

Nowa metoda badania losowej dystrybucji włókien w wysokowartościowym betonie samozagęszczalnym

The new approach to the study of random distribution of fibres in high performance self-compacting concrete

1. Wprowadzenie

Dotychczasowe badania wysokowartościowego betonu samozagęszczającego się, zbrojonego włóknami stalowymi (WWBSZWS) nie dostarczyły systematycznych danych doświadczalnych umożliwiających ich projektowanie na podstawie zakładanych właściwości mechanicznych oraz rozmieszczenia i ukierunkowania zbrojenia rozproszonego (1-3). Jest to przyczyną rozbieżności projektowanych właściwości mechanicznych od wykazywanych przez te betony (4, 5). Ważne znaczenie ma przede wszystkim określenie stopnia odchyłań w zakładanych właściwościach mechanicznych tego betonu, ze względu na rozmieszczenie i ukierunkowanie zbrojenia rozproszonego (6-8). Uzyskane w badaniach wyniki będą stanowiły podstawę do opracowania metod projektowania WWBSZWS z uwzględnieniem wybranych formowanych elementów konstrukcyjnych. Prezentowane badania stanowią podstawę do opracowania metod badania rozmieszczenia włókien o różnej geometrii w matrycy betonów samozagęszczających się, z uwzględnieniem zakładanych, zróżnicowanych stanów naprężeń. W związku ze znacznym zróżnicowaniem obecnie stosowanych włókien stalowych i dużym wpływem metod formowania elementów konstrukcyjnych na jednorodność mieszanki, otrzymywanie WWBSZWS o zakładanych właściwościach mechanicznych jest trudne i wymaga szerszego rozpoznania badawczego (9, 10). Wyniki dotychczasowych badań fibrobetonów samozagęszczalnych wykazują, że o ich samozagęszczaniu się i właściwościach fizycznych decyduje głównie geometria włókien i ich udział objętościowy w mieszance betonowej. Jednakże w dotychczasowych publikacjach brak jest oceny wpływu metod formowania WWBSZWS na ich właściwości fizyczne, co w przypadku tych betonów stanowi duży problem. Obecnie zbrojenie rozproszone jest traktowane jako dodatek do betonu poprawiający jego właściwości, ale nie jako zbrojenie konstrukcyjne (są już przykłady takich zrealizowanych konstrukcji). W takim podejściu rozmieszczenie równomierne zbrojenia może być uznane za bezpieczne, ale nie optymalne (11, 12). W przyszłości należy się spodziewać rozwoju konstrukcji

1. Introduction

The previous studies on random distribution of steel fibres in high performance self-compacting concrete SFRHPSCC have not provided systematic, validated experimental data to enable their design for their assumed mechanical parameters as well as the distribution and orientation of the dispersed reinforcement (1-3). This causes the discrepancy between the projected and obtained mechanical parameters of the modified concretes (4, 5). It is important to determine the degree of variation of the assumed mechanical properties of SFRHPSCC due to the location and orientation of the dispersed reinforcement (6-8). These research results should form the basis for development of the design method for SFRHPSCC applied to selected components. The presented research is a basis for identifying the behavior of fibres with different geometrical parameters in the matrix of self-compacting concrete, taking into account the assumed differentiated states of stress. In view of the diversity of the currently used steel fibres and high impact which the formation methods have on the homogeneity of the mixture of SFRHPSCC of the assumed mechanical properties further knowledge is indispensable for the development of this technology and thus further studies are necessary (9, 10). The results of previous studies of self-compacting fiber reinforcement concrete indicate that their self-thickening and physical-mechanical properties are mainly depended of the geometric parameters of fibres and their volume ratio in concrete mix. However, in previous papers, there have been no assessment of the impact of SFRHPSCC molding methods on its physical properties, which for this concrete is the substantial problem. Currently, fibre reinforcement is treated as an additive to concrete which improves its properties, but not as structural reinforcement. In this approach, a uniform distribution of reinforcement can be considered safe, but not optimal (11,12). One cannot exclude that in the future the development of SCC reinforced only with fibres will be produced. The molding effect on the orientation and uniformity of fibres distribution must be considered in designing of such structures. This study provides the first systematic data that can be used for this purpose.

zbrojonych tylko włóknami. Wpływ formownia na kierunek i równomierność rozmieszczenia włókien musi być uwzględniany w projektowaniu takich konstrukcji. Badania dostarczają pierwszych systematycznych danych, które mogą być w tym celu wykorzystane.

Zasadniczym celem prezentowanych badań było ustalenie rozmieszczenia i ukierunkowania zbrojenia rozproszonego w WWBSZWS. Pozwoli to na projektowanie konstrukcji betonowych uwzględniających prawdopodobne rozmieszczenie zbrojenia rozproszonego, typowe dla danego typu elementu i metody jego formowania. Istotą problemu jest ustalenie jak w różnych konstrukcjach zmienia się rozmieszczenie zbrojenia rozproszonego w zależności od metody układania mieszanki, z uwzględnieniem jej właściwości reologicznych, udziału objętościowego i geometrii stosowanych włókien stalowych.

Uzyskane wyniki badawcze mogą być wykorzystane do zwiększenia dokładności modelowania właściwości mechanicznych wybranych elementów konstrukcyjnych, przy zastosowaniu zbrojenia rozproszonego. Umożliwi to lepsze wykorzystanie efektów stosowania włókien w matrycy betonowej, będących w niektórych przypadkach dobrą alternatywą dla zbrojenia tradycyjnego. Uzyskane w pracy wyniki mogą być punktem wyjścia do dalszych, bardziej zaawansowanych badań, obejmujących skomplikowane przypadki elementów betonowych, a także umożliwi wprowadzenie przewidywanego rozmieszczenia włókien do opracowań normowych.

2. Metody

2.1. Właściwości reologiczne mieszanek

Badania laboratoryjne wykazały, co zostało powszechnie przyjęte, że właściwości reologiczne mieszanek betonowych mogą być opisane modelem Bingham, wyrażonego równaniem:

$$\tau = \tau_o + \eta_{pl} \cdot \dot{\gamma} \quad [1]$$

gdzie:

τ – naprężenie styczne, Pa

τ_o – granica płynięcia mieszanki, Pa

η_{pl} – lepkość plastyczna mieszanki, Pa·s

$\dot{\gamma} = d\gamma/dt$ – prędkość odkształcenia postaciowego mieszanki

Gdy naprężenia przekroczą granicę płynięcia, rozpoczyna się przemieszczanie mieszanki z prędkością proporcjonalną do lepkości plastycznej. Im mniejsza będzie lepkość plastyczna mieszanki, tym większa będzie prędkość jej płynięcia, przy danym obciążeniu (13). Pomiar parametrów reologicznych mieszanek WWBSZWS wykonywano za pomocą reometru BT2 i aproksymowano modelem Bingham (rysunek 1).

2.2. Badania rozmieszczenia włókien

Rozmieszczenie włókien stalowych w WWBSZWS badano w belkach, o wymiarach 600x150x150 mm (rysunek 2). Badania te wykonywano cyfrową analizą obrazu (metoda niszcząca - rysunek 3) oraz tomografią komputerową (metoda nieniszcząca - rysunek 4). W celu sprawnego analizowania obrazu betonu zawierające-

The main aim of this study is to determine the distribution and orientation of reinforcement in SFRHPSCC. This will allow the design of concrete structures with anticipated deployment of the dispersed reinforcement, specific to the structural elements and method of their molding. The most important problem is to determine how in various structures the deployment of the dispersed reinforcement is dependent on the placing of the concrete mixture, taking into account its rheological properties, the volume ratio and geometric parameters of the steel fibres. The research results can be used to improve the accuracy of modeling the mechanical properties of selected structure elements, with dispersed reinforcement. This will allow better optimization of the use of fibres in a matrix of concrete, which in some cases is a good alternative to traditional reinforcement, reducing the technological limitations. This research project results may be the starting point for further, more advanced studies, including complex concrete structural elements.

