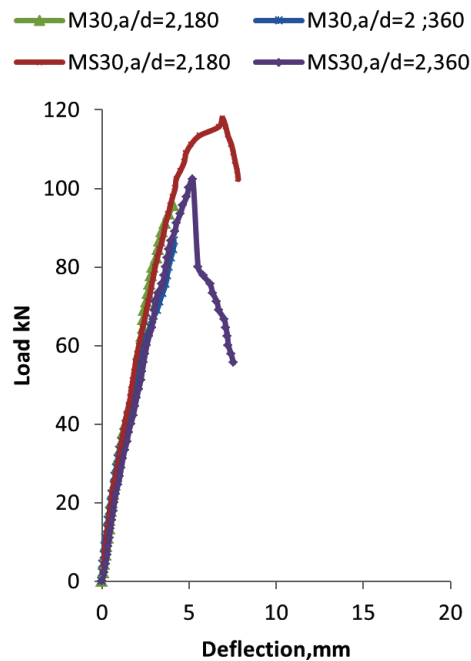
It can be observed from the Tables 5 and 6 that as the shear span to depth ( $a/d$ ) ratio increases, the ultimate load and ultimate shear strength decreases. This may be attributed to the increasing principal tensile stresses in the shear span causing diagonal tension cracks which decrease the shear resistance of the beam. The addition of steel fibers improves the ductility and change the failure mode from a brittle shear collapse into a ductile flexural-shear failure. By keeping the stirrup spacing constant and adding steel fibers, the cracking strength and ultimate shear strength increased because of the confining effect of steel fiber which plays a significant role before and after cracking. As the grade of concrete increased, initial crack strength and ultimate strength increased because the shear resistance of beam has been increased. Figure 8 shows the variation of shear strength with shear span to depth ( $a/d$ ).

### 4.3. Load vs deflection curves

Figures 9(a) and 9(b) show a comparison of load deflection curves for SCC and SFSCC beams of M30 grade for  $a/d = 2$  and 2.5.

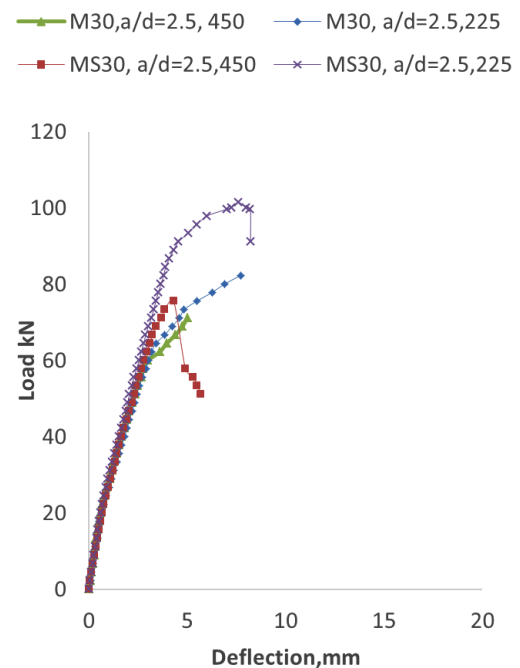
The SCC30-360 beam shows both lower load carrying capacity ( $F_u = 86.77$  kN) and brittle failure pattern compared to the beam with steel fibers (SFSCC30-360). The ultimate load and maximum deflection corresponding to the ultimate load increased by 18% and by 26.4% due to addition of steel fibers.

As the shear span to depth ratio ( $a/d$ ) increased from 2 to 2.5, the load carrying capacity and shear strength decreased. The beam



Rys. 9(a). Obciążenie – ugięcie (M30, a/d = 2)

Fig. 9(a). Load Vs deflection of M30, a/d = 2



Rys. 9(b). Obciążenie – ugięcie (M30, a/d = 2,5)

Fig. 9(b). Load Vs deflection of M30, a/d = 2,5

porównano z istniejącymi modelami nośności na ścinanie dla wibrobetonu.

### 5.1. Beton niezbrojony włóknami

(a) Russo i in. (20)

Na podstawie badań 116 belek ze strzemionami, wykonanych z betonu wysokiej wytrzymałości, Russo i in. (20) zaproponowali wzór na uśrednioną wytrzymałość na ścinanie ( $V_{uc}$ ). Parametrami zmiennymi w badaniach była wytrzymałość betonu na ściskanie ( $f_c$ ), proporcja a/d i rozstaw strzemion. Naprężenie tnące w belkach bez włókien wynika z sumy stanu łukowego i giętnego.

