

Sai Nitesh K. J. N, Prof. S. Venkateswara Rao, Prof. P. Rathish Kumar

Department of civil engineering, NIT - Warangal, Telangana, India

Odporność na skręcanie elementów z betonu samozagęszczającego się zbrojonego włóknami stalowymi i zawierającego kruszywo z recyklingu

Analysis of the thickness of steel rebars cover in concrete effect on Torsional behaviour of steel fibres reinforced with recycled aggregate Self Compacting Concrete

Słowa kluczowe: beton wibrowany, samozagęszczający się beton, włókna stalowe, sztywność na skręcanie, kąt skrętu, wytrzymałość na skręcanie

Keywords: vibrated concrete, Self Compacting Concrete, steel fibres, torsional stiffness, angle of twist, torsional toughness.

1. Wprowadzenie

Skręcanie występuje często w wielu konstrukcjach, jednak rzadko pojawia się bez równoczesnego udziału innych naprężeń. Dominuje w wielu elementach konstrukcyjnych takich jak ramy przestrzenne, belki w kształcie odwróconej litery L, w podporach przeciwslonecznych, zakrzywionych belkach, w zbiornikach wodnych, w płytach z belką krawędziową i w ryglach. Początkowo zniszczenia na skutek skręcania konstrukcyjnych elementów betonowych następują wraz z postępowaniem naprężeń rozciągających, ponieważ ścinanie pojawia się w wyniku skręcania. Ze względu na to, że beton jest materiałem o małej wytrzymałości na rozciąganie, może to powodować powstawanie niekorzystnych pęknięć lub nawet doprowadzić do katastrofy budowlanej. Odporność na skręcanie oraz sztywność skrętna elementów konstrukcyjnych odgrywają ważną rolę w analizie 3D konstrukcji betonowych. W rezultacie, skręcanie elementów betonowych jest tak samo ważne jak obciążenie osiowe, ścinanie i zginanie. Wytrzymałość

1. Introduction

Torsion takes place more frequently in many structures but rarely it occurs unaccompanied. It is predominant in many structural members such as space frames, inverted L-beams as in supporting sunshades, curved beams in water tanks, edge beams of slab, spandrel beams etc. Initiation of torsional failure of concrete structural elements is through progression of tensile stress which is because pure shear originates due to torsion. Due to inherent weakness of tensile strength of concrete, it may lead to undesirable cracking or even disastrous collapse. Torsional toughness and torsional rigidity of structural elements have a significant role in the 3D analysis of concrete structures. Consequently, torsional behaviour of concrete members are as crucial as axial force, shear and bending. The tensile strength and toughness of the concrete increases to a moderate level with the inclusion of steel fibres. The utilisation of Recycled Concrete Aggregate [RCA] in concrete has the potential to reduce both environmental impact and the associated financial cost. The information available is small in the literature

na rozciąganie i twardość betonu ulegają poprawie dzięki zastosowaniu włókien stalowych. Natomiast zastosowanie kruszywa pochodzącego z recyklingu betonu może zmniejszyć zarówno niekorzystny wpływ na środowisko jak i wpłynąć na zmniejszenie kosztów produkcji. Istnieje niewiele danych literaturowych dotyczących właściwości betonu samozagęszczającego się zbrojonego włóknami i zawierającego kruszywo pochodzące z recyklingu poddanego wyłącznie skręcaniu.

Z dotychczasowych doświadczeń wynika, że dodatek włókien poprawia właściwości mechaniczne, ciągliwość elementów konstrukcyjnych z betonu samozagęszczającego się [BSZ] i wibrowanego [BW]. Okay i in. (1), Aydin i in. (2) opisali wytrzymałość i trwałość betonu samozagęszczającego się. Nagaratnam i in. (3) zbadali wpływ dodatku włókien ze zmiennym współczynnikiem kształtu na obciążenia skrętne w betonie wibrowanym. Patil i in. (4) oraz T.D. Gunneswara Rao i in. (5, 6) zbadali belki z betonu zbrojonego włóknami stalowymi poddane skręcaniu i stwierdzili, że przy dodatku włókien stalowych właściwości skrętne belek ulegają poprawie wraz ze wzrostem wytrzymałości betonu na rozciąganie. Pająk i Ponikiewski (7) zbadali natomiast wpływ kształtu włókien stalowych na właściwości BSZ i stwierdzili, że włókna z haczykowatymi odgięciami mają znaczny wpływ na właściwości w fazie osłabienia materiału w porównaniu do włókien prostych. Sable i in. (8) opisali wpływ różnych rodzajów włókien stalowych na ścinanie, a także na wytrzymałość na skręcanie BSZ i BW ze zmiennym współczynnikiem kształtu włókien. Raut L. L i in. (9) zbadali belki z betonu zbrojonego włóknami stalowymi i stwierdzili, że dodatek włókien poprawił odporność na skręcanie, maksymalną wytrzymałość na skręcanie oraz wytrzymałość na rozciąganie betonu. Tabsh i in. (10) stwierdzili, że dodatek kruszywa z recyklingu betonu zastępujący do 30% naturalnego kruszywa grubego nie powoduje większych zmian we właściwościach mechanicznych betonu. Saha (11) przeprowadził badania wpływu dodatku kruszywa grubego z recyklingu na wytrzymałość betonu i stwierdził, że dodatek 25% kruszywa z recyklingu zastępujący kruszywo naturalne ma mały wpływ na wytrzymałość betonu. Yazici i in. (12) zbadali natomiast wpływ dodatku kruszywa grubego z recyklingu do BSZ i stwierdzili, że wpływa on korzystnie na właściwości reologiczne mieszanki betonowej. Kruszywo grube z recyklingu zastępujące kruszywo naturalne w ilości do 75% nie pogarsza znacząco właściwości mechanicznych betonu.

Przeprowadzono niewiele badań związanych ze skręcaniem BSZ, natomiast dane dotyczące wyników badań skręcania BSZ zbrojonego włóknami stalowymi zawierającego kruszywo z recyklingu są znikome. Z tego względu przeprowadzono badania mające na celu zbadanie wpływu dodatku włókien stalowych o zmiennym współczynnikiem kształtu na urabialność, wytrzymałość na ściskanie i na rozciąganie przy rozłupywaniu, maksymalny moment obrotowy, odporność na skręcanie, sztywność skrętną, kąt skrętu oraz nachylenie pęknięć w betonie samozagęszczającym się w porównaniu do betonu wibrowanego. Przygotowano 32 belki o zmiennych właściwościach dotyczących zbrojenia włóknami lub jego braku, współczynnika kształtu włókien stalowych z haczykowatymi końcówkami, rodzaju betonu o wytrzymałości 50 MPa lub

on behavioural characteristics of fibre reinforced self compacting concrete members with RCA subjected to pure torsion.

The previous research works reported that addition of fibres increases the mechanical properties, ductility of structural elements in self compacting and vibrated concrete [VC]. Okay et al. (1), Aydin et al. (2) reported the strength and durability characteristics of self-compacting concrete. Nagaratnam et al. (3) studied the effect of fibres with different aspect ratio in resisting torsional loads in vibrated concrete. Patil et al. (4) and Gunneswara Rao et al. (5, 6) studied the effect of steel fibres reinforced concrete beams under torsion and concluded that with addition of steel fibres the torsional properties of plain beams improve with increase in the concrete tensile strength. Pająk and Ponikiewski (7) studied the effect of shape of steel fibres on SCC and reported that hookend fibres significantly influence on post peak behaviour of SCC compared to straight fibres. Sable et al. (8) reported the effect of different type of steel fibres on shear and torsional strength of SCC and VC with different aspect ratios. Raut et al. (9) studied the under reinforced SFRC beams and concluded that the addition of fibres increases the torsional toughness, ultimate torsional strength and affects the ductility. Tabsh et al. (10) reported that no significant changes will take place in mechanical properties of recycled aggregate concrete up to 30% replacement of natural coarse aggregate [NCA]. A study on strength of recycled coarse aggregate with different replacement levels was done by Saha (11) and it was observed that 25% replacement will not change the strength characteristics significantly. Yazici et al. (12) have investigated the effect of recycled coarse aggregate in SCC and reported that it effects the rheological properties positively. The addition of recycled coarse aggregate can be equal to 75% without substantial worsening of mechanical properties.

Very few research investigations were done on torsional characteristics of SCC but the research on torsional behaviour of RCA based SFRSCC is scant. Hence, the experimental study aims to examine the effect of steel fibres with different aspect ratios on workability, compressive strength, split tensile strength, ultimate torque, torsional toughness, torsional stiffness, angle of twist and inclination of cracking pattern of SCC and a comparison is made with vibrated concrete. 32 beams were cast with a parametric variation in plain and fibre reinforced concrete, aspect ratio of hook end steel fibres, type of concrete with 50 MPa, 80 MPa strength and 0.5% dosage of fibres by volume of concrete. Finite element modelling has been done using ATENA-GID (24) [Advanced Tool in Engineering for Non-Linear Analysis] and a correlation was done with experimental results.

2. Materials and methods

2.1. Materials

Ordinary Portland cement 53 grade, conforming to IS: 12269-1999(3) with size maximum of 90 μ has been used in the present investigation. The specific gravity and standard consistency were 3.12 g/cm³ and 32% respectively.

80 MPa oraz stałą zawartością włókien wynoszącą 0,5% objętości betonu. Modelowanie za pomocą Metody Elementów Skończonych [MES] przeprowadzono stosując oprogramowanie ATENA-GID [Zaawansowane Narzędzie Inżynieryjne do Analizy Nieliniowej], a wyniki porównano z wynikami doświadczalnymi.

2. Materiały i metody

2.1. Zastosowane materiały

Zastosowano zwykły cement portlandzki klasy 53, zgodny z normą indyjską IS: 12269-1999 (3) o uziarnieniu maksymalnym 90 μm . Jego ciężar właściwy i konsystencja normowa wynosiły odpowiednio 3,12 g/cm^3 i 32%.

Do badań zastosowano kruszywo drobne pozyskane z pobliskiej rzeki należące do kategorii 2, zgodnie z normą indyjską IS: 383-1999 (14). Gęstość nasypowa, ciężar właściwy oraz moduł rozdrobnienia piasku wynosiły odpowiednio 1,41 g/cm^3 , 2,68 g/cm^3 oraz 2,9.

Stosowano kruszywo grube, którym był łamany granit o maksymalnej średnicy ziaren 16 mm, zgodny z normą indyjską IS: 383-1999 (14). Gęstość nasypowa kruszywa grubego, ciężar właściwy i moduł rozdrobnienia wynosiły odpowiednio 1,46 g/cm^3 , 2,7 g/cm^3 i 7,1.

Zastosowano także kruszywo grube z recyklingu otrzymane poprzez pokruszenie kostek i belek betonowych stosowanych do badań w laboratorium betonu w Krajowym Instytucie Technologii w Warangal. Przed zastosowaniem, kruszywo wypłukano w wodzie w celu usunięcia zanieczyszczeń i wstępnie namoczono przez 30 minut, a następnie wysuszono w powietrzu. Gęstość nasypowa, ciężar właściwy i moduł rozdrobnienia kruszywa grubego wynosiły odpowiednio 1,308 g/cm^3 , 2,53 g/cm^3 i 7,15.

W badaniach zastosowano popiół lotny klasy F, zgodny z normą IS: 3812: Część-II-2003 (15) dostarczony z elektrociepłowni w Ramagundam w Indiach o ciężarze właściwym wynoszącym 2,18 i rozdrobnieniu 6400 cm^2/g .

Do betonu o wysokiej wytrzymałości zastosowano pył krzemionkowy zgodny z normą indyjską IS: 15388, [Część-II]-[2003] (16) dostarczoną przez firmę Elkam o uziarnieniu 150 nm i ciężarze właściwym 2,22 g/cm^3 . Dodatek krzemionki wynosiła 8% masy cementu w przypadku BSZ i 5% w przypadku BW.