2. Experimental procedure

2.1. Methods

Laboratory studies have shown, and it has been commonly accepted, that rheological behavior of concrete may be sufficiently enough described by the Bingham model according to equation:

$$\tau = \tau_o + \eta_{pl} \cdot \dot{\gamma} \quad [1]$$

where: τ (Pa) is the shear stress at shear rate $\dot{\gamma}$ (1/s) and τ_o (Pa) and η_{pl} (Pas) are the yield stress value and plastic viscosity, respectively.

Yield stress value is the shear stress necessary for initiating flow. When the shear stress (τ) is higher than the yield stress value, the flow of the mixture occurs and the resistance to the flow depends on plastic viscosity; the higher the plastic viscosity of the concrete mixture, the slower its flow in relation to the shear stress.

Rheological parameters of fresh concrete, are frequently measured using Two Point Workability Test (TPWT), by applying a given shear rate and measuring the resulting shear stress (13). This procedure was used in this study. The rheological parameters are determined by regression analysis according to the relation:

$$T = g + N h \quad [2]$$

where: T is the shear resistance of a sample measured at rotation rate N and g (Nmm) and h (Nmms) are constants corresponding respectively to yield value τ_o and plastic viscosity η_{pl} (Fig. 1).

2.2. Distribution fibers study

The uniformity of distribution of steel fibers has been studied in SFRHPSCC molded as bars with dimensions of 600x150x150 mm (Fig. 2). For concrete test the digital image analysis (destructive method – Fig. 3) and computed tomography (non-destructive method – Fig. 4) were applied. In order to present the distribution of steel fibres, a special program was adopted which defines the cut fibers

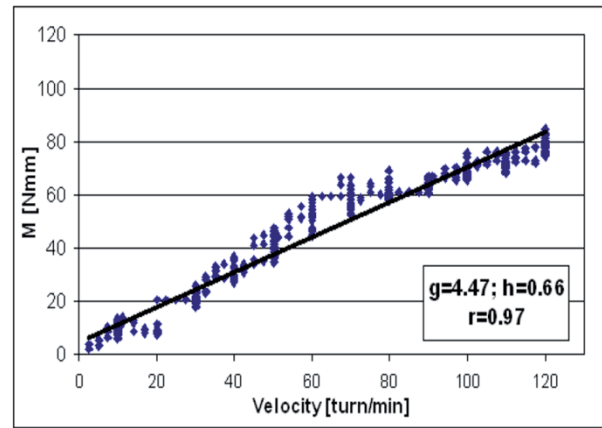
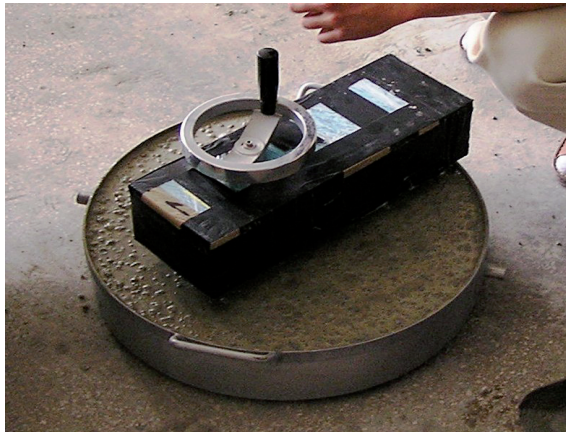


Fig. 1. BT-2 concrete rheometer and procedure of g and h determination

Rys. 1. Reometr BT-2 i metoda wyznaczania parametrów reologicznych mieszanki betonowej

go rozproszone włókna stalowe, opracowano program, którego zadaniem było „wyszukanie” przeciętych włókien oraz ich ułożenia względem badanej próbki.

Przeprowadzono również badania rozmieszczenia włókien tomografem komputerowym. Tomograf komputerowy był wyposażony w 64 rzędy detektorów, a rekonstruowana grubość warstwy serii natywnej badania tomograficznego wynosiła 0,625 mm, co stanowiło szerokość pojedynczego detektora. Promieniowaniem przezświetlającym próbki była wiązka promieni rentgena. Wymiar badanej powierzchni każdej warstwy betonu wynosił 150x150 mm, przy czym była ona dzielona na 16 prostokątów, zwanych kolumnami i oznaczanych jako 1x16 (porównaj rysunek 7). W badaniach tomograficznych stosowano także podział powierzchni wyciętych próbek na 16 lub 32 kwadratów, oznaczanych odpowiednio 16x16 i 32x32. Dla każdej belki betonowej wynikiem badań była seria natywna zapisana w formacie DICOM składająca się z minimum 950 obrazów, seria rekonstruowana składająca się z minimum z 1500 obrazów, przy uwzględnieniu interwału w zakresie 50÷80% grubości warstwy natywnej. Warunki akwizycji były wyznaczone przez napięcie lampy nie mniejsze niż 140 kV i natężenie prądu wynoszące 400 mA.

ends and describes their position in the sample. This program was particularly useful to evaluate the homogeneity of distribution of steel fibers in self-compacting concrete. For effective analysis of scattered fibres reinforced concrete the computer program has been used; the accuracy of results depends only upon the resolution of analyzed image. The program finds the intersections of fibres on the surface and their orientation. Some steps can be distinguished when the program operates. At first, the area of analyzed part of the image is delineated. In this stage the virtual table of colors is created in which the contents of particular meshes correspond with the colors. The next step of image recognition consists in elimination of those meshes which represent the values under the assumed limit. After this operation the table of colors transforms into the logic table which contains only the values 0 or 1; it means that in the mesh there is a part of analyzed fibres or there is no fibres. Because the transfer from the real color scale to the grey color scale leads always to the loss of some information, the next step consists in filling and rounding the contours of fibres. The new table, determining the number of fibres and some other data is formed. In the next step the program eliminates too small or too large areas which could be positively identified as fibre cross sections. Finally the results of image analysis are highlighted. The values determining the amount of fibres present in every square area are generated.



Fig. 2. Slump-flow test and SFRHPSCC beams C4 600x150x150 mm

Rys. 2. Badania rozplywu mieszanek samozagęszczalnych z włóknami stalowymi oraz formowanie belek o wymiarach 600x150x150 mm

Tablica 1 / Table 1



SKŁADY MIESZANEK SAMOZAGĘSZCZALNYCH ZASTOSOWANYCH W BADANIACH
COMPOSITION OF SFRHPSCC MIXTURE

Składnik / Oznaczenie Component	Symbol	Zawartość / Content
CEM I 42,5 R	C	490,0
Piasek / Sand 0-2 mm	S	756,0
Kruszywo bazaltowe / Basalt 2-8 mm	B	944,4
Mikrokrzemionka / Silica fume	SF	49,0
Water	W	226,4
Włókna stalowe – kg/m ³ (% objętościowo) Steel fibres – kg/m ³ (% by volume)	F	100 – 180 (1,25 – 2,25)
Superplastyfikator Glenium ACE 48 (3.5 % m.c.) Superplasticizer Glenium ACE 48 (3.5 % m.c.)	SP	17,0
Stabilizator RheoMatrix (0.4 % m.c.) Stabilizer RheoMatrix (0.4 % m.c.)	ST	1,6
W/(C+SF)	-	0,42
Klasa konsystencji (SF) / Slump-flow (SF)	-	SF3

In the study the computer tomography was also used. The applied CT scanner was equipped with 64 rows of detectors, and the thickness of a series of reconstructed native CT scan was 0.625 mm, i.e. the width of a single detector. The penetration factor in the study was an X-ray beam. The examined surface of each layer of concrete was 150x150 mm. For each beam the result consisted of a native series written in DICOM format with at least 950 images, and reconstructed series with at least 1500 images taking into account the interval in the range 50 ÷ 80% of the thickness of the native layer. Parameters of acquisition were not less than: 140 kV lamp voltage and 400 mAs current strength.