$$V_{uc} = V_a + V_b. \quad [1]$$

$$V_{uc} = \xi \left[ 0.97 \rho_s^{0.46} r_c^{\frac{1}{2}} + 0.2 \rho_s^{0.91} f_c^{0.38} f_{y1}^{0.96} (a/d)^{-2.33} \right] \quad [2]$$

gdzie,

$$\xi = 1 / \sqrt{1 + d / (25 d_a)} \quad [3]$$

$$\rho_s = A_s / (b d) \quad [4]$$

gdzie jest parametrem uwzględniającym efekt skali,  $d$  jest użyteczną wysokością przekroju,  $d_a$  jest maksymalnym wymiarem kruszywa grubego,  $f_c$  jest wytrzymałością na ściskanie próbki walcowej,  $\rho_s$  jest stopniem zbrojenia podłużnego,  $f_{y1}$  granicą plastyczności zbrojenia podłużnego. Dla strzemion niezbędny jest dodatkowy człon w równaniu [1].

$$V_u = V_{uc} + V_s \quad [5]$$

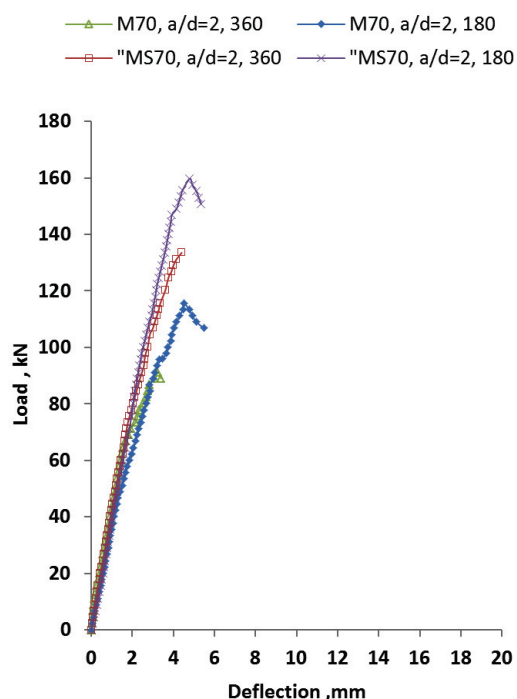
$$V_s = 1.75 l_{br} \rho_{st} f_{yst} \quad [6]$$

designated SCC30-225 showed both lower load carrying capacity and brittle failure pattern compared to SFSCC30-225. Addition of steel fibers has increased the load bearing capacity by 23.2 % and also maximum deflection corresponding to ultimate load increased by 43.8%. Similarly, SCC30-450 beam showed both lower load carrying capacity ( $F_u = 71.27$  kN) and brittle failure pattern. After ultimate load  $F_u$ , the beam did not show any post peak behaviour and the load carrying capacity declined abruptly. Compared to SCC30-450 beam, the ultimate load bearing capacity ( $F_u$ ) of the beam with steel fibers (SFSCC30-450) increased by 28.08% and maximum deflection corresponding to the ultimate load increased by 28.2%.

Figures 10(a) and 10(b) shows a comparison of the load deflection curves for SCC and SFSCC beams of M70 grade for a/d=2 and 2.5.

It can be noticed that SCC70-360 beam showed both lower load carrying capacity ( $F_u = 93.67$  kN) and brittle failure pattern. After ultimate load  $F_u$ , the beam did not show any post peak behaviour and the load carrying capacity declined abruptly. Compared to SCC70-360 beam, the ultimate load bearing capacity ( $F_u$ ) of the beam with steel fibers (SFSCC70-360) increased by 48.2% and the maximum deflection corresponding to the ultimate load increased by 52.54%. Similarly, SCC70-180 beam showed both lower load carrying capacity and brittle failure pattern compared to SFSCC70-180 beam. Addition of steel fibers has increased the load bearing capacity by 38.07% and also the maximum deflection corresponding to ultimate load increased by 19.91%.

It can be observed that as the Shear Span to depth (a/d) ratio increased from 2 to 2.5, the ultimate load and shear capacity of the beam decreased. The SCC70-450 beam showed both lower



Rys. 10(a). Obciążenie – ugięcie (M70,  $a/d = 2$ )

Fig. 10(a). Load Vs deflection of M70,  $a/d = 2$

gdzie

$$I_b = \frac{0.97 \rho_s^{0.46} f_c^{1/2}}{0.97 \rho_s^{0.46} f_c^{1/2} + 0.2 \rho_s^{0.91} f_c^{0.96} (a/d)^{-2.33}} \quad [7]$$

$$\rho_s = A_s / (bd) \quad [8]$$

gdzie  $V_s$  jest naprężeniem tnącym w obecności strzemion, jest momentem bezwładności przekroju belki,  $f_{yst}$  jest granicą plastyczności strzemion a jest proporcją rozstawu strzemion do długości ścinania  $s$ .

b) Żelbetowa norma chińska, GB50010–2002 (24)

Na podstawie szczegółowych badań belek wykonanych z różnych klas betonu i różnym rozstawie strzemion, w normie chińskiej (23) zaproponowano wzór obliczenia wytrzymałości na ścinanie dla wibrobotonu w postaci

