

Stany graniczne użytkowości belek żelbetonowych z betonu wysokowartościowego z dodatkiem włókien

Piotr Smarzewski

*Katedra Konstrukcji Budowlanych, Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Lubelska,
e-mail: p.smarzewski@pollub.pl*

Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki i analizy badań belek żelbetonowych wykonanych z betonu wysokowartościowego z dodatkiem włókien stalowych i polipropylenowych poddanych zginaniu w schemacie 4-punktowym przy obciążeniach eksploatacyjnych. Badania przeprowadzono dla trzech prostokątnych belek żelbetonowych zróżnicowanych pod względem ilości i rodzaju zbrojenia. W belce B1 skonstruowano tradycyjne zbrojenie prętami stalowymi. W belkach B2 i B3 zamiast prętów górnych i strzemion zastosowano zbrojenie rozproszone o zmiennej procentowej objętości włókien. W badaniach wykorzystano system pomiarowy do bezkontaktowych trójwymiarowych pomiarów odkształceń – ARAMIS. Analizy zachowania belek pod obciążeniem statycznym w zakresie użytkowości przedstawiono w oparciu o: obrazy zarysowania i odkształcenia oraz zależności siła-przemieszczenie.

Słowa kluczowe: belka żelbetonowa, beton wysokowartościowy, włókno stalowe, włókno polipropylenowe, system ARAMIS, odkształcenie, przemieszczenie, rysa.

1. Wprowadzenie

Beton wysokowartościowy jest materiałem coraz częściej stosowanym w budownictwie z uwagi na trwałość. Jako wzmocnienie matrycy dodawane są włókna, które ograniczają jej zarysowanie i polepszają wytrzymałość na rozciąganie. Badania betonu z włóknami prowadzone są od sześćdziesięciu lat [1-3], a wciąż wyznacza się dalsze kierunki ich rozwoju [4-5]. Jedną z nowszych koncepcji jest hybrydyzacja włókien, czyli optymalne połączenie kilku ich rodzajów o odmiennych właściwościach w celu utworzenia złożonych kompozytów o bardzo dużej odporności na pękanie w szerokim zakresie rozwarcia rys [6]. W betonie można połączyć kilka różnych typów włókien, aby uzyskać efekt synergii. Zadowolające wyniki uzyskuje się przez połączenie dużych makro-włókien, które zapewnią wytrzymałość przy dużych pęknięciach z drobnymi mikro-włóknami, które wzmocnią fazę przejściową, reakcję na pękanie i odporność na wyciąganie makro-włókien. Innym podejściem jest hybrydyzacja włókien o zbliżonej wielkości, lecz o różnych modułach sprężystości. Włókno o wysokim module osiągnie optymalną zdolność wzmocnienia matrycy betonowej przy małych i średnich rysach, natomiast włókno o niskim module rozwinię pełną zdolność zbrojenia przy dużych rysach. W literaturze można spotkać wiele publikacji dotyczących badania elementów konstrukcyjnych z betonów wysokowartościowych wzmocnianych przeważnie włóknami stalowymi [7-8].

Przedmiotem pracy są analizy stanów granicznych rys i ugięć trzech belek żelbetonowych o wymiarach 2500 mm x 400 mm x 200 mm, wykonanych z betonu wysokowartościowego z dodatkiem włókien stalowych i polipropylenowych, poddanych zginaniu w schemacie 4-punktowym. Celem pracy jest określenie wpływu dodatku hybrydowego zbrojenia rozproszonego na rysoodporność, odkształcalność i sztywność belek wykonanych z betonów wysokowartościowych przy obciążeniach eksploatacyjnych.

