

BETON WYSOKIEJ WYTRZYMAŁOŚCI W ELEMENTACH ŻELBETOWYCH ZESPOLONYCH

Barbara SADOWSKA-BURACZEWSKA*, Magdalena PAZIK

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45 A, 15-351 Białystok

Streszczenie: Projektowanie betonów wysokowartościowych (BWW) o wymaganych właściwościach i założonej wytrzymałości jest zadaniem nietrywialnym i odbiegającym od metod stosowanych dla betonów zwykłych. Stosowanie w jednym elemencie (konstrukcji) betonów o znacznie różniących się właściwościach, również jest zadaniem nietypowym. W pracy przedstawiono wyniki badań żelbetowych belek zespolonych wykonanych warstwowo z betonu zwykłego i BWW oraz jednorodnych belek typu kontrolnego. Analizowane były belki modelowe o rozpiętości 1100 mm i prostokątnym przekroju poprzecznym $b \times h = 80 \times 120$ mm, badane pod obciążeniem doraźnym. Badano belki zespolone z betonu zwykłego z warstwą BWW klasy C60/75 w strefie ściskanej o grubości 4 cm oraz belki zespolone z warstwą BWW w strefie ściskanej C100/115 o grubości 4 cm. Elementami kontrolnymi były belki jednorodne z betonu zwykłego.

Słowa kluczowe: żelbetowe belki zespolone typu beton-beton, BWW, krzywizna, rysy.

1. Wprowadzenie

Wiele prac poświęconych betonom wysokowartościowym (BWW) skupia się wyłącznie na ich właściwościach (Jasiczak i in., 2008) i zastosowaniu w całym elemencie. Nieliczne publikacje z zakresu częściowego zastosowania BWW na całej długości belki w strefie ściskanej (Yamada i in., 1999) oraz w górnej strefie na odcinku czystego zginania w konstrukcji opisują zachowanie się elementów belkowych pod obciążeniem doraźnym (Łapko i Grygo, 2010). Odrębną grupę problemów rozwiązano w pracach badawczych dotyczących zastosowania betonu ekspansyjnego jako nadbetonu (Król, 1995; Król i in., 1997). Sygnalne badania opisane w pracy (Yamada i in., 1999) stanowiły przesłankę do podjęcia badań belek zespolonych typu beton-beton z użyciem częściowym BWW (Sadowska-Buraczewska i Łapko, 2007; Sadowska-Buraczewska, 2011).

W pracy przedstawiono użycie betonu wysokowartościowego w części elementu belkowego: w jego górnej ściskanej strefie z dolną warstwą wykonaną z betonu zwykłego. Celem pracy jest wyjaśnienie poprzez badania eksperymentalne zachowania się zginanych elementów nośnych, zespolonych z warstw BWW i betonu zwykłego.

2. Materiały wykorzystane w elementach badawczych

Receptury betonów zwykłych przygotowano zgodnie z zaleceniami (PN-EN 206-1:2003 *Beton. Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność*, PN-EN 934-2:2002 *Domieszki do betonu, zaprawy i zaczynu. Domieszki do betonu. Definicje i wymagania*), natomiast receptury BWW według pracy (Jasiczak i in., 2008). Do wykonania mieszanki betonu zwykłego użyto komponentów wymienionych w tabeli 1. Natomiast do wykonania mieszanek BWW użyto następujących składników: dla klasy C60/75 według tabeli 2 i dla klasy C100/115 według tabeli 3.

Tab. 1. Skład mieszanki betonowej C20/25 w belkach modelowych zbrojonych

Składnik	Ilość składników w kg na m ³
Cement I 42.5R	260
Kruszywo – piasek 0 - 2	660
Kruszywo – żwir 2 - 8	1150
Dodatek typu II: popiół lotny	60
Woda	178