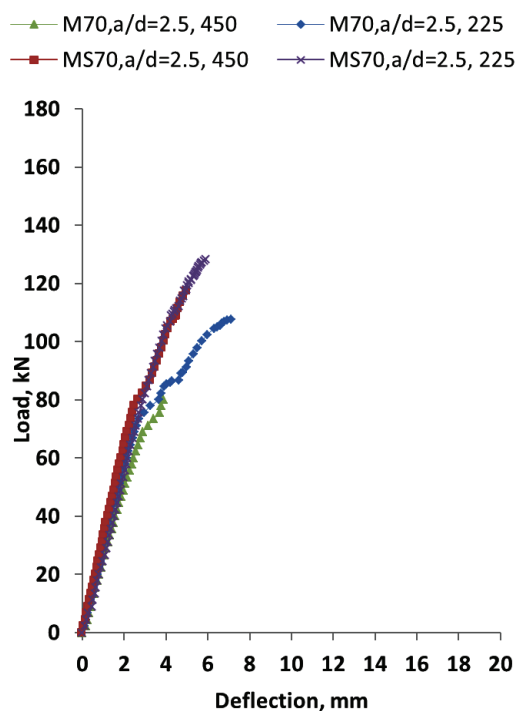
$$V_u = \frac{1.75}{1+\lambda} f_t b d + f_{yst} \frac{A_{st}}{s} d \quad [9]$$

$$v_u = \frac{V_u}{bd} \quad [10]$$

gdzie  $V_u$  jest siłą tnącą elementu żelbetowego,  $f_t$  jest wytrzymałością na rozciąganie,  $\lambda$  jest proporcją  $a/d$ ,  $v_u$  jest wytrzymałością na ścinanie elementu żelbetowego a  $s$  jest rozstawem strzemion.

(c) ACI 318-14 (25)

Norma ACI 318 proponuje równanie na obliczenie wytrzymałości na ścinanie dla wibrobotonu w postaci:



Rys. 10(b). Obciążenie – ugięcie (M70,  $a/d = 2,5$ )

Fig. 10(b). Load Vs deflection of M70,  $a/d = 2,5$

load carrying capacity ( $F_u = 88.7$  kN) and was associated with a brittle failure.

Compared to SCC70-450 beam, the ultimate load bearing capacity ( $F_u$ ) of the beam with steel fibers (SFSCC70-450) increased by 32.4% and maximum deflection corresponding to the ultimate load increased by 39.05%. Similarly, in the case of SCC70-225 beam the load carrying capacity was low and the failed in brittle failure pattern compared to SFSCC70-225. Once again it was proved that addition of steel fibers increased the load bearing capacity by 38.07% and maximum deflection corresponding to ultimate load increased by 19.91%.

From the above observations it can be concluded that the addition of steel fibers can greatly enhance the ductility and change the failure pattern from brittle shear failure to ductile flexural failure. The SCC beam without steel fibers failed soon after first diagonal crack has occurred.

## 5. Comparison of test results with models from literature

The experimental results obtained for ultimate shear strength of non-fibrous SCC and fibrous SCC are compared with the shear strength models available for vibrated concrete and a comparison was made.

### 5.1. Non-Fibrous SCC

(a) Russo et al. (20)

After a detailed investigation on 116 High strength concrete (HSC) beams with stirrups as shear reinforcement Russo et al. (20) has

$$v_u = \frac{1}{7} \left[ \sqrt{f_c} + 120 \rho_s \left( \frac{d}{a} \right) \right] + \rho_{st} f_{yst} \quad [11]$$

gdzie  $v_u$  jest wytrzymałością na ścinanie,  $f_c$  jest średnią wytrzymałością betonu na ściskanie,  $\rho_s$  jest stopniem zbrojenia wzdużnego,  $f_{yst}$  jest granicą plastyczności zbrojenia wzdużnego i  $a/d$  jest proporcją długością ścinania do wysokości przekroju.

## 5.2. Fibrobeton

(a) Narayanan i Darwish (1)

Narayanan i Darwish (1) zaproponowali dla betonu z włóknami stalowymi wzór na naprężenie ścinania ( $v$ ). Parametrami zmiennymi w badaniach były: objętościowy udział włókien ( $F$ ), smukłość włókien ( $l/d$ ), wytrzymałość betonu na ściskanie  $f_{cu}$ , stopień zbrojenia oraz proporcja strefy ścinania do wysokości przekroju  $a/d$ .

$$v_f = 0.41 \tau F \quad [12]$$

gdzie  $F = (l_f / d_f) V_f k_f$ ,  $V_f$  jest naprężeniem tnącym drutobetonu,  $\tau$  jest uśrednionym naprężeniem przyczepności włókien ( $\tau = 4,15$  MPa),  $l_f / d_f$  jest smukłością włókien,  $k_f$  jest parametrem odpowiadającym różnym charakterystykom przyczepności włókien, przyjmowanym w granicach od 0,5 dla włókien okrągłych, 0,75 dla karbowanych włókien i 1,0 dla włókien z nacięciami. W interesującym nas przypadku, wartość parametru przyjęto równą 0,75 jak dla włókien karbowanych, które były użyte do badań.

