BADANIA BELEK ŻELBETOWYCH Z BETONU WYSOKOWARTOŚCIOWEGO Z DODATKIEM WŁÓKIEN STALOWYCH I POLIPROPYLENOWYCH

Piotr Smarzewski, Monika Szafraniec
Politechnika Lubelska, Wydział Budownictwa i Architektury
Katedra Konstrukcji Budowlanych, ul. Nadbystrzycka 40, 20-618 Lublin
e-mail: p.smarzewski@pollub.pl

Streszczenie:
W artykule przedstawiono wyniki badań i analizy belek żelbetowych z fibrobetonu wysokowartościowego z włóknami stalowymi i polipropylenowymi. Belki poddano zginaniu w schemacie 4-punktowym aż do ich zniszczenia. Badania wykonano dla trzech elementów o zmiennej ilości i zróżnicowanym rodzaju zbrojenia. W jednym elemencie skonstruowano typowe zbrojenie prętami stalowymi. W dwóch kolejnych pręty górne i strzemiona zastąpiono zbrojeniem rozproszonym o zmiennej procentowej objętości włókien stalowych i polipropylenowych. Do wyznaczenia stanu deformacji i odkształcenia wykorzystano system ARAMIS do trójwymiarowych bezkontaktowych pomiarów pól przemieszczeń i odkształceń.

Słowa kluczowe: belka żelbetowa, fibrobeton wysokowartościowy, włókno stalowe, włókno polipropylenowe, system ARAMIS

Wstęp

Mniejsza trwałość istniejących konstrukcji z betonu zwykłego w warunkach coraz większego skażenia środowiska naturalnego wytycza nowe trendy badań w kierunku poprawy jego jakości (Glinicki i in. 2001, Cladera, Mari 2005, Koksal 2008). Naukowcy prowadzą eksperymenty na betonach nowej generacji o wysokiej wytrzymałości i trwałości. W latach osiemdziesiątych i dziewięćdziesiątych ubiegłego wieku na większą skalę zaczęto stosować betony wysokowartościowe w konstrukcjach budowlanych. W technologii betonu zaczęto używać terminu technologia trwałości oznaczającego wykonanie wysokiej jakości kompozytu betonowego o dużej wytrzymałości i szczelności, odporności na agresje chemiczne i ścieranie oraz pełnej mrozoodporności. Ostatnio coraz większe zainteresowanie wywołują betony wysokowartościowe z dodatkiem różnych odmian włókien pełniących funkcję zbrojenia rozproszonego. Klasyfikację włókien wraz z ich charakterystykami technicznymi przedstawiono w pracy Łapko, Karwowskiej 2011. Wpływ najczęściej stosowanych włókien stalowych i syntetycznych na właściwości elementów betonowych był przedmiotem wielu badań m. in. Ashour i in.

1992, Gustafsson, Noghabai 1999, Ulańskiej i in. 2000. Włókna dodawane są w ilości gwarantującej pozytywny efekt wytrzymałościowy lub polepszenie innych własności mechanicznych, a ich rozkład w elemencie jest losowy i zależy od stopnia zagęszczenia mieszanki betonowej.

Przedmiotem pracy są trzy belki żelbetowe (oznaczone symbolami B1÷B3) o wymiarach 2500 x 400 x 200 mm, różniące się ilością i rodzajem zbrojenia. W belce B1 zastosowano typowe zbrojenie prętami stalowymi, a w B2 i B3 użyto dwóch prętów dołem i zbrojenia rozproszonego włóknami stalowymi i polipropylenowymi o zmiennej procentowej objętości.

W artykule przedstawiono analizę stanu odkształcenia i deformacji powyższych belek poddanych zginaniu w schemacie 4-punktowym. Badania przeprowadzono z użyciem systemu ARAMIS do bezkontaktowych trójwymiarowych pomiarów pól odkształceń.

