



Betony z użyciem kruszywa recyklingowego wysokiej wytrzymałości – dziedzina zrównoważonego rozwoju

Barbara Sadowska-Buraczewska, Piotr Rutkowski
Politechnika Białostocka

1. Wstęp

Wiele nowoczesnych społeczeństw zwraca uwagę na aspekty związane z ekologią, zrównoważonym rozwojem [8, 9] oraz dbaniem o zdrowe i naturalne środowisko. Świadomość ekologiczna dotyczy doboru stosowanych materiałów budowlanych oraz rozwiązań technologicznych tak, by maksymalnie zredukować negatywny wpływ na środowisko. Konflikt pomiędzy potrzebami, a rozwojem gospodarczym, związany z przemysłem budowlanym, można załagodzić poprzez wypracowywanie optymalnych rozwiązań, nieograniczających rozwój, a jednocześnie chroniących nieodnawialne zasoby naturalne. Prowadzić to może do osiągnięcia technologii, pozwalającej na wprowadzenie zasad klarownej produkcji tj.: oszczędności energii, surowców naturalnych, wody oraz ponownego wykorzystywania materiałów odpadowych (recyklingu). Recykling betonu oraz wykorzystanie go ponowne to ograniczenia eksploatacji zasobów naturalnych (wody, kruszywa, skał itp.). odpowiednie gospodarowanie odpadami i używanie ich powtórne przynoszące nie tylko korzyści dla środowiska, ale także rozwiązuje problem zagospodarowania odpadów, składowania, a także utylizacji [1, 2].

W pracy przedstawione zostały badania eksperymentalne modelowych żelbetowych belek o przekroju prostokątnym z użyciem kruszyw z recyklingu o wysokiej wytrzymałości (BWW). Analizy eksperymentalne opracowane w zakresie badań doraźnych dotyczyły: ugięć, nośności, odkształceń betonu po wysokości belki, szerokości i zasięgu rys. Analiza

porównawcza obejmuje zachowanie się belek z recyklingu (z różną zawartością procentową kruszyw w stosunku do m^3 mieszanki betonowej) z elementami modelowymi kontrolnymi wykonanymi z BWW na kruszywach naturalnych. Badania właściwe żelbetowych elementów belkowych poprzedzone zostały badaniami wytrzymałościowymi próbek betonów z użyciem kruszyw z recyklingu oraz betonów wysokiej wytrzymałości na kruszywach naturalnych.

2. Badania eksperymentalne żelbetowych elementów belkowych z zastosowaniem kruszyw z recyklingu

Przeprowadzone badania miały na celu określenie wpływu zastąpienia naturalnego kruszywa grubego kruszywem uzyskanym z recyklingu betonu wysokowartościowego na zachowanie się belek. W obecnej dostępnej literaturze jest bardzo mało odniesień do prac badawczych z zakresu stosowania kruszywa z recyklingu wysokiej wytrzymałości [2]. W związku z tym podjęto badania eksperymentalne w tej tematyce. W procesie badawczym można wyróżnić IV etapy.

2.1. I etap badań

W ramach tego etapu wykonano beton wysokiej wytrzymałości posługując się zaleceniami zg z [4, 5, 6, 10]. Do wykonania próbek badawczych mieszanki BWW wykorzystano m.in.: cement CEM I 42,5 HSR, piasek, grys bazaltowy, mikro krzemionka, super plastyfikator, wodę. Wskaźnik wodno-cementowy wynosił dla receptury I – 0,31, II – 0,29; gęstość objętościowa odpowiednio $\rho=2273 \text{ kg/m}^3$ i $\rho=2531 \text{ kg/m}^3$ (różnice wynikały z ilości cementu i kruszywa). Badania wytrzymałościowe wykonanych próbek przeprowadzono po 7, 14 i 28 dniach (tabela 1). Wytrzymałości określono zgodnie z obowiązującymi zasadami podanymi w [12, 13] uzyskując:

2.2. II etap badań

Wszystkie przebadane próbki przekruszono za pomocą szczękowej kruszarki LAB-02-130 [3] o regulowanym stopniu rozdrobnienia kruszywa docelowego. Destrukt przesiano uzyskując w ten sposób kruszywo frakcji 2–4 oraz 4–8 mm (rys. 1).

