

Wybrane właściwości BSZ z dodatkiem falisto-haczykowatych włókien stalowych

THE INFLUENCE OF WAVY-HOOKED STEEL FIBRES ON THE SELECTED CHARACTERISTIC OF SCC

Streszczenie

W artykule przedstawiono wpływ falisto-haczykowatych włókien stalowych na wybrane właściwości fibrobetonów samozagęszczalnych. Program badań obejmował: badanie wytrzymałości na ściskanie, badanie wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu, badanie wytrzymałości równoważnej na rozciąganie przy zginaniu oraz badania rozmieszczenia włókien w matrycy betonowej metodą tomografii komputerowej. Badania przeprowadzono dla betonów cementowych z zawartością zarówno stalowych włókien falistych Steelbet 50/0,65 oraz nowych włókien falisto-haczykowatych Steelwave B55/0,65 w ilości 25, 35 i 45 kg/m³ (co odpowiada odpowiednio zawartości objętościowej włókien w betonie: 0,32%, 0,45% i 0,57%) oraz dla próbek kontrolnych z zerową zawartością włókien. Przyjęto, że klasa betonu użytego do badań powinna być nie niższa niż C30/37. Badania wytrzymałości równoważnej wykonano wg zaleceń zawartych w RILEM. Badania wykazały poprawę parametrów mechanicznych betonu (wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu) o około 15,5% przy zastosowaniu w betonie włókien Steelwave względem wcześniej stosowanych włókien Steelbet. Ponadto badania wykazały wzrost równoważnej wytrzymałości na zginanie o około 48% przy zastosowaniu w betonie włókien Steelwave względem wcześniej stosowanych włókien Steelbet. Dodatkowe badania wykazały poprawę parametrów mechanicznych betonu (wytrzymałości resztkowej na zginanie) o około 26% (dla $f_{R,1}$), 22% (dla $f_{R,2}$), 27% (dla $f_{R,3}$), 51% (dla $f_{R,4}$), przy zastosowaniu w betonie włókien Steelwave względem wcześniej stosowanych włókien Steelbet.

Abstract

The aim of the present work is to investigate the selected behavior (slump flow, compressive and flexural tensile strength, fracture energy) of self-compacting concrete reinforced

with wavy-hooked steel fibres. The goal of this work was to determine the distribution and orientation of fibres in self-compacting concrete, cast of small beams (600x150x150 mm). The paper presents the laboratory investigations of SCC reinforced with wavy steel fibres Steelbet 50/0,65 and wavy-hooked steel fibres Steelwave B55/0,65 with volume ratios (25, 35 and 45 kg/m³). The laboratory tests were determined according to RILEM TC 162-TDF recommendation. The bottom side of each specimen was notched with 25 mm depth. The fibres effectiveness increases with the increase of fibre dosage. The increase in distance of SCC bars from the point of mixtures feeding significantly improves their strength.

1. Wprowadzenie

Elementy betonowe z dodatkiem włókien coraz śmielej wkraczają w światowe budownictwo komunikacyjne i pokrewne technologie. Stosowane są m.in. w: nawierzchniach drogowych, ścianach oporowych, płytach lotnisk, przy stabilizacji zboczy, posadzkach przemysłowych, palach wbijanych czy tunelowych konstrukcjach torkretowych [1–8]. Najnowsze kompozyty fibrobetonowe, wykonane na bazie mieszanki samozagęszczalnej, często charakteryzujące się bardzo dużą zawartością włókien (nawet do 15% udziału objętościowego), znajdują coraz szersze zastosowanie, adekwatne metody badań [9–12] i coraz częściej stosuje się je jako podstawowy materiał konstrukcyjny w budownictwie zamiast zwykłego betonu [13–20]. Nowoczesne techniki, takie jak konstrukcje stalowo-fibrobetonowe, betony zbrojone matami z włókien stalowych czy zbrojenie hybrydowe konstrukcji betonowych, stwarzają bardzo szerokie możliwości stosowania zwykłych i samozagęszczalnych fibrobetonów, przy wykazywanych problemach technologicznych. Innowacyjnością przedstawioną w artykule jest falisto-haczykowaty kształt włókien (jako innowacja produktowa) oraz ich zastosowanie w betonach samozagęszczalnych (jako innowacja procesowa).

2. Założenia i metodyka badań

Celem badań jest określenie wybranych parametrów wytrzymałościowych betonu zbrojonego zbrojeniem rozproszonym – włóknami stalowymi falistymi Steelbet 50/0,65 oraz włóknami stalowymi falisto-haczykowatymi Steelwave B55/0,65, produkowanymi przez przedsiębiorstwo Urban-Metal Sp. z o.o. z Rachowic. Program badań obejmował następujące punkty:

- badanie wytrzymałości na ściskanie,
- badanie wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu,
- badanie wytrzymałości równoważnej na rozciąganie przy zginaniu.

Dodatkowo przeprowadzono badania wytrzymałości resztkowej na zginanie. Badania przeprowadzono dla betonów cementowych z zawartością zarówno włókien Steelbet 50/0,65 oraz nowych włókien falisto-haczykowatych Steelwave B55/0,65 w ilości 25, 35 i 45 kg/m³ (co odpowiada odpowiednio zawartości objętościowej włókien w betonie: 0,32%, 0,45% i 0,57%) oraz dla próbek kontrolnych z zerową zawartością włókien. Przyjęto, że klasa betonu użytego do badań powinna być nie niższa niż C30/37. Badania wytrzymałości równoważnej wykonano wg zaleceń zawartych w RILEM TC 162-TDF [9]. Belki i kostki betonowe użyte do badań zostały wykonane i przebadane w Laboratorium Wydziału Budownictwa Politechniki Śląskiej. Zaprojektowano beton o konsystencji mieszanki S2. Wykonano ogółem 28 belek betonowych 15 x 15 x 55 cm (7 zarobów po 4 belki) oraz 21 kostek betonowych o boku 15 cm. W tabelach 1 i 2 przedstawiono skład ilościowy i jakościowy betonu, z którego wykonano próbki. Recepturę obliczono, przy uwzględnieniu działania plastyfikatora „Pantarhit 50 (BV) ”(2%), dla klasy konsystencji S2. Określona wg opadu stożka rzeczywista konsystencja mieszanki wyniosła 50 mm.