Tablica 2 / Table 2

CHARAKTERYSTYKA GEOMETRYCZNA WŁÓKIEN STALOWYCH
CHARACTERISTICS OF APPLIED STEEL FIBRES

Nazwa Name	Symbol	Długość Length (mm)	Średnica Diameter (mm)	Przekrój poprzeczny Cross-section	Kształt Shape	Materiał Material	Wytrzymał. na rozcz. Tensile strength (N/mm ²)
KE 20/1,7	KE	20±10%	1,70±10%	prostokątny ¹⁾ rectangular ¹⁾		DC01	770±15%
SW 35/1.0	SW	35±10%	2,30±2,95 ²⁾	część okręgu part of circle		Stal niskowęglowa low-carbon steel	800±15%

Uwagi: ¹⁾ grubość 0,50±10%; ²⁾ szerokość (mm);

Remark: ¹⁾ thickness 0.50±10%; ²⁾ width (mm);

Aby zapewnić dobrą analizę obrazu betonu zawierającego rozproszone włókna, opracowano specjalne oprogramowanie, którego dokładność zależy wyłącznie od rozdzielczości analizowanego zdjęcia. Zadaniem oprogramowania jest zlokalizowanie wszystkich włókien w przekroju poprzecznym wyciętej próbki betonu i określenie ich położenia. Przygotowywane są zdjęcia próbek betonowych, które następnie są poddawane analizie komputerowej. Oprogramowanie przetwarza matrycę, której wymiary są ustalone na podstawie rozdzielczości zdjęcia. Każda komórka matrycy zawiera informacje o kolorze zidentyfikowanym w tym punkcie na zdjęciu. Program krok po kroku generuje wirtualną matrycę, w której liczbom przyporządkowano określone kolory. Po zakończeniu tego postępowania kolorowa matryca zamienia się w matrycę logiczną, w której wartości komórek wynoszą 0 lub 1, w zależności od tego, czy w danym punkcie program rozpoznał obecność włókien czy nie. Ponieważ zmiana kolorów rzeczywistych na odcienie szarości wiąże się nieuchronnie z utratą pewnej liczby danych, kolejnym etapem jest wypełnienie konturów włókien w celu otrzymania bardziej zaokrąglonych kształtów. Podczas tej fazy generowana jest nowa matryca, która opisuje ilość włókien i dane o nich.

Tablica 3 / Table 3

BADANE WŁÓKNA STALOWE I ICH ZAWARTOŚĆ W BADANYCH MIESZANKACH

THE STEEL FIBRES CONTENT IN THE MIXTURES

Mieszanka Mixture	Zawartość włókien, % objętościowo Content of fibres, % by volume	
	KE 20/1,7	SW 35/1,0
C0	-	-
C1	1,25	-
C2	2,25	-
C3	-	1,25
C4	-	2,25

3. Materials

The composition of SFRHPSCC is shown in Table 1. Two types of steel fibres were used in the study (Table 2) and with different volume ratio (Table 3). The self-compacting behavior was met by all tested concretes, according to adopted mixing procedure (Fig.

Tablica 4 / Table 4

WŁAŚCIWOŚCI BADANYCH MIESZANEK I BETONÓW WWBSZWS

THE PROPERTIES OF FRESH AND HARDENED SFRHPSCC MIXTURES

Mieszanka Mixture	Urabialność / Workability				$f_{c,cube\ 28}$ MPa
	Slump-flow		Parametry reologiczne Rheological parameters		
	T_{500}, s	SF, mm	G, Nmm	H, Nmmmin	
C0	3	750	88	1 457	90
C1	4	700	105	3 008	105
C2	5	650	362	3 146	110
C3	2	740	160	2 802	95
C4	3	690	421	1 596	100

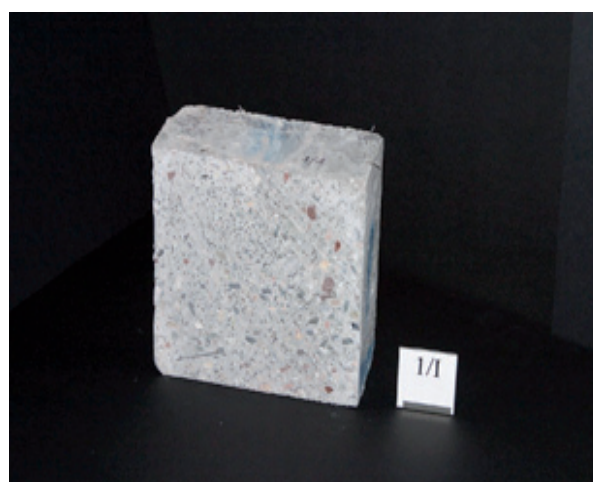
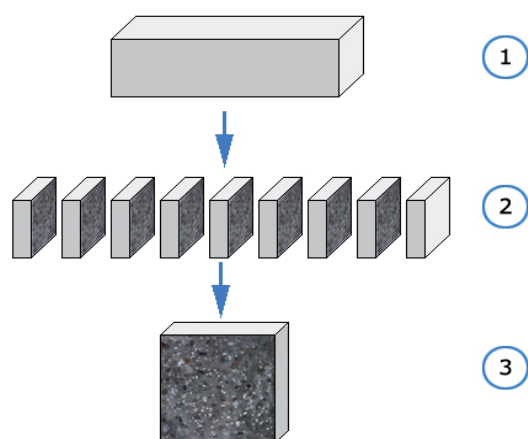


Fig. 3. Phases of micro-section preparation and a specimen ready for analysis

Rys. 3. Proces otrzymywania próbek do badań i przykładowa próbka

W ramach kolejnej operacji program usuwa elementy, których powierzchnia jest zbyt mała lub zbyt duża, aby rozpoznać je jako włókna. Następnie program pokazuje wszystkie zidentyfikowane włókna na tle oryginalnej grafiki, która może być ręcznie korygowana. Analiza lokalna pozwala wyświetlić wyniki pojedynczego przekroju poprzecznego z podaniem ilości włókien w przekroju.

3. Materiały

Skład badanych mieszank WWBSZWS przedstawiono w tablicy 1. W badaniach stosowano dwa rodzaje włókien stalowych (tablica 2), przy różnym ich udziale objętościowym (tablica 3). Kryterium samozagęszczalności spełniały wszystkie badane mieszanki (rysunek 5). Szczegółowe wyniki badań przedstawiono dla mieszank, w których zawartość włókien wynosiła 1,25% oraz 2,25% (90 i 180 kg/m³).

W tablicy 4 przedstawiono wyniki badań mieszank i stwardniałych próbek WWBSZWS. Samozagęszczalność sprawdzano wykorzystując parametry rozplywu oraz właściwości reologiczne. Dodatkowo przeprowadzono badania wytrzymałości na ściskanie.

5). The obtained results are presented for samples with the fiber content 1.25 and 2.25% (90 and 180 kg/m³). In Table 4 the results for SFRHPSCC mixtures are presented. The self-compacting behavior was verified by the time and flow diameter measurements with Abrams cone as well as by the measured rheological parameters. The compressive strength was measured after 28 days of concrete samples curing.