Tabela 1. Średnia wytrzymałość na ściskanie i rozciąganie dla receptury I i II (na kruszywach naturalnych)

Table 1. The compression and tensile strengths for formulas I and II (samples made with natural aggregate)

Lp.	Średnia wytrzymałość na ściskanie [MPa]						Średnia wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	
	7-dni		14-dni		28-dni			
	I	II	I	II	I	II	I	II
$\bar{x} =$	65,9	81,0	84,5	96,4	100,6	106,0	7,82	8,19



Rys. 1. Widok kruszywa wtórnego uzyskanego z próbek betonu BWW, frakcje 2–4 oraz 4–8 mm

Fig. 1. High strength recycled aggregate, size fractions 2–4 and 4–8 mm

2.3. III etap badań

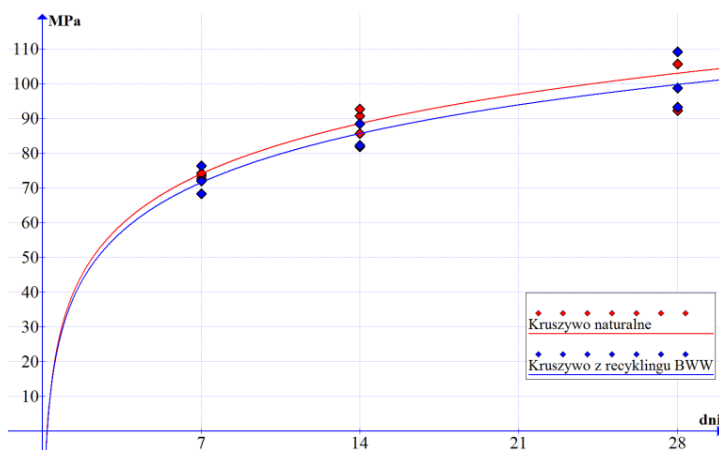
III etap badań polegał na porównaniu parametrów wytrzymałościowych elementów betonowych wykonanych przy całkowitym zastąpieniu kruszywa grubego kruszywem z recyklingu BWW (pochodzącym z elementów wykonanych na podstawie receptur I oraz II – obu o podobnych proporcjach poszczególnych składników oraz wykonanych na tym samym cemencie z elementami modelowymi (wykonanymi przy zastosowaniu kruszywa naturalnego). Otrzymano następujące wyniki z przeprowadzonych badań dla elementów wykonanych przy zastosowaniu kruszywa naturalnego (tabela 2).

Wyniki przedstawione w tabeli 2 i na rysunku 2 wyraźnie pokazują zbieżność wyników w zakresie wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie próbek betonów serii I i II.

Tabela 2. Wytrzymałość na ściskanie i rozciąganie próbek dla próbek receptury I i II (na kruszywach z recyklingu)

Table 2. The compression and tensile strengths for formulas I and II (samples made with recycled aggregate)

Lp.	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]						Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	
	7-dniowa		14-dniowa		28-dniowa			
1.	72,7	68,3	85,6	81,9	105,7	93,2		
2.	73,5	72,0	90,7	82,3	92,2	98,8	7,26	9,06
3.	74,3	76,4	92,7	88,5	109,2	109,2	6,45	9,00
\bar{x}	73,5	72,2	89,7	84,2	102,4	100,4	7,27	9,10



Rys. 2. Graficzne zestawienie wyników badań próbek kostkowych wykonanych z użyciem kruszywa naturalnego oraz kruszywa z recyklingu BWW.