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: bsadowska@pb.edu.pl

Tab. 2. Skład mieszanki betonowej C60/75 w belkach modelowych zbrojonych

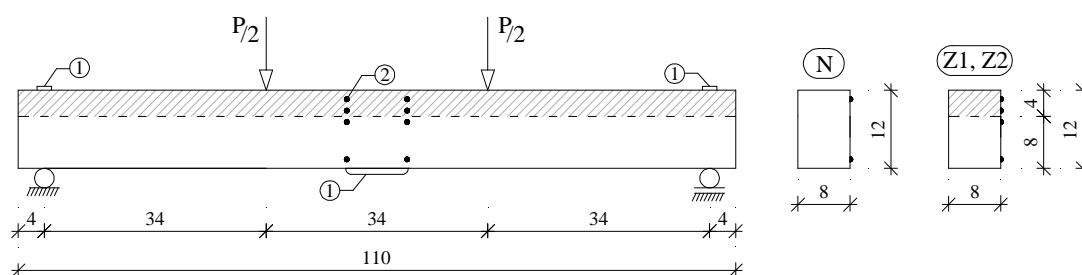
Składnik	Ilość składników w kg na m ³
Cement I 52.5 Aalborg White Polska	340
Kruszywo – piasek 0 - 2	640
Kruszywo – żwir 2 - 8	1290
Popiół lotny	80
Pył krzemionkowy	30
Superplastyfikator	1,5% masy cementy
Woda	123

Tab. 3. Skład mieszanki betonowej C100/115 w belkach modelowych zbrojonych

Składnik	Ilość składników w kg na m ³
Cement I 52.5 Aalborg White Polska	450
Kruszywo – piasek 0 - 2	630
Kruszywo – grys bazaltowy 2 - 8	1070
Popiół lotny	100
Pył krzemionkowy	45
Superplastyfikator	8,1
Woda	119

3. Badania doświadczalne

Elementy badawcze wykonano jako żelbetowe belki zespolone o wymiarach 80 × 120 × 1100 mm. Dolna warstwa o grubości 80 mm wykonana została z betonu zwykłego klasy C 20/25. Bezpośrednio na nią ułożono warstwę z betonu wysokowartościowego o grubości 40 mm (metodą mokre na mokre). Belki kontrolne wykonano w całości z betonu zwykłego klasy C 20/25. Zbrojenie podłużne wszystkich belek stanowiły 2 pręty $\varnothing 8$ i strzemiona $\varnothing 3$. Zastosowane zbrojenie poprzeczne przenikało warstwę BWW. Po 28 dniach dojrzewania element badany umieszczony był na stanowisku badawczym i poddany obciążeniu doraźnemu w formie 2 sił skupionych P przyłożonych w 1/3 rozpiętości belki. Elementy badano w zakresie ugięć i odkształceń betonu po wysokości elementu. Ponadto obserwowano rysy w strefie czystego zginania. Podczas badań rejestrowano siłę za pomocą systemu komputerowego DaqView



Rys. 1. Schemat elementów badanych i punkty pomiarowe: 1 – pomiar ugięcia, 2 – pomiar odkształceń betonu

będącego na wyposażeniu Katedry Konstrukcji Budowlanych na Wydziale Budownictwa i Inżynierii Środowiska Politechniki Białostockiej. Siłę zwiększano aż do zniszczenia belek. Na rysunku 1 pokazano schemat obciążenia i punkty pomiarowe. Wykonano następujące serie belek: Z1 – 3 sztuki belek zespolonych z warstwą BWW grubości 40 mm klasy C 60/75, Z2 – 3 sztuki belek zespolonych z warstwą BWW grubości 40 mm klasy C 100/115 oraz N – 3 sztuki belek kontrolnych wykonanych w całości z betonu klasy C 20/25.

Zakres badań wytrzymałościowych obejmował określenie wytrzymałości betonów na ściskanie na próbkach kostkowych o boku 150 mm po 7, 14 i 28 dniach oraz określenie modułów sprężystości dla BWW stosując tak zwane kapsle piaskowe (Boulay i de Larrard, 1993a i b) i betonu zwykłego. W tabeli 4 przedstawiono wyniki badań wytrzymałościowych.