4. Experimental results and discussion

The results, presented below are based on investigation of one concrete element (Fig. 3), divided in 9 sections. The full report generated by the computer program is very large, so only a local analysis of one section is presented here. In Fig. 6 the presentation of the results of a fibre count in a selected cross-section of concrete C2 divided into 16 x 16 squares is shown. On this basis the real distribution of fibres in the unit area of the sample cross-section was determined. In Fig. 7 the results of the fibre count in a selected cross-section of concrete C2 with a division mesh 1 x 16 (rows) is presented. On this basis the total distribution of fibres in horizontal cross-sections of the concrete sample, describing their local and global three-dimensional concentration in a horizontal direction was presented. The results of the fibre count in a selected cross-section

4. Wyniki badań

Przedstawione poniżej wyniki są częścią raportu z badania całego elementu (rysunek 3), składającego się z 9 próbek, wyciętych za pomocą piły diamentowej (rysunek 3). Ponieważ pełny raport generowany przez program jest bardzo obszerny, poniżej przedstawiono tak zwaną analizę lokalną, jednego przekroju. Na rysunku 6 przedstawiono obrazowo pomiar ilości włókien uzyskany za pomocą tomografu, na powierzchni wybranej próbki wyciętej z betonu C2 podzielonej na 16 x 16 kwadratów. Na tej podstawie ustalano rzeczywiste rozmieszczenie włókien w tej próbce betonu. Na rysunku 7 pokazano znaną ilość włókien na powierzchni wybranej próbki wyciętej z betonu C2, w przypadku podzia-



Fig. 4. The CT scanner equipped with 64 rows of detectors

Rys. 4. Tomograf komputerowy wyposażony w 64 rzędy detektorów

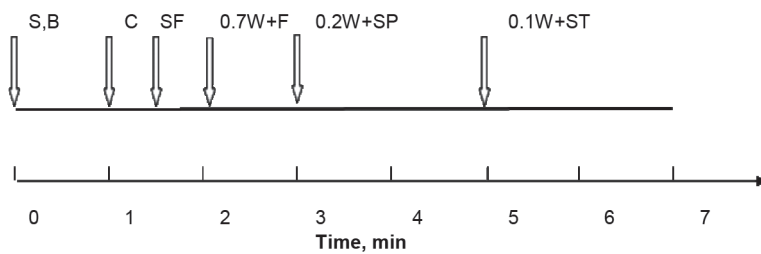


Fig. 5. Mixing procedure of SFRHPSCC

Rys. 5. Proces przygotowywania mieszanek samozagęszczających się z włóknami

of concrete C2 with a division mesh 1 x 16 (columns) are presented in Fig. 8. On this basis the overall distribution of fibres in vertical cross-sections of the concrete sample, describing their local and total three-dimensional [3D] concentration in a vertical direction can be found.

The application of global scale to a substantial extent decreases the transparency of result presentation, because depending on the degree of divisions, the number of fibres in a sampled field fluctuated from 0 to 53. The global results can be obtained by generating diagrams showing the number of fibres in cross-sections and in the whole concrete

0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0
0	2	0	1	3	0	0	0	0	0	1	2	0	1	1	0	2
0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0
0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	1	2	0	1	0	1	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	2	2	1
0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	1	0	0
0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	3	0	2	1
0	0	1	0	2	0	0	0	0	0	3	1	0	0	0	0	0
0	0	0	1	0	2	0	2	0	0	0	0	0	0	1	0	0
0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	1	2	1	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	1	1

Fig. 6. The example of a concrete C2 cross-section divided in 16 x 16 squares and the analysis of the number of fibres

Rys. 6. Przekrój belki z betonu C2 w odległości 100 mm od jej powierzchni podzielony na 16 x 16 kwadratów i wyniki analizy

Mean value: 0.35

Standard deviation: 0.52

Number of fibres in a cross-section: 91

Real size of the mesh field: 0.93 cm

Minimum

Maksimum

Minimal amount of fibres: 0

Maximal amount of fibres: 3

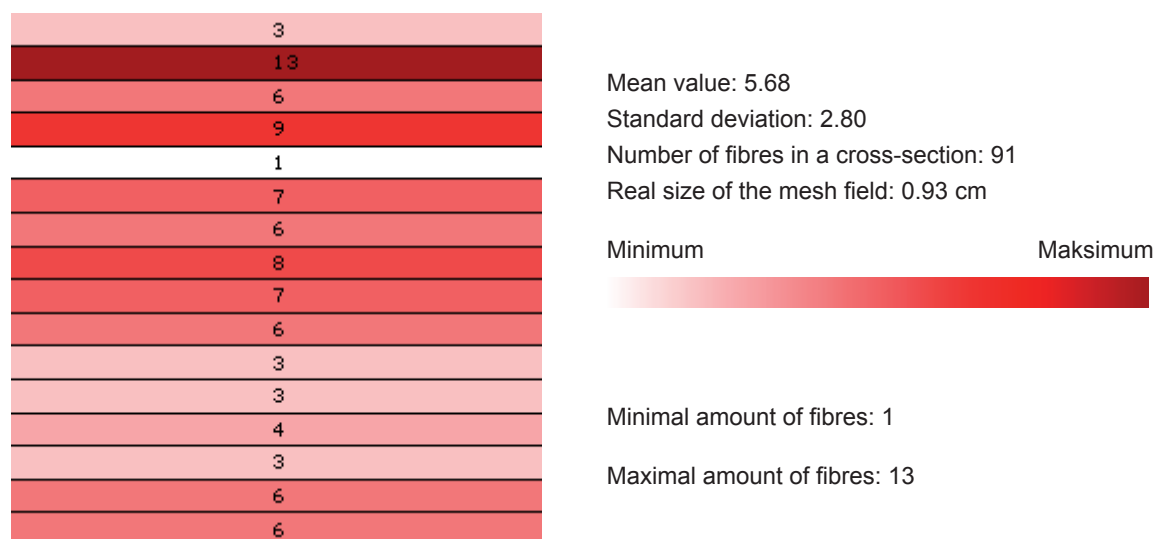


Fig. 7. The example of a concrete C2 cross-section divided in 1 x 16 rows and analysis of the number of fibres, data from the rows

Rys. 7. Przykład przekroju poprzecznego belki betonowej podzielonej na 1x16 prostokątów oraz wyniki analizy ilości włókien

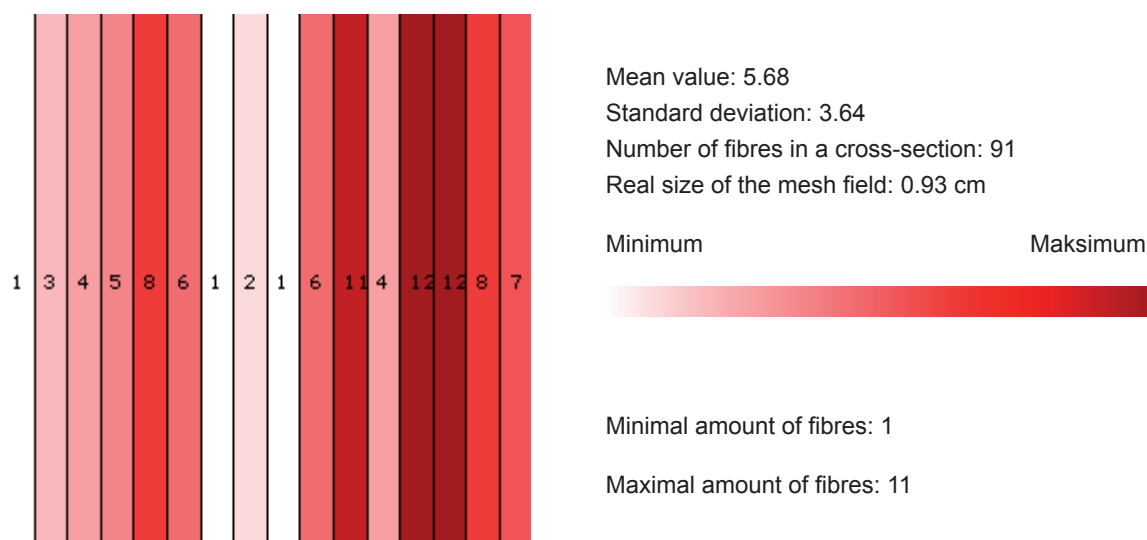


Fig. 8. The example of a concrete C2 cross-section for the division 16 x 16 and analysis of the number of fibres, data from the columns

Rys. 8. Przykład przekroju poprzecznego belki betonowej podzielonej na 16x16 pionowych prostokątów i wyniki analizy

lu powierzchni na 16 poziomych wierszy, oznaczonych jako 1 x 16. Na tej podstawie ustalano rozmieszczenie włókien w wyciętych próbkach betonu, określając lokalną i całkowitą ich koncentrację przestrzenną w układzie poziomym.