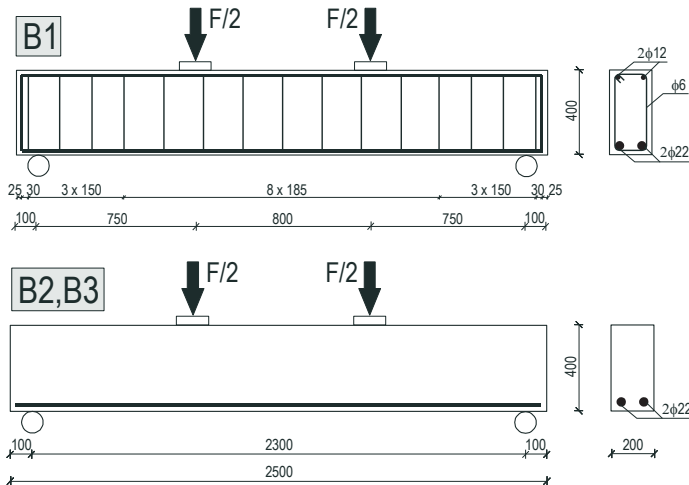
2. Opis badań

Badano trzy belki B1-B3 swobodnie podparte o jednakowych wymiarach. Szczegółowe charakterystyki elementów podano w tabeli I. Belki wykonano z betonu wysokowartościowego z dodatkiem zmiennej procentowej objętości włókien stalowych

i polipropylenowych. W belce B1 zastosowano tradycyjne zbrojenie prętami stalowymi: dwoma prętami dołem o średnicy $\varnothing 22$, dwoma góra $\varnothing 12$ i strzemiionami $\varnothing 6$. W belkach B2 i B3 zbrojenie dolne pozostawiono bez zmian, a zrezygnowano z prętów górnych i strzemiion na rzecz włókien stalowych i polipropylenowych. W belce B2 procentowa objętość włókien stalowych wynosiła $V_{fs} = 0.5\%$, a polipropylenowych $V_{fp} = 0.025\%$. W belce B3 odpowiednio 1% i 0.05%. Wymiary belek oraz rozmieszczenie zbrojenia przedstawiono na rys. 1.

Tabela 1. Charakterystyki belek

Symbol belki	Wymiary przekroju [mm]	Zbrojenie podłużne		Zbrojenie poprzeczne		Zbrojenie rozproszone			
		pręty dolne $\varnothing 22$		pręty górne $\varnothing 12$		strzemiiona $\varnothing 6$		włókna stalowe	włókna polipropylenowe
		ρ [%]	ilość [szt.]	ρ' [%]	ilość [szt.]	ρ_w [%]	s [mm]	V_{fs} [%]	V_{fp} [%]
B1	b=200 h=400	0.95	2	0.28	2	0.19	150	–	–
B2		0.95	2	–	–	–	–	0.5	0.025
B3		0.95	2	–	–	–	–	1	0.05



Rys. 1. Układ zbrojenia i schemat obciążenia belek

Zbrojenie główne wykonano ze stali żebrowanej gatunku 34GS, a strzemiiona ze stali gładkiej gatunku St0S. Charakterystyki stali prętów zbrojenia głównego i poprzecznego oraz włókien stalowych i polipropylenowych podano w tabeli 2. W tabeli 3 zamieszczono skład wszystkich mieszanek betonowych, dla których wskaźnik woda/składniki wiążące wynosił 0.3.

Powierzchnie licowe belek przygotowano przed badaniem w celu eliminacji ich jednorodnej struktury. Elementy pomalowano wapnem malarskim, a następnie naniesiono kropkowaną czarną fakturę. Sposób przygotowania belek pokazano na rys. 2.