Badania doświadczalne

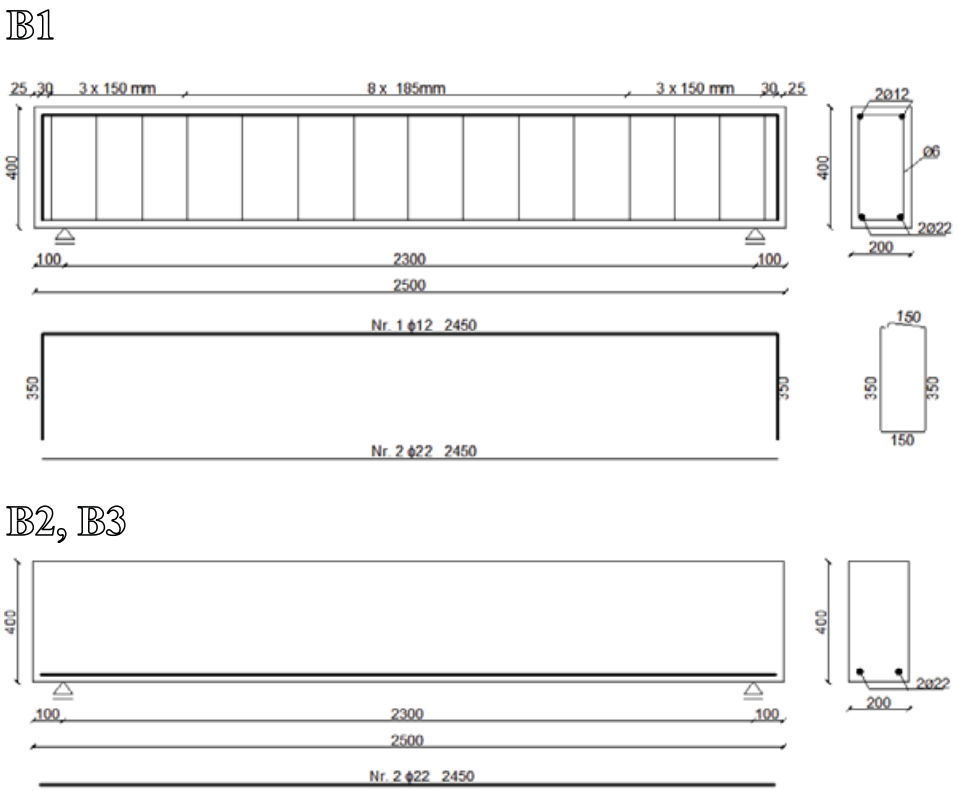
Wykonano elementy belkowe B1÷B3 i elementy kontrolne według trzech receptur RI÷RIII. W belce B1 nie zastosowano włókien. W elemencie B2 procentowa objętość włókien stalowych wynosiła 0.5%, a polipropylenowych 0.025%, a w B3 odpowiednio 1% i 0.05%. Stałymi składnikami mieszanek betonowych był: cement, mikrokrzemionka zagęszczona, kruszywo, woda i superplastyfikator. W tabeli 1 zestawiono składy mieszanek.

Tab. 1. Składy mieszanek betonowych

Symbol	Składnik mieszanki betonowej	Receptura RI	Receptura RII	Receptura RIII
C	Cement CEM I 52.5R [kg/m^3]	596	596	596
M	Mikrokrzemionka zagęszczona [kg/m^3]	59.6	59.6	59.6
K	Kruszywo granodiorytowe 2-8mm [kg/m^3]	990	990	990
P	Piasek kwarcowy [kg/m^3]	500	500	500
S	Superplastyfikator BASF Glenium SKY 591 [l/m^3]	20	20	20
W	Woda [l/m^3]	196	196	196
WS	Włókna stalowe Baumix 60, 1x60 mm [kg/m^3]	-	78	39
WP	Włókna polipropylenowe [kg/m^3]	-	0.5	0.25

Dla powyższych składów ilościowych mieszanek betonowych wyznaczono charakterystyczne wskaźniki:
(K+P)/(C+M) = 2.27 – wskaźnik kruszywo-frakcje pyłowe
W/(C+M) = 0.3 – wskaźnik wodno-spoiwowy
S/(C+M+K+P) = 0,017 – wskaźnik superplastyfikator - (kruszywo + frakcje pyłowe).

Schematy zbrojenia belek przedstawiono na Rys. 1.