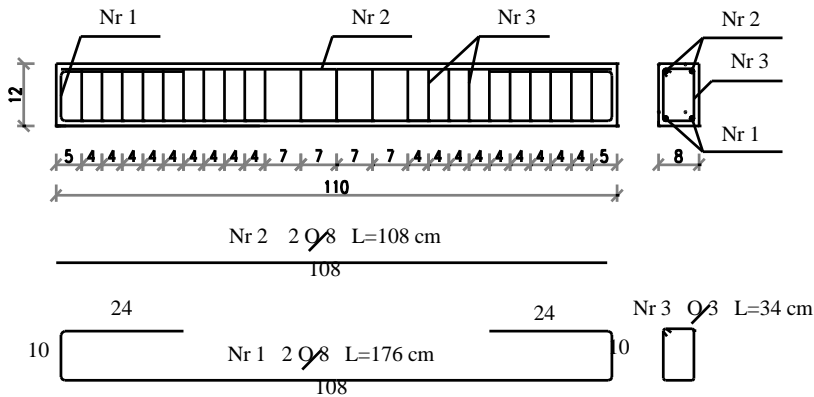
Fig. 2. Graphic results of experimental tests for samples made of natural aggregate and recycled HSC aggregate.

2.4. IV etap

Przygotowanie elementów badawczych

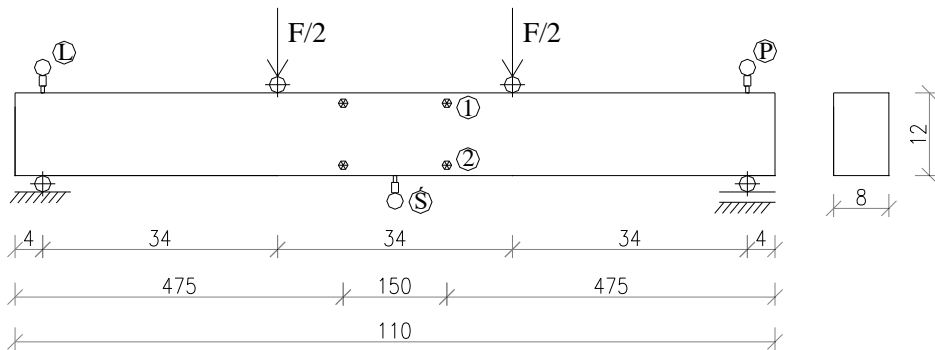
Przedmiotem zasadniczych badań będących głównym celem przedmiotowej pracy była analiza ugięć, odkształceń, rozwoju rys i nośności żelbetowych belek w skali półtechnicznej (o wym. 110 x 12 x 8 cm) wykonanych z zastosowaniem kruszywa recyklingowego wysokiej wytrzymałości (belki A i B). Funkcję belek kontrolnych pełniły elementy wykonane na podstawie tej samej receptury oraz z zastosowaniem identycznego zbrojenia, z tym, że stosowane kruszywo było w pełni kruszy-

wem naturalnym – belki C oraz D. Poniżej pokazano schemat zbrojenia elementów badawczych (rys. 3). Zbrojenie belek zgodnie z Aprobata Techniczną ITB AT-15-4648/2006. Badania przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej DR MB-60. Obciążenie stanowiły dwie siły skupione przykładane w 1/3 rozpiętości przęsła belki. Sposób obciążenia pokazano na rysunku 4.