Jako domieszkę zastosowano superplastyfikator na bazie zmodyfikowanego polikarboksyłanu, zgodny z normą IS 9103-1999 (17). Jego nazwa handlowa to Chryso Fluid Optima S-815. Optymalną ilość domieszki ustalono na podstawie mieszanek próbnych.

Zastosowano gładkie ocynkowane włókna stalowe z haczykowatymi końcówkami firmy Stewols India Private Limited, o współczynniku kształtu wynoszącym 50 [0,6 mm średnicy, 30 mm długości], 70 [0,5 mm średnicy, 35 mm długość] i 100 [0,5 mm średnicy, 50 mm długości]. Granica plastyczności stosowanych włókien wynosiła 275 MPa.

Locally available river sand conforming to Zone-II as per IS: 383-1999(14) as fine aggregate has been used. The bulk density, specific gravity, and fineness modulus of the sand were 1.41 g/cm^3 , 2.68 g/cm^3 , and 2.9 respectively.

Crushed granite aggregate of maximum 16 mm size conforming to IS: 383-1999(14) has been used as coarse aggregate. The bulk density, specific gravity and fineness modulus of the coarse aggregate were 1.46 g/cm^3 , 2.7 g/cm^3 and 7.1 respectively.

The recycled coarse aggregate [RCA] used in this study was obtained by crushing tested specimens of concrete cubes and beams available in concrete laboratory of the National Institute of Technology, Warangal. Before using, the aggregates were washed with water to remove any unwanted substances, and pre-soaked for 30 minutes and then air-dried. The bulk density, specific gravity and fineness modulus of the coarse aggregate used were 1.308 g/cm^3 , 2.53 g/cm^3 and 7.15 respectively.

Fly ash of class F conforming to IS: 3812: Part-II-2003(15) obtained from Ramagundam thermal power plant (India) with a specific gravity of 2.18 g/cm^3 and fineness of 6400 m^2/kg was used.

Micro silica conforming to IS: 15388, (Part-II)-(2003) (16) obtained from Elkem Company with size of 150 nm and specific gravity of 2.22 g/cm^3 has been used. The dosage of micro silica was 8% and 5% by mass of cement for SCC and VC respectively.

Modified polycarboxylate based superplasticizer conforming to IS 9103-1999(17) as chemical admixture was used. The product name is Chryso Fluid Optima S-815. Optimum dosage is confirmed by various trial mixes.

Plain galvanized steel fibres [SF] of hook end type from Stewols India Private Limited, with aspect ratio 50 [0.6 mm diameter, 30 mm length, 70 [0.5 mm diameter, 35 mm length] and 100 [0.5 mm diameter, 50 mm length] were used. Fibres of all aspect ratios had a yield strength of 275 MPa.

Potable water is used for mixing and curing of concrete as per IS 456-2005(18).

2.2. Methods

2.2.1. ATENA-GID

ATENA-GID (24) is a finite element based software for nonlinear analysis of reinforced concrete structures. The real behaviour of concrete and reinforced concrete structures including concrete cracking, crushing and reinforcement yielding can be easily simulated in ATENA-GID is an interactive graphical user interface used for the definition, preparation and visualization of all the data related to numerical simulation.

2.2.2. Mix Proportions

Mix proportions for 50 MPa and 80 MPa vibrated concrete are developed based on IS: 10262-2009 (19) while SCC mix proportions were prepared based on Nan Su, et.al (20) method. The details of

Tablica 1 / Table 1

ZAWARTOŚĆ SKŁADNIKÓW, kg/m³

QUANTITIES OF INGREDIENTS, kg/m³

Oznaczenie betonu Designation of concrete	Rodzaj betonu Type of concrete	Cement	Popiół lotny Fly ash	Mikrokrzemionka Micro silica	Kruszywo drobne Fine aggregate	Kruszywo grube Coarse aggregate	Woda Water	SP	w/s w/b
50MPa	BSZ / SCC	430	180	0	851	783	194	5.16	0.32
	BW / VC	435	150	0	732	884	200	0.6	0.34
80 MPa	BSZ / SCC	500	110	40	800	775	190	6	0.29
	BW / VC	450	100	22	821	920	162	1.7	0.28

Do mieszanek zarobowych i do pielęgnacji próbek użyto wody pitnej, zgodnej z normą IS 456-2005 (18).

2.2. Metody

2.2.1. ATENA-GID:

ATENA jest to zaawansowane oprogramowanie do analizy nieliniowej zbrojonych elementów konstrukcyjnych. Program ten pozwala na łatwą symulację zjawisk występujących w betonie i betonowych konstrukcjach zbrojonych takich jak pękanie, kruszenie i uplastycznienie zbrojenia. GiD to interaktywny graficzny interfejs służący do określania, przygotowywania i wizualizacji wszystkich danych związanych z symulacją numeryczną.

2.2.2. Proporcje mieszanek

Proporcje mieszanek dla betonu wibrowanego o wytrzymałości 50 MPa i 80 MPa opracowano na podstawie normy indyjskiej IS: 10262-2009 (19), natomiast mieszanki BSZ opracowano na podstawie metody Nan Su, i in. (20). Ilość poszczególnych składników oraz wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu i wytrzymałość na ściskanie zbadaną na kostkach sześciennych podano odpowiednio w tablicach: 1–4. Badania próbek betonowych przeprowadzono zgodnie z normą indyjską IS: 516-1999 (21).

2.3. Badania

Zbadano belki wykonane z BSZ oraz BW zbrojone włóknami o wskaźnikach kształtu włókien stalowych z haczykowatymi końcówkami wynoszących 50, 70 i 100. Zawartość włókien była stała i wynosiła 0,5% objętości betonu. Przygotowano 32 belki o szerokości przekroju poprzecznego 100 mm i długości 200 mm oraz rozpiętości całkowitej 2300 mm. Zaformowano po trzy kostki sześciennie o wymiarach 150x150x150 mm i zbadano ich wytrzymałość na ściskanie oraz po trzy walce o wysokości 300 mm i średnicy 150 mm i przeprowadzono badania wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu zgodnie z normą indyjską IS: 516-1999 (21). Wszystkie próbki dojrzewały w tych samych warunkach przez 28 dni.

2.4. Stanowisko do badań

Po 28 dniach dojrzewania, na pobielonych belkach wyznaczono dwa odcinki w odległości L/3 i 2L/3 od wschodniej strony belki,

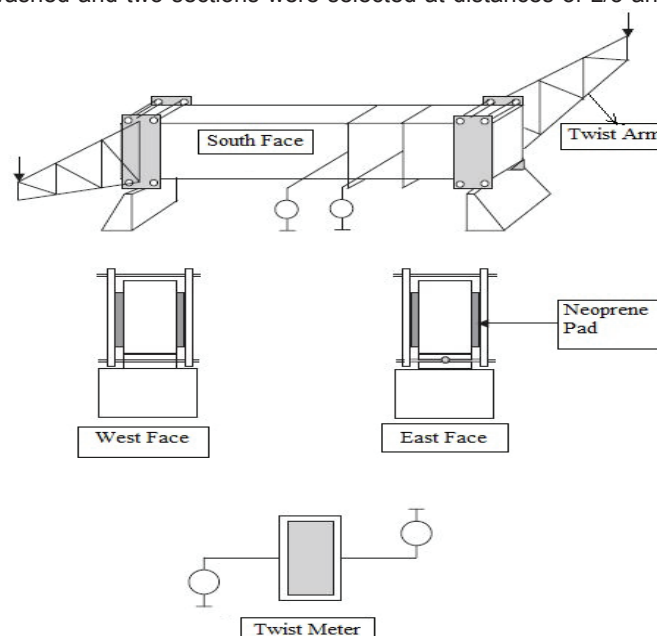
quantities of ingredients along with the corresponding split tensile strengths and cube compressive strengths are presented in Tables 1 and 4. Testing of concrete specimens was done according to IS: 516-1999(21).

2.3. Experimental investigation

The study includes testing of fibre reinforced SCC and VC beams with aspect ratios 50, 70 and 100 of hook end steel fibres. The dosage of fibres was kept constant in the entire work i.e. 0.5% by volume of concrete. 32 beams were cast each with a cross-sectional width of 100 mm and length of 200 mm having an overall span of 2300 mm. Three companion cubes of size 150x150x150 mm were cast and tested to determine the compressive strength and cylinders of size 300 mm height and 150 mm diameter were cast to determine the split tensile strength of concrete as per IS: 516-1999(21). All the specimens were cured under same conditions up to 28 days.

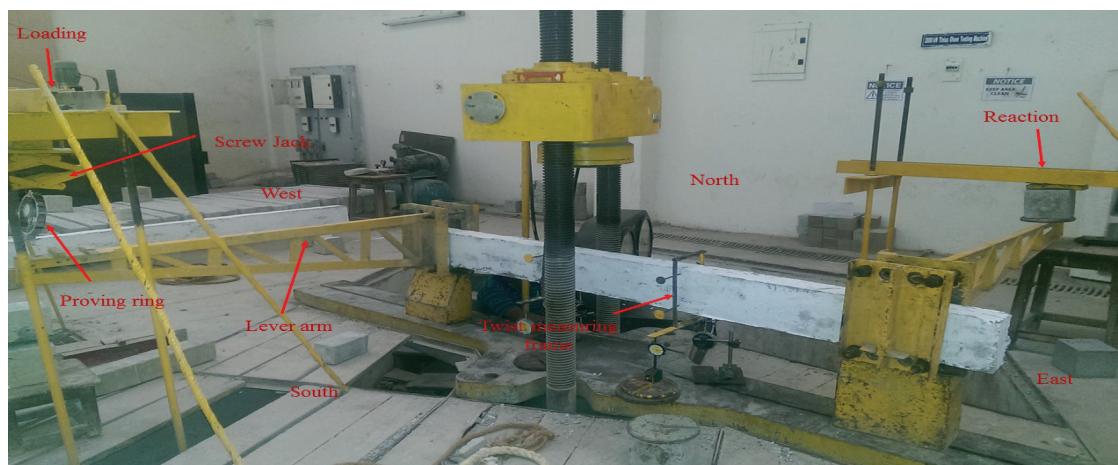
2.4. Experimental setup

After 28 days of curing, the beams described earlier were white washed and two sections were selected at distances of L/3 and



Rys. 1. Różne schematy stanowiska badawczego

Fig. 1. Different views of test setup



Rys. 2. Stanowisko do badania skręcania

Fig. 2. Torsion test set up

gdzie "L" oznacza długość niepodpartą. Te dwa odcinki zaznaczono na wszystkich bokach belek, aby umożliwić pomiar nachylenia pęknięć. Końce belek wsparto na dwóch sztywnych podporach. Aby umożliwić skręcanie belek, wałek umieszczono na podporach w kierunku wzdłużnym. Podporę na wschodnim boku belki przy osi wzdłużnej częściowo ograniczono, aby umożliwić rotację. Ramię skrętne o długości 1,6 m zainstalowano na każdej podporze belki. W celu przyłożenia obciążenia na ramię skrętne, zastosowano mechaniczny dźwignik śrubowy. Belkę poddano skręcaniu przy jednoczesnym wyeliminowaniu możliwości zginania, tak że ramię skrętne i powierzchnia obciążenia były prostopadłe do osi wzdłużnej belki. W celu uniknięcia miejscowego kruszenia belki, między stalowymi płytami ramion skrętnych a bokami belki, zamocowano podkładki neoprenowe o grubości 5 mm. Przygotowane stanowisko badawcze pokazano na rysunku 1.