Tabela 2. Cechy wytrzymałościowe prętów stalowych i zbrojenia rozproszonego

Rodzaj zbrojenia	Średnica [mm]	f_y [MPa]	f_t [MPa]	ϵ_u [%]	E [GPa]	f_t/f_y
Pręty dolne	22	475	644	10.5	203	1.36
Pręty górne	12	456	642	9.7	199	1.41
Strzemiiona	6	302	454	8.5	193	1.50
Włókna stalowe BAUMIX 50	1	–	1100	–	200	–
Włókna polipropylenowe BAUCON 12	0.03	–	350	–	3.5	–

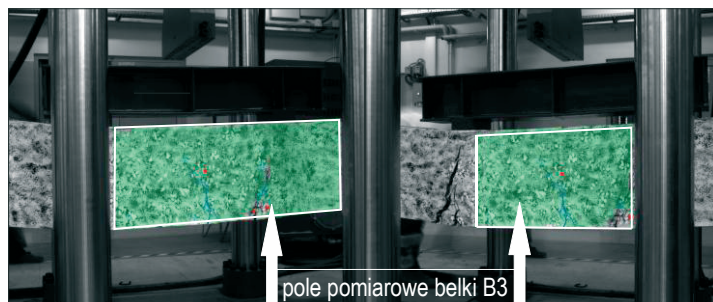
Tabela 3. Skład betonu i fibrobetonów

Składniki mieszanki betonowej	B1	B2	B3
Cement CEM I 52.5R [kg/m^3]	596	596	596
Mikrokrzemionka [kg/m^3]	59.6	59.6	59.6
Kruszywo granodiorytowe 2-8mm [kg/m^3]	990	990	990
Piasek kwarcowy [kg/m^3]	500	500	500
Superplastyfikator [l/m^3]	20	20	20
Woda [l/m^3]	196	196	196
Włókna stalowe [kg/m^3]	–	39	78
Włókna polipropylenowe [kg/m^3]	–	0.25	0.5



Rys. 2. Ustawienie belki B1 z powierzchnią przygotowaną do pomiaru stanu deformacji

W badaniach belek wykorzystano system do bezkontaktowych trójwymiarowych pomiarów odkształceń i przemieszczeń – ARAMIS. Na etapie początkowym określono pole pomiarowe do obliczenia stanu deformacji. Badany obszar ograniczono z powodu geometrycznej konfiguracji prasy do prostokąta, o długości około 70 cm i wysokości 40 cm, usytuowanego symetrycznie w połowie belki (rys. 3). Po jednej stronie elementu wykonywano pomiary systemem ARAMIS, natomiast po drugiej przeprowadzono niezależne pomiary propagacji i rozwarcia rys. Badanie belek miało charakter etapowy. Belki poddano obciążeniu statycznemu dwiema siłami skupionymi, zwiększanymi skokowo aż do zniszczenia. Badania belek trwały od 0.5 do 2.5 godziny. W tym czasie wykonywano i rejestrowano zdjęcia z częstotliwością próbkowania 0.2 Hz. Dokładność systemu ARAMIS przy pomiarach przemieszczeń wynosi $5\mu\text{m}$, a przy pomiarach odkształceń 0.01%. Wyniki badań właściwości betonu i fibrobetonów belek zestawiono w tabeli 4. W kolejności podano wytrzymałości na ściskanie f_c , wytrzymałości na rozciąganie przez rozłupywanie $f_{ct,sp}$, wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu w schemacie 4-punktowym i moduły sprężystości E_c . Wyniki badań belek: obciążenia rysujące F_{cr} , obciążenia przy których powstały rysy ukośne $F_{cr,dg}$, obciążenia w chwili uplastycznienia rozciąganego zbrojenia F_y , obciążenia niszczące F_u , obciążenia F_8 przy ugięciach eksploatacyjnych $\alpha = 8$ mm, sumy rozwarcia rys Σw i maksymalne odkształcenia skrajnych włókien strefy ścisłanej ϵ_{cu} zamieszczono w tabeli 5.