Rys. 3. Układ zbrojenia belek

Fig. 3. Reinforcement bars of beams

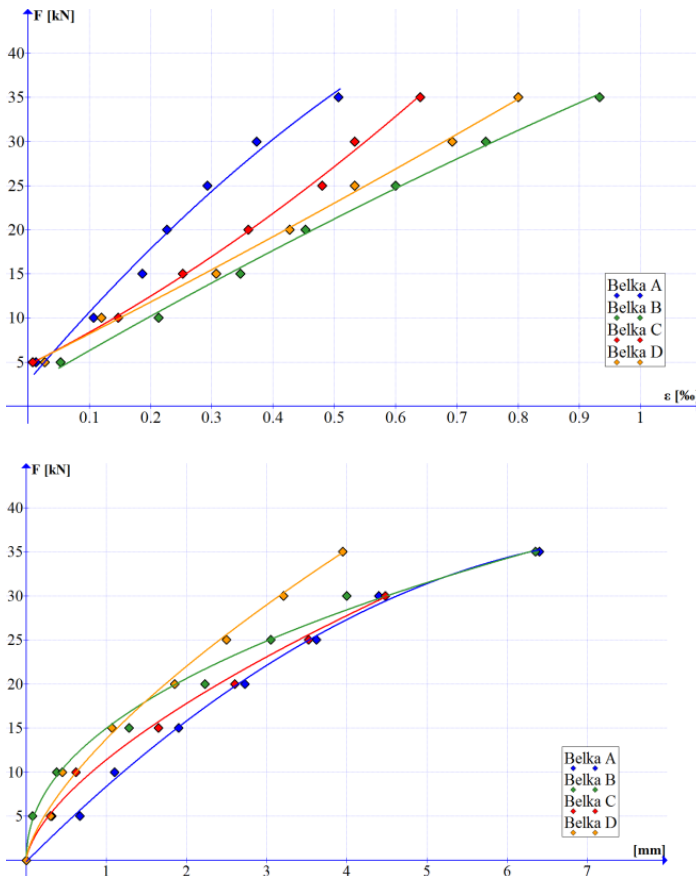


Rys. 4. Schemat stanowiska badawczego: 1, 2 – repery do pomiaru odkształceń betonu w strefie odpowiednio ściskanej i rozciąganej; L, P, Ś – czujniki do pomiaru ugięć

Fig. 4. Loading scheme, cross sections and zones of measurements in tested model beams: 1,2 – zone of compressive strain measurement, L, S, P – zone of registration of deflection

Pomiar odkształceń i ugięć

Odkształcenia belek odczytywano za pomocą miernika Demec. Wyniki pomiarów przedstawiono graficznie w zależności siła odkształcenie na rysunku. Pomiarów ugięć dokonywano za pomocą czujników przemieszczeń w środku rozpiętości elementu i na podporach. Pomiarów dokonano po każdym zwiększeniu obciążenia o 5 kN. Wyniki pomiarów średnich odkształceń betonu i ugięć dla poszczególnych belek pokazano na rysunku 5.



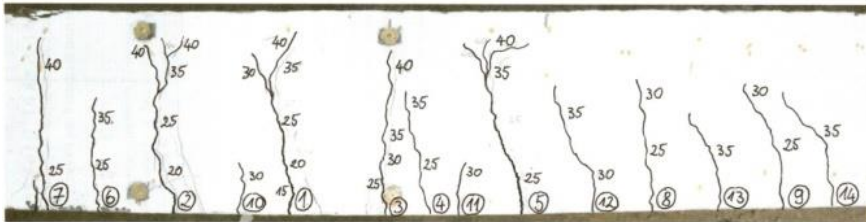
Rys. 5. Wykres zależności siła – odkształcenie betonu strefy ściskanej przekroju oraz siła-ugięcie

Fig. 5. Experimental relationships between concentrated force – compressive strains and force-deflection for tested beams under short time load till to rupture

Z wykresów wynika, że odkształcenia betonu w strefie ściskanej i ugięcia belek w środku rozpiętości belek wykonanych na kruszywach naturalnych nie odbiegają znacząco od siebie w porównaniu z belkami wykonanymi z betonów z zastosowaniem kruszyw z recyklingu.