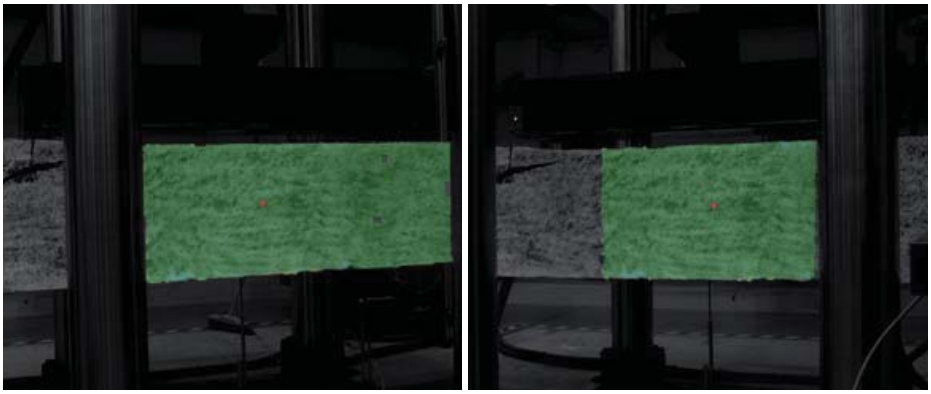


Rys. 1. Wymiary belek oraz rozmieszczenie zbrojenia

Badanie wytrzymałości betonu na ściskanie przeprowadzono na kostkach o boku 100 mm i dodatkowo na odwiertach rdzeniowych pobranych z nieuszkodzonych stref zginanych belek. Wynosiły one dla B1, B2, B3 odpowiednio 113.8 MPa, 106.6 MPa i 111 MPa. Inne badane własności betonu i stali zbrojeniowej przedstawiono w pracy Smarzewskiego 2013.

Mieszankę betonową układano warstwowo z każdorazowym zagęszczaniem kolejnej warstwy za pomocą wgłębnego wibratora buławowego. Po zakończonym betonowaniu, górne powierzchnie belek zacierano, wyrównywano i przykrywano mokrymi tkaninami celem zapewnienia odpowiednich warunków dojrzewania. Belki rozformowano po upływie 14 dni, a poddano badaniom po 44 dniach od betonowania. Belki B2 i B3 wykonano i badano z 4-dniowym opóźnieniem względem belki B1. Przed badaniami belki pokrywano wapnem malarskim i po wyschnięciu nanoszono czarny, kropkowany deseń farbą w sprayu, aby umożliwić poprawny pomiar pól przemieszczeń i odkształceń systemem ARAMIS.

W początkowym etapie określano pole pomiarowe, na którym przeprowadzano obliczenia. Zakres badanego obszaru był ograniczony konfiguracją geometryczną prasy między jej filarami wsporczymi i pozwalał na właściwe ustawienie urządzenia dla pola obliczeniowego długości około 60-70 cm na 40 cm (cała wysokość belki, Rys. 2). Badano środkowe obszary belek o największych deformacjach. Po ustawieniu belki na stanowisku badawczym wykonywano regulacje systemu krzyżem kalibracyjnym wyposażonym w punkty referencyjne. Następnie stworzono projekt pomiarowy i ustawiono tryb zapisu zdjęć rejestrowanych podczas badania belek przez 3-4 godz. z częstotliwością próbkowania 0.2 Hz.



Rys. 2. Obszar pomiaru z dwóch kamer belki B2 w chwili zniszczenia

Belki po ustawieniu na stanowisku badawczym poddawano etapowemu obciążaniu statycznemu. Z jednej strony belek przeprowadzono pomiary systemem ARAMIS, a z drugiej, niezależnie wykonano pomiary szerokości rys za pomocą mikroskopu Optika XC-100L. Pierwszy etap przebiegał w sposób ciągły, aż do pojawienia się pierwszych rys. W tym momencie zatrzymywano przyrost obciążenia, zaznaczano przebieg rys i mierzono ich szerokości. Obciążenie wznawiano po oznaczeniu wszystkich rys. Na każdym kolejnym etapie obciążenia wykonywano dokumentację propagacji i rozwarcia rys.