Tabela 1. Receptura mieszanki betonowej konsystencji

Lp.	Rodzaje składników	Ilość składników na 1 m ³ [kg]
1	CEM I 32,5 R	350,0
2	„Pantarhit 50 (BV) ”(2%)	7,0
3	woda	168,0
4	piasek 0–2 mm	635,0
5	żwir 2–8 mm	830,0
6	żwir 8–16 mm	488,0
7	Włókna Steelbet B50/0,65 (W1)	25-35-45
8	Włókna Steelwave B55/0,65 (W2)	25-35-45

Tabela 2. Oznaczenie składów oraz zawartości włókien stalowych w badaniach

Oznaczenia składu	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
Rodzaj włókien	Brak	W1	W2	W1	W2	W1	W2
Zawartość włókien [kg/m ³]	0	25	25	35	35	45	45

3. Program badań

3.1. Określenie wytrzymałości na ściskanie

Badanie wytrzymałości na ściskanie przeprowadzono przy użyciu maszyny wytrzymałościowej typu MATEST C-104. Maszyna posiada aktualną legalizację i umożliwia przeprowadzenie pomiarów wytrzymałości na ściskanie w zakresie działającej siły do 3000 kN. Badania przeprowadzono na próbkach sześciennych o boku 15 cm. Wykonano po cztery próbki dla każdej partii betonu. Badanie wytrzymałości wykonano zgodnie z zaleceniami zawartymi w normie PN-EN 206-1 „Beton. Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.

3.2. Określenie wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu i wytrzymałości równoważnej na rozciąganie przy zginaniu.

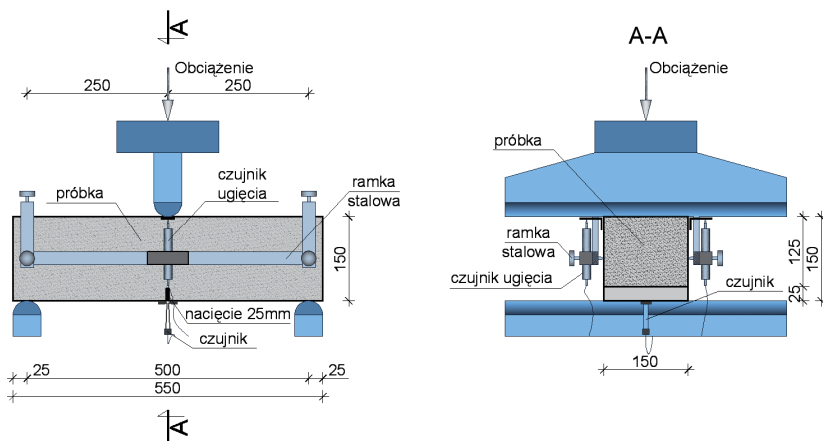
Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu w granicy proporcjonalności można określić wg EN 14651:

$$f_{ct,L}^f = \frac{3F_L L}{2bh_{sp}^2} \quad (1)$$

gdzie: F_L – maksymalna siła w przedziale ugięcia $0 \pm 0,05$ mm, L – rozpiętość belki (300 mm), b – szerokość belki (150 mm), h_{sp} – wysokość belki pomniejszona o wysokość szczeliny (125 mm).

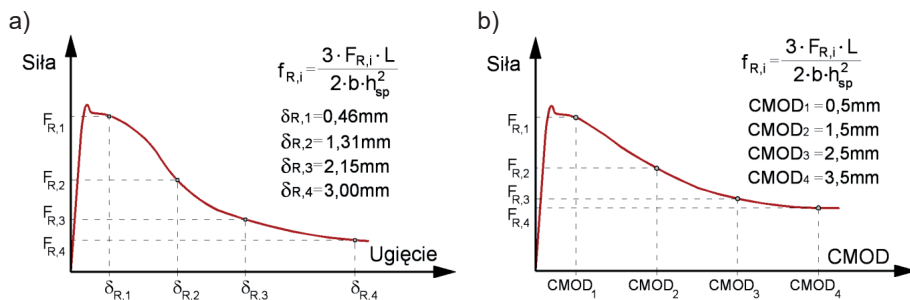
Zginanie belek zostało przeprowadzone w Laboratorium Wydziału Budownictwa Politechniki Śląskiej. Badania laboratoryjne zostały przeprowadzone zgodnie z zaleceniami RILEM TC 162-TDF [9]. Przebadano próbki pryzmatyczne o wymiarach 150x150x550 mm. Po zabetonowaniu próbki były przechowywane w warunkach wysokiej wilgotności, pod

folią, przez jeden dzień. Po rozformowaniu były przechowywane w wodzie o temperaturze 20°C aż do dnia poprzedzającego badanie. Bezpośrednio przed badaniem w środku próbki wykonywano nacięcie piłą diamentową o głębokości 25 mm. Następnie próbki poddawano próbie centrycznego zginania, przy rozpiętości belki wynoszącej 500 mm (rys. 1). Badania były prowadzone przy stałym przyroście ugięcia wynoszącym 0,2 mm/min, aż do osiągnięcia ugięcia wynoszącego 5 mm. Równocześnie prowadzony był stały odczyt szerokości rozwarcia rysy (CMOD).