Mimośród obciążenia wynosił 1,51 m w środkowej strefie belki. Obciążenie zmierzono za pomocą dynamometru pierścieniowego. Dynamometr ten umieszczono także na ograniczonym końcu, aby sprawdzić reakcję momentu obrotowego. Do zmierzenia skrętu belki zastosowano mierniki skrętu. Mierniki skrętu składające się ze stalowej ramy przymocowano do belki za pomocą śrub poprzecznych [rysunek 2]. Aby ułatwić pomiar skrętu, zastosowano sztywne stalowe ramy o długości ramienia 230 mm umieszczone na pionowych bokach ramy. Pod stalowymi ramionami ustawiono cztery czujniki pomiarowe, jak na rysunku 2. Rozstaw pomiędzy czujnikami wynosił 250 mm, co umożliwiło obliczenie skrętu na jednostkę długości.

2.5. Metody badawcze

Obciążenie poprzeczne przechodziło stopniowo przez mechaniczny dźwignik śrubowy na sztywne podpory belki umieszczone w kierunku wschód-zachód jak pokazano na rysunku 2 na stoliku maszyny badawczej Tinius-Olsen. Podczas przykładania obciążenia, szczególną uwagę poświęcono temu, aby powierzchnia obciążenia nie wychodziła poza obszar ramion skrętnych. Dzięki temu ograniczono zginanie belki. Do momentu zniszczenia próbki, dla każdego przyrostu obciążenia obliczano odpowiedni skręt na

$2L/3$ from east side of the beam where 'L' is the unsupported length. The two sections were marked on all faces of the beams to enable measurement the inclination of crack. Simply supported end conditions were created by mounting the beams on two rigid supports. To enable twisting of beam, a roller was positioned on the supports in the longitudinal direction. The support on east face of beam about the longitudinal axis was partly restrained to rotate. The twist arms at each support of the beam were specially made and positioned with an arm length of 1.6 m. Mechanical screw jack was used to apply the load on the twist arm. The beam was subjected to pure torsion and any probability of bending was avoided, so that the twisting arm and plane of loading were at right angles to the longitudinal axis of the beam. To avoid local crushing, neoprene pads of 5 mm thickness were placed between the steel plates of twisting arms and sides of the beam. The complete testing arrangement is shown in Fig.1.

Eccentricity of the load was 1.51 m from centre of the beam. The load was measured by using a proving ring. At the restraining end a proving ring was also placed to verify the reaction torque. Twist meters were used to measure the twist of the beam. By means of transverse screws, twist meters consisting of steel frame attached to the beam as shown in Fig. 2. To facilitate the measurement of rotation, rigid steel frames with an arm length of 230 mm on vertical faces of the frame were used. Four dial gauges were positioned underneath the steel arms as shown in Fig. 2. The spacing between the dial gauges was 250 mm which enabled calculation of twist per unit length.

2.5. Testing methods

Transverse load was applied gradually through mechanical jack on rigid supports of the beam placed in East-West direction as shown in Fig. 2 on table of Tinius-Olsen testing machine. While applying the load, extreme care was taken such that the plane of loading does not fall out of the plane of twist arms. Consequently, bending of beam has been restrained. Until the failure of the specimen, the respective twist per unit length was calculated for every increment

jednostkę długości. Nachylenie potencjalnego pęknięcia mierzone po zakończeniu badania. Przebieg pęknięcia belki z każdej z czterech stron pokazano na rysunkach 3 i 4. Metodę badawczą wdrożono na podstawie badań przeprowadzonych przez G. C. Behera (22).

of the load. Inclination of potential crack was measured after the completion of the test. Crack pattern of beams in four directions are shown in Figs. 3 and 4. Testing procedure was adopted based on the experimentation done by Behera (22).

3. Wyniki i dyskusja

3. Results and discussions

3.1. Urabialność

3.1. Workability

Właściwości BSZ zbadano przeprowadzając różne pomiary. Wszystkie wyniki badań świeżych mieszanek BSZ takie jak rozplływ na stoliku, lejek V i J-pierścień sprawdzono zgodnie z wytycznymi specyfikacji EFNARC [European Federation of National Associations Representing Concrete] (23). Dla BW przeprowadzono natomiast

Various tests were conducted to verify the characteristics of fresh SCC. All the test results like slump flow, V-funnel and J-ring were confirming to EFNARC (European Federation of National Trade Associations) (23) guidelines for SCC. Slump test and compaction factor test were conducted for VC. The fresh properties of SCC and VC are shown in Tables 2 and 3.

Tablica 2 / Table 2

WŁAŚCIWOŚCI ŚWIEŻYCH MIESZANEK Z BETONU SAMOZAGĘSZCZAJĄCEGO SIĘ [EFNARC 2005]

FRESH PROPERTIES OF SELF COMPACTING CONCRETE [EFNARC 2005]

Rodzaj badania Name of the test	Rozplływ na stoliku Slump flow mm		T _{500 mm} , sec		J-pierścień J- ring mm		Lejek V / V- funnel sec		Lejek V T _{5 min} V- funnel T _{5 min} sec	
	50 MPa	80 MPa	50 MPa	80 MPa	50 MPa	80 MPa	50 MPa	80 MPa	50 MPa	80 MPa
Wartości graniczne wg EFNARC EFNARC limits	550-850		2-5		0-10		6-12		6-15	
Oznaczenie próbek betonowych* Designation of concrete*	50 MPa	80 MPa	50 MPa	80 MPa	50 MPa	80 MPa	50 MPa	80 MPa	50 MPa	80 MPa
SCC plain	755	790	2.44	2.3	4	6	7	7	10	9
SFSCC 50	675	745	2.59	2.8	7	8	8	8	11	11
SFSCC 70	640	730	3.43	3.2	9	9	9	9	12	12
SFSCC 100	610	680	3.70	3.8	10	10	10	10	12	12
RSCC plain	740	775	2.62	2.84	5	6	8	6	10	9
RSFSCC 50	670	730	3.42	3.54	7	8	9	8	12	11
RSFSCC 70	630	720	3.80	3.98	9	9	10	9	13	13
RSFSCC 100	600	670	4.12	4.05	10	10	12	10	14	14

*SCC plain – without fibres/BSZ bez dodatku włókien, SF – steel fibres/włókna stalowe, R – recycled coarse aggregate/kruszywo grube pochodzące z recyklingu

Tablica 3 / Table 3

WŁAŚCIWOŚCI ŚWIEŻYCH MIESZANEK Z BETONU WIBROWANEGO ZGODNE Z IS-1199 [2004]

PROPERTIES OF THE MIX OF VIBRATED CONCRETE IS-1199 [2004]

Oznaczenie próbek betonowych* Designation of concrete*	Rodzaj kruszywa Type of aggregate	Rozplływ/Slump, mm		Współczynnik zagęszczenia Compaction factor	
		50 MPa	80 MPa	50 MPa	80 MPa
VC plain	Naturalne Natural	120	110	0.95	0.91
SFVC 50		98	93	0.91	0.87
SFVC 70		93	87	0.9	0.82
SFVC 100		87	82	0.89	0.78
RVC plain	Z recyklingu RCA	95	90	0.93	0.88
RSFVC 50		78	82	0.88	0.83
RSFVC 70		72	76	0.84	0.79
RSFVC 100		68	68	0.8	0.75

* VC plain – without fibres/BW bez dodatku włókien, SF – steel fibres/włókna stalowe, R – recycled coarse aggregate/kruszywo grube pochodzące z recyklingu

badania rozplywu na stoliku i wspolczynnika zagęszczenia. Właściwości świeżych mieszanek BSZ i BW podano w tablicach 2 i 3.

3.2. Compressive and split tensile strength

3.2. Wytrzymałość na ściskanie i rozciąganie przy rozlupywaniu

Tablica 4 / Table 4

WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE PRÓBEK BETONU BSZ I BW O WYTRZYMAŁOŚCI 50 MPa I 80 MPa ZAWIERAJĄCYCH KRUSZYWO NATURALNE I KRUSZYWO Z RECYKLINGU

DETAILS OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF NA AND RCA BASED SCC AND VC SPECIMENS OF 50 MPa AND 80 MPa CONCRETE

Oznaczenie próbek betonowych* Designation of concrete*	Rodzaj betonu Type of concrete	Wytrzymałość na ściskanie na kostkach Cube compressive strength MPa				Wytrzymałość na rozciąganie przy rozlupywaniu Split tensile strength MPa			
		50 MPa		80 MPa		50 MPa		80 MPa	
		NA*	RCA*	NA*	RCA*	NA*	RCA*	NA*	RCA*
VC plain	BW Vibrated concrete	50.1	46.8	80.6	73.5	3.37	3.18	4.67	4.24
SFVC-50		53.7	50.9	84.2	76.8	3.75	3.56	5.22	4.92
SFVC-70		55.1	52.4	85.6	79.8	3.89	3.68	5.36	5.06
SFVC-100		52.8	49.7	83.4	76.1	3.68	3.45	5.16	4.88
SCC-plain	BSZ SCC	50.2	47.3	81.0	74.9	3.41	3.25	4.81	4.56
SFSCC-50		52.5	49.9	84.9	79.6	3.88	3.73	5.52	5.25
SFSCC-70		54.4	52.5	86.2	80.5	3.98	3.84	5.68	5.38
SFSCC-100		51.6	49.1	83.2	77.2	3.76	3.62	5.34	4.96

* SCC plain – without fibres/BSZ bez dodatku włókien, VC plain – without fibres/BW bez dodatku włókien, SF – steel fibres/włókna stalowe, R and/i RCA – recycled coarse aggregate/kruszywo grube pochodzące z recyklingu, NA – natural aggregate/kruszywo naturalne

3.3. Przebieg pęknięć

Przebieg pęknięć belek poddanych działaniu skręcania można analizować poprzez zmierzenie nachylenia pęknięcia po zniszczeniu belki. Jednakowe naprężenia ściskające i rozciągające wytworzone w wyniku skręcania prowadzą do powstania pęknięcia pod kątem 45°. Nachylenie pęknięcia oblicza się poprzez zmierzenie rozstępu rysy ze wszystkich czterech stron belki. Dla wszystkich badanych belek, kąt nachylenia pęknięć wynosił od 42° do 47° w stosunku do osi wzdluznej. Można stwierdzić, że kąt nachylenia pęknięcia nie zależy od dodatku włókien, kruszywa z recyklingu, a także wzrostu współczynnika kształtu włókien stalowych, a głównie zależy od naprężeń ściskających i rozciągających.

3.3. Crack patterns

The failure pattern of beams under pure torsion can be analysed by measuring inclination of crack after failure. The equal compressive and tensile stresses produced due to torsion lead to failure at 45° crack angle. Inclination of crack pattern is calculated by measuring distance of crack from all four sides of beam. For all beams, inclination of crack is 42° to 47° with respect to longitudinal axis. It can be observed that the inclination of crack angle is not affected by addition of fibres, recycled aggregate as well as increase of aspect ratio as it is mainly depends on compressive and tensile stresses.