Analiza wyników badań

Przyczyny zniszczenia elementów belkowych ustalono po analizach ich stanu przy maksymalnym obciążeniu, charakteru i rozwarcia rys oraz po ocenie stanu zbrojenia. W tabeli 2 przedstawiono objętościowy stopień zbrojenia belek.

Tabela 2. Objętościowy stopień zbrojenia i siły niszczące

Oznaczenie elementu	Receptura	Objętościowy stopień zbrojenia [%]	Siła niszcząca przy zginaniu [kN]
B1	RI	1.67	397.1
B2	RII	1.68	295.0
B3	RIII	2.43	440.6

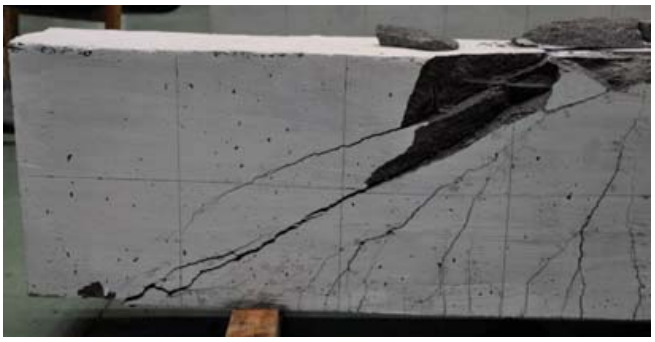
W przypadku belki B1 zaobserwowano powstawanie charakterystycznych rys ukośnych od zginania występujących w mniej więcej stałych odległościach. Badanie belki zakończono w chwili zmiażdżenia betonu w strefie przyłożenia siły, przy równoczesnym powstaniu licznych rys o dużym rozwarciu na niewielkim odcinku belki. Na belce powstały 42 rysy o szerokości 0.05-0.4 mm.

Belka B2 uległa nagłemu zniszczeniu w wyniku powstania bardzo szerokiej szczeliny ścinająco-zginającej. Na belce powstało jedynie 30 rys.

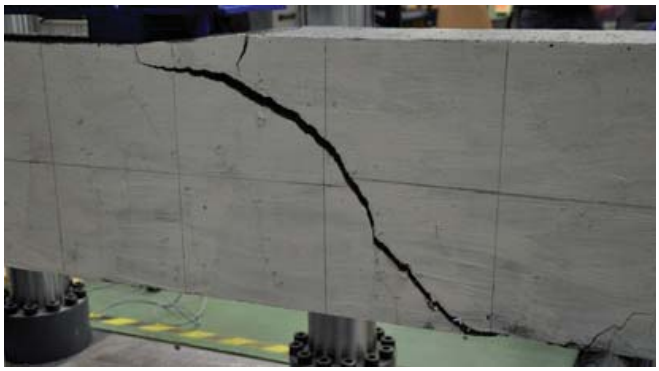
Na belce B3 najszersze rysy pojawiły się w strefie środkowej i zarejestrowano ich aż 57 o małych szerokościach. W końcowej fazie badania zrywaniu włókien stalowych towarzyszyły głośne trzaski.

Obrazy zniszczenia belek przedstawiono na Rys. 3.