Tab. 4. Cechy wytrzymałościowe badanych betonów

Projektowana klasa betonu	Średnie wartości wytrzymałości betonów na ściskanie [MPa]			Średnie wartości modułu sprężystości E_{cm} [GPa]
	po 7 dniach	po 14 dniach	po 28 dniach	
C20/25	-	-	31,00	31,45
C60/75	-	56,30	63,10	36,40
C100/115	97,20	101,60	104,70	45,20

3.1. Wpływ warstwy BWW na krzywiznę belek

Pomiaru ugięć dokonywano za pomocą czujników zegarowych o dokładności pomiaru 0,001 mm (punkt 1 na rysunku 1). Czujniki umieszczone były w trzech miejscach, na podporze lewej, prawej oraz w środku rozpiętości belki. Pomiaru ugięć następowały po każdorazowym zwiększeniu poziomu siły. Na podstawie pomierzonych wartości ugięć obliczono krzywiznę elementów badanych. Zastosowano wzór na krzywiznę χ belki:

$$\chi = \frac{a_{eksp}}{l^2 \alpha_k} \quad (1)$$

gdzie: a_{eksp} jest wartością ugięcia dla wybranego poziomu siły, l jest rozpiętością efektywną elementu, a α_k jest współczynnikiem przyjętym według pracy (Łapko i Jensen, 2005) i wynosi $\alpha_k = 5/48$.

Wykres zależności siła-krzywizna przedstawiono na rysunku 2.

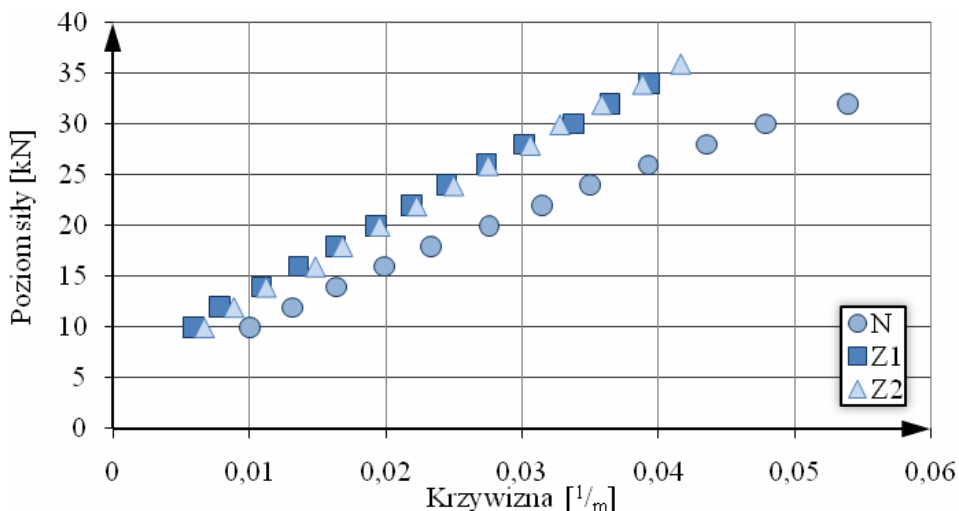
Analizując wykres zależności siła-krzywizna badanych elementów zauważamy, że krzywizna belek zespolonych wykonanych z warstwą BWW klasy C 60/75 i z warstwą BWW klasy C 100/115 jest mniejsza w porównaniu z krzywizną belek kontrolnych wykonanych w całości z betonu zwykłego klasy C 20/25.