Rys. 1. Stanowisko badawcze

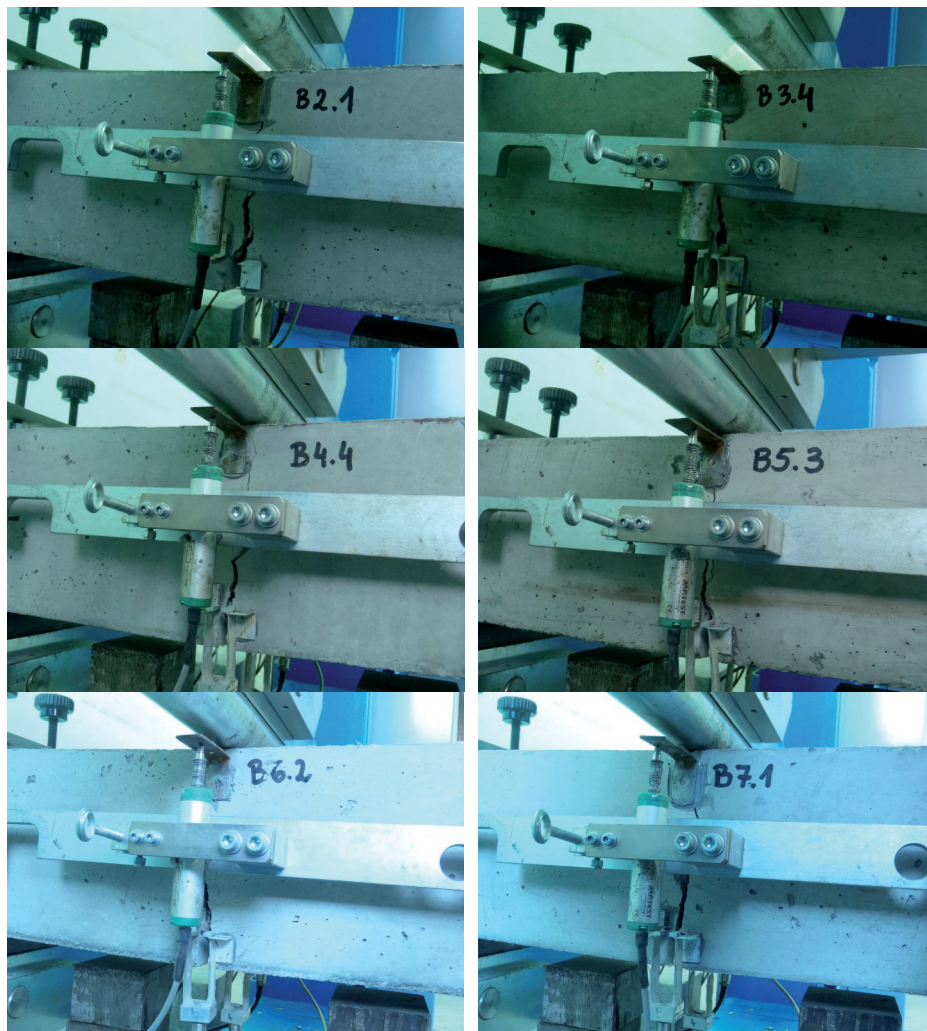
Wytrzymałość resztkowa na zginanie jest umownym maksymalnym naprężeniem rozciągającym, przy założonym ugięciu bądź CMOD. Badania próbek pryzmatycznych z nacięciem można przeprowadzać sterując szybkością ugięcia bądź szybkością rozwarcia krawędzi naciętej szczeliny (CMOD). W przypadku sterowania szybkością ugięcia wytrzymałość resztkową należy określać dla ugięć wg rysunku 2.



Rys. 2. Określenie resztkowej wytrzymałości na zginanie $f_{R,i}$ z zależności: a) siła-ugięcie; b) siła – CMOD.

Widok stanowiska badawczego w trakcie badań przedstawiono na fotografii 1. Autorzy przeprowadzili badania laboratoryjne ze stałym przyrostem ugięcia w czasie.

Stąd, zamieszczone obliczenia naprężenia są wykonane dla odpowiedniej wartości ugięć. Rozwarcie krawędzi naciętej szczeliny (CMOD) równe 0,5 mm odpowiada stanowi granicznemu użytkowania, a $CMOD=2,5$ mm stanowi granicznemu nośności. Wartości wytrzymałości resztkowych $f_{R,1}$ i $f_{R,3}$ określono dla ugięć odpowiadających podanym wartościom CMOD czyli: 0,46 mm i 2,15 mm.



Fot. 1. Widok stanowiska badawczego w trakcie badań

3.3. Badania rozmieszczenia włókien w matrycy betonowej metodą tomografii komputerowej

Zastosowany do badań tomograf komputerowy był wyposażony w 16 rzędów detektorów, a rekonstruowana grubość warstwy serii natywnej badania tomograficznego wynosiła

0.625 mm, co stanowiło szerokość pojedynczej warstwy w matrycy detektorów. Próbki walcowe otrzymano metodą odwiertu z belek świadków i prześwietlane były wiązką promieniowania X. Dla każdej próbki betonowej powstała seria warstw zapisana w formacie DICOM. Każda seria składa się z 256 obrazów. Warunki akwizycji dostosowywane były dynamicznie do aktualnie badanej próbki oraz protokołu rekonstrukcji zastosowanego do danego pomiaru. Istotnym parametrem jest napięcie lampy, które ustalone zostało na poziomie 140 kV, natężenie prądu oraz czas ekspozycji. Na potrzeby prezentowanych wyników badań wykonano łącznie 256 warstw każdej próbki, co pozwoliło na przestrzenną rekonstrukcję struktury wewnętrznej próbki betonowej o wymiarach 50x150 mm, metodami matematycznymi tomografii komputerowej.

4. Wyniki badań

4.1. Badanie wytrzymałości na ściskanie

Celem określenia rzeczywistej wytrzymałości na ściskanie betonu z którego wykonano omawiane beleczki, przy wykonywaniu każdej z nich wykonywano po cztery próbki sześciennie o boku 15 cm. Otrzymane wyniki badań wytrzymałości na ściskanie przedstawiono w tabeli 3 i na rysunku 3.

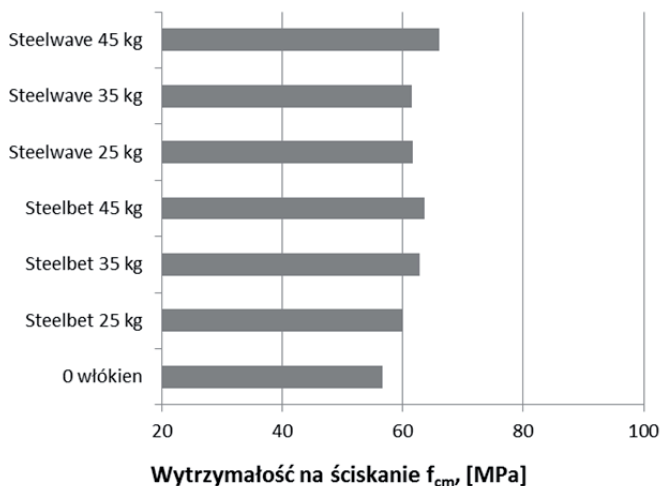
Tabela 3. Zestawienie wyników badań wytrzymałości na ściskanie