B1



B2

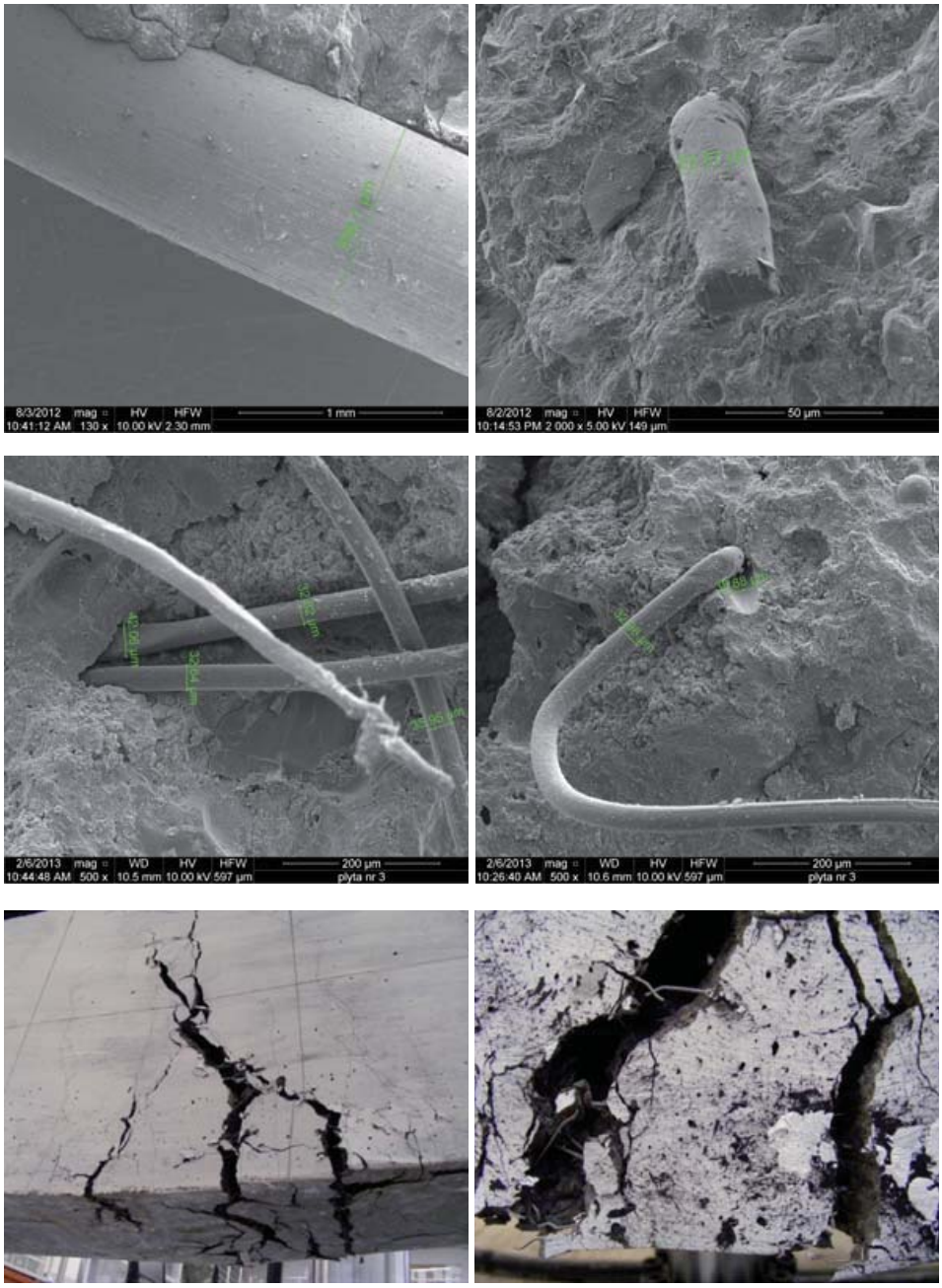


B3



Rys. 3. Obrazy zniszczenia belek

Analizując zarysowanie belek stwierdzono, że belkę B3 o najwyższym stopniu zbrojenia (2.43%) pomimo bardzo licznych rys charakteryzowała największa nośność. Świadczy to o korzystnym rozkładzie zbrojenia rozproszonego w matrycy i o dobrej współpracy betonu wysokowartościowego z włóknami stalowymi i polipropylenowymi co potwierdzają zdjęcia mikro i makrostruktury betonu, Rys. 4.