3.4. Właściwości związane ze skręcaniem

3.4. Torsional properties

Tablica 5 / Table 5

WŁAŚCIWOŚCI ZWIĄZANE ZE SKRĘCANIEM BELEK Z BSZ I BW

TORSION PROPERTIES OF SCC AND VC BEAMS

Oznaczenie* Designation*	Maksymalny moment obrotowy Ultimate torque kNm		Skręt przy maksymalnym momencie obrotowym Twist at ultimate torque 10 ⁻³ rad/m		Początkowa sztywność skrętna Initial torsional stiffness kNm ²		Odporność na skręcanie Torsional toughness 10 ⁻³ kNm/m	
	50 MPa	80 MPa	50 MPa	80 MPa	50 MPa	80 MPa	50 MPa	80 MPa
VC plain	2.52	3.57	6.50	7.10	541.87	741.74	10.59	16.49
SFVC 50	2.82	3.95	7.90	9.50	585.41	776.46	15.09	28.32
SFVC 70	2.95	4.08	8.50	11.20	602.23	796.84	17.23	34.13
SFVC 100	2.74	3.82	7.31	9.10	572.34	767.54	12.68	24.58
SCC plain	2.65	3.70	6.71	7.54	600.55	757.54	10.87	18.46
SFSCC 50	2.95	4.24	8.90	11.92	642.14	804.76	19.02	37.78
SFSCC 70	3.08	4.38	9.20	13.80	662.57	817.65	19.92	46.97
SFSCC 100	2.86	4.12	7.9	11.32	632.56	794.93	14.81	34.89
RVC plain	2.38	3.25	6.10	6.51	490.12	690.64	8.64	13.45
RSFVC 50	2.67	3.72	7.27	8.60	542.97	736.3	12.23	22.00
RSFVC 70	2.81	3.84	7.85	10.20	558.32	751.20	13.78	28.29
RSFVC 100	2.62	3.64	6.60	8.20	529.82	724.01	11.03	20.14
RSCC plain	2.51	3.48	6.20	6.90	538.54	702.35	9.73	15.12
RSFSCC 50	2.83	4.08	8.21	10.90	592.82	743.82	16.02	32.22
RSFSCC 70	2.97	4.24	8.70	12.20	611.54	752.21	18.01	38.60
RSFSCC 100	2.77	3.96	7.10	10.40	581.37	730.21	12.92	29.59

* SCC plain – without fibres/BSZ bez dodatku włókien, VC plain – without fibres/BW bez dodatku włókien, SF – steel fibres/włókna stalowe, R – recycled coarse aggregate/kruszywo grube pochodzące z recyklingu

4. Dyskusja wyników

Stwierdzono, że dodatek włókien stalowych nieznacznie pogorszył urabialność w przypadku obu rodzajów betonu. Urabialność mieszanek betonowych zawierających kruszywo z recyklingu uległa pogorszeniu na skutek dużej absorpcji wody jaką wykazuje ten rodzaj kruszywa. Dodatek włókien stalowych w BSZ także pogorszył urabialność, ponieważ hamują one swobodny rozptył mieszanki. Pogorszenie tej właściwości nie przekracza jednak wartości granicznych zawartych w EFNARC [2005]. Wzrost wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu jest większy niż wytrzymałości na ściskanie w przypadku obu rodzajów betonu z powodu działania mostkującego włókien w powstałych pęknięciach. Wyniki badań właściwości mechanicznych betonu BSZ i BW wskazują na to, że włókna o współczynniku kształtu wynoszącym 70 poprawiają właściwości związane z rozciąganiem bardziej niż włókna o współczynniku kształtu 50 i 100.

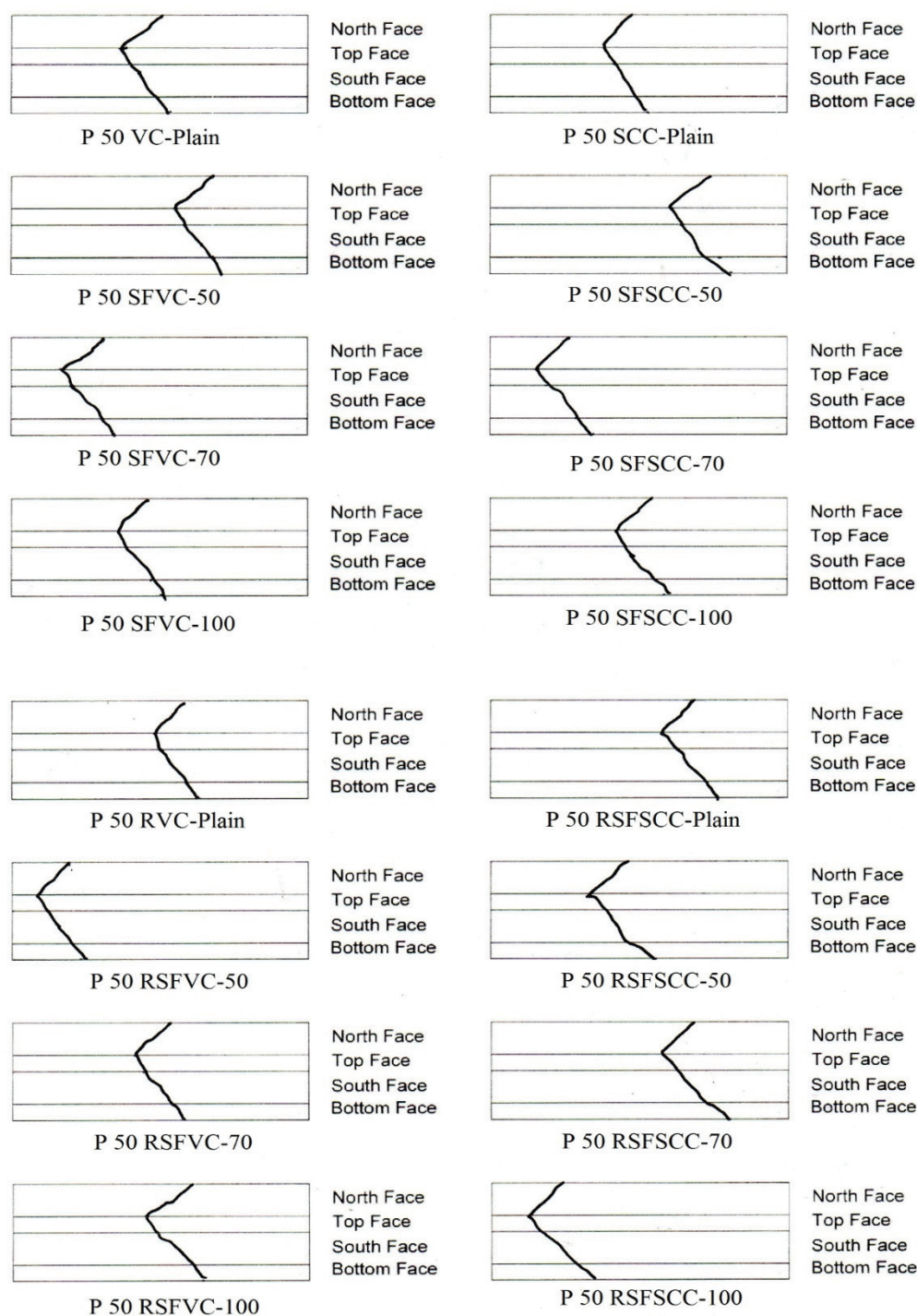
Z przeprowadzonych badań wynika, że belki z BSZ i BW z lub bez dodatku włókien stalowych, ulegały zniszczeniu charakteryzującemu się jednym pęknięciem. Zniszczenie we wszystkich belkach niezawierających włókien było nagłe, gwałtowne i powodowało całkowite złamanie belki na dwie części. Natomiast belki z BSZ i BW z włóknami stalowymi miały lepszą ciągliwość, co pozwalało na zachowanie belki w całości bez złamania na dwie osobne

4. Discussion of test results

It was observed that addition of steel fibres marginally reduced the workability of the both concretes. The workability of RAC mixtures was reduced because of high water absorption capacity of recycled aggregates. Also, addition of steel fibres in SCC reduce the workability as steel fibres act as barrier to the movement of concrete. But the reduction of workability is controlled and is within the limits of EFNARC (2005). The increase in split tensile strength is more significant than compressive strength in both concretes due to bridging action of fibres in cracks. From the mechanical properties of both SCC and VC, it can be stated that the fibres with 70 aspect ratio exhibited more tensile properties than 50 and 100 aspect ratio.

From the experiments it can be observed that both plain and steel fibrous beams of SCC and VC failed with one potential crack. The failure of all plain beams were sudden, violent and got separated. While steel fibrous beams of both SCC and VC have shown better ductile nature without separating into two pieces though failed with a solitary potential crack as shown in Fig. 5. This is due to interlocking of steel fibres in matrix.

Skew bending type of failure was observed in plain and fibre concrete beams of both the concretes. On the longer face tension crack



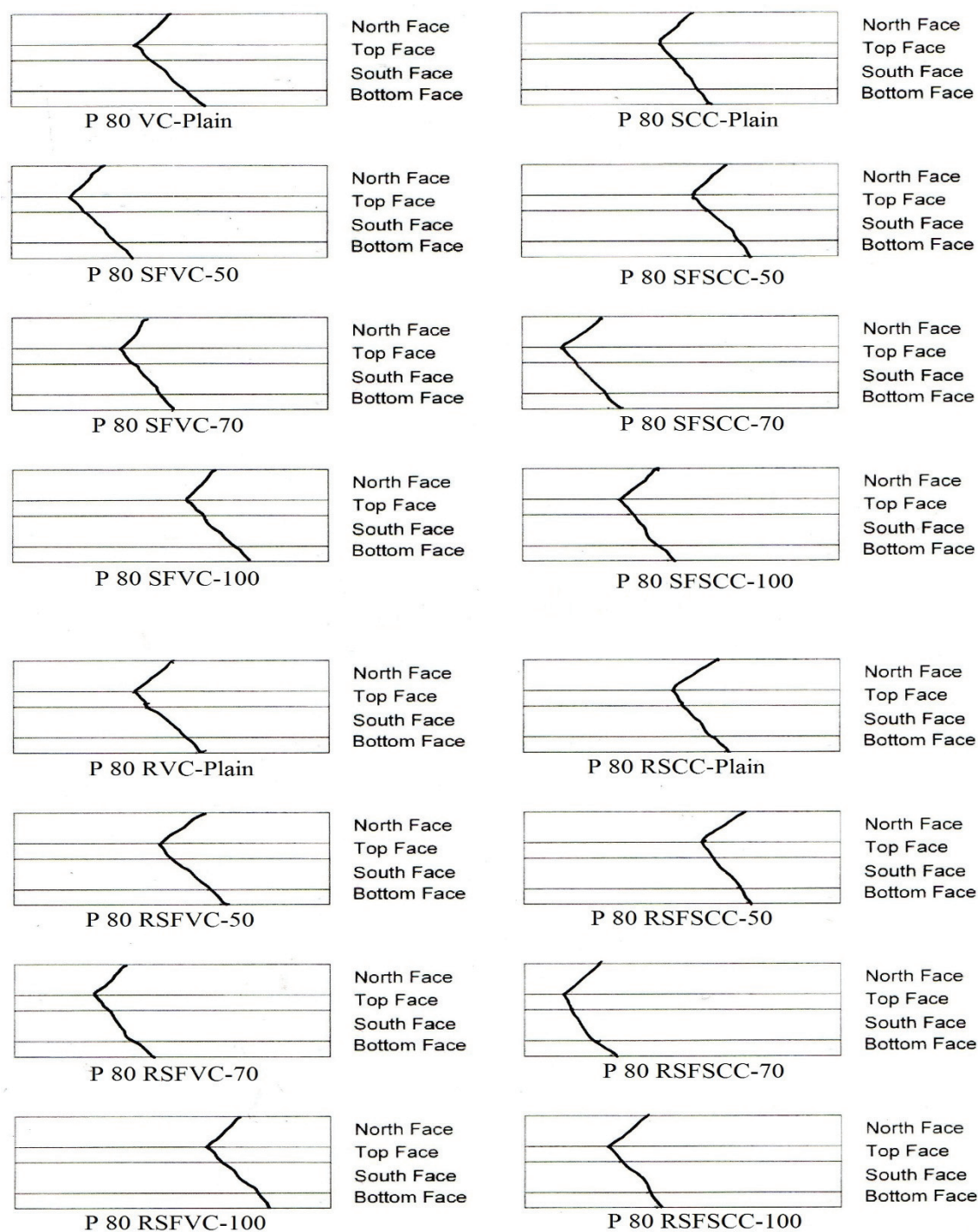
Rys. 3. Przebieg pęknięć belek z każdej z czterech stron dla próbek betonu 50 MPa bez i z dodatkiem włókien stalowych

Fig. 3. Crack pattern on four sides of the plain and with fibres concrete beams of 50 MPa

części, pomimo utworzenia się pojedynczej rysy, pokazanej na rysunku 5. Jest to spowodowane zazębaniem się włókien stalowych w matrycy cementowej.