Włókna	Ozn.	Masa [kg]	f_c [MPa]	f_{cm} [MPa]	Gęstość ρ [kg/m ³]	Opad stożka [cm]
Brak	B1/1	7,882	56,0	56,6	2335	5,0
	B1/2	7,978	59,1		2364	
	B1/3	7,856	56,0		2328	
	B1/4	7,956	55,1		2357	
Steelbet B50/0,65 25kg	B2/1	7,920	61,8	60,1	2347	5,0
	B2/2	7,990	62,1		2367	
	B2/3	7,930	58,2		2350	
	B2/4	7,918	58,3		2346	
Steelwave B55/0,65 25kg	B3/1	7,886	60,4	61,6	2337	3,5
	B3/2	7,894	63,4		2339	
	B3/3	7,906	61,0		2343	
	B3/4	7,889	61,4		2337	
Steelbet B50/0,65 35kg	B4/1	7,949	60,6	62,8	2355	3,0
	B4/2	7,987	65,2		2367	
	B4/3	7,994	61,6		2369	
	B4/4	8,003	63,7		2371	

Tabela 3. Cd. Zestawienie wyników badań wytrzymałości na ściskanie

Włókna	Ozn.	Masa [kg]	f_c [MPa]	f_{cm} [MPa]	Gęstość ρ [kg/m ³]	Opad stożka [cm]
Steelwave B55/0,65 35kg	B5/1	8,005	62,3	61,5	2372	2,5
	B5/2	7,918	59,9		2346	
	B5/3	7,953	61,9		2356	
	B5/4	7,975	61,8		2363	
Steelbet B50/0,65 45kg	B6/1	8,011	65,4	63,6	2374	2,0
	B6/2	8,008	62,7		2373	
	B6/3	8,004	64,2		2372	
	B6/4	8,075	62,0		2393	
Steelwave B55/0,65 45kg	B7/1	8,016	65,6	66,0	2375	1,0
	B7/2	8,026	67,7		2378	
	B7/3	8,006	64,8		2372	
	B7/4	8,136	66,0		2411	

Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie wykazały przyrost wytrzymałości wraz ze wzrostem zawartości włókien w betonie. Dla zawartości 45 kg/m³ włókien Steelbet uzyskano przyrost wytrzymałości o 12,3% a dla zawartości 45 kg/m³ włókien Steelwave uzyskano przyrost wytrzymałości o 16,6%, względem betonu bez włókien. Badania wykazały poprawę parametrów mechanicznych betonu (wytrzymałość na ściskanie) większą o około 5% przy zastosowaniu w betonie włókien Steelwave względem wcześniej stosowanych włókien Steelbet.

Rys. 3. Wpływ rodzaju włókien na wytrzymałość na ściskanie f_{cm}

4.2. Badanie wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu oraz wytrzymałości równoważnej na rozciąganie przy zginaniu

Celem określenia wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu betonu, przy wykonywaniu każdej z nich wykonywano po cztery belki. Otrzymane wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu przedstawiono w tabeli 4 i na rysunku 4. Wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu wykazały znaczny przyrost wytrzymałości wraz ze wzrostem zawartości włókien w betonie. Dla zawartości 45 kg/m³ włókien Steelbet uzyskano przyrost wytrzymałości o 63,7%, a dla zawartości 45 kg/m³ włókien Steelwave uzyskano przyrost wytrzymałości o 79,2%, względem betonu bez włókien. Badania wykazały poprawę parametrów mechanicznych betonu (wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu) większą o około 15,5% przy zastosowaniu w betonie włókien Steelwave względem wcześniej stosowanych włókien Steelbet.

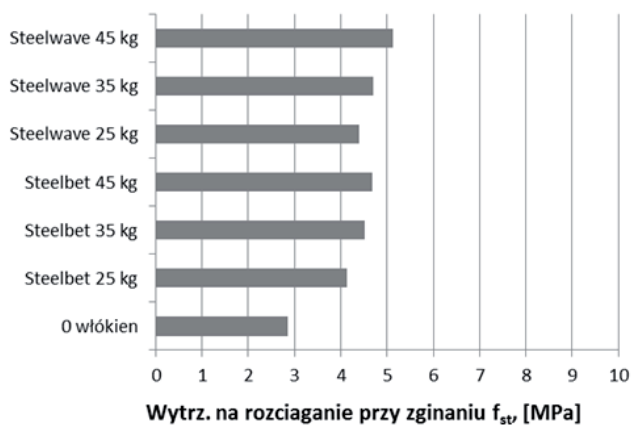
Celem określenia równoważnej wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu betonu, przy wykonywaniu każdej z nich wykonywano po cztery belki. Otrzymane wyniki badań przedstawiono w tabeli 4 i na rys. 5. Wyniki badań równoważnej (ekwiwalentnej) wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu betonu, f_{eq} wykazały znaczny przyrost wytrzymałości wraz ze wzrostem zawartości włókien w betonie. Dla zawartości 45 kg/m³ włókien Steelbet uzyskano przyrost wytrzymałości równoważnej o 580%, a dla zawartości 45 kg/m³ włókien Steelwave uzyskano przyrost wytrzymałości równoważnej o 629%, względem betonu bez włókien. Badania wykazały poprawę parametrów mechanicznych betonu (równoważna wytrzymałość na zginanie) większą o około 48% przy zastosowaniu w betonie włókien Steelwave względem wcześniej stosowanych włókien Steelbet.