Rys. 4. Współpraca włókien stalowych i polipropylenowych w matrycy betonu wysokowartościowego

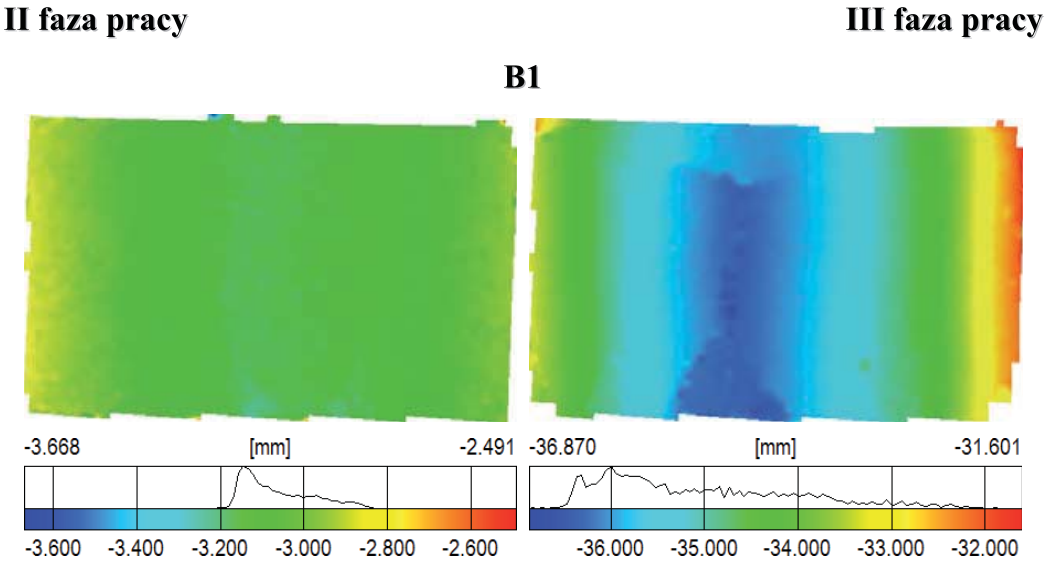
Ilość zbrojenia rozproszonego belki B3 dobrano właściwie, co przełożyło się na dużą nośność na ścinanie elementu wzmocnionego włóknami w strefach przypodporowych. W przypadku belki B2 procentowa objętość włókien okazała się niewystarczająca i nie rekompensowała braku strzemion w obszarach ścinanych. Świadczy o tym porównywalny stopień zbrojenia belek B1 i B2 przy jednoczesnej różnicy siły niszczącej na poziomie ok. 26%.

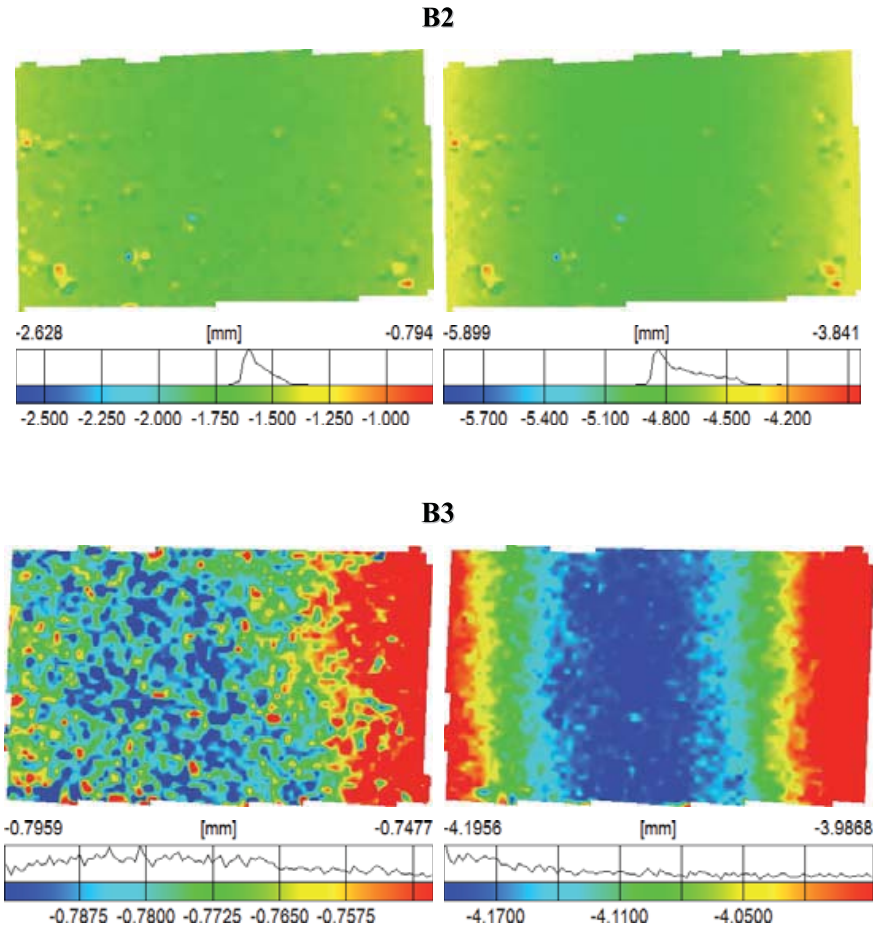
Wyniki przedstawiające ugięcia poszczególnych belek przedstawiono w tabeli 3.