Na rysunku 8 przedstawiono znaną ilość włókien na powierzchni wybranej próbki betonu C2 w przypadku podziału tej powierzchni na 16 kolumn, oznaczonych jako 1x16. Na tej podstawie ustalano ogólne rozmieszczenie włókien w pionowych przekrojach próbki betonu, określając lokalną i całkowitą ich koncentrację przestrzenną w układzie pionowym.

Zastosowanie skali globalnej w znacznym stopniu zmniejsza przejrzystość wyników, ponieważ w zależności od stopnia podziału próbki ilość włókien w badanym polu waha się od 0 do 53 sztuk. Wyniki ogólne uzyskuje się poprzez generowanie diagramu przedstawia-

structural element (Fig. 9). Figures 10 - 12 show the results for the selected three of nine sections of the tested element made of C3 concrete, in the mesh 32 x 32. On the basis of deployment of fibres in a sample, the general trends of their dispersion can be evaluated.

The results of the computer tomography are presented in Figures 13 - 17. 2D [two-dimensional] patterns of concrete beam C4 sections located at 100 mm, 200 mm, 400 mm and 550 mm from the surface of the concrete sample are shown in Figures 13 and 14. It should be noted that the characteristic rounding of edges of the images of individual sections results from the scanning method, and not from the internal structure of the concrete. The selected sections of the concrete in question prove generally to have an even distribution of fibres, in the volume of the concrete. There are no large clusters of fibres in a matrix of concrete. The arrangement of fibers is parallel to the direction of flow of the mixture in the proc-

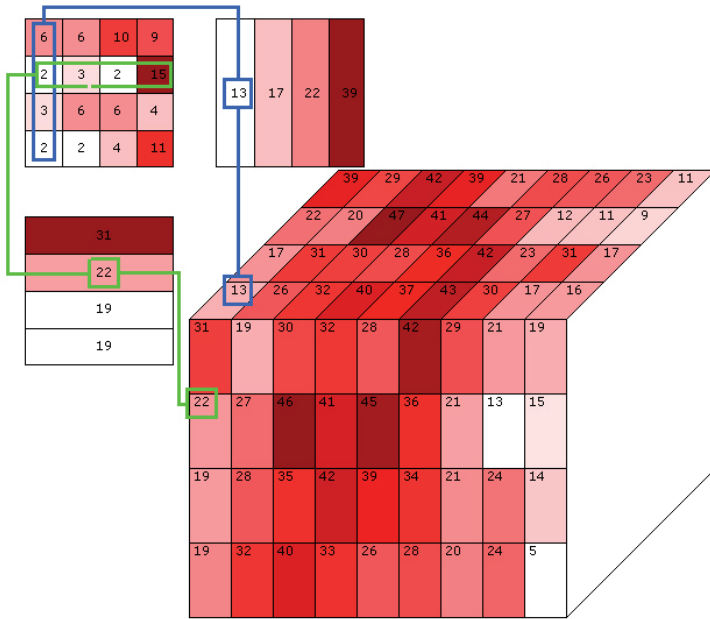


Fig. 9. Diagram showing the number of fibres in global analysis of concrete C2

Rys. 9. Diagram pokazujący ilość włókien uzyskaną z całkowitej analizy betonu C2

ess of molding. There are only few fibres arranged perpendicularly to the direction of flow.

The rheological parameters and X-ray of 2D sections of SFRHPSCC beams, for different kind of fibres and their volume share, are presented in Figures 15. In general, increasing fibre content causes linear increase of yield stress value g of SFRHPSCC. The range of influence of fibres content on plastic viscosity h of SFRHPSCC also depends on the matrix properties and on the fibre length.

The 3D cross-section of the concrete C2 beam, laying between 400-500 mm from the surface of the sample is shown in Figures 16 and 17. 3D image confirms the trend of the orientation of fibers in a matrix of concrete. The fibres are generally evenly distributed in concrete, with the exception of selected sections of the edge of the concrete.

4. Summary

In these studies the original method and software to analyze the distribution of fibres in concrete, as well as the tomogra-

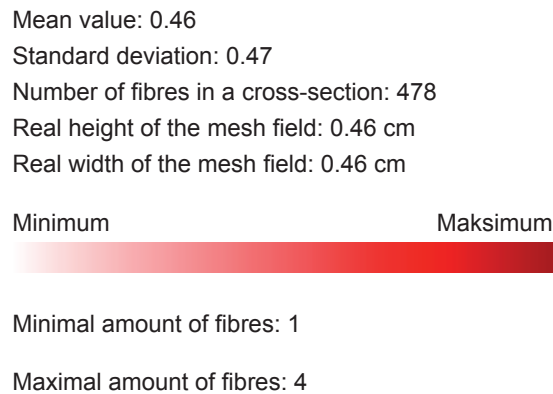
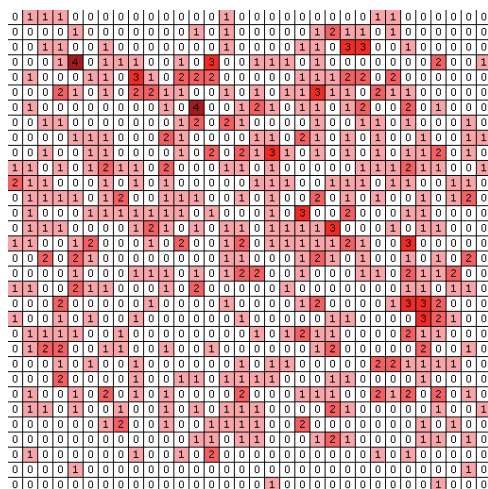


Fig. 10. The cross-section located at 200 mm of the surface of the beam from concrete C3 divided in 32 x 32 squares and result of analysis of the number of fibres

Rys. 10. Przekrój belki z betonu C3 położonej w odległości 200 mm od jej powierzchni i podzielonej na 32x32 kwadraty oraz wyniki analizy ilości włókien