3.2. Wpływ warstwy BWW na odkształcenia betonu

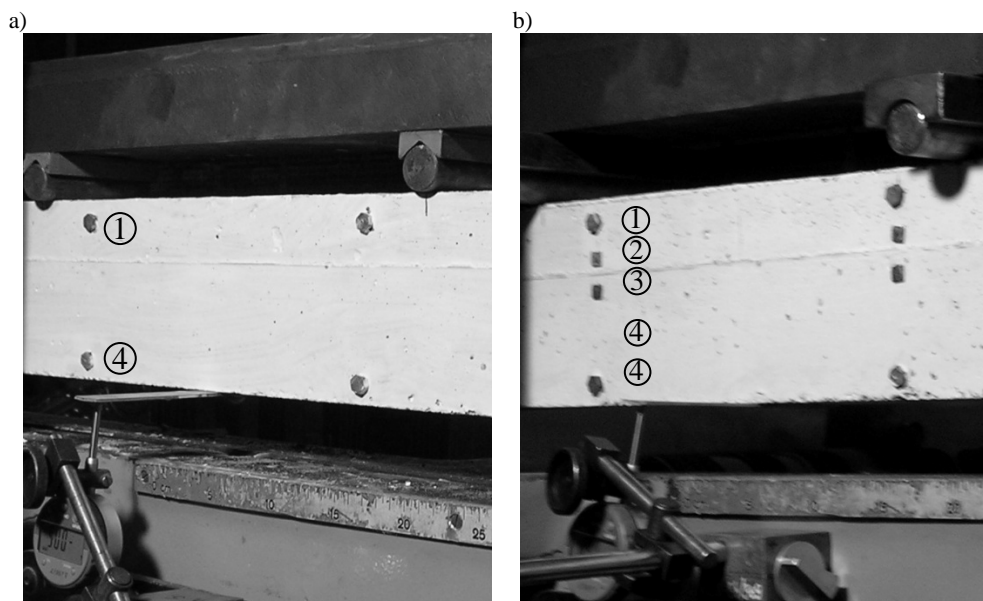
Odształcenia betonu na wysokości belek mierzono za pomocą ekstensometru DEMEC o bazie 15 mm (w punktach pokazanych na rysunkach 1 i 3). Wartości odkształceń odczytywano zgodnie z planem obciążania belek po każdorazowym zwiększaniu poziomu siły. Średnie wartości z trzech pomiarów odkształceń każdej belki w górnej strefie przekroju przedstawiono

na wykresie zależności siła-odkształcenie (rys. 4) oraz na wykresie odkształceń betonu na wysokości belki dla wybranych poziomów siły serii N, Z1 i Z2 (rys. 5).

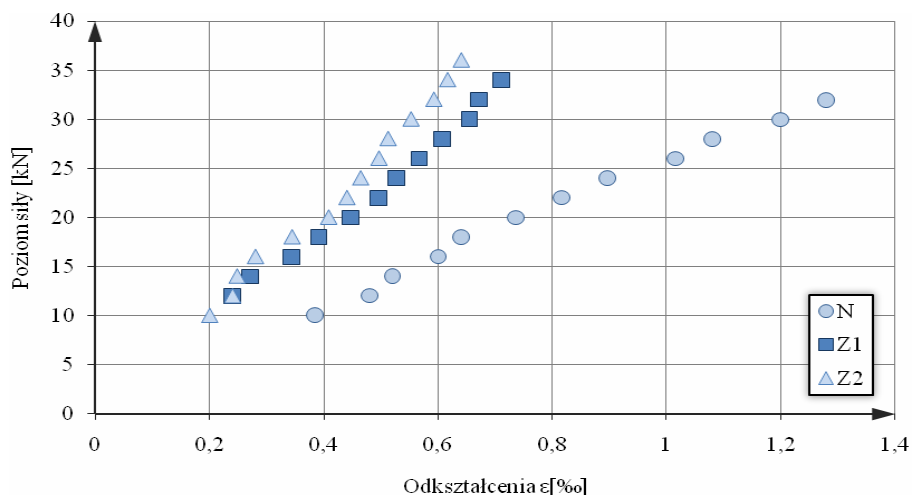
Analizując pomierzone odkształcenia na wysokości przekroju w poszczególnych belkach dla danego poziomu siły, można zauważyć zmniejszenie wartości odkształceń betonu w strefie ściskanej belek zespolonych w porównaniu do odkształceń belek jednorodnych wykonanych z betonu zwykłego. Zauważamy również wyraźne różnice pomiędzy wartościami odkształceń betonu w strefie ściskanej w belkach zespolonych przy zastosowaniu betonów wysokiej wytrzymałości o różnych klasach: dla belek Z2 z warstwą BWW klasy C100/115 wartości odkształceń betonu są mniejsze niż wartości odkształceń betonu belek Z1 wykonanych z BWW klasy C60/75. Potwierdzają to wyniki badań doraźnych w zakresie maksymalnych odkształceń krawędziowych w strefie ściskanej.