W przypadku belek z BSZ i BW bez i z dodatkiem włókien pęknięcia powstałe na skutek skręcania biegły zgodnie ze schematem zginania ukośnego. Dłuższe pęknięcia powstawało na jednym obciążanym boku belki i dalej biegło przez górną i dolną ścianę po czym obejmowało czwarty bok na zasadzie ściskanego zawiasu, co doprowadzało do zniszczenia [złamania belki]. Właściwości

is formed and prolonged to top and bottom faces and finally joined on fourth face as a compression hinge and led to failure (collapse). The torsional properties of the both concretes are shown in Table 5. The torsional strength has increased with fibres addition in the both concretes. The increment of torsional strength in SCC beams is higher than VC for all aspect ratios. This is due to increment in tensile strength of SCC with addition of fibres. This is causing the significant improvement of torsional strength of SCC. There is more uniform distribution of fibres throughout the mix. It led to increase the bond between fibres and cement matrix. This indicates higher



Rys. 4. Przebieg pęknięć belek z każdej z czterech stron dla próbek betonu 80 MPa bez i z dodatkiem włókien stalowych

Fig. 4. Crack pattern on four sides of the plain and with fibres concrete beams of 80 MPa

związane ze skręcaniem obu rodzajów betonów podano w tablicy 5. Wytrzymałość na skręcanie rośnie wraz z wprowadzeniem dodatku włókien w przypadku obu rodzajów betonu. Przyrost wytrzymałości na ściskanie jest większy dla belek z BSZ w porównaniu do BW i dotyczy to wszystkich współczynników kształtu. Jest to spowodowane wzrostem wytrzymałości na rozciąganie BSZ z dodatkiem włókien. Zaobserwowano znaczą poprawę wytrzymałości na skręcanie w przypadku BSZ. Rozkład włókien jest bardziej równomierny w całej mieszance. Prowadzi to do wzrostu wiązania pomiędzy włóknami i matrycą cementową. Wskazuje to na lepszą

potentiality of fibres in counteracting the torsional loads in SCC compared to VC. The linear portion of torque-twist curve (slope of initial tangent) indicate torsional stiffness of beams and was found to increase with addition of steel fibres. This increase is essentially with increase in modulus of matrix due to steel fibres. The area under torque-twist curve indicate torsional toughness of concrete which is observed to be significantly increased with addition of steel fibres. This is due to crack delaying property and energy absorption capacity of matrix with fibres. The percentage increase in torsional properties of fibre concrete beams both SCC and VC

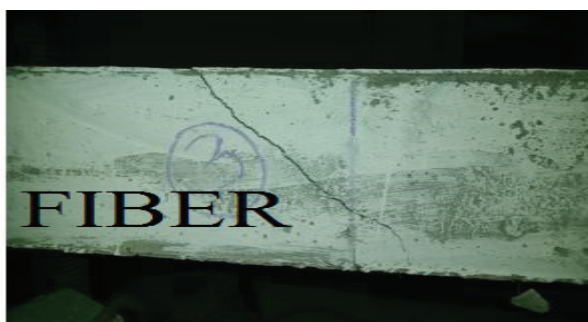


Fig. 5. The formation of crack in plain and fiber beams

Rys. 5. Pęknięcia powstałe w belkach bez dodatku włókien [po lewej stronie] i z włóknami stalowymi [po prawej stronie]

zdolność włókien do przeciwdziałania obciążeniom skrętnym w BSZ w porównaniu do BW. Liniowy odcinek krzywej moment obrotowy-skręt [nachylenie początkowej stycznej] wskazujący sztywność skrętną wzrasta wraz z dodatkiem włókien stalowych. Wzrost ten jest wyraźniejszy ze wzrostem modułu sprężystości matrycy spowodowanym dodatkiem włókien stalowych. Obszar pod krzywą moment obrotowy-skręt wskazujący odporność na skręcanie betonu znacznie wzrasta w przypadku dodatku włókien stalowych. Wynika to z opóźnienia pęknięcia i zdolności do pochłaniania energii przez matrycę zawierającą włókna. Poprawę właściwości związanych ze skręcaniem belek z BSZ i BW zawierających włókna w porównaniu do belek bez włókien pokazano w tablicy 6.

Można stwierdzić niewielki wzrost maksymalnego momentu obrotowego, natomiast znaczny przyrost skrzywienia przy maksymalnym momencie obrotowym oraz odporności na skręcanie zaobserwowano w przypadku dodatku włókien o współczynniku kształtu 50 i 70. Stwierdzono także znaczne zwiększenie kąta skrzywienia przy maksymalnym momencie obrotowym oraz odporności na skręcanie

with respect to plain beams are shown in Table 6.

It can be observed that there is a moderate increase in ultimate torque, but a significant increment has been observed in twist at ultimate torque and torsional toughness with addition of fibres for aspect ratio of 50 and 70. It can be stated that there is a pronounced improvement of angle of twist at ultimate torque and torsional toughness is higher in 80 MPa than in 50 MPa in both concretes with natural and recycled aggregate. This indicates that the effect of steel fibres play a prominent role in more brittle natured matrix. The maximum increase of all torsional properties was found in steel fibres of aspect ratio 70 in all specimens. It may be due to availability of optimum length to develop the interfacial bond stress, and contributed to increase of the torsional properties of beams. The effect of steel fibres is considerably higher in SCC than in VC with increase in aspect ratio up to 70 there is a corresponding increase in torsional properties. The flowability of SCC made fibres to distribute uniformly throughout concrete due to this homogeneity and integrity is being enhanced better than VC. This might be

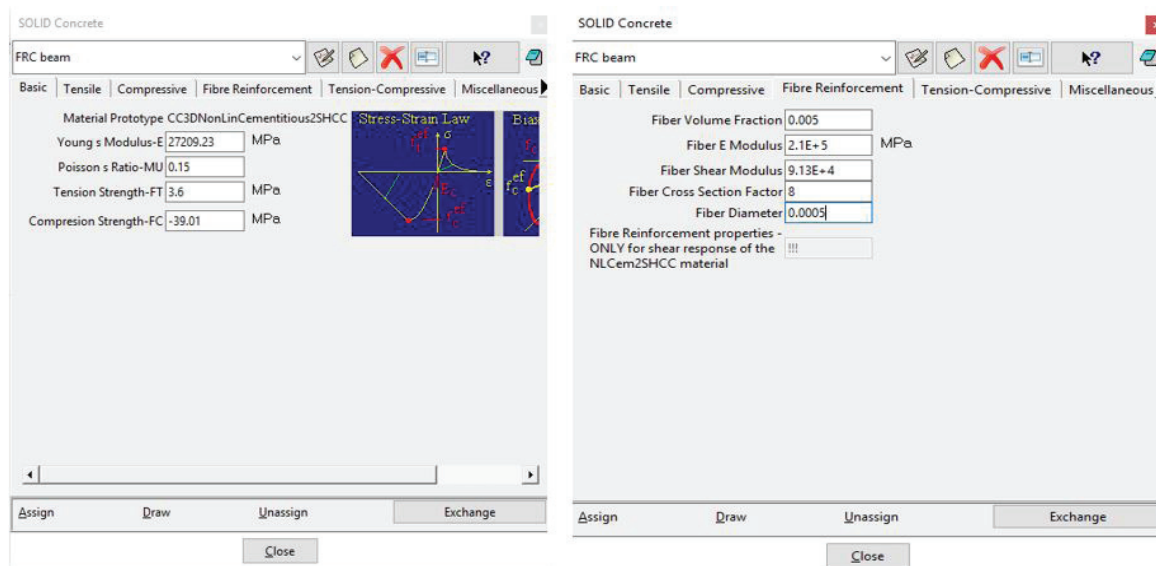
Tablica 6 / Table 6

POPRAWA WŁAŚCIWOŚCI ZWIĄZANYCH ZE SKRĘCANIEM BELEK ZAWIERAJĄCYCH WŁÓKNA

PERCENTAGE INCREASE IN TORSIONAL PROPERTIES OF FIBROUS BEAMS

Oznaczenie* Designation*	Maksymalny moment obrotowy Ultimate torque kNm		Skręt przy maksymalnym momencie obrotowym Twist at ultimate torque 10^{-3} rad/m		Odporność na skręcanie Torsional toughness 10^{-3} kNm/m	
	50 MPa	80 MPa	50 MPa	80 MPa	50 MPa	80 MPa
SFVC 50	11.90	10.64	21.54	33.80	42.49	71.74
SFVC 70	17.06	14.28	30.77	57.75	62.70	106.97
SFVC 100	08.73	07.00	12.34	28.16	19.74	49.06
SFSCC 50	11.32	14.59	32.84	58.10	74.98	104.66
SFSCC 70	16.22	18.38	37.31	83.02	83.26	154.44
SFSCC 100	07.92	11.35	17.91	50.13	36.25	89.00
RSFVC 50	12.18	14.46	19.18	32.31	41.55	63.57
RSFVC 70	18.07	18.15	28.69	56.92	59.49	110.33
RSFVC 100	10.08	12.00	8.20	26.15	27.66	49.74
RSFSCC 50	12.75	17.24	32.26	57.97	64.65	113.10
RSFSCC 70	18.33	21.84	40.32	76.81	85.10	155.29
RSFSCC 100	10.36	13.79	14.52	50.72	32.79	95.70

* SCC/BSZ, VC/BW, SF – steel fibres/włókna stalowe, R – recycled coarse aggregate/kruszywo grube pochodzące z recyklingu



Rys. 6. Właściwości betonu i włókien stalowych wprowadzane do programu ATENA

Fig. 6. Properties of concrete and steel fibers as input in ATENA

betonu 80 MPa w porównaniu do betonu 50 MPa, w przypadku obu rodzajów betonu z kruszywem naturalnym i z recyklingu. Oznacza to, że włókna stalowe mają duży wpływ na poprawę właściwości matrycy cementowej, która z natury jest krucha. Największą poprawę wszystkich właściwości związanych ze skręcaniem zaobserwowano dla wszystkich próbek zawierających włókna stalowe o współczynniku kształtu wynoszącym 70. Może to wynikać z optymalnej długości włókien wpływającej korzystnie na napięcie wiązania pomiędzy włóknami i matrycą cementową i w efekcie poprawy właściwości skrętnych belek. Wpływ dodatku włókien stalowych jest znacznie większy w BSZ niż w BW, a wzrost współczynnika kształtu aż do 70 odpowiada odpowiedniemu wzrostowi właściwości związanych ze skręcaniem. Zdolność rozplywu BSZ pozwala na równomierne rozmieszczenie włókien w betonie, a dzięki tej jednorodności i spójności ma on lepsze właściwości niż

attributed to increase in tensile strength and torsional properties. The torsional properties are slightly affected with recycled coarse aggregate due to presence of old mortar on surface of ITZ. The depletion of all properties were restored by addition of steel fibres. The effect of fibres is seen to be higher in the case of recycled aggregate concrete than in concrete with virgin aggregates. The test results indicated that the addition of steel fibres, the structural behaviour of concretes is improved.