Rys. 3. Obszar pomiarowy belki B3 z obu kamer

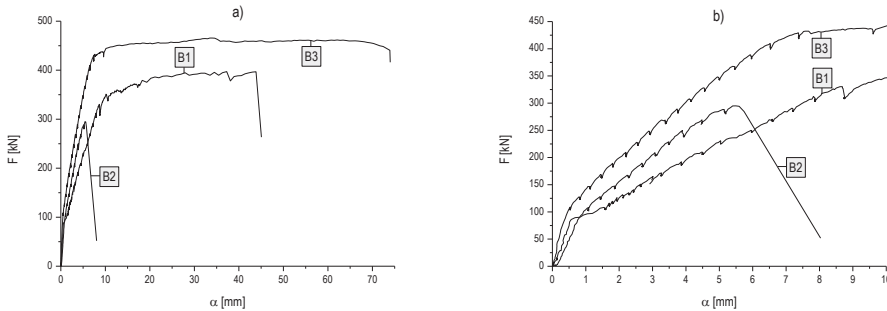
Tabela 4. Wyniki badań właściwości betonu i fibrobetonów

Symbol belki	f_c [MPa]	$f_{ct,sp}$ [MPa]	$f_{ct,fl}$ [MPa]	E_c [GPa]	$f_{ct,sp} / f_c$	$f_{ct,fl} / f_c$	$f_{ct,sp} / f_{ct,fl}$
B1	113.8	5.0	8.2	38.7	0.04	0.07	0.61
B2	106.6	9.9	8.9	32.4	0.09	0.08	1.11
B3	111.0	11.0	9.4	39.4	0.10	0.08	1.17

Tabela 5. Wyniki badań belek

Symbol belki	F_{cr} [kN]	$F_{cr,dg}$ [kN]	F_y [kN]	F_u [kN]	F_8 [kN]	Σw [mm]	ε_{cu} [%]
B1	89.4	171.0	351	397.1	311.4	10.35	1.86
B2	93.3	200.0	–	295.0	51.8	3.3	1.76
B3	109.0	290.0	444.8	440.6	431.2	6.8	0.53

Zachowanie się belek pod obciążeniem zilustrowano na wykresach obciążenie – ugięcie w połowie rozpiętości w całym zakresie obciążenia i w zakresie ograniczonym do 10 mm, aby wyeksponować stan eksploatacji, rys. 4.



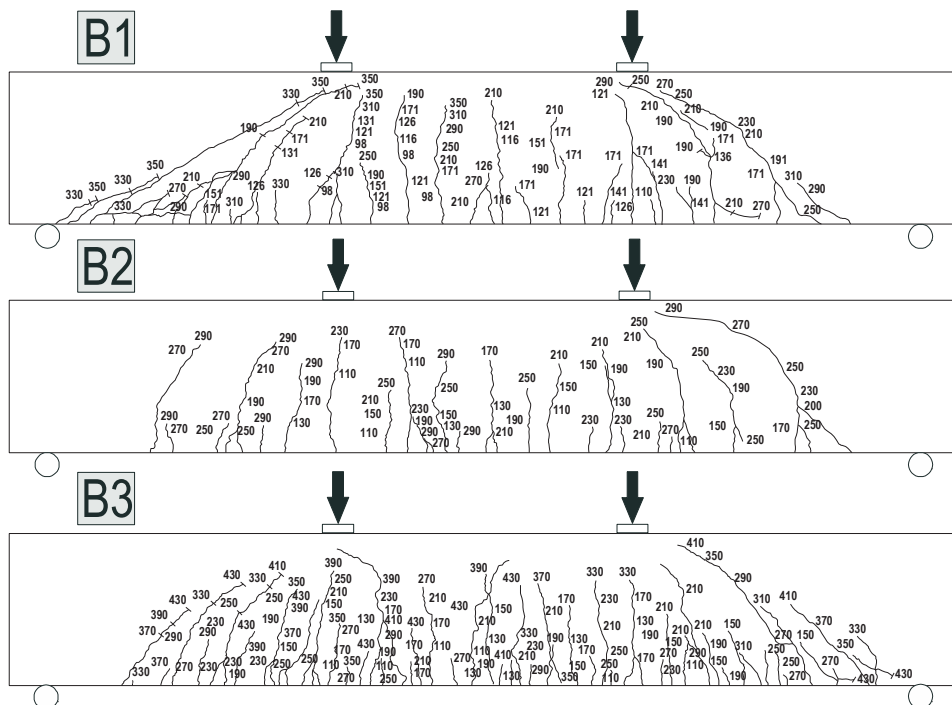
Rys. 4. Ugięcia belek w środku rozpiętości: a) w zakresie obciążenia, b) w stanie eksploatacji