(b) Ta'an i Feel (21)

Model obliczenia wytrzymałości na ścinanie fibrobetonu został zaproponowany przez Ta'an i Feel, (21), na podstawie badania 89 belek zniszczonych wskutek ścinania. Czynniki wpływającymi na wytrzymałość na ścinanie okazały się proporcja  $a/d$ , procent głównego zbrojenia, jego wymiary i typ.

$$v_f = \frac{8.5}{9} k V_f \frac{l_f}{d_f} \quad [13]$$

gdzie  $k$  jest parametrem uwzględniającym smukłość włókien, dla włókien karbowanych  $k = 0,75$ , jest udziałem objętościowym włókien a  $l_f / d_f$  jest smukłością włókien.

(c) Swamy i in. (22)

Swamy i in. (22), na podstawie swoich badań lekkich belek z drutobetonu, zaproponowali model kratownicy do obliczenia wytrzymałości na ścinanie:

$$v_f = 0.37 \tau V_f \frac{l_f}{d_f} \quad [14]$$

gdzie  $\tau$  jest równe 4,15 MPa według propozycji Narayanan i Darwish (1),  $V_f$  jest objętościowym udziałem włókien a ( $l_f / d_f$ ) jest smukłością włókien.

proposed to calculate the average shear strength ( $V_{uc}$ ). The parameters varied in the investigation were concrete compressive strength ( $f_c$ ), shear span to depth ratio  $a/d$ , and stirrup ratio. For beams without shear reinforcement the shear stress is due to arch and beam action

$$V_{uc} = V_a + V_b \quad [1]$$

$$V_{uc} = \xi \left[ 0.97 \rho_s^{0.46} f_c^{1/2} + 0.2 \rho_s^{0.91} f_c^{0.38} f_{y1}^{0.96} (a/d)^{-2.33} \right] \quad [2]$$

Where,

$$\xi = 1 / \sqrt{1 + d / (25 d_a)} \quad [3]$$

$$\rho_s = A_s / (b d) \quad [4]$$

Where  $v_a$  and  $v_b$  are the shear stresses due to the arch and beam actions respectively.  $\xi$  is the factor for taking into account size effect,  $d$  is the effective depth of the beam,  $d_a$  is the maximum size of coarse aggregate.  $f_c$  is the compressive strength of the circular cylinder.  $\rho_s$  is the longitudinal reinforcement ratio.  $f_{y1}$  is the yielding strength of the longitudinal reinforcement.  $a/d$  is the shear span-to-depth ratio. A third term must be added to equation [1] when stirrups are present.

$$V_u = V_{uc} + V_s \quad [5]$$

$$V_s = 1.75 I_b \rho_{st} f_{yst} \quad [6]$$

Where

$$I_b = \frac{0.97 \rho_s^{0.46} f_c^{1/2}}{0.97 \rho_s^{0.46} f_c^{1/2} + 0.2 \rho_s^{0.91} f_c^{0.38} (a/d)^{-2.33}} \quad [7]$$

$$\rho_s = A_s / (b d) \quad [8]$$

Where  $V_s$  is the shear stress due to the stirrups,  $I_b$  is the index of beam action,  $f_{yst}$  is the yielding strength of the stirrup, and  $\rho_{st}$  is the stirrup ratio evaluated with reference to the spacing  $s$ .

Chinese Code for Design of Concrete Structure, GB50010–2002 (24)

After detailed investigation on Beams with different grades of concrete and Stirrups ratio, Chinese code (23) proposed an equation for vibrated concrete to calculate the shear strength

$$V_u = \frac{1.75}{1 + \lambda} f_t b d + f_{yst} \frac{A_{st}}{s} d \quad [9]$$

$$v_u = \frac{V_u}{b d} \quad [10]$$

Where  $V_u$  is the shear load of the RC member,  $f_t$  is the tensile strength of the prism,  $\lambda$  is the shear span-to-depth ratio and  $v_u$  is the shear strength of the RC member and  $s$  is the spacing.

(c) ACI code 318-14 (25)

ACI committee 318 after a detailed investigation on beams with different grades of concrete, different yield strength and Stirrups

Tablica 7 / Table 7

## WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCINANIE BELEK BEZ WŁÓKIEN

## SHEAR STRENGTH OF SCC BEAMS WITHOUT FIBER

Oznaczenie Designation	Russo et al. (20) $V_u$ MPa	GB50010–2002 (24) $V_u$ MPa	ACI code 318-02 (25) $V_u$ MPa	Experimental $V_u$ MPa
SCC30-180	2.30	3.23	1.92	2.66
SCC70-180	4.40	4.03	2.42	3.21
SCC30-225	1.94	2.72	1.71	2.29
SCC70-225	3.42	3.40	2.19	2.8
SCC30-360	1.97	2.78	1.46	2.41
SCC70-360	4.12	3.57	1.96	2.6
SCC30-450	1.60	2.35	1.35	2.03
SCC70-450	3.12	3.03	1.82	2.47