5. FEM modelling of beams using ATENA-GID

To validate the experimental results, a non-linear analysis was performed on the beams using finite element software ATENA-GID. Geometrical model is created and the material properties and

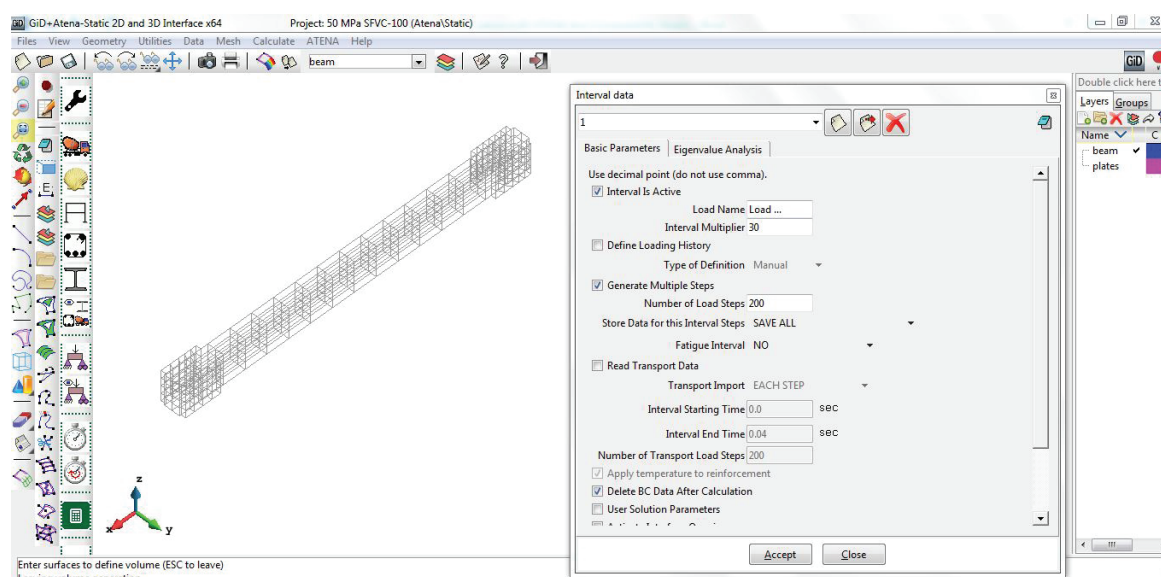
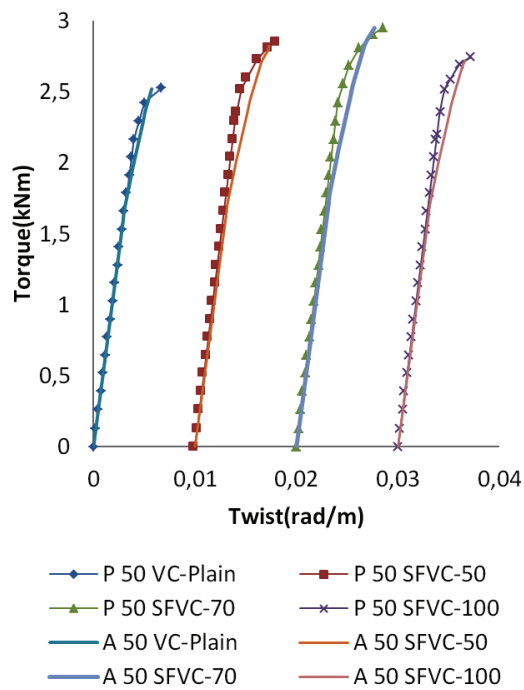


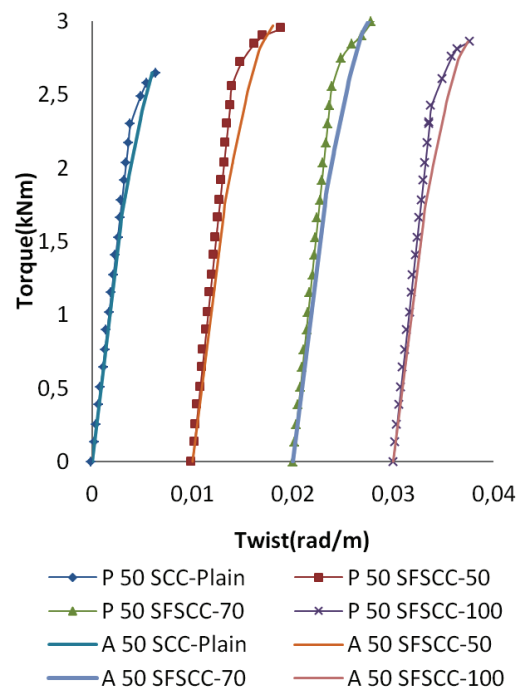
Fig. 7. Beam model with plates and meshing with interval data

Rys. 7. Model belki z płytkami i siatką oraz danymi interwałowymi



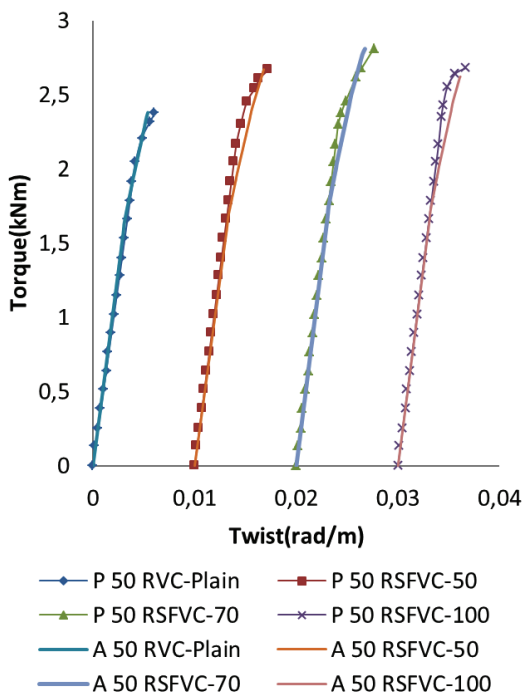
Rys. 8. Zależność moment obrotowy-skręt dla BW-50MPa z wyników doświadczalnych [P] i symulacji ATENA [A]

Fig. 8. Torque-twist behaviour of VC-50 MPa with experiment [P] and ATENA [A]



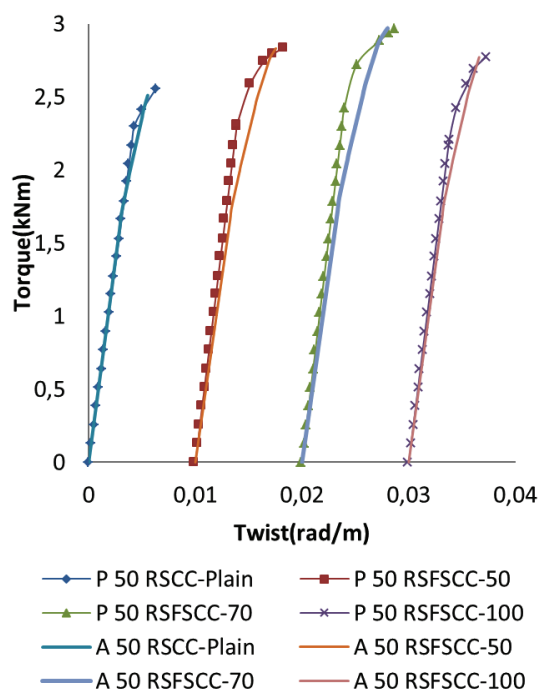
Rys. 9. Zależność moment obrotowy-skręt dla BSZ-50MPa z wyników doświadczalnych [P] i symulacji ATENA [A]

Fig. 9. Torque-twist behaviour of SCC-50 MPa with experiment [P] and ATENA [A]



Rys. 10. Zależność moment obrotowy-skręt dla BW-50MPa z kruszywem z recyklingu z wyników doświadczalnych [P] i symulacji ATENA [A]

Fig. 10. Torque-twist behaviour of RVC-50 MPa with experiment [P] and ATENA [A]



Rys. 11. Zależność moment obrotowy-skręt dla BSZ-50MPa z kruszywem z recyklingu z wyników doświadczalnych [P] i symulacji ATENA [A]

Fig. 11. Torque-twist behaviour of RSCC-50 MPa with experiment [P] and ATENA [A]

BW. Można to przypisać zwiększeniu wytrzymałości na rozciąganie i poprawie właściwości związanych ze skręcaniem. Na właściwości te nieznacznie wpływa dodatek kruszywa grubego z recyklingu i co się z tym wiąże zawartości starej zaprawy w strefie przejściowej kruszywo-zaczyn. Pogorszenie właściwości związanych ze

boundary conditions are defined. The three dimensional regions are modelled by volumes in GID. After creation of the geometry, material properties are defined and assigned to individual volumes. Boundary conditions are used to define supports and loads. In ATENA analysis, it is always useful to define monitoring points.

Tablica 7 / Table 7

PORÓWNANIE WYNIKÓW EKSPERYMENTALNYCH I SYMULACJI PRZEPROWADZONYCH ZA POMOCĄ PROGRAMU ATENA NA BELKACH Z BSZ I BW

COMPARISON OF EXPERIMENTAL AND ATENA RESULTS OF SCC & VC BEAMS

Oznaczenie belki* Beam designation*	Wynik doświadczalny-kąt krętu Experi- ment-angle of twist 10 ⁻³ rad/m		Wynik symulacji ATENA-kąt krętu ATE- NA-angle of twist 10 ⁻³ rad/m		Różnica między wynikami % % of difference	
	50 MPa	80 MPa	50 MPa	80 MPa	50 MPa	80 MPa
Klasa betonu Grade of concrete						
VC-plain	6.52	7.10	5.72	6.29	12.00	11.41
SFVC-50	7.90	9.50	7.29	8.57	7.72	9.79
SFVC-70	8.50	11.20	7.67	10.59	9.76	5.45
SFVC-100	7.32	9.12	6.59	8.46	9.73	7.03
SCC-plain	6.70	7.54	5.97	6.69	10.90	11.27
SFSCC-50	8.90	11.92	8.01	10.66	10.00	10.57
SFSCC-70	9.20	13.80	8.29	12.98	9.89	5.87
SFSCC-100	7.92	11.32	7.43	10.38	5.95	8.30
RVC-plain	6.14	6.50	5.38	5.87	11.80	9.69
RSFVC-50	7.27	8.60	6.79	8.06	6.60	6.28
RSFVC-70	7.85	10.22	6.75	9.44	14.01	7.45
RSFVC-100	6.62	8.24	6.12	7.59	7.27	7.44
RSCC-plain	6.21	6.92	5.53	6.12	10.81	11.30
RSFSCC-50	8.20	10.90	7.54	9.97	8.05	8.53
RSFSCC-70	8.76	12.20	8.02	11.23	7.82	7.95
RSFSCC-100	7.10	10.42	6.60	9.30	7.04	10.58
Średnia różnica między wynikami % / Average % error					9.33	8.68

* SCC plain – without fibres/BSZ bez dodatku włókien, VC plain – without fibres/BW bez dodatku włókien, SF – steel fibres/włókna stalowe, R – recycled coarse aggregate/kruszywo grube pochodzące z recyklingu

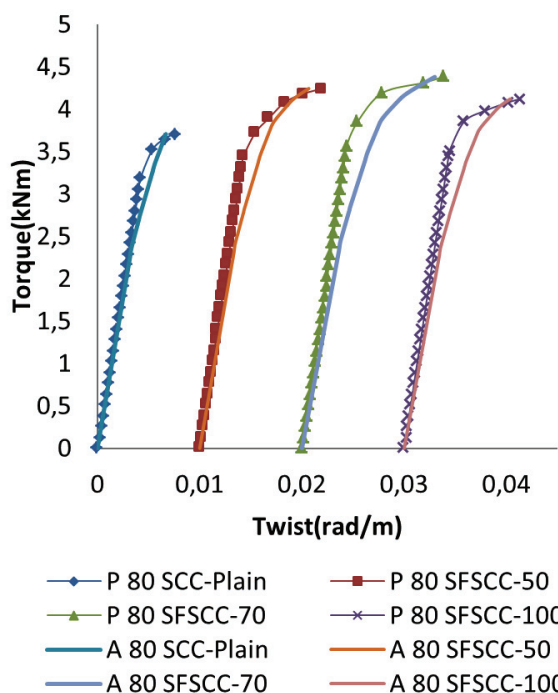
skręcaniem niweluje dodatek włókien stalowych. Efekt dodatku włókien jest bardziej widoczny w przypadku betonu z kruszywem z recyklingu niż w betonie z kruszywami pierwotnymi. Wyniki badań wykazały, że dodatek włókien stalowych poprawia właściwości konstrukcyjne betonu.