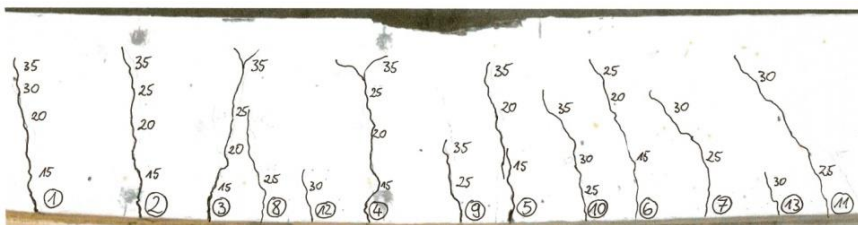
Obserwacja rozwoju zarysowania

Obserwacji zarysowania oraz pomiaru rozwartości rys dokonywano równoległe z badaniami odkształceń i ugięć. Wszystkie zmiany (powstawanie nowych rys lub rozwój istniejących) notowano i opisywano na powierzchni belki po każdym zwiększeniu siły o 5 kN. Pomiary rozwarcia rys dokonywano przy pomocy mikroskopu Brinella. Przykładowo na rysunku 6 i 7 pokazano sposób kształtowania się i rozwoju rys wraz ze zwiększeniem obciążenia dla belki z kruszywem z recyklingu.



Rys. 6. Kształtowanie się i rozwój rys belki A wraz z podanymi wartościami obciążenia w kN

Fig. 6. The measurements of cracks of beams A with load level



Rys. 7. Kształtowanie się i rozwój rys belki C wraz z podanymi wartościami obciążenia w kN

Fig. 7. The measurements of cracks of beams C with load level

Na przedstawionych rysunkach widać zarysowanie, przykładowych badanych belek, w strefie czystego zginania. Porównano belki z wykorzystaniem kruszywa z recyklingu z belką z kruszywem naturalnym. Z tej analizy wynika, że stopień nasycenia rys belki A w porównaniu z belką C nie różni się znacząco od siebie, co oznacza że stosowanie kruszywa odpadowego nie wpływa niekorzystnie na stan graniczny użytkowalności.

Nośność na zginanie

Badania wszystkich serii belek wykonywano aż do zniszczenia. W tabeli 3 przedstawiono wyniki analizy wytrzymałościowej badanych belek.

Tabela 3. Wyniki badań nośności na zginanie

Table 3. The carrying capacity values

Serie belek	Siła niszcząca $F [kN]$	Moment niszczący $M_{sd} [kNm]$
A	40	6,80
B	41	6,97
C	39	6,63
D	41	6,97

Nośność belek wykonanych z betonu z wykorzystaniem kruszyw naturalnych w porównaniu z belkami z zastosowaniem kruszywa wtórnego nie różni się znacznie wartością. Z tego wynika, że gospodarowanie odpadami jest korzystne dla środowiska jak i nośności elementów.

3. Podsumowanie i wnioski

Przemysł budowlany generuje znaczne ilości odpadów nie tylko podczas rozbiórki obiektów, lecz również w czasie ich eksploatacji (modernizacje, remonty). Dyrektywa Unii Europejskiej [14] to ogromny postęp odnośnie zasad w przypadku gospodarowania zasobami materiałowymi oraz odpadami budowlanymi.

Analiza wyników badań próbek betonowych betonów z kruszywem naturalnym w porównaniu z próbkami betonów z kruszywem z recyklingu (przy zastąpieniu tej samej ilości kruszywa naturalnego kruszywem

wtórny) w zakresie wytrzymałości na ściskanie, rozciąganie przy zginaniu pozwala stwierdzić, że brak jest znaczących różnic w ich wartości.

Elementy kostkowe przy całkowitym zastąpieniu kruszywa grubego kruszywem z recyklingu wykazują od 2 do 5,5% spadku wytrzymałości na ściskanie w porównaniu do analogicznych próbek wykonanych z użyciem kruszywa naturalnego, w przypadku wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu jest to od 11 do 25%.

Zastąpienie kruszywa bazaltowego kruszywem z recyklingu nie wpłynęło negatywnie na nośność i odkształcalność belek modelowych, wielkości te nie różniły się znacząco od siebie (były prawie równe). Stosowanie kruszywa wtórnego poprzez ponowne gospodarowanie odpadami budowlanymi ma ogromny wpływ na ochronę środowiska i zdrowia.