Rys. 2. Wykres zależności siła P - krzywizna c belek zespolonych serii Z1, Z2 i kontrolnych serii N

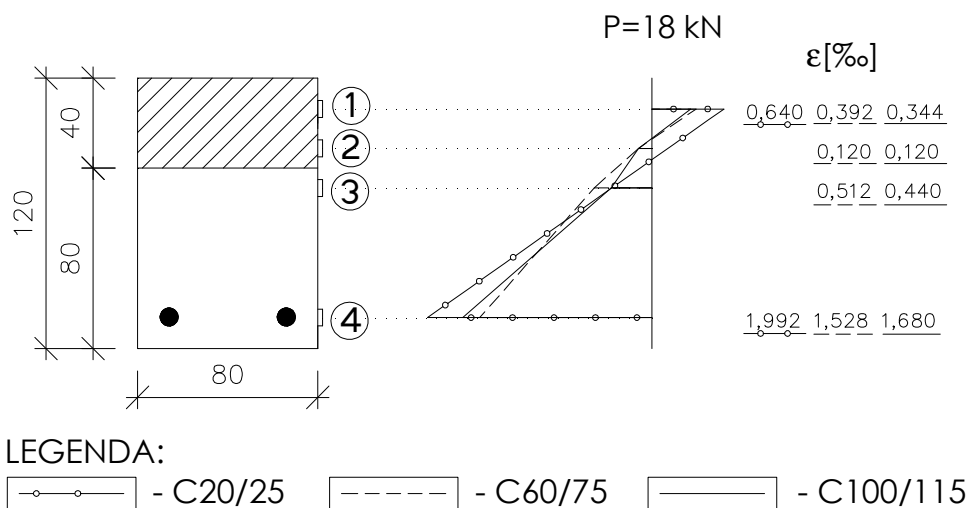


Rys. 3. Rozstaw punktów pomiarowych podczas badań odkształceń: a) w belce kontrolnej, b) w belce zespolonej

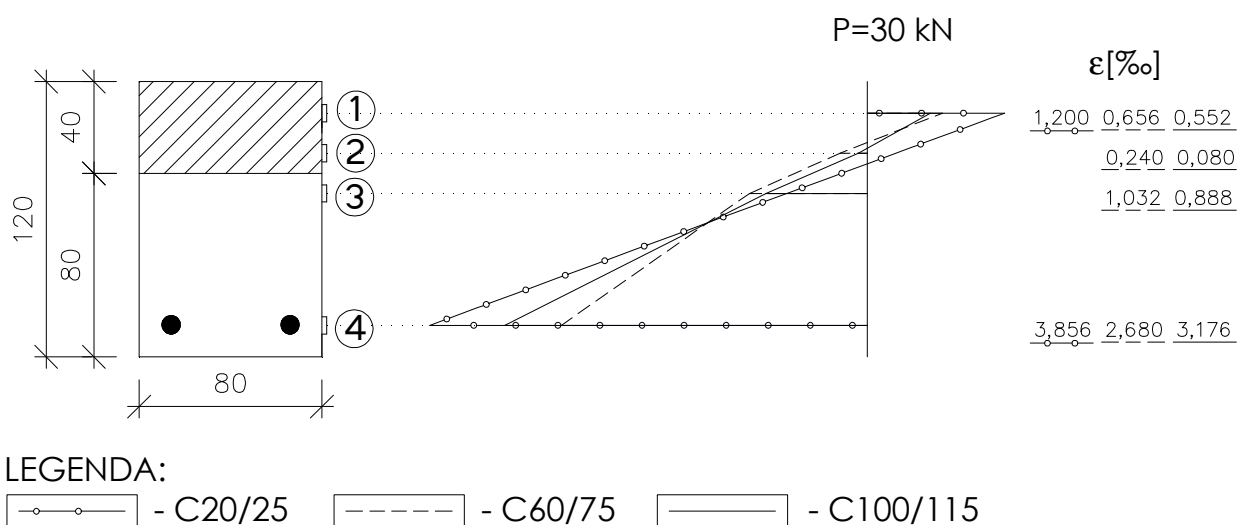


Rys. 4. Wykres zależności siła P - odkształcenie ϵ w strefie ściskanej belek kontrolnych serii N i zespolonych serii Z1 i Z2

a)



b)