5. Modelowanie MES za pomocą oprogramowania ATENA-GID

Celem modelowania geometrycznego w programie ATENA jest opis geometrii konstrukcji, właściwości materiałowych oraz warunków brzegowych. Model analityczny do analizy elementów skończonych powstaje podczas etapu wstępnego z wykorzystaniem w pełni automatycznego generatora siatki. Po opracowaniu geometrii, należy określić właściwości stosowanego materiału i wpisać je w odpowiednie okna w programie. Warunki brzegowe stosowane są do określenia podpór i obciążeń. Warunki brzegowe i obciążenia określone są w GiD za pomocą "interwałów". Interwał opisuje zbiór warunków brzegowych i obciążeń, które są stosowane w danej liczbie kroków. W analizie ATENA zawsze przydatne jest określenie punktów monitorowania. Punkty te są wykorzystywane do śledzenia zmian pewnych wielkości podczas analizy. Na przykład można ich używać do obserwacji narastania skrętu lub sił w danych obszarach.

The monitoring points are used to see the evolution of certain quantities during the analysis. For instance, they can be used to follow the development of deflection or forces at given locations. The monitoring points were selected at the place where dial gauges were placed during experiment. The basic material parameters are defined in the Basic dialog – the Young's modulus of elasticity E , the Poisson's coefficient of lateral expansion, the strength in direct tension F_t , and the cube compressive strength F_c . FRC beam element is used to input the details of the materials used. The level of closeness increase with experimental data by giving the material data in ATENA such as compressive and tensile strength of concrete and steel fibres. The plain concrete beam specimens were without fibres addition. The effect of fibres was considered by entering the values of compressive, tensile strength and Young's modulus of the fibre concrete specimens. Similarly, the fibres parameters such as diameter and length of the fibre, aspect ratio and type of fibre (hooked end) are given before analysis was performed. Fig. 6 shows the details of the concrete and steel fibres input and Fig. 7 shows the beam with finite element mesh.

All the 32 beams tested experimentally were simulated using ATENA-GID (24) software. From the analysis, the load-deflection curve is developed from which the angle of twist of beam can be determined. Torque-Twist curves obtained from experimental values are shown in Figs 8-15 as well as curves from ATENA software .



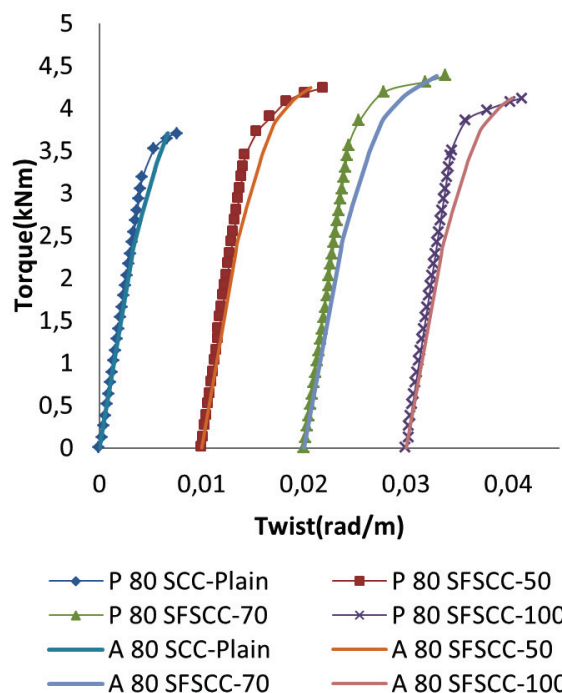
Rys. 13. Zależność: moment obrotowy-skręt dla BSZ-80MPa z wyników doświadczalnych [P] i symulacji ATENA [A]

Fig. 13. Torque-twist behaviour of SCC-80 MPa with experiment [P] and ATENA [A]

Wszystkie 32 zbadane belki poddano symulacjom stosując oprogramowanie ATENA-GID (24). Na podstawie analizy opracowano krzywą obciążenie-skręt, a przy jej wykorzystaniu można określić kąt skrzywienia belki. Krzywe moment obrotowy-skręt uzyskane na podstawie wyników doświadczeń i symulacji za pomocą oprogramowania ATENA pokazano na rysunkach 8-15.

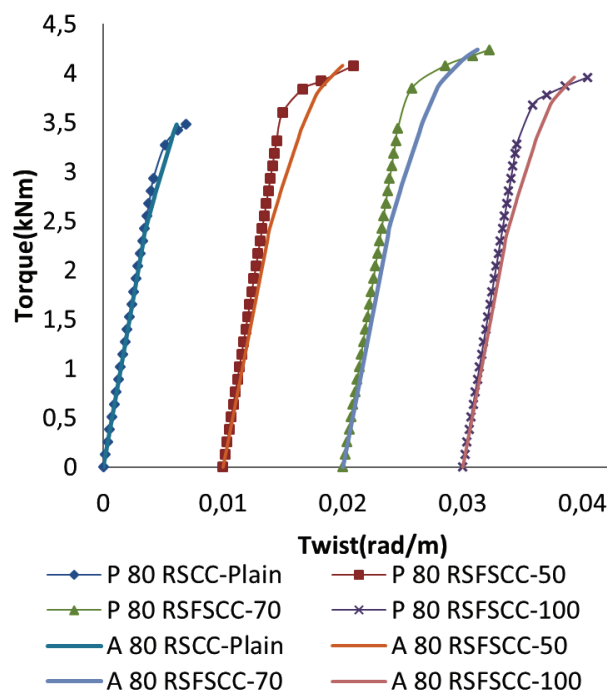
6. Podsumowanie

Oprogramowanie ATENA GID zastosowano w celu określenia skrzywienia na każdym etapie obciążenia. Kąt skrzywienia obliczono dla każdej belki po wprowadzeniu właściwości włókien stalowych oraz wytrzymałości betonu na ściskanie i rozciąganie. Stwierdzono znaczny wzrost kąta skrzywienia związany z dodatkiem włókien stalowych. Wzrost ten wynosił około 36%, 68% i 35% dla próbek z betonu wibrowanego z włóknami stalowymi VC-50, VC-70 i VC-100 w porównaniu do betonu 80 MPa bez dodatku włókien; zawierającego kruszywo naturalne. Stwierdzono także wzrost o około 59%, 94% i 55% dla próbek z betonu samozagęszczającego się z włóknami stalowymi SCC-50, SCC-70 i SCC-100 w porównaniu do betonu 80 MPa bez dodatku włókien; zawierającego kruszywo naturalne. Wzrost jest mniejszy w przypadku belek z dodatkiem kruszywa z recyklingu. Porównanie wyników uzyskanych doświadczalnie oraz metodą elementów skończonych zestawiono w tabelicy 7 uwzględniając kąt skrzywienia belki. Stwierdzono, że analiza elementów skończonych za nisko szacuje skrzywienie w odniesieniu do kąta skrzywienia badanych belek o 8% do 9% w stosunku do wartości uzyskanych doświadczalnie. Krzywe elementów skończonych wykazują dobrą zgodność z wynikami doświadczalnymi dla całego zakresu badań związanych ze skrzywieniem.



Rys. 14. Zależność moment obrotowy-skręt dla BW-80MPa z kruszywem z recyklingu z wyników doświadczalnych [P] i symulacji ATENA [A]

Fig. 14. Torque-twist behaviour of RVC-80 MPa with experiment [P] and ATENA [A]



Rys. 15. Zależność moment obrotowy-skręt dla BSZ-80MPa z kruszywem z recyklingu z wyników eksperymentalnych [P] i symulacji ATENA [A]

Fig. 15. Torque-twist behaviour of RSCC-80 MPa with experiment [P] and ATENA [A]

6. Observations

The ATENA GID interface was used to obtain deflections at each load step. Angle of twist is calculated for every beam by incorporating the properties of steel fibres, compressive and tensile

7. Wnioski

1. Dodatek włókien stalowych do obu rodzajów betonu nieznacznie pogorszył właściwości świeżych mieszanek betonowych i nieznacznie poprawił wytrzymałość na ściskanie. Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu obu rodzajów betonu wzrasta wraz z dodatkiem włókien stalowych w porównaniu do betonu niezawierającego włókien, niezależnie od współczynnika kształtu.
2. Stwierdzono, że zastąpienie kruszywa naturalnego kruszywem z recyklingu w ilości 25% pogarsza urabialność obu rodzajów betonu. Właściwości mechaniczne betonów [BSZ, BW] z dodatkiem kruszywa pochodzącego z recyklingu uległy pogorszeniu. Dotyczy to zarówno betonów z włóknami jak i bez włókien.
3. Dodatek włókien stalowych do BSZ i BW poprawia nieco końcową wytrzymałość na skręcanie, początkową sztywność skrętną i znacznie zwiększa kąt skrętu oraz odporność na skręcanie BSZ i BW.
4. Odporność na skręcanie, końcowa wytrzymałość na skręcanie i skręt przy maksymalnym momencie obrotowym ulegają poprawie ze wzrostem współczynnika kształtu włókien od 50 do 70 w porównaniu do betonu bez dodatku włókien. Dotyczy to obu rodzajów betonu bez i z dodatkiem kruszywa z recyklingu.
5. Mieszanki z dodatkiem włókien o współczynniku kształtu 70 zawierające kruszywo naturalne wykazały wzrost skrętu przy maksymalnym momencie obrotowym o około 31% i 58% odpowiednio dla BW 50 MPa i 80 MPa, w porównaniu do betonu bez włókien. Natomiast w BSZ, skręt przy maksymalnym momencie obrotowym zwiększył się odpowiednio o około 37% i 83%.
6. Mieszanki z dodatkiem włókien o współczynniku kształtu 70 zawierające kruszywo z recyklingu wykazały wzrost skrętu przy maksymalnym momencie obrotowym o około 29% i 57% odpowiednio dla BW 50 MPa i 80 MPa, w porównaniu do betonu bez włókien. Natomiast w BSZ skręt przy maksymalnym momencie obrotowym zwiększył się odpowiednio o około 40% i 77%.
7. Stwierdzono, że poprawa właściwości betonu związanych ze skręcaniem jest wyraźniejsza w przypadku BSZ w porównaniu do BW. Dotyczy to zarówno betonów z kruszywem pochodzącym z recyklingu jak i betonów zawierających tylko kruszywo naturalne. Wynika to z równomiernego rozkładu włókien i silnego wiązania pomiędzy włóknami stalowymi a BSZ.
8. W związku z tym, że beton wysokiej wytrzymałości jest materiałem kruchym, zaobserwowano duży wpływ dodatku włókien stalowych na wszystkie właściwości związane ze skręcaniem zarówno BSZ jak i BW.
9. Pogorszenie właściwości związanych ze skręcaniem na skutek dodatku kruszywa grubego z recyklingu można zniwelować poprzez dodatek włókien stalowych do obu rodzajów betonu.
10. Na przebieg nachylenia pęknięcia belek poddanych skręcaniu nie ma wpływu ani dodatek włókien stalowych ani rodzaj kruszywa i dotyczy to obu rodzajów betonu.
11. Wyniki doświadczalne uzyskane dla BSZ i BW porównano z wynikami symulacji w programie ATENA. Zależność tę

behaviour of concrete. It is observed that is a significant increase in angle of twist due to addition of steel fibres. An increase of 36.2%, 68.36% and 34.5% is observed in VC-50, VC- 70 and VC-100 with respect to plain concrete of 80 MPa with natural aggregate. An increase of 59.3%, 94% and 55.1% is observed in SCC-50, SCC-70 and SCC-100 with respect to plain concrete of 80 MPa with natural aggregate. The rate of increase is decreased in beams with recycled aggregate concrete. A comparison between finite element results and experimental results is summarized in Table-7 in terms of angle of twist of the beam. It is observed from the results that finite element analysis underestimates torsional behaviour in terms of angle of twist of the tested beams by 8% to 9% compared to experimental values. The finite element curves show good agreement with experimental results throughout the entire range of torsional behaviour.