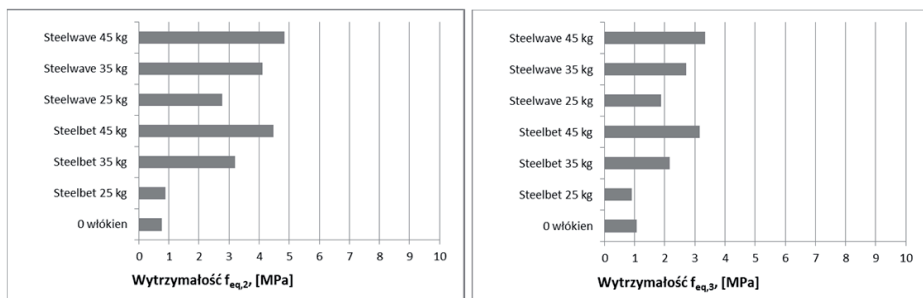
Tablica 4. Zestawienie wyników badań wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu oraz wytrzymałości równoważnej na rozciąganie przy zginaniu

Próbka	Siła maksymalna F_{max} [kN]	Ugięcie odp F_{max} [mm]	Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu f_b [MPa]	Wytrzymałość równoważna na zginanie, f_{eq} [MPa]		Wytrzymałości resztkowa na zginanie [MPa]			
				$f_{eq,2}$	$f_{eq,3}$	$f_{R,1}$	$f_{R,2}$	$f_{R,3}$	$f_{R,4}$
B1.1	14,03	0,66	2,49	1,50	0,66	0,16	0,24	0,78	0,82
B1.2	12,32	0,08	2,94	0,93	0,65	0,14	0,12	0,56	0,31
B1.3	13,15	0,03	2,21	0,09	2,53	0,07	0,07	0,78	0,08
B1.4	21,23	0,77	4,79	0,56	0,43	0,23	0,34	0,40	0,62
B2.1	14,69	0,04	4,70	0,18	0,59	1,11	0,79	0,55	0,50
B2.2	12,08	0,03	3,87	0,90	0,73	1,06	0,70	0,64	0,56
B2.3	14,43	0,04	4,62	1,78	1,53	2,31	1,72	1,19	0,91
B2.4	10,52	0,03	3,37	0,69	0,75	1,14	0,88	0,57	0,56
B3.1	16,11	0,04	5,15	2,86	2,02	3,16	2,10	1,44	1,18
B3.2	13,03	0,20	4,17	2,27	1,12	1,75	1,04	0,51	0,48
B3.3	14,57	0,09	4,66	2,89	1,56	2,57	1,41	0,85	0,63
B3.4	11,30	0,83	3,61	3,06	2,80	3,03	2,99	2,21	1,16

Tablica 4. Cd. Zestawienie wyników badań wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu oraz wytrzymałości równoważnej na rozciąganie przy zginaniu

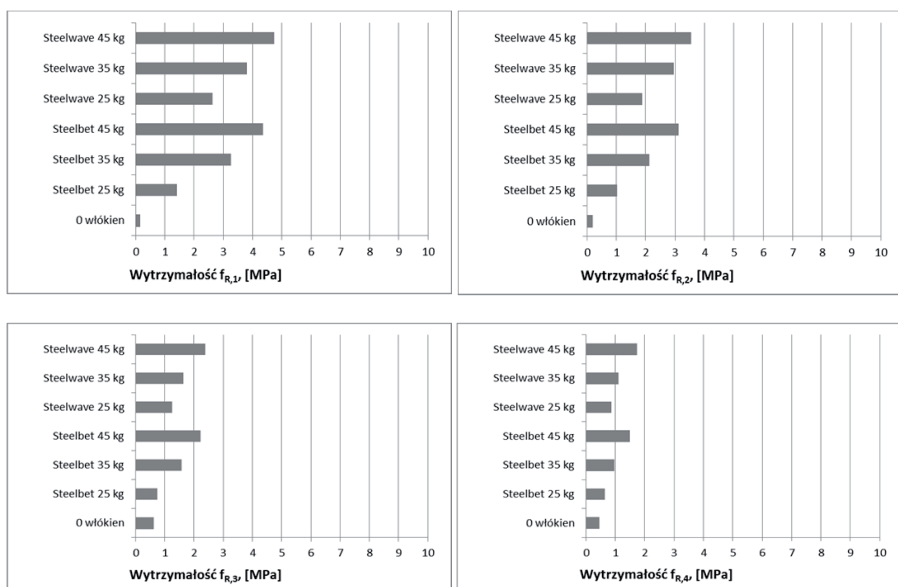
Próbka	Siła maksymalna F_{max} [kN]	Ugięcie odp F_{max} [mm]	Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu f_{ls} [MPa]	Wytrzymałość równoważna na zginanie, f_{eq} [MPa]		Wytrzymałości resztkowa na zginanie [MPa]			
				$f_{eq,2}$	$f_{eq,3}$	$f_{R,1}$	$f_{R,2}$	$f_{R,3}$	$f_{R,4}$
B4.1	13,48	0,05	4,31	3,23	2,12	3,25	1,95	1,66	1,29
B4.2	13,40	0,06	4,29	1,58	1,07	1,82	1,02	0,68	0,56
B4.3	13,31	0,11	4,26	3,55	2,64	3,28	2,65	2,13	0,41
B4.4	16,30	0,03	5,22	4,43	2,85	4,66	2,84	1,82	1,60
B5.1	15,82	0,15	5,06	5,13	3,15	4,60	3,42	1,67	1,04
B5.2	14,76	0,06	4,72	3,68	2,40	3,71	2,49	1,24	0,86
B5.3	14,17	0,12	4,53	4,27	3,13	3,63	3,40	2,43	1,67
B5.4	13,95	0,11	4,46	3,41	2,18	3,29	2,46	1,21	0,88
B6.1	19,49	0,44	4,95	4,54	3,31	4,56	3,12	2,05	1,42
B6.2	15,03	0,26	4,81	4,50	3,12	4,53	3,47	2,80	1,17
B6.3	18,22	0,45	4,51	4,43	3,21	3,96	2,98	1,98	1,84
B6.4	15,61	0,10	4,45	4,44	2,96	4,34	2,93	2,04	1,56
B7.1	15,64	0,12	5,00	4,99	3,08	4,61	2,96	2,78	2,23
B7.2	17,07	0,61	5,46	5,27	3,93	5,39	4,26	2,67	2,02
B7.3	14,56	0,10	4,66	4,17	2,94	3,95	3,09	1,90	1,37
B7.4	16,75	0,07	5,36	4,96	3,43	5,02	3,85	2,21	1,30

Rys. 4. Wpływ rodzaju i zawartości włókien na wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu f_{st}

Rys. 5. Wpływ rodzaju i zawartości włókien na równoważną wytrzymałość na zginanie, f_{eq}