Belki B1 i B2 uległy zniszczeniu na ścinanie, natomiast obciążenie belki B3 przerwano, gdy szerokości szczelin przekraczały 20 mm. Obraz zniszczenia elementu B3 był zbliżony do zniszczenia w wyniku przecinania. Obrazy zarysowania badanych belek po zniszczeniu przedstawiono na rys. 5.

3. Analiza wyników

Analizy zachowania belek pod obciążeniem statycznym przedstawiono w oparciu o: obrazy zarysowania i odkształcenia betonu oraz porównania wykresów siła-ugięcie.

W przypadku belki B1 zaobserwowano powstawanie rys prostopadłych w stałych odległościach. Badanie zakończono, gdy beton uległ zmiażdżeniu w strefie ściskanej nad końcem rysy ukośnej, przy równoczesnym zerwaniu strzemiona. Na belce powstały 42 rysy o szerokościach od 0.05 do 0.4 mm o największym wymiarze w połowie rozpiętości belki. Belka B2, bez zbrojenia strzemionami, miała najmniejszą nośność i uległa zniszczeniu na ścinanie w sposób gwałtowny na skutek powstania szerokiej, ukośnej szczeliny. Na belce B2 powstało 18 rys. W belce B3 rysy o największej szerokości powstały w strefie czystego zginania. Na belce zarejestrowano aż 57 rys. W końcowej fazie obciążenia elementu, zrywaniu włókien stalowych towarzyszyły charakterystyczne trzaski. Powstałe rysy miały szerokości około 0.1 mm i umiejscowione były gęsto wzdłuż dolnej krawędzi belki. Pomiar zakończono, gdy jedna z rys osiągnęła szerokość 0.5 mm.