Tablica 8 / Table 8

## WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCINANIE BELEK Z FIBROBETONU

## SHEAR STRENGTH OF STEEL FIBRE REINFORCED SCC BEAMS

Oznaczenie Designation	Narayanan and Darwish (1) $V_{uf}$ MPa	Ta'an and Feel (21) $V_{uf}$ MPa	Swamy et al (22) $V_{uf}$ MPa	Lim and Oh (23) $V_{uf}$ MPa	Experimental $V_{uf}$ MPa	Chinese code for FRC (24) $V_{uf}$ MPa
SFSCC30-180	3.22	2.81	3.40	3.79	3.28	4.49
SFSCC70-180	5.32	4.91	5.50	5.89	4.44	5.71
SFSCC30-225	2.86	2.45	3.05	3.43	2.82	3.79
SFSCC70-225	4.34	3.93	4.53	4.91	3.56	4.84
SFSCC30-360	2.89	2.48	3.08	3.47	2.84	4.03
SFSCC70-360	5.04	4.63	5.23	5.62	3.86	5.25
SFSCC30-450	2.51	2.11	2.70	3.09	2.53	3.43
SFSCC70-450	4.04	3.63	4.23	4.62	3.26	4.48

## (d) Lim i Oh (23)

Lim i Oh (23), zaproponowali analityczny wzór na wytrzymałość na ścinanie fibrobetonu na podstawie badań 9 belek o różnym udziale włókien stalowych i proporcjach strzemion do pożądanego zbrojenia na ścinanie.

$$v_f = 0.5\tau V_f \frac{I_f}{d_f} \cot\alpha \quad [15]$$

gdzie  $\alpha$  jest nachyleniem rys do zbrojenia podłużnego, równym  $45^\circ$ , jest równe 4,15 MPa zgodnie z sugestią Narayanan i Darwish, (1), a  $V_f$  jest względną objętością włókien.

## (e) Wytyczne chińskie dla fibrobetonu CECS 38:2004 (24)

Dla różnych klas betonów i gęstości rozstawienia strzemion chińska norma, (24), zaleca stosowanie równania:

$$V_{uf} = \frac{1.75}{1+\lambda} f_f b d (1 + \beta_v \lambda_f) + f_{yst} \frac{A_{st}}{s} d \quad [16]$$

ratio has given an equation to calculate shear strength for vibrated concrete.

$$v_u = \frac{1}{7} \left[ \sqrt{f'_c} + 120\rho_s \left( \frac{d}{a} \right) \right] + \rho_{st} f_{yst} \quad [11]$$

Where  $v_u$  is the shear strength,  $f'_c$  is the average compressive strength of concrete,  $\rho_s$  is the longitudinal reinforcement ratio.  $f_{yst}$  is the yielding strength of the longitudinal reinforcement and  $a/d$  is the shear span-to-depth ratio.

## 5.2. Fibrous SCC

## (a) Narayanan and Darwish (1)

Using steel fibers as shear reinforcement, Narayanan and Darwish (1) has proposed a formula for shear stress due to fiber ( $v_f$ ). The parameters varied in their investigation were volume fraction ( $F$ ) of the fibers, fiber aspect ratio ( $l/d$ ), concrete compressive strength  $f_{cu}$ , amount of longitudinal reinforcement ( $\rho_{st}$ ), and the shear span/effective depth ratio  $a/d$ .

$$v_f = 0.41\tau F \quad [12]$$



Rys. 11. Zniszczenie belki SCC30

Fig. 11. Failure pattern of SCC30



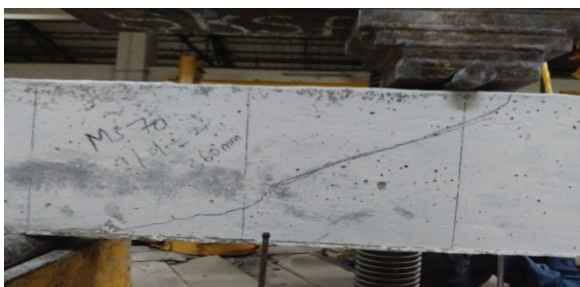
Rys. 12. Zniszczenie belki SFSCC30

Fig. 12. Failure pattern of SFSCC30



Rys. 13. Zniszczenie belki SCC70

Fig. 13. Failure pattern of SCC7



Rys. 14. Zniszczenia belki SFSCC70

Fig. 14. Failure pattern of SFSCC70

$$v_{uf} = \frac{V_{uf}}{bd} \quad [17]$$

gdzie  $V_{uf}$  jest siłą tnącą w elemencie żelbetowym,  $\beta_v$  jest parametrem zależnym od typu włókien, równym 0,75 dla włókien kar-

Were  $F = (l_f / d_f) V_f k_f$  where  $V_f$  is shear stress due to steel fibers,  $\tau$  is the average fibre matrix interfacial bond stress, and  $\tau = 4.15$  MPa. is the fibre factor  $(l_f / d_f)$  is the fibre aspect ratio.  $k_f$  is the bond factor that accounts for differing bond characteristics of the fibre, it is assigned a relative value of 0.5 for round fibers, 0.75 for crimped fibers, and 1.0 for indented fibers. In the present case the value of as crimped fibers were used in the study.