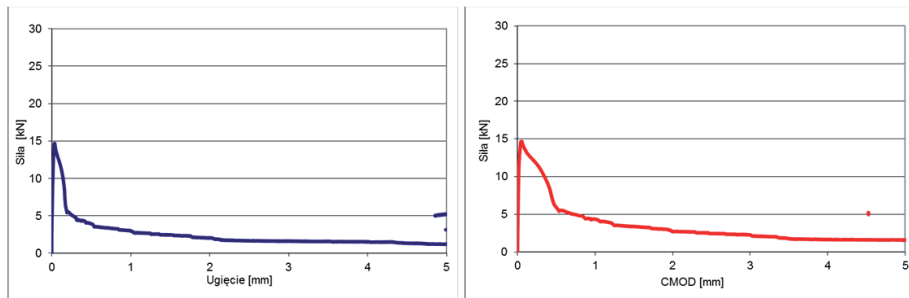
4.3. Wytrzymałość resztkowa na zginanie

Celem określenia wytrzymałości resztkowej na zginanie betonu, wykonano dodatkowe badania i obliczenia dla czterech belek z każdej serii. Otrzymane wyniki badań wytrzymałości resztkowej na zginanie przedstawiono w tabeli 4 i na rysunku 6. Wyniki badań wytrzymałości resztkowej na zginanie wykazały znaczny przyrost wytrzymałości wraz ze wzrostem zawartości włókien w betonie. Dla zawartości 45 kg/m³ włókien Steelbet uzyskano przyrost wytrzymałości o 290% (dla $f_{R,1}$), 161% (dla $f_{R,2}$), 352% (dla $f_{R,3}$), 327% (dla $f_{R,4}$), a dla zawartości 45 kg/m³ włókien Steelwave uzyskano przyrost wytrzymałości o 317% (dla $f_{R,1}$), 183% (dla $f_{R,2}$), 379% (dla $f_{R,3}$), 378% (dla $f_{R,4}$), względem betonu bez włókien. Badania wykazały poprawę parametrów mechanicznych betonu (wytrzymałości resztkowej na zginanie) większą o około 26% (dla $f_{R,1}$), 22% (dla $f_{R,2}$), 27% (dla $f_{R,3}$), 51% (dla $f_{R,4}$), przy zastosowaniu w betonie włókien Steelwave względem wcześniej stosowanych włókien Steelbet.

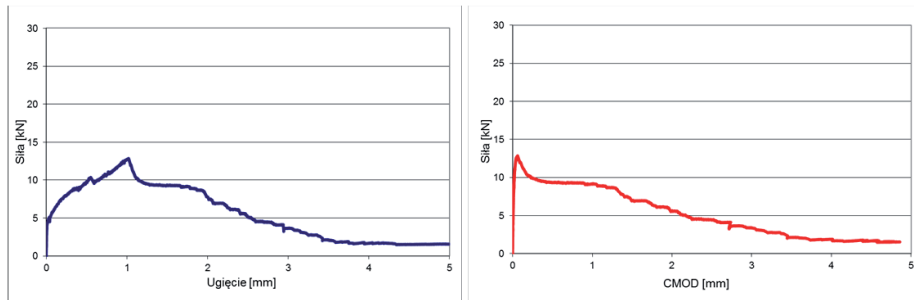
Rys. 6. Określenie resztkowej wytrzymałości na zginanie $f_{R,i}$ z zależności: a) siła-ugięcie

Jak już wcześniej zauważono, włókna z deformacjami falisto-haczykowatymi (Steelwave) okazały się być bardziej efektywne niż włókna faliste (Steelbet), co można zaobserwować na zamieszczonych rysunkach (5, 6, 7). Zmiana kształtu włókien z falistego na falisto-haczykowaty skutkowałą zwiększeniem wytrzymałości resztkowej $f_{R,1}$ o około 26%, a $f_{R,3}$ o 27% w stosunku do elementów zbrojonych włóknami falistymi. Podstawą przeprowadzonych powyższych badań było określenie zależności siła – ugięcie oraz siła – CMOD, których wybrane wykresy (zgodnie z wybranymi badaniami na fotografii 1) przedstawiono na rysunku 7.