Tab. 3. Zestawienie ugięć belek

Element	Siła w fazie II pracy belki [kN]	Ugięcie w fazie II [mm]	Siła w fazie III pracy belki [kN]	Ugięcie w fazie III [mm]
B1	170.9	3.7	387.2	36.9
B2	167.5	2.6	295.0	5.9
B3	167.6	0.8	416.1	4.2

W belce B1 w II i III fazie pracy zaobserwowano największe, zaś w belce B3 najmniejsze wartości ugięcia elementu. Belka B1 w II fazie pracy ugięła się o prawie 30% więcej niż belka B2. Mapy ugięć belek w II i III fazie pracy pokazano na Rys. 5.

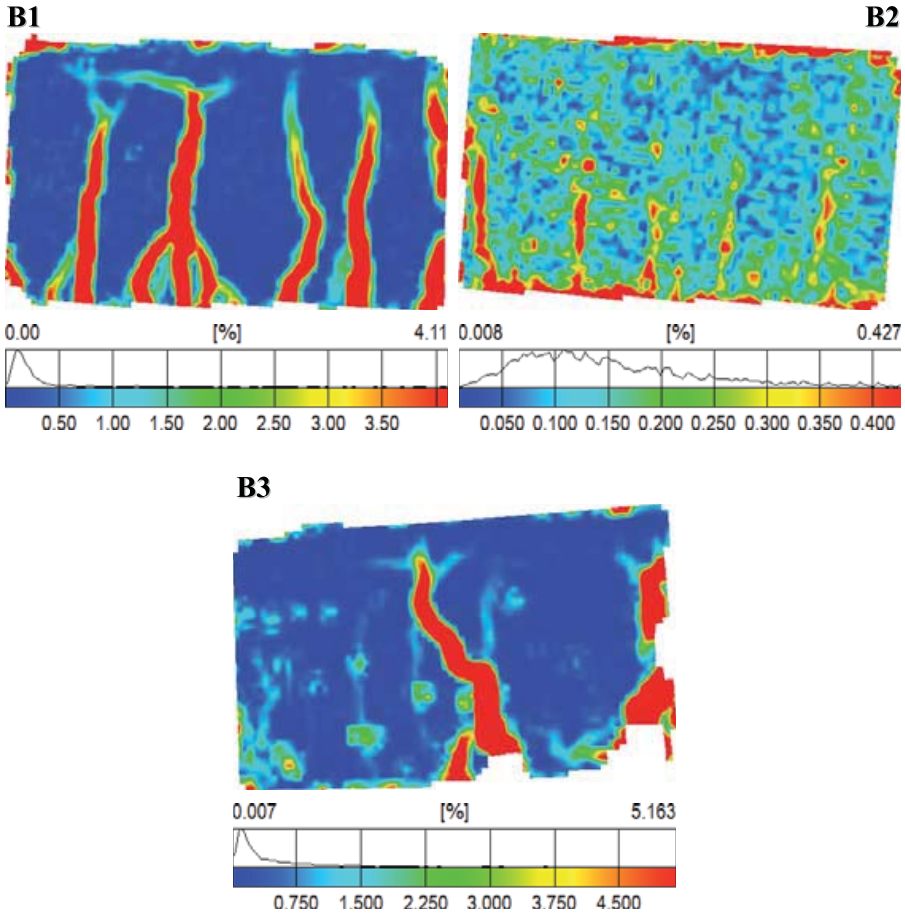




Rys. 5. Ugięcia belek w II i III fazie pracy

Porównując wyniki stanu deformacji z II i III fazy pracy belek, można wyraźnie stwierdzić korzystny wpływ zbrojenia hybrydowego na zmniejszenie wartości ugięcia elementów B2 i B3. Przy porównywalnym poziomie obciążenia w II fazie pracy wartości ugięć belek fibrobetonowych były wyraźnie mniejsze niż belki żelbetowej.