Recykling to nie tylko dziedzina zrównoważonego rozwoju, ale także oszczędności i ekologia.

*Badania finansowane z projektu badawczo-rozwojowego
NCBiRNR04-0012-10/2010 realizowanego na Wydziale Budownictwa
i Inżynierii Środowiska Politechniki Białostockiej.*

Literatura

1. **Adamczyk J., Dylewski R.:** *Recykling odpadów budowlanych w kontekście budownictwa zrównoważonego.* W: Problemy ekorozwoju, Zielona Góra, 2010.
2. **Ajdukiewicz A., Kliszczewicz A.:** *Utilization of recycled aggregates in HS/HPC.* 5th International Symposium on Utilization of High Strength / High Performance Concrete, Vol. 2, Sandefjord, Norway, 973–980 (1999).
3. **Boltryk M., Pawluczuk E.:** *Metoda ustalania wody efektywnej w mieszance betonowej na kruszywie z recyklingu.* W: Zagadnienia materiałowo-technologiczne infrastruktury i budownictwa. Material and technology issues of infrastructure and construction. Praca zbiorowa pod redakcją A. Łapko, M. Broniewicza, J. A. Prusiel, Wydawnictwo Politechniki Białostockiej, Białystok, 2008.
4. **Jasiczak J., Mikołajczak P.:** *Technologia betonu modyfikowanego domieszkami i dodatkami.* Politechnika Poznańska, Poznań, 2003.
5. **Jasiczak J., Wdowska A., Rudnicki T.:** *Betony ultra wysokowartościowe: właściwości, technologie, zastosowania.* Polski Cement, Kraków, 2008.
6. **Kaszyńska M.:** *BWW: możliwości, cechy, zastosowania.* W: XVII Ogólnopolska Konferencja Warsztat Pracy Projektanta Konstrukcji, Ustroń, 2012.

7. **Łapko A., Jensen B.J.:** *Podstawy projektowania i algorytmy obliczeń konstrukcji żelbetowych*. Arkady, Warszawa, 2005.
8. **Pawłowski A.:** *Teoretyczne uwarunkowania rozwoju zrównoważonego*. Rocznik Ochrona Środowiska (Annual Set the Environment Protection), 11, (2009).
9. **Pawłowski L.:** *Rola monitoringu środowiska w realizacji zrównoważonego rozwoju*. Rocznik Ochrona Środowiska (Annual Set of Environment Protection), 13, (2011).
10. **Rangan B.V.:** *High-performance and Durability through Design*. International Workshop on HPC, SP-159, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1996.
11. **Zajac B., Gołębiowska I.:** *Nowoczesne metody recyklingu*. Inżynieria I Aparatura Chemiczna, nr 5 (2010).
12. PN-EN 12390-3: *Badania betonu. Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań*, PKN, Warszawa 2001.
13. PN-EN 12390-5: *Badania betonu. Wytrzymałość na zginanie próbek do badania*, PKN, Warszawa 2001.
14. Dyrektywa Unii Europejskiej 2008/98/WE, Dz.U. L 312 z22.11.2008, s. 3.

Concrete with Recycled HSC/HPC Aggregates in Sustainable Development

Abstract

The paper summarizes the experimental analysis of flexural capacity and deformability of structural concrete beam prepared with the use of recycled aggregates from high-strength concrete and high performance concrete. The reinforced recycled concrete beams used in the tests were prepared in modelling scale with the rectangular-section of 80 x 120 mm and the effective span of 1100 mm.

Replacement of basalt aggregates with recycling ones has not affected the carrying capacity and flexibility of model beams. Obtained results were not significantly different for each type of aggregate (they were almost equal). The use of secondary aggregates by construction waste management has a huge impact on environmental and health protection.

Recycling is not only in the sphere of sustainable development, but also cost saving and ecology.