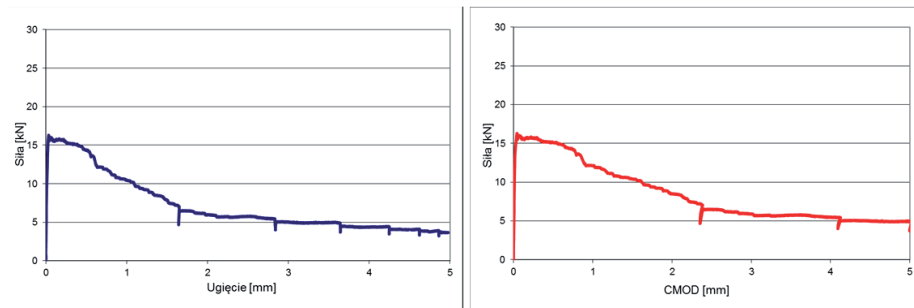
Belka 2.1



Belka 3.4

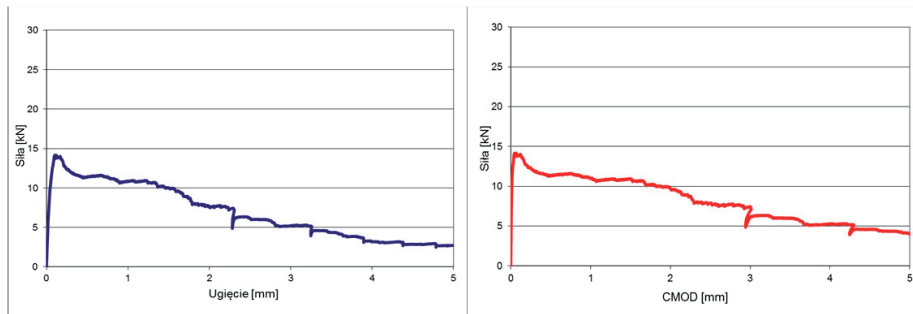


Belka 4.4

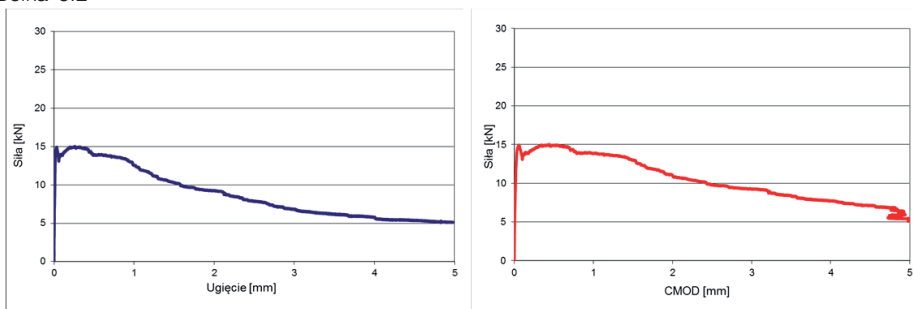


Rys. 7. Wykresy zależności siła-ugięcie oraz siła – CMOD

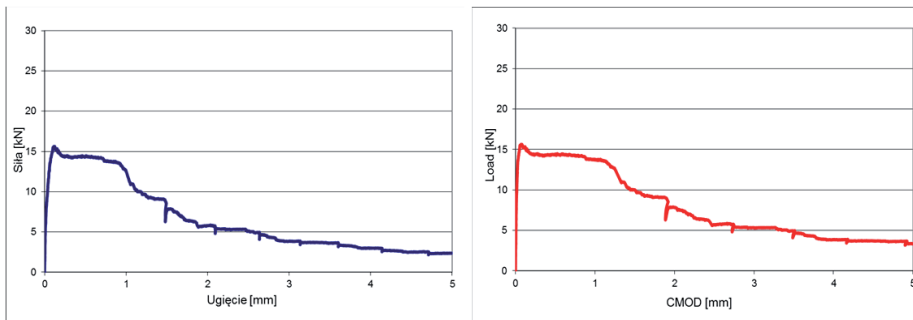
Belka 5.3



Belka 6.2



Belka 7.1

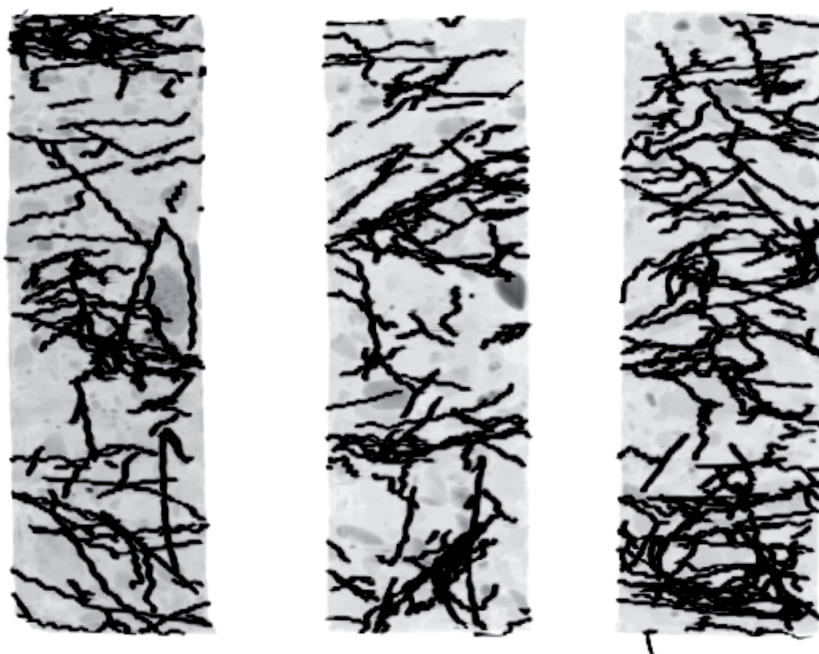


Rys. 7. Cd. Wykresy zależności siła-ugięcie oraz siła – CMOD

4.4. Badania rozmieszczenia włókien w matrycy betonowej metodą TK

Zostały przeprowadzone badania porównawcze trzech próbek betonu z różną zawartością włókien zbrojenia rozproszonego. Uzyskano warstwy o grubości 0,625 mm na całej długości próbki, dla których przeprowadzono rekonstrukcje według trzech algorytmów dla każdej z próbek, w celu dobrania jakości obrazu do zróżnicowanej struktury

wewnętrznej próbki. Metodą rentgenowskiej tomografii komputerowej zbadano trzy próbki w kształcie walca o średnicy około 50 mm i wysokości około 150 mm (rysunek 8). Na podstawie warstw o grubości 0,625 mm dokonano rekonstrukcji zgodnie z trzema protokołami, a następnie dokonano rekonstrukcji wolumetrycznej pozwalającej na zobrazowanie struktury wewnętrznej w ujęciu przestrzennym, co pozwala na jej analizę porównawczą. W przypadku próbki B 3.1, obserwuje się wyraźne zagęszczenie włókien stalowych w górnej i środkowej części próbki. Przestrzenie pomiędzy obszarami zagęszczeń wykazują widoczne braki zbrojenia rozproszonego, ale w ograniczonym zakresie. W przypadku próbki B 5.1 rozmieszczenie włókien jest bardziej równomierne, nie występuje gromadzenie na górnej powierzchni próbki. Widoczne są nieznaczne zagęszczenia w podobnej odległości od siebie, jak w przypadku próbki B 3.1, ale około 30 mm głębiej, niż w pierwszym przypadku. Próbka B 7.1, zapewne ze względu na dużą ilość włókien, wykazuje najbardziej równomierne ich rozmieszczenie, bez widocznej tendencji do zagęszczeń. Włókna rozmieszczają się głęboko, co powoduje brak włókien na powierzchni górnej.