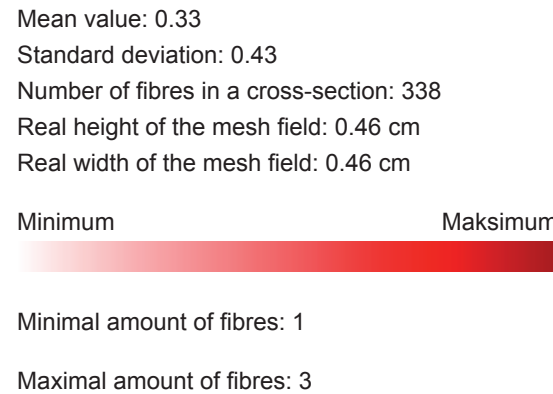
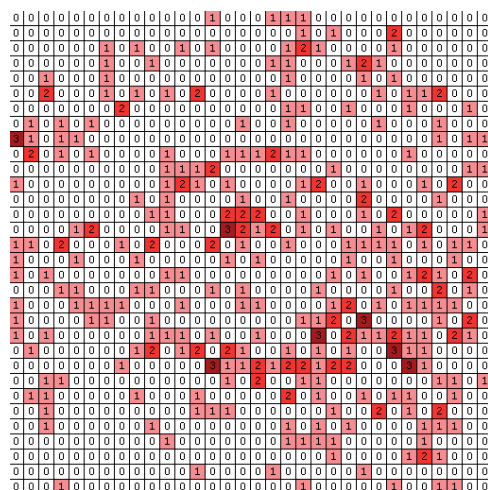
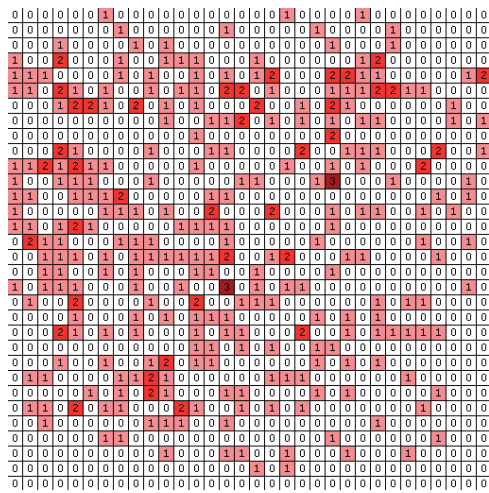


Fig. 11. The cross-section of 400 mm of concrete C3 for the division 32 x 32 and analysis of the number of fibres

Rys. 11. Przekrój belki z betonu C3 położonej 400 mm od powierzchni i podzielonej na 32x32 kwadraty oraz wyniki analizy ilości włókien



Mean value: 0.32
 Standard deviation: 0.36
 Number of fibres in a cross-section: 330
 Real height of the mesh field: 0.46 cm
 Real width of the mesh field: 0.46 cm

Minimum Maksimum



Minimal amount of fibres: 1

Maximal amount of fibres: 3

Fig. 12. The cross-section of 500 mm of concrete C3 for the division 32 x 32 and analysis of the number of fibres

Rys. 12. Przekrój belki betonowej położony 500 mm od jej powierzchni i podzielony na 32x32 pola oraz wyniki analizy ilości włókien

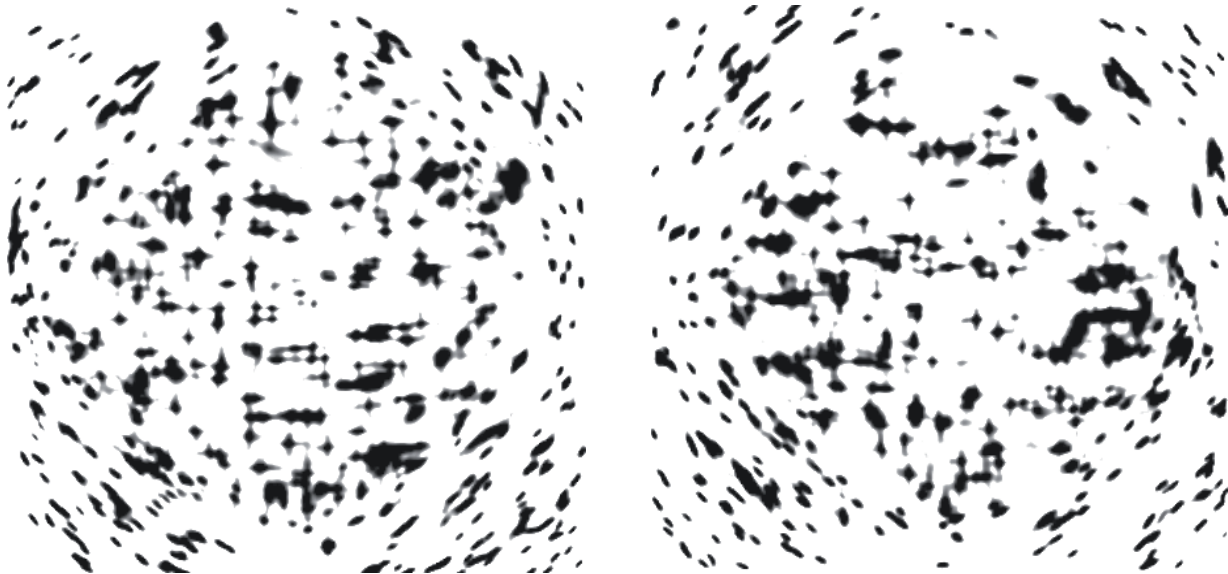


Fig. 13. The 2D images of sections of concrete C4 beams located at 100 mm and 200 mm from its surface

Rys. 13. Obrazy 2D przekrojów belki z betonu C4, położonych 100 mm i 200 mm od jej powierzchni

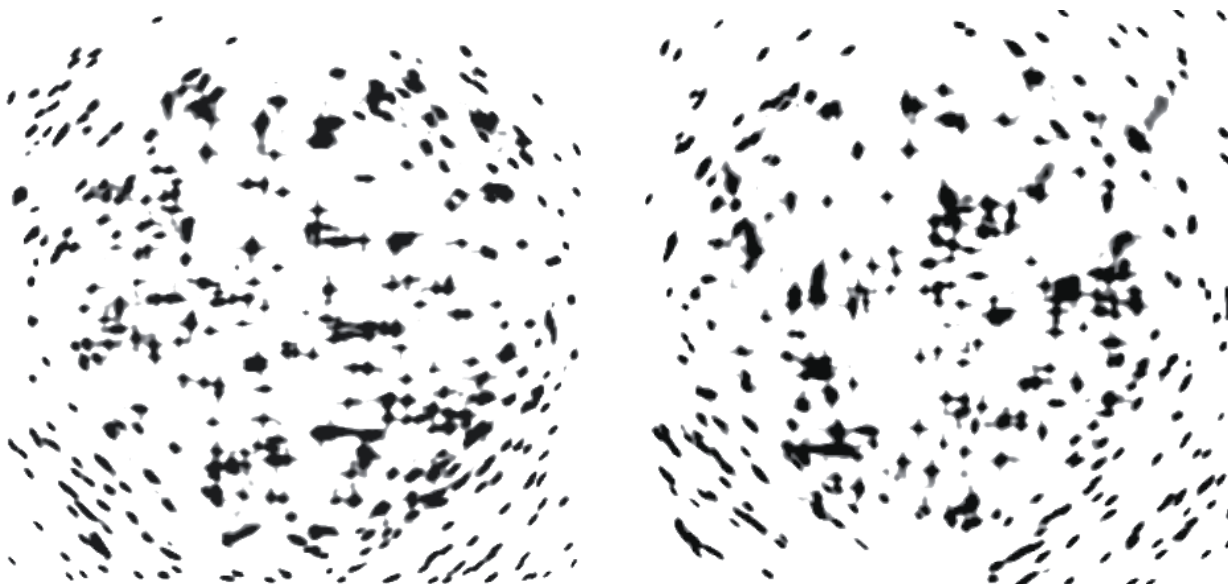


Fig. 14. 2D images of sections of concrete C4 beam located at 400 mm and 550 mm from its surface

Rys. 14. Obrazy 2D przekrojów belki z betonu C4, położonych w odległości 400 mm i 550 mm od jej powierzchni