Mapy odkształceń Misesa belek B1÷B3 w końcowym etapie obciążenia zilustrowano na Rys. 6.



Rys. 6. Odkształcenia Misesa w końcowych etapach obciążenia

W belce B1 przy wartości obciążenia 270 kN, odkształcenie Misesa w rysie prostopadłej wynosiło 41.1‰. Przy obciążeniu 52 kN odkształcenie w rysie zlokalizowanej w połowie rozpiętości belki B2 wynosiło 4.3‰. Największe odkształcenia w tym elemencie powstały w strefie przypodporowej nie objętej pomiarem. Natomiast w belce B3 największe odkształcenia na poziomie 51.6‰ powstały w strefie czystego zginania przy obciążeniu 416 kN.

Wnioski

Porównując wyniki badania zginanych belek stwierdzono, że największą nośnością na ścinanie charakteryzował się element B3 z największą objętościową ilością włókien stalowych i polipropylenowych bez zbrojenia poprzecznego. Stwierdzono, że istnieje minimalna procentowa zawartość włókien, powyżej której stosowanie zbrojenia rozproszonego skutkuje uzyskaniem wyższej nośności niż w przypadku użycia zbrojenia tradycyjnego. Zawartość 0.5% włókien stalowych i 0.025% włókien polipropylenowych w belce B2 okazała się niewystarczająca i uległa ona nagłemu zniszczeniu na skutek przekroczenia nośności na ścinanie.

Zarysowanie belek fibrobetonowych porównano na tym samym poziomie obciążenia i zauważono, że w belce B3 powstało więcej rys niż w belkach B1 i B2, ale o znacznie mniejszych szerokościach.

Na podstawie map stanów deformacji dokonano porównania ugięcia i odkształcenia belek i stwierdzono, że belkę B3 charakteryzuje największa sztywność a zarazem największa ciągliwość.

Podziękowania

Wyniki prac były finansowane w ramach środków statutowych Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego nr S/15/2013.

Bibliografia:

1. Ashour S.A., Hasanain G.S., Wafa F.F. (1992), *Shear Behavior of High-Strength Fiber Reinforced Concrete Beams*. ACI Structural Journal, V. 89, No. 2, s. 176-184.
2. Cladera A., Mari A.R. (2005), *Experimental study on high-strength concrete beams failing in shear*. Engineering Structures 27, s. 1519-1527.
3. Glinicki M.A., Litorowicz A., Zieliński M. (2001), *Interpretacja badań odporności fibrobetonów na pękanie przy zginaniu*. XLVII Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB, Opole-Krynica, s. 308-314.
4. Gustafsson J., Noghabai K. (1999), *Steel fibers as shear reinforcement in high strength concrete beams*. Technical Report, Luleå University of Technology, Division of Structural Engineering, 1999.
5. Karwowska J. Łapko A., (2011), *Przydatność stosowania nowoczesnych kompozytów fibrobetonowych w konstrukcjach budowlanych*. Civil and Environmental Engineering 2, s. 41-46.
6. Koksal F. (2008), *Combined effect of silica fume and steel fiber on the mechanical properties of high strength concretes*. Construction and Building Materials 22, s. 1874-1880.
7. Smarzewski P. (2013), *Stany graniczne użytkowalności belek żelbetowych z betonu wysokowartościowego z dodatkiem włókien*. Budownictwo i Architektura 12(1), 155-162.
8. Ulańska D., Figa M., Stawicka A. (2000), *Właściwości betonu z dodatkiem włókien polipropylenowych w zbrojonych elementach zginanych*. Inżynieria i Budownictwo nr 11, 615-619.

Liczba znaków ze spacjami: 25 023