Próbka B 3.1

Próbka B 5.1

Próbka B 7.1

Rys. 8. Obrazy uzyskane metodą rentgenowskiej tomografii komputerowej dla trzech próbek w kształcie walca o średnicy około 50 mm i wysokości około 150 mm

5. Wnioski końcowe

W wyniku analizy wyników otrzymanych po przeprowadzeniu badań wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu i wytrzymałości równoważnej na rozciąganie przy zginaniu

belek fibrobetonowych z wprowadzonym zróżnicowanym (25, 35, 45 kg/m³) dodatkiem falistych włókien stalowych Steelbet 50/0,65 oraz falisto-haczykowatych włókien stalowych Steelwave B55/0,65 (włókna o zbliżonych parametrach geometrycznych, ale innym kształcie), można stwierdzić:

- badania wykazały poprawę parametrów mechanicznych betonu (wytrzymałość na ściskanie) większą o około 5% przy zastosowaniu w betonie włókien Steelwave względem stosowanych włókien Steelbet,
- badania wykazały poprawę parametrów mechanicznych betonu (wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu) większą o około 15,5% przy zastosowaniu w betonie włókien Steelwave względem wcześniej stosowanych włókien Steelbet,
- badania wykazały poprawę parametrów mechanicznych betonu (równoważna wytrzymałość na zginanie) większą o około 48% przy zastosowaniu w betonie włókien Steelwave względem wcześniej stosowanych włókien Steelbet,
- dodatkowe badania wykazały poprawę parametrów mechanicznych betonu (wytrzymałości resztkowej na zginanie) większą o około 26% (dla $f_{R,1}$), 22% (dla $f_{R,2}$), 27% (dla $f_{R,3}$), 51% (dla $f_{R,4}$), przy zastosowaniu w betonie włókien Steelwave względem wcześniej stosowanych włókien Steelbet.

Na podstawie badań rozmieszczenia włókien w matrycy betonowej metodą TK, stwierdzono:

- następuje dobre przestrzenne rozmieszczenie włókien Steelwave w betonie niezależnie od stopnia ich rozpatrywanego dozowania.
- nie stwierdzono występowania tzw „jeży” (wspólnego blokowania się włókien Steelwave ze sobą).

Innowacją procesową przedstawioną w artykule jest zastosowanie włókien stalowych o kształcie falisto-haczykowatym w betonach BSZ. Badania laboratoryjne potwierdziły kierunkowe rozmieszczanie się zbrojenia rozproszonego w trakcie zabiegów technologicznych formowania BSZ. Stwarza to możliwość poprawy parametrów mechanicznych przy założeniu optymalnych czynników składu BSZ oraz optymalnych metod formowania. Symulacja przepływu mieszanki betonowej w formie wykazuje kierunkowanie się włókien równoległe do kierunku przepływu mieszanki. Zjawisko to pogłębia się wraz ze wzrostem udziału objętościowego włókien w mieszance. Kierunkowanie się włókien wpływa na poprawę charakterystyki wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu badanych BSZ z włóknami o długości powyżej 50 mm nawet o 90%.

Literatura

- [1] E.N.B. Pereira, J.A.O. Barros, A. Camões: Steel Fiber-Reinforced Self-Compacting Concrete: Experimental Research and Numerical Simulation. *Journal of Structural Engineering* 134:8 (2008) 1310–1321.
- [2] V.M.C.F. Cunha, J.A.O. Barros, J.M. Sena Cruz: Tensile behavior of steel fiber reinforced self-compacting concrete. SP-274-4 Fiber Reinforced Self-Consolidating Concrete: Research and Applications, ACI Committees 544 and 237:51–68.
- [3] J. Cai, H. Jiang, Y. Zhu, D. Wang: Mechanical properties of fiber reinforced self-compacting concrete. *Optoelectronics and advanced materials –rapid communications* 4:7 (2010) 1013–1016.
- [4] C.I. Goodier. Development of self-compacting concrete. *Proceedings of the ICE – Structures and Buildings* 56:4 (2003) 405–414.
- [5] J. Katzer, J. Domski: Quality and mechanical properties of engineered steel fibres used as reinforcement for concrete, *Construction and Building Materials* 34 (2012) 243–248.
- [6] J. Gołaszewski: Influence of cement properties on new generation superplasticizers performance, *Construction and Building Materials* 35 (2012) 586–596

- [7] T. Ponikiewski: Reologiczne i mechaniczne właściwości betonów samozagęszczalnych z włóknami stalowymi, *Cement Wapno Beton* 17:5 (2012) 301–309.
- [8] A.M. Glinicki: Trwałość betonu w nawierzchniach drogowych, IBDiM Warszawa, 2011
- [9] RILEM TC 162-TDF. Test and design methods for steel fibre reinforced concrete, Final recommendations. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions* 35 (2002) 579–82.
- [10] EN 14651:2005+A1:2007(E) Test method for metallic fibre concrete – Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual) CEN European Commit- 439 tee for Standardization 440
- [11] ASTM C 1018, Standard Test Methods for Flexural Toughness and First Crack Strength of Fiber Reinforced Concrete (Using Beam with Third Point Loading), ASTM 4 (2002) 637–644.
- [12] Japan Society of Civil Engineers, Method of Test for Flexural Strength and Flexural Toughness of Fiber Reinforced Concrete. Standard SF-4 (1984) 58–66.
- [13] K. Holschemacher, T. Mueller, Y. Ribakov: Effect of steel fibers on mechanical properties of high-strength concrete. *Materials and Design* 31 (2010) 2604–2615
- [14] D.V. Soulioti, N.M. Barkoula, A. Paipetis, T.E. Matikas: Effects of Fiber Geometry and Volume Fraction on the Flexural Behaviour of Steel-Fibre Reinforced Concrete. *An International Journal for Experimental Mechanics* 47 (2011) 535–541.
- [15] M. Di Prisco, G. Plizzari, L. Vandewalle: Fiber reinforced concrete: new design perspectives. *Materials and Structures* 42 (2009) 1261–1281.
- [16] G. Giaccio, J.M. Tobes, R. Zerbino: Use of small beams to obtain design parameters of fibre reinforced concrete. *Cement & Concrete Composites* 30:4 (2008) 297–306.
- [17] R. Hameed, A. Turatsinze, F. Duprat, A. Sellier: Study on the flexural properties of metallic-hybrid-fibre-reinforced concrete. *Maejo International Journal of Science and Technology* 4:02 (2010) 169–184.
- [18] D.J. Kim, S.H. Park, G.S. Ryu, K.T. Koh: Comparative flexural behavior of Hybrid Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete with different macro fibers. *Construction and Building Materials* 25 (2011) 4144–4155.
- [19] N. Banthia, M. Sappakittipakorn: Toughness enhancement in steel fiber reinforced concrete through fiber hybridization, *Cement and Concrete Research* 37 (2007) 1366–1372.
- [20] M.C. Nataraja, N. Dhang, A.P. Gupta: Toughness characterization of steel fiber-reinforced concrete by JSCE approach. *Cement and Concrete Research* 30:4 (2000) 593–597.