7. Conclusions

1. Addition of steel fibres in both concretes will marginally decrease the properties of concrete mix and slightly enhance the compressive strength. Split tensile strength of both concretes has increased significantly by addition of steel fibres compared to plain concrete, irrespective of fibres aspect ratio.
2. It can be concluded that with 25% replacement of RCA, the workability decreases in both the concretes. Mechanical properties of RCA based concretes (SCC, VC) were decreased. It is true for the concretes with and without fibres.
3. Addition of steel fibres in SCC and VC moderately enhances the ultimate torsional strength, initial torsional stiffness but significantly improves the angle of twist and torsional toughness of SCC than VC.
4. With the increase in aspect ratio of the steel fibres from 50 to 70, there is an increment in torsional toughness, ultimate torsional strength and twist at ultimate torque compared to plain concrete. It is true for both concretes with and without recycled coarse aggregate.
5. The mixes with fibres aspect ratio 70 (NA) had an increase in twist at ultimate torque of about 31% and 58% in 50 MPa and 80 MPa vibrated concrete respectively compared to plain concrete. Whereas, in SCC the twist at ultimate torque is increased by 37% and 83% respectively.
6. The mixes with fibres aspect ratio 70 (RCA) had an increase in twist at ultimate torque about 29%, 57% in 50 MPa and 80 MPa vibrated concrete, respectively. Whereas, in SCC the twist at ultimate torque is increased by about 40% and 77% respectively.
7. It is observed that the increase in torsional properties of SCC is higher than of VC. It is true for concretes with and without recycled coarse aggregate. It is due to uniform distribution of fibres and bondage between steel fibres and SCC.
8. Due to brittle nature of high strength concrete the effect of addition of steel fibres were more significant in all torsional properties of both SCC and VC.

uznano za zadowalającą, a średnia różnica pomiarów była mniejsza niż 10%.

12. Dodatek włókien stalowych do obu betonów nieznacznie pogarsza właściwości mieszanki betonowej i nieco poprawia wytrzymałość na ściskanie. Wytrzymałość na rozciąganie obu betonów zwiększyła się znacznie w wyniku dodatku włókien stalowych w porównaniu do betonów bez ich dodatku, niezależnie od ich współczynnika kształtu.
 13. Stwierdzono, że zastąpienie 25% kruszywa kruszywem z recyklingu pogarsza urabialność obu rodzajów betonów. Także właściwości mechaniczne obu betonów uległy pogorszeniu. Te zmiany zachodzą niezależnie od dodatku włókien.
 14. Dodatek włókien stalowych do BSZ i BW zwiększa umiarowanie końcową wytrzymałość na skręcanie i początkową sztywność na skręcanie, natomiast znacznie poprawia kąt skrętu i wytrzymałość na skręcanie obu rodzajów betonów.
 15. Ze zwiększeniem współczynnika kształtu włókien stalowych z 50-70 następuje wzrost wytrzymałości na skręcanie, końcowej wytrzymałości na skręcanie, a także skrętu w przypadku końcowego momentu obrotowego; w porównaniu do betonu bez włókien. Jest to słuszne dla obu rodzajów betonów, bez i z grubym kruszywem z recyklingu.
 16. Mieszanki z dodatkiem włókien o współczynniku kształtu 70 wykazują zwiększenie skrętu w przypadku końcowego momentu obrotowego o około 31% i 58% odpowiednio dla betonów wibrowanych 50 MPa i 80 MPa w porównaniu do betonu bez włókien. Natomiast w przypadku BSZ skręt dla końcowego momentu obrotowego wzrósł odpowiednio o 37% i 83%.
9. The depletion of torsional properties due to use of recycled aggregate could be restored by addition of steel fibres in both concretes.
 10. The inclination of crack pattern for beams subjected to pure torsion is not influenced by the addition of steel fibres and type of aggregate in both concretes.
 11. The experimental results of SCC and VC were correlated with the results obtained from ATENA. The correlation was found satisfactory with a confidence level of 85-90%.
 12. Addition of steel fibres in both concretes will marginally decrease the properties of concrete mix and slightly enhance the compressive strength. Split tensile strength of both concretes has increased significantly by addition of steel fibres compared to plain concrete irrespective of fibres aspect ratio.
 13. It can be stated that with 25% replacement of RCA, the workability decreases in the both concretes. Mechanical properties of RCA based concretes (SCC, VC) were decreased. It is true for the concretes with and without fibres.
 14. Addition of steel fibres in SCC and VC moderately enhances the ultimate torsional strength, initial torsional stiffness but significantly improves the angle of twist and torsional toughness of SCC than VC.
 15. With the increase in aspect ratio of the steel fibres from 50 to 70, there is an increment in torsional toughness, ultimate torsional strength and twist at ultimate torque compared to plain concrete. It is true for both concretes with and without recycled coarse aggregate.
 16. The mixes with fibres aspect ratio 70 (NA) had an increase in twist at ultimate torque of about 31% and 58% in 50 MPa and 80 MPa vibrated concrete respectively compared to plain concrete. Whereas, in SCC the twist at ultimate torque is increased by 37% and 83% respectively.

Literatura / References

1. F. Okay, S. Engin, Torsional behaviour of steel fiber reinforced concrete beams, *Constr. Build. Mat.*, **28**, 1, 269-275 (2012).
2. S. Aydin, Effects of fiber strength on fracture characteristics of normal and high strength concrete: *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, **57**, 2, 191 (2013).
3. B. H. Nagaratnam, A. Faheem, M. E. Rahman, M. A. Mannan, M. Leblouba, Mechanical and Durability Properties of Medium Strength Self-Compacting Concrete with High-Volume Fly Ash and Blended Aggregates, *Periodica Polytechnica. Civil Engineering*, **59**, 2, 155 (2015).
4. S. P. Patil, K. K. Sangle, Tests of steel fibre reinforced concrete beams under predominant torsion, *J. Build. Eng.*, **6**, 157-162 (2016).
5. T. G. Rao, D. R. Seshu, Torsion of steel fibre reinforced concrete members. *Cem. Concr. Res.*, **33**, 1783-1788 (2003).
6. T. G. Rao, D. R. Seshu, Torsional response of fibrous reinforced concrete members: Effect of single type of reinforcement. *Constr. Build. Mat.*, **20**, 187-192 (2006).
7. M. Pająk, T. Ponikiewski, Effect of the shape of steel fibers on the mechanical properties of reinforced self-compacting concrete, *Cement Wapno Beton*, **80**, 335-342 (2013).
8. K. S. Sable, M. K. Rathi, Comparison of normal compacted concrete and self-compacted concrete in shear & torsion, *Int. J. of Computer Technology and Electronics Engineering*, 2, Part 4, 74-79 (2012).
9. F. Okay, S. Engin, Torsional behaviour of steel fiber reinforced concrete beams, *Constr. Build. Mat.*, **28**, 1, 269-275 (2012).

10. S. Aydin, Effects of fiber strength on fracture characteristics of normal and high strength concrete: *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 57, 2, 191 (2013).
11. B. H. Nagaratnam, A. Faheem, M. E. Rahman, M. A. Mannan, M. Leblouba, Mechanical and Durability Properties of Medium Strength Self-Compacting Concrete with High-Volume Fly Ash and Blended Aggregates, *Periodica Polytechnica. Civil Engineering*, 59, 2, 155 (2015).
12. S. P. Patil, K. K. Sangle, Tests of steel fibre reinforced concrete beams under predominant torsion. *J. Build. Eng.*, 6, 157-162 (2016).
13. T. G. Rao, D. R. Seshu, Torsion of steel fibre reinforced concrete members. *Cem. Concr. Res.*, 33, 1783-1788 (2003).
14. T. G. Rao, D. R. Seshu, Torsional response of fibrous reinforced concrete members: Effect of single type of reinforcement, *Constr. Build. Mat.*, 20, 187-192 (2006).
15. M. Pająk, T. Ponikiewski, Effect of the shape of steel fibers on the mechanical properties of reinforced self-compacting concrete, *Cement Wapno Beton*, 80, 335-342 (2013).
16. K. S. Sable, M. K. Rathi, Comparison of normal compacted concrete and self-compacted concrete in shear & torsion, *Int. J. of Computer Technology and Electronics Engineering*, 2, Part 4, 74-79 (2012).
17. L. L. Raut, D. B. Kulkarni, Torsional strengthening of under reinforced concrete beams using crimped steel fiber, *Int. J. Res. Eng. Techn.*, 3, 6, 466-471 (2014).
18. S. W. Tabsh, A. S. Abdelfatah, Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete, *Constr. Build. Mat.*, 23, 2, 1163-1167 (2009).
19. S. Saha, C. Rajasekaran, Mechanical properties of recycled aggregate concrete produced with Portland Pozzolana Cement, *Adv. Concr. Constr.*, 4, 1, 027-035 (2016).
20. Ş. Yazici, A. Mardani-Aghabaglou, M. Tuyan, Properties of self-consolidating concrete incorporating coarse recycled concrete aggregate, *Cement Wapno Beton*, 84, 168 (2017).
21. IS 12269-1987, Specifications for 53 grade ordinary Portland cement, Bureau of Indian Standards-New Delhi, India.
22. IS 383-1970 (Reaffirmed 2002), Specification for coarse and fine aggregates from natural sources for concrete, Bureau of Indian Standards-New Delhi, India.
23. IS: 3812: Part-II (2003), Specification for Pulverized Flyash in concrete. Guidelines, Bureau of Indian Standards-New Delhi, India.
24. IS: 15388, Part-II (2003), Specification for Silica Fume. Guidelines, Bureau of Indian Standards-New Delhi, India.
25. IS 9103-1999 Concrete Admixtures-Specification, Bureau of Indian Standards-New Delhi, India.
26. IS 456-1957 (Reaffirmed 2005), Code of practice for general construction of plain and reinforced concrete, Bureau of Indian Standards-New Delhi, India.
27. IS 10262-2009, Concrete Mix Proportioning- Guidelines, Bureau of Indian Standards-New Delhi, India.
28. N. Su, K. C. Hsu, H. W. Chai, A simple mix design method for self-compacting concrete, *Cem. Concr. Res.*, 31, 1799-1807 (2001).
29. IS 516-1959 (Reaffirmed 1999), Method of test for strength of concrete, Bureau of Indian Standards-New Delhi, India.
30. G. C. Behera et al, Experimental Study on Torsional Behaviour of Singly Type of Reinforcement with Ferrocement "U" Wraps: *International journal of innovative Science, Engineering and Technology*, 2, 4 (2015).
31. S. .C Concrete, *The European Guidelines for Self-Compacting Concrete 2005*.
32. Z. Procházková, J. Červenka, ATENA Science – GiD Tutorial: ATENA Program Documentation Part 4-6, January 22, Prague 2016.