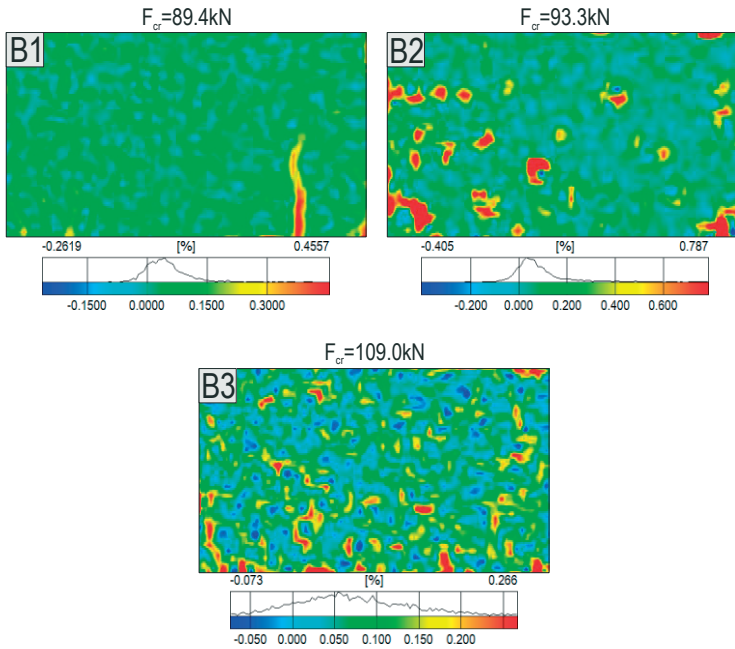
Rys. 5. Obrazy zarysowania belek

Zarysowania belek porównano w II fazie pracy elementów zginanych. Obliczono liczbę i łączną szerokość rys dla wartości siły odpowiadającej połowie zakresu fazy II. Dla B1 łączna szerokość 32 rys wynosiła 4.05 mm, przy obciążeniu 250 kN. Natomiast dla B2 przy 18 rysach, szerokość wyniosła 0.85 mm przy sile 200 kN. Z kolei dla B3 przy obciążeniu 280 kN powstały 42 rysy o sumarycznej szerokości równej 2.80 mm. Największa liczba rys powstała na belce B3 o największej nośności, natomiast najmniej rys zarejestrowano na belce B2. Analizując zarysowanie belki B3 stwierdzono bardzo dobrą współpracę betonu z włóknami stalowymi i polipropylenowymi w przenoszeniu naprężeń. Analizując rysy na końcowych etapach obciążenia stwierdzono, że średnia szerokość rys belek fibrobetonowych B2 i B3 wynosi 0.12 mm, a belki żelbetowej 0.25 mm. Po zniszczeniu elementów sumowano szerokości powstałych rys, a ich wartość podano w tabeli 5. Porównywalne wartości przyrostów szerokości rys świadczą o korzystnych rozkładach włókien w elementach fibrobetonowych. W tabeli 6 zestawiono pomierzone odległości między rysami przy obciążeniach eksploatacyjnych F_s i niszczących F_u . W kolejności podano: N – liczbę rys, minimalne, maksymalne oraz średnie odległości pomiędzy rysami oznaczone symbolami S_{min} , S_{max} i S_{rm} .

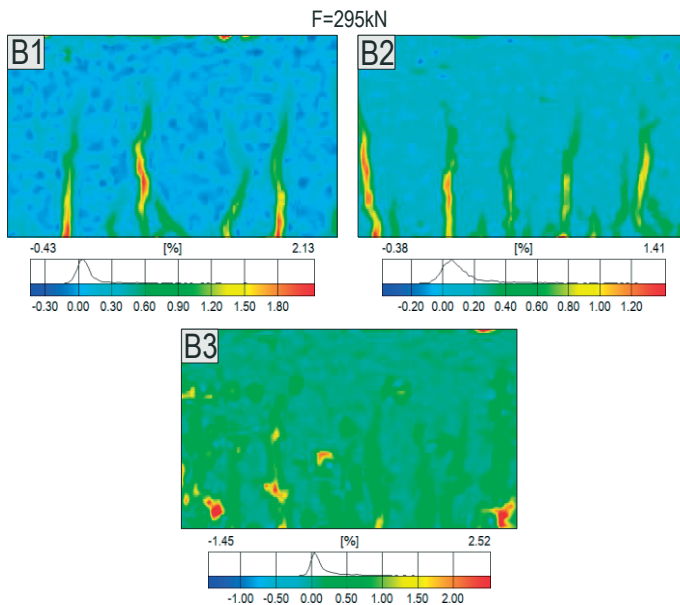
Tabela 6. Odległości między rysami przy obciążeniach eksploatacyjnych i niszczących

Symbol belki	N	$F_s=0.6F_u$ Odległości między rysami					
		F_u [kN]	S_{min} [mm]	S_{max} [mm]	S_{rm} [mm]	S_{min} / S_{rm}	S_{max} / S_{rm}
B1	32	238.3	21	135	70	0.3	1.93
B2	13	177.0	27	182	115	0.23	1.58
B3	40	264.4	14	111	59	0.24	1.88
B1	42	397.1	7	97	57	0.12	1.70
B2	30	295.0	14	135	71	0.20	1.90
B3	57	440.6	14	83	47	0.29	1.77

Na rysunku 6 pokazano obrazy odkształceń betonu w chwili powstania pierwszych rys w belkach B1-B3. Każdy obraz odkształcenia odpowiada polu pomiarowemu o długości około 70 cm i wysokości 40 cm, równej całej wysokości belki.