Rys. 5. Obraz odkształceń betonu ϵ_c na wysokości belki: a) dla siły 18 kN, b) dla siły 30 kN

3.2. Analiza propagacji rys w belkach zespolonych i kontrolnych

Zarysowanie zespolonych konstrukcji żelbetonowych jest zjawiskiem bardzo złożonym z uwagi na występowanie tu wielu czynników. Zarysowanie elementów, zwłaszcza w zaawansowanym stadium obciążenia, może być sygnałem wyczerpania nośności ustroju. Zasięg i szerokość rys pozwalają w dużym stopniu kontrolować

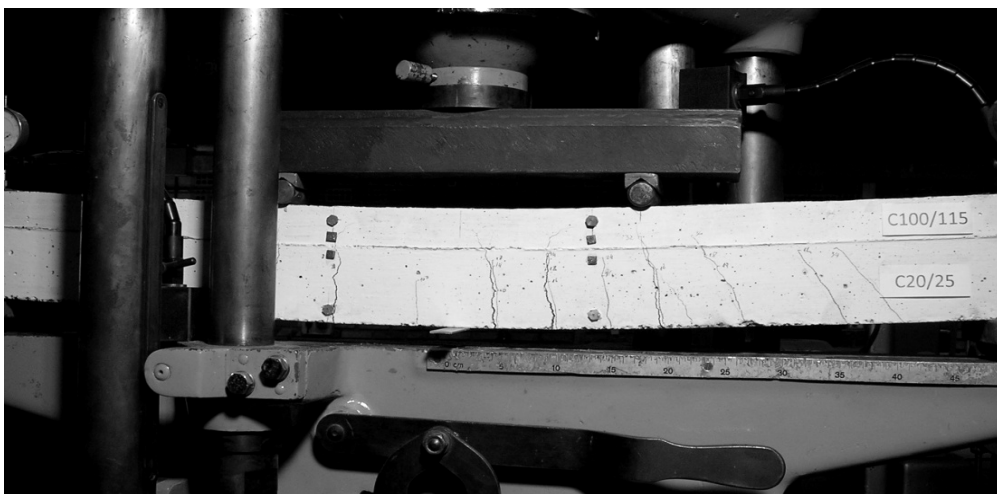
stopień wyężenia elementu. Pomiar szerokości rys i obraz zarysowania jest ważnym elementem oceny eksploatowanej konstrukcji pod względem bezpieczeństwa. W trakcie badania elementów zaznaczano przebieg i zakres penetracji rys, zapisując u wierzchołka rysy wielkość obciążenia. Na rysunkach 6, 7 i 8 przedstawiono widok rys w badanych belkach serii N, Z1 i Z2 po zniszczeniu.



Rys. 6. Dokumentacja zarysowania po zniszczeniu belek jednorodnych wykonanych całkowicie z betonu zwykłego – seria N



Rys. 7. Dokumentacja zarysowania po zniszczeniu belek zespolonych z warstwą BWW betonu klasy C60/75 – seria Z1



Rys. 8. Dokumentacja zarysowania po zniszczeniu belek zespolonych z warstwą BWW betonu klasy C100/115 – seria Z2

Propagacja rys w belkach serii Z2 jest zdecydowanie mniejsza niż w belkach kontrolnych serii N, a także mniejsza niż w belkach zespolonych serii Z1. Analiza dokumentacji z obserwacji rys (ich liczby, szerokości, przebiegu) w poszczególnych belkach jest kolejnym potwierdzeniem większej efektywności belek zespolonych z udziałem betonu wysokowartościowego (przy klasie C 100/115) w zakresie odkształcalności, w porównaniu z belkami jednorodnymi z betonu zwykłego.