(b) Ta'an and Feel (21)

A Model was proposed to predict the ultimate shear strength of fibre-reinforced concrete rectangular beams by Ta'an and Feel (21). A total of 89 beams were tested, all the beams have failed in shear. The factors influencing the shear strength of fibre concrete beams were found to be the shear span-to-depth ratio, main reinforcement volume, dimensions, and type.

$$v_f = \frac{8.5}{9} k V_f \frac{l_f}{d_f} \quad [13]$$

Where  $k$  is a factor reflecting the fibre shape. For crimped fibers,  $k = 0.75$ ,  $V_f$  is the fibre volume fraction and  $(l_f / d_f)$  is the fibre aspect ratio.

(c) Swamy et al (22)

To assess the effectiveness of steel fibers used as shear reinforcement in lightweight concrete beams Swamy et al (22) from their research work has proposed a truss model to predict the ultimate shear strength,

$$v_f = 0.37 \tau V_f \frac{l_f}{d_f} \quad [14]$$

Where  $\tau$  is equal to 4.15 MPa as suggested by Narayanan and Darwish (1) and  $V_f$  is the fibre volume fraction.  $(l_f / d_f)$  is the fibre aspect ratio.

(d) Lim and Oh (23)

An analytical model to predict shear strength of fiber reinforced concrete was proposed by Lim and Oh (23). A total of nine beams were cast by varying volume fraction of steel fibers and the ratio of stirrups to the required shear reinforcement.

$$v_f = 0.5 \tau V_f \frac{l_f}{d_f} \cot \alpha \quad [15]$$

Where  $\alpha$  is the inclination between the longitudinal reinforcement and the shear crack, and is equal to  $45^\circ$  and  $\tau$  is equal to 4.15 MPa as suggested by Narayanan and Darwish (1) and  $V_f$  is the fibre volume fraction.

(e) Chinese Guidelines for FRC, CECS 38:2004 (24)

After detailed investigation on Beams with different grades of concrete and stirrups ratio Chinese code (23) has proposed an equation for fiber reinforced concrete.

bowanych,  $\lambda_f$  określa ilość włókien wg wzoru  $V_f (l_f / d_f)$  a  $v_{uf}$  jest wytrzymałością na ścinanie elementu żelbetowego wykonanego z fibrobetonu.

Na podstawie powyższych modeli proponowanych dla wibrobetonów bez wzmocnienia i ze wzmocnieniem włóknami, obliczono wytrzymałość na ścinanie betonu samozagęszczającego się z użyciem parametrów zmiennych w przedstawionych badaniach własnych. Wyniki przedstawiono w tablicach 7 i 8.

Z danych w powyższej tablicy wynika, że wartości uzyskane z własnych badań doświadczalnych są najbliższe wartościom wynikającym z modelu zaproponowanego przez Russo i in. (20).

Tablica 8 przedstawia wartości wytrzymałości na ścinanie belek z fibrobetonu obliczone według wzorów proponowanych w literaturze dla wibrobetonów.

Z powyższych danych wynika, że wartości najbliższe wartościom uzyskanym z badań własnych otrzymuje się wg propozycji Narayanan i Darwish (1).

## 6. Szczegóły badanych belek

W programie badano 16 belek, w tym 8 bez włókien i 8 z drutobetonu. Rysunki 11 i 12 przedstawiają typowe wzorce zniszczenia belek, wykonanych z betonu M30, niezbrojonego i drutobetonu.

Podobnie, na rysunkach 13 i 14 przedstawiono wzorce zniszczenia belek z betonu M70 bez włókien i z włóknami. Należy podkreślić, że zniszczenie belek bez włókien było typu kruchego a belek z włóknami – typu plastycznego.

## 7. Wnioski

Z przeprowadzonych badań wynikają następujące wnioski:

1. Wraz ze wzrostem proporcji długości strefy ścinania do wysokości ( $a/d$ ) z 2 do 2,5, zarysowanie, wytrzymałość na ścinanie, energia zniszczenia i sztywność maleją, zarówno w przypadku betonu bez włókien jak i z włóknami, dla klasy betonu M30 i M70.
  2. Dodatek włókien zmienia schemat zniszczenia belki z kruchego na giętno-tnący. Rośnie także wytrzymałość na ścinanie. Badania pokazały, że włókna stalowe odgrywają znaczną rolę przed i po zarysowaniu belki.
- Dla proporcji strefy ścinania  $a/d = 2$ , dodatek włókien stalowych podnosi odporność na zarysowanie i wytrzymałość na ścinanie odpowiednio o 16% i 18,9% dla betonów M30 i M70. Ugięcia maksymalne wzrosły o 30,16%, energia zniszczenia i sztywność o 47,5% i 15,6% odpowiednio. Podobnie, dla  $a/d = 2,5$  zarysowanie i wytrzymałość na ścinanie wzrosły dla betonów M30 odpowiednio o 23,7% i 20,2%.
3. W przypadku betonu M30 dodatek włókien zwiększył odporność na zarysowanie i wytrzymałość na ścinanie o 19,2%

$$V_{uf} = \frac{1.75}{1 + \lambda} f_r b d (1 + \beta_v \lambda_f) + f_{yst} \frac{A_{st}}{s} d \quad [16]$$

$$v_{uf} = \frac{V_{uf}}{b d} \quad [17]$$

Where  $V_{uf}$  is the shear load of the fiber reinforced RC member, and  $\beta_v$  is the influence coefficient it is taken as 0.75 for crimped fibre of the steel fibers,  $\lambda_f$  is fiber factor equals to  $V_f (l_f / d_f)$  and  $v_{uf}$  is shear strength of fiber reinforced RC member.