Rys. 6. Obrazy odkształceń betonu w polu pomiarowym przy obciążeniu rysującym belki B1-B3

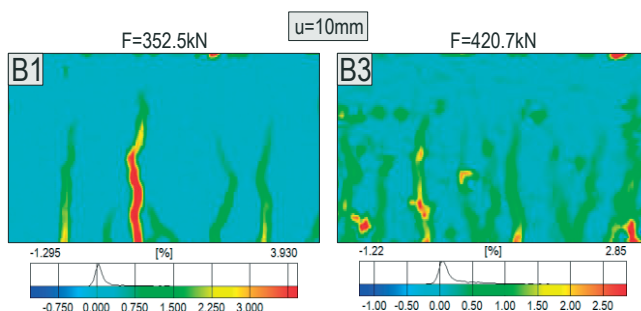


Rys. 7. Stan odkształcenia betonu przy tym samym poziomie obciążenia $F=295$ kN

Analizując odkształcenia betonu w belce B1 zauważono, że do momentu powstania pierwszej rysy wartości odkształceń włókien rozciąganych betonu w części środkowej elementu wahały się w przedziale 0.5-2%. Odkształcenie betonu odpowiadające powstaniu pierwszej rysy zauważono przy sile 89.4 kN. W belkach B2 i B3 w początkowych fazach obciążenia obserwowano rozkłady odkształceń betonu na powierzchni elementu o wartościach zawartych w przedziale 0.75-2%. Odkształcenia włókien dolnych betonu obrazujące powstanie pierwszej rysy w belkach B2 i B3 zauważono odpowiednio przy wartościach obciążenia 93.3 kN i 109 kN.

Obrazy odkształceń betonu belek B1-B3 przy stałym poziomie obciążenia $F = 295$ kN pokazano na rys. 7. W przypadku belki B2 było to obciążenie niszczące, przy którym odkształcenia betonu w rysach wynosiły 14.1%. Podsumowując uzyskane wyniki stwierdzono, że odkształcenia fibrobetonów wysokowartościowych są dużo mniejsze od odkształceń betonu wysokowartościowego.

Porównując maksymalne wartości odkształceń betonu we włóknach rozciąganych belek B1 i B3 na poziomie granicznych ugięć eksploatacyjnych stwierdzono, że odkształcenia betonu w elemencie B3 są o 28% mniejsze od odkształcenia betonu w belce żelbetowej B1 przy obciążeniu większym o 16%, rys. 8.



Rys. 8. Stan odkształcenia betonu belek B1 i B3 przy tym samym poziomie ugięcia $\alpha = 10$ mm

Wyniki opisujące zależności siła – ugięcie przedstawiono w tabeli 7. W kolejności podano wartości ugięć: w stanie uplastycznienia zbrojenia podłużnego α_y , w stanie zniszczenia α_u , w stanie eksploatacji α_s przy sile odpowiadającej 60% wartości obciążenia niszczącego oraz odpowiednie wartości sił. Obliczono również procentowe wskaźniki obciążenia w stanie użytkowalności i uplastycznienia.

Tabela 7. Charakterystyki krzywych siła – ugięcie w środku rozpiętości

Symbol belki	α [mm]			F [kN]			Wskaźniki obciążenia	
	α_s	α_y	α_u	F_s	F_y	F_u	F_s / α_s	F_y / α_y
B1	5.53	11.32	37.26	238.3	351.0	397.1	43.09	31.01
B2	2.44	–	5.49	177.0	–	295.0	72.54	–
B3	3.19	10.33	73.91	264.4	444.8	440.6	82.88	43.06

Ugięcia belek B2 i B3 w stadium eksploatacji różniły się między sobą o 31%. Największe ugięcia końcowe charakteryzowało belkę B3 o największej zawartości włókien. Natomiast belkę B1 charakteryzowały ponad dwukrotnie większe ugięcia w stadium eksploatacji i ponad dwukrotnie mniejsze w stadium zniszczenia w porównaniu do belki B3.