4. Podsumowanie

Badania doświadczalne belek zespolonych z udziałem betonów BWW potwierdziły, że zastosowanie betonów wysokowartościowych w strefie ściskanej może być korzystnym sposobem poprawy parametrów wytrzymałościowych ustrojów zginanych w zakresie ich nośności, odporności na rysy, redukcji ugięcia, przy jednoczesnym obniżeniu kosztów materiałowych w zakresie zużycia BWW.

Krzywizna belek zespolonych Z1 i Z2 jest mniejsza w porównaniu z krzywizną belek kontrolnych N wykonanych w całości z betonu zwykłego.

Odształcenia ściskanej strefy przekroju belek zespolonych były mniejsze w belkach zespolonych z BWW klasy C 60/75 i C 100/115 w porównaniu z odształceniami belki jednorodnej wykonanej całkowicie z betonu zwykłego klasy C 20/25. Stwierdzono korzystny efekt redystrybucji stanu odształceń i naprężeń w ściskanej strefie przekroju zespolonego, który nie występuje w belkach jednorodnych.

Literatura

- Boulay C., de Larrard F. (1993a). The Sand – Box; A New Capping System for Testing HPC Cylinders. *Concrete International* (ACI), 63-66.
- Boulay C., de Larrard F. (1993b). Capacity High – Performance Concrete Cylinders with the “Sand – Box”. W: *Proceedings of the Symposium High – Strength Concrete*, Lillehammer, Norway.
- Jasiczak J., Wdowska A., Rudnicki T. (2008). Betony ultrawysokowartościowe. Właściwości, technologie, zastosowania. *Polski Cement*, Kraków.
- Król M. (1995). Zaczyny i betony ekspansywne do napraw i wzmocnień konstrukcji z betonu. W: *Materiały Konferencji Naukowej „Aktualne problemy ochrony budowli przed korozją”*. Kraków.
- Król M., Halicka A., Tur W. (1997). Konstrukcje zespolone z udziałem betonu zwykłego i ekspansywnego. *Wydawnictwa Uczelniane Politechniki Lubelskiej*.
- Łapko A., Grygo R. (2010). Zastosowanie BWW do odcinkowego wzmocniania elementów żelbetowych. W: M. Kamiński, J. Jasiczak, W. Buczkowski, T. Błaszczński (red.). *Trwałe rozwiązania naprawcze w obiektach budowlanych. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne*, Warszawa, 46-52.
- Łapko A., Jensen B. Ch. (2005). Podstawy projektowania i algorytmy obliczeń konstrukcji żelbetowych. *Wydawnictwo Arkady*, Warszawa.
- Sadowska-Buraczewska B. (2011). Zginane belki żelbetowe wzmocniane betonami nowej generacji, W: *Konstrukcje zespolone*. T. Biliński (red.). *Oficyna Wydawnicza Uniwersytetu Zielonogórskiego*, 267-274.
- Sadowska-Buraczewska B., Łapko A. (2007). The concept of strengthening of compressive zone in rc beams using HPC-HSC. W: *Proceedings of 9th International Conference: Modern building materials, structures and techniques*, Vilnius, Lithuania, 752-757.
- Yamada M., Matsuura H., Kumai H. (1999). Hybrid reinforced concrete beams by high-strength and normal-strength concrete. W: *Proceedings of 5th Symposium on High Performance and High-Strength Concrete*, Sundefjord, Norway, 925-934.

THE HIGH STRENGTH CONCRETE IN THE HYBRID REINFORCED CONCRETE MEMBERS

Abstract: The paper summaries the experimental of flexural capacity and deformability of structural concrete beams prepared as composite members consisting of two concrete layers made of reinforced normal concrete and high-strength concrete (HSC). The reinforced concrete composite beams used in the tests were prepared in modelling scale with the rectangular-section of 80 × 120 mm and the effective span of 1100 mm. The basic samples were composed in two layers consisting of high strength concrete as the top layer (C60/75 and C100/115), and normal strength concrete.

Pracę wykonano w Politechnice Białostockiej w ramach pracy statutowej S/WBiŚ/2/2008.