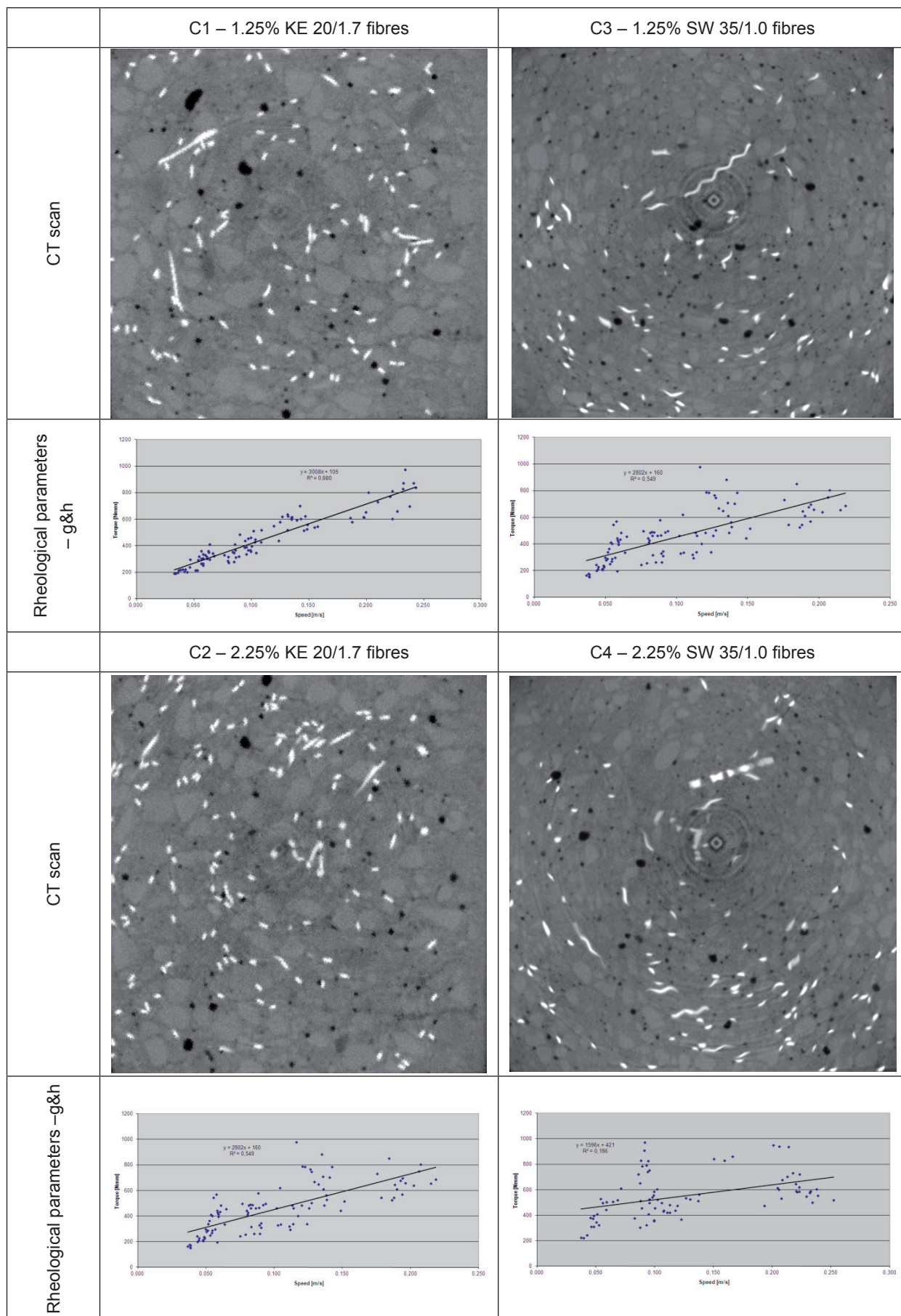


Fig. 15. Rheological parameters and X-ray 2D images of beams sections of SFRHPSCC for different kind and content of fibres

Fig. 15. Parametry reologiczne i obrazy 2D przekrojów belek z WWBSZWS w przypadku różnego rodzaju i różnej zawartości włókien

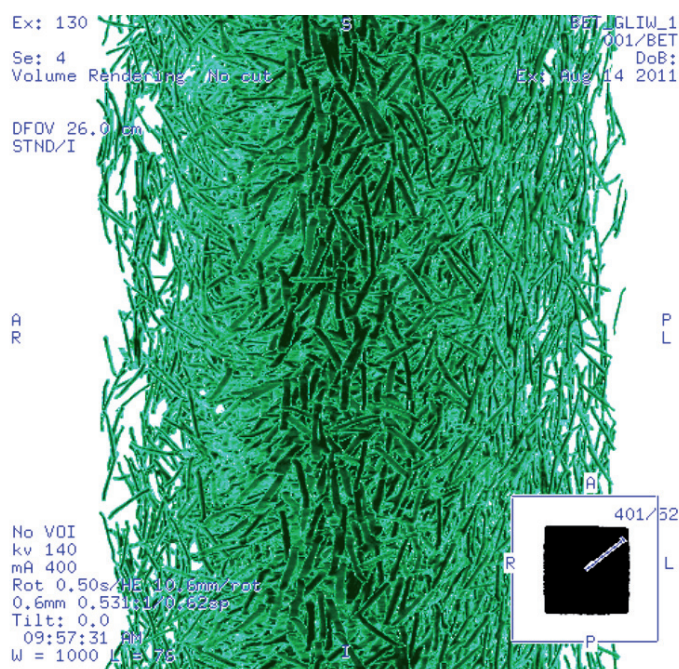


Fig. 16. X-ray 3D image of section of concrete C2 beam embracing the volume located at 400 ÷ 500 mm from its surface

Rys. 16. Trójwymiarowy obraz rentgenowski odcinka belki z betonu C2 obejmujący objętość od 400 do 500 mm od jej powierzchni

jącego ilość włókien w poszczególnych przekrojach oraz w całym badanym elemencie betonowym (rysunek 9).

Na rysunkach 10 - 12 przedstawiono wyniki dla wybranych trzech z dziewięciu wyciętych próbek badanego elementu fibrobetonowego C3 w przypadku podziału ich powierzchni na 1024 kwadraty, oznaczone jako 32 x 32. Na podstawie przedstawionych, przykładowych symulacji rozmieszczenia włókien w badanej próbce betonowej, stwierdzić można ogólne tendencje w ich rozmieszczeniu.

Wyniki badań przeprowadzonych tomografem komputerowym przedstawiono na rysunkach 13 - 17. Powierzchnie przekrojów belki betonowej C4 w układzie dwuwymiarowym 2D, położonych w odległości, kolejno 100, 200, 400, i 550 mm od powierzchni bocznej belki pokazano na rysunkach 13 i 14.

Należy podkreślić, że charakterystyczne zaokrąglenia obrazów poszczególnych przekrojów belki betonowej, związanych z badaniami za pomocą tomografu, wynikają tylko z metody ich skanowania, a nie z geometrii próbek. Na podstawie przedstawionych wybranych przekrojów próbek betonu można stwierdzić równomierne rozmieszczenie włókien w całej objętości badanej próbki. Nie spotyka się dużych skupisk włókien w matrycy betonowej. Dobrze widoczne jest równoległe ułożenie włókien, zgodne z kierunkiem przemieszczania się mieszanki w trakcie formowania. Niewiele jest włókien ułożonych prostopadłe do tego kierunku.