Based on the models proposed by various researchers for non-fibrous and fibrous concretes for vibrated concrete, the shear strength of SCC beams are calculated taking the parameters considered in the present investigation and are presented in Tables 7 and 8.

A comparison of the values in the above Table it can be noted that the experimental values obtained by the experimental values are close to those predicted on the basis of the model proposed by Russo et al. (20).

Table 8 shows the values of the shear strength of steel fiber reinforced SCC beams calculated on the basis of various models available in the literature on vibrated concrete.

From the above Table it can be noted that the values predicted by Narayanan and Darwish (1) are relatively close to experimental values.

## 6. Details of tested beams

A total of 16 beams including eight non fibrous and eight fibrous beams have been cast and tested. Figures 11 and 12 show typical failure patterns of plane and fibrous SCC M30 grade concrete beams.

Similarly, Figures 13 and 14 show the failure pattern for plain SCC and fibrous SCC for M70 grade concrete. It was noticed that plain specimen's failed in sudden brittle failure, where as in case of fibrous SCC the mode of failure was ductile.

## 7. Conclusions

Based on the experimental study the following conclusions have been drawn:

1. As shear span to depth ratio ( $a/d$ ) increased from 2 to 2.5, cracking, ultimate shear strength, toughness and stiffness has decreased in case of both SCC & SFSCC and for both the grades M30 and M70.
2. Addition of fiber has modified the failure pattern from brittle shear failure to a ductile flexural-shear failure. There is also an increase in the ultimate shear strength. This shows that steel fibers play a very important role before and after cracking.



- i 23,2%. Ugięcia przy maksymalnym obciążeniu wzrosły o 45,76% a energia zniszczenia i sztywność odpowiednio o 56,8% i 18,8%. Dla  $a/d = 2$  i 2,5 odporność na zarysowanie i wytrzymałość na ścinanie wzrosły odpowiednio o 31% i 25,66%.
4. Dla betonu M70, dodanie włókien zwiększyło odporność na zarysowanie i wytrzymałość na ścinanie odpowiednio o 25,71% i 30,77%. Ugięcia wzrosły o 25,5% a energia zniszczenia i sztywność wzrosły odpowiednio o 48,65% i 14,6%; dla  $a/d = 2$  i 2,5 odporność na zarysowanie i wytrzymałość na ścinanie wzrosły odpowiednio o 16,3% i 20,12%.
  5. Wraz ze wzrostem klasy betonu przy stałej proporcji  $a/d$ , odporność na zarysowanie, wytrzymałość na ścinanie, energia zniszczenia i sztywność wzrosły odpowiednio o 23,7%, 25%, 36,33% i 59,2%.
  6. Uzyskane wyniki badań porównano z modelami istniejącymi w literaturze dla wibrobetonu. Dla betonu bez włókien, najbliższa uzyskanym wynikom była wytrzymałość na ścinanie według wzoru zaproponowanego przez Russo i in. (20), a dla fibrobetonu według wzoru Narayana i Darwish (1).
3. For shear span to depth ratio  $a/d = 2$ , addition of steel fibers enhanced the cracking and ultimate shear strength by 16% and 18.9% respectively for M30 and M70 grades of SCC. The deflections at ultimate load increased by 30.16%, the toughness and stiffness increased by 47.5 % and 15.6 % respectively. Similarly for  $a/d = 2.5$  the cracking and ultimate shear strength increased by 23.7% and 20.2 % respectively for M30 grade SCC.
  4. In case of M30 grade SCC, addition of fibers enhanced cracking and ultimate shear strength by 19.2% and 23.2% respectively. The deflections at ultimate load increased by 45.76%, and toughness and stiffness increases by 56.8 % and 18.8% respectively for this grade of SCC for the shear span to depth ratio  $a/d = 2$  and 2.5 the cracking and ultimate shear strength increased by 31 % and 25.66% respectively.
  5. In case of M70 grade SCC, addition of fibers enhanced the cracking and ultimate shear strength by 25.71% and 30.77% respectively. The deflections at ultimate load increased by 25.5%, and toughness and stiffness increased by 48.65 % and 14.6 % respectively for shear span to depth ratio  $a/d = 2$  and 2.5 the cracking and ultimate shear strength increased by 16.3% and 20.12% respectively.
  6. With increase in the grade of concrete for a constant  $a/d$  ratio, the cracking shear strength, ultimate shear strength, toughness and stiffness increased by 23.7%, 25%, 36.33% and 59.2% respectively.
  7. A comparison was made between experimental shear strength values with those obtained based on various models on vibrated concrete. It was noticed that the ultimate shear strength predicted by Russo et al (20) model for plain SCC beams and Narayana and Darwish (1) model for FRSCC compared well.