4. Podsumowanie

W wyniku przeprowadzonych eksperymentów stwierdzono istotny wpływ hybrydowego zbrojenia rozproszonego na rysoodporność, odkształcalność i sztywność belek wykonanych z betonu wysokowartościowego.

Zarysowanie belek porównano na tym samym poziomie obciążenia i zauważono, że wraz z większym dodatkiem włókien znacznie zmniejsza się szerokość rys przy większej ich liczbie. Moment powstania pierwszej rysy w belkach z włóknami następuje później niż w belce bez włókien i jest związany z procentową ich objętością. Włókna korzystnie

wpływają na pracę belek w obszarach niesprężystych po zarysowaniu betonu i uplastycznieniu prętów stalowych oraz na charakter zniszczenia. Analizując stan odkształceń zauważono, że ich rozkład w elementach fibrobetonowych jest nierównomierny na powierzchni elementu. Ugięcia belek ze zbrojeniem rozproszonym na tym samym poziomie obciążenia były mniejsze od belki żelbetowej. Ugięcia belki z włóknami B3 są ponad dwukrotnie mniejsze w porównaniu do ugięć belki bez włókien. Belka z 1% objętościową zawartością włókien stalowych wykazywała bardzo dużą ciągliwość materiału. Na podstawie wykonanych badań można zauważyć korzystny wpływ dodania nawet niewielkiej ilości zbrojenia rozproszonego na mniejsze krzywizny elementów.

Literatura

- 1 Brandt A.M. Cement Based Composites: Materials, Mechanical Properties and Performance. Taylor and Francis. London and New York 2009.
- 2 Glinicki M.A. Beton ze zbrojeniem strukturalnym. XXV Ogólnopolskie warsztaty pracy projektanta konstrukcji. Szczyrk 2010, 279-308.
- 3 Brandt A.M. Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering. Composite Structures 86 (2008) 3-9.
- 4 Walraven J.C. High performance fiber reinforced concrete: progress in knowledge and design codes. Materials and Structures (2009) 42: 1247-1260.
- 5 Prisco M., Plizzari G., Vandewalle L. Fibre reinforced concrete: new design perspectives. Materials and Structures (2009) 42: 1261-1281.
- 6 Banthia N., Gupta R. Hybrid fiber reinforced concrete (HyFRC): fiber synergy in high strength matrices. Materials and Structures Vol. 37 (2004) 707-716.
- 7 Ashour S.A., Hasanain G.S., Wafa F.F. Shear Behavior of High-Strength Fiber Reinforced Concrete Beams. ACI Structural Journal. V. 89, No. 2, March-April 1992, 176-184.
- 8 Chunxiang Q., Pantaikuni I. Properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete beams in bending. Cement and Concrete Composites 21 (1999) 73-81.

Serviceability limit states of high performance reinforced concrete beams with hybrid fibre

Piotr Smarzewski

Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Lublin University of Technology, e-mail: p.smarzewski@pollub.pl

Abstract: The article presents the results of research and analysis of reinforced high performance concrete beams with steel and polypropylene fibres at service load. The beams were bent in the 4-point model. Research was carried out for three different rectangular reinforced concrete beams in terms of the quantity and the type of reinforcement. The beam B1 was constructed conventionally with reinforced steel rods. The beams B2 and B3, instead of the compressive rods and the stirrups the fibre reinforcement of variable fibre volume percentage was applied. In the tests a non-contact system for three-dimensional measurements of deformation – ARAMIS was used. The analysis of the behaviour of the beams under static load for serviceability was based on: images of cracks, strain and force – displacement curves.

Keywords: reinforced beam, high performance concrete, steel fibre, polypropylene fibre, system ARAMIS, strain, displacement, crack.