Na rysunku 15 pokazano rozmieszczenie włókien w próbkach stanowiących przekroje elementu betonowego otrzymane za pomocą tomografii komputerowej oraz parametry reologiczne mieszanki. Można stwierdzić, że wzrost udziału objętościowego włókien powoduje wzrost granicy płynięcia g badanych mieszanek betono-

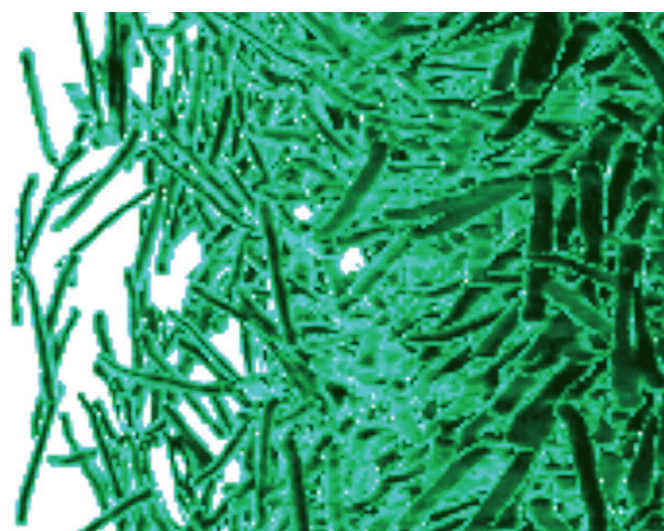


Fig. 17. X-ray 3D image of section of concrete C2 beam, located at 450 mm from its surface

Rys. 17. Trójwymiarowy obraz rentgenowski przekroju belki z betonu C2, położonej w odległości 450 mm od jej powierzchni

phy examinations were applied. The developed computer program allows the analysis of the distribution of individual fibres in the samples, both in the global and local systems. It also allows the identification of trends in the distribution of fibres, depending on the direction of concrete mix molding, the proximity of the walls of molds and in the perpendicular system near the surface and near the bottom of the form. The computed tomography shows the inner space of concrete with steel fibers in 2D and 3D formats without any limitations.

The applied methods of identifying the deployment of fibres in the SFRHPSCC revealed no tendency of sticking them to the walls of the form, and no effects of the wall itself. It has been observed that there were lower concentration of fibres in the immediate proximity of the mold walls.

The majority of fibers were positioned in the most cases parallel to the longitudinal walls of the mold which leads to the conclusion that such behavior results from the direction of concrete mixture flow.

The orientation of fibres connected with the direction of the SFRHPSCC mix flow during molding was confirmed. Proved as well was the uniform distribution of fibers in the produced concrete element. There was no evidence of fibers clusters formation.

The presented method and software is the introduction to the study of the relationship between the distribution of fibers in concrete elements and the strength parameters of concrete.

References / Literatura

1. R. Zerbino, J. M. Tobes, M. E. Bossio, G. Giaccio, On the orientation of fibres in structural members fabricated with self compacting fibre reinforced concrete, *Cem. Concr. Comp.* **34**, 191-200 (2012).
2. D. J. Kim, A. E. Naaman, S. El-Tawil, Comparative flexural behavior of four fiber reinforced cementitious composites, *Cem. Concr. Comp.* **30**, 917-928 (2008).

wych. Zakres zmian lepkości plastycznej h , spowodowany zmianami zawartości włókien, zależy od właściwości mieszanki betonowej oraz od długości włókien.

Projekcje trójwymiarowe 3D przekroju belki betonowej C2 w obszarze 400-500 mm od jej powierzchni bocznej pokazano na rysunkach 16 i 17. Obrazy 3D potwierdzają tendencję do kierunkowego ułożenia włókien w matrycy betonowej. Włókna są na ogół równomiernie rozłożone w betonie, za wyjątkiem niewielkich obszarów położonych w sąsiedztwie naroży próbek.

5. Podsumowanie

W oparciu o wyniki badań rozmieszczenia włókien stalowych w belkach betonowych, w których wykorzystano specjalnie opracowaną metodę wraz z oprogramowaniem komputerowym oraz tomografię komputerową, stwierdzono możliwość prowadzenie tych analiz w całej objętości przygotowanych próbek. Opracowany program komputerowy pozwala na badanie rozmieszczenia włókien w całej objętości próbek, jak również w niewielkich, wybranych obszarach. Umożliwia to również znalezienie tendencji w ułożeniu włókien w zależności od kierunku formowania mieszanki betonowej, i to zarówno blisko bocznych ścian formy, jak i w układzie pionowym, przy powierzchni elementu oraz niedaleko dna formy. Tomografia komputerowa pozwala na uzyskanie dwuwymiarowych 2D i trójwymiarowych 3D obrazów rozmieszczenia włókien w całej wewnętrznej objętości elementu betonowego.

Przeprowadzone badania wykazały równomierne rozmieszczenie włókien w całej objętości betonowych. Nie stwierdzono tworzenia się skupisk włókien. Zastosowane metody badania rozmieszczenia włókien w próbkach WWBSZWS nie ujawniły także tendencji do ich przylegania do ścian formy. Natomiast zaobserwowano mniejszą ilość włókien w bezpośrednim sąsiedztwie tych ścian.

Przeważająca ilość włókien ułożonych w większości przypadków równoległe do podłużnych ścian formy pozwala wnioskować, iż zachowanie takie wynika z kierunku formowania i rozplywania się mieszanki w formie. Potwierdzono więc orientację włókien zgodną z kierunkiem płynięcia mieszanki WWBSZWS w trakcie formowania.

Przedstawiona metoda i oprogramowanie stanowią wstęp do badań na temat zależności pomiędzy rozmieszczeniem włókien w elemencie betonowym a określeniem ich wpływu na wytrzymałość.

3. Y. Ding, C. Azevedo, J. B. Aguiar, S. Jalali, Study on residual behaviour and flexural toughness of fibre cocktail reinforced self compacting high performance concrete after exposure to high temperature, *Constr. Build. Mat.* **26**, 21-31 (2012).
4. Y. Ding, S. Liu, Y. Zhang, A. Thomas, The investigation on the workability of fibre cocktail reinforced self-compacting high performance concrete, *Constr. Build. Mat.* **22**, 1462-1470 (2008).
5. S.-T. Kang, J.-K. Kim, Investigation on the flexural behavior of UHPCC considering the effect of fiber orientation distribution, *Constr. Build. Mat.* **28**, 57-65 (2011).
6. T. Ponikiewski, G. Cygan, Wybrane właściwości samozagęszczających się fibrobetonów z włóknami stalowymi, *Cement Wapno Beton*, **78**, 203-209 (2011).
7. S.-T. Kang, J.-K. Kim, The relation between fiber orientation and tensile behavior in an Ultra High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites (UHPFRCC), *Cem. Concr. Res.* **41**, 1001-1014 (2011).
8. P. N. D. Tanikella, R. Gettu, On the distribution of fibers in self compacting concrete. 7th RILEM Symposium on Fibre - Reinforced Concretes - BE-FIB, RILEM Publications S.A.R.L Chennai, India, pp. 1147 – 1153 (2008).
9. M. C. Torrijos, J. M. Tobes, B. E. Barragán, R. L. Zerbino, Orientation and distribution of steel fibres in self-compacting concrete. *ibid.* pp. 729-738.
10. L. Vandewalle, G. Heirman, F. van Rickstal, Fibre orientation in self-compacting fibre reinforced concrete. *ibid.* pp. 719-728.
11. M. Y. Yardimci, B. Baradan, M. A. Taşdemir, Studies on the relation between fiber orientation and flexural performance of SFRSCC, *ibid.* pp. 711-718.
12. P. Stroeven, P. Shah, S. P., Use of radiography-image analysis for steel fibre reinforced concrete, In. "Testing and Test Methods of Fibre Reinforced Composites", pp. 308-311, R. N. Swamy ed., Construction Press, Lancaster, 1978.
13. G. H. Tattarsall, P. F. G. Banfill, *The Rheology of Fresh Concrete*. Boston, Pitman Books Limited, 1983.