## Literatura / References

1. R. Narayanan, I. Y. S. Darwish, "Use of steel fibers as shear reinforcement". *ACI Struct. J.*, **84**, 216–227 (1987).
2. C. Cucchiara, L. La Mendola, M. Papia, "Effectiveness of stirrups and steel fibres as shear reinforcement". *Cement Concrete Composites*. **26**, 777–786 (2004).
3. Y. K. Kwak, M. Eberhard, W. S. Kim, J. Kim, "Shear strength of steel fibre-reinforced concrete beams without stirrups". *ACI Struct. J.*, **99**, 4, 530–538 (2002).
4. Y. Ding, Z. You, S. Jalali, "The composite effect of steel fibres and stirrups on the shear behaviour of beams using self-consolidating concrete", *Engineering Structures*, **33**, 107–117 (2011).
5. K. S. Kim, D. H. Lee, J. H. Hwang, D. A. Kuchma, "Shear behaviour model for steel fiber reinforced concrete members without transverse reinforcements", *Composites Part B*, **43**, 5, 2324–2334 (2012).
6. T. Greenough, M. Nehdi, "Shear behaviour of fibre-reinforced self-consolidating concrete slender beams". *ACI Mat. J.*, **105**, 5, 468–477 (2008).
7. G. Tiberti, F. Minelli, G. A. Plizzari, F. J. Vecchio, "Influence of concrete strength on crack development in SFRC members", *Cem. Concr. Comp.*, **45**, 176–185 (2014).
8. E. Cuenca, J. Echegaray-Oviedo, P. Serna, "Influence of concrete matrix and type of fiber on the shear behaviour of self-compacting fiber reinforced concrete beams", *Comp. Part B*, **75**, 135–147 (2015).
9. IS: 12269 - 2013, "Indian Standard Ordinary Portland Cement, 53 Grade – Specification", Bureau of Indian Standards, New Delhi 2013.
10. IS: 3812 (Part-1) - 2003, "Indian Standard Pulverized Fuel Ash – Specification, Part-1: For Use as Pozzolana in Cement, Cement Mortar and Concrete", Bureau of Indian Standards, New Delhi 2003.
11. IS: 383 – 1970 (Reaffirmed 2002), "Indian Standard Specification for Coarse and Fine Aggregates from Natural Sources for Concrete", Bureau of Indian Standards, New Delhi 2002.
12. IS 15388:2003, "Specification for use silica fume as mineral admixture in cement concrete", Bureau of Indian Standards, New Delhi 2003.

13. ASTM C494 / C494M-13, "Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete", ASTM International, West Conshohocken, PA, USA 2013.
14. ASTM A820-01, "Standard Specification for use Steel Fibers for Fiber-Reinforced Concrete". ASTM International, West Conshohocken, PA, USA 2001.
15. IS: 1786 - 2008, "Indian Standard High Strength Deformed Steel Bars and Wires for Concrete Reinforcement- Specification", Bureau of Indian Standards, New Delhi 2008.
16. T. Ponikiewski, G. Cygan, "Some properties of self-compacting concretes reinforced with steel fibres", *Cement Wapno Beton*, **78**, 4, 203-209 (2011).
17. S. V. Rao, S. S. Rao, D. Ramaseshu, P. R. Kumar, "Self-Compacting Concrete – A rational mix design", *Cement Wapno Beton*, **80**, 5, 271-280 (2013).
18. EFNARC Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete, 2005.
19. IS: 516-1959 (Reaffirmed 2004), "Indian Standard Methods of Tests for Strength of Concrete", Bureau of Indian Standards, New Delhi 2006.
20. G. Russo, G. Somma, P. Angeli, "Design shear strength formula for high strength concrete beams", *Mat. and Str.*, **37**, 10, 680–688 (2004).
21. A. Ta'an, A. Feel, "Evaluation of shear strength of fibre reinforced concrete beams", *Cem. Concr. Comp.*, **12**, 2, 87–94 (1990).
22. R. N. Swamy, R. Jones, A. T. P. Chiam, "Influence of steel fibres on the shear resistance of lightweight concrete I-beams", *ACI Str. J.*, **90**, 1, 03–114 (1993).
23. D. H. Lim, B. H. Oh, "Experimental and theoretical investigation on the shear of steel fibre reinforced concrete beams". *Eng. Struct.*, **21**, 10, 937–944 (1999).
24. China Association for Engineering Construction Standardization. Technical Specification for Fibre Reinforced Concrete Structures (CECS 38:2004). China Architecture & Building Press 2004.
25. ACI Committee 318. Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14) and Commentary (318R-14); American Concrete Institute 2014.