

Beton na kruszywie z recyklingu w belkowych elementach konstrukcyjnych

Concrete on recycled aggregate in beam structural elements

dr inż. Barbara Sadowska-Buraczewska (ORCID: 0000-0002-1238-1272), inż. Anna Świerzbina, Politechnika Białostocka

DOI: 10.5604/01.3001.0054.4893

Streszczenie: W pracy przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych żelbetonowych belek o przekroju prostokątnym o wymiarach 1100x120x80 mm wykonanych z betonów z wykorzystaniem kruszywa z recyklingu oraz belek kontrolnych jednorodnych wykonanych z użyciem kruszywa naturalnego. Badania w zakresie doraźnym obejmują ugięcia, odkształcenia, nośność i rysy belek z zastosowaniem kruszywa z recyklingu. Ponadto w pracy przedstawiono badania materiałowe zastosowanych betonów.

Słowa kluczowe: kruszywo z recyklingu, badania doraźne, belki żelbetowe.

Abstract: The paper presents the results of experimental tests of reinforced concrete beams with a rectangular cross-section with dimensions of 1100x120x80 mm, made of concrete with the use of recycled coarse aggregate, and homogeneous control beams made of natural aggregate. Ad hoc tests include deflections, deformations, load capacity and cracks of beams using recycled aggregate. In addition, the paper presents material tests of the concretes used.

Keywords: recycled aggregate, short term loads, reinforced concrete beams.

1. Wprowadzenie

Gospodarka i przemysł to dwie dziedziny życia stale rozwijające się i mające znaczny wpływ na życie człowieka. Już od roku 1987, kiedy to ONZ ogłosił postulat, który można przetłumaczyć jako: „Rozwój mający na celu zaspokojenie aspiracji rozwojowych obecnego pokolenia z zachowaniem możliwości zaspokojenia tych samych aspiracji przez przyszłe pokolenia”, zaczęła wzrastać świadomość ekologiczno-ekonomiczna. Ważne jest właściwe eksploataowanie konstrukcji. Jednak najważniejszym ciągle etapem jest rozwój budownictwa w kierunku E^3 , czyli ekologicznym, ekonomicznym i energetycznym [2, 6].

Od stycznia 2023 roku, w Polsce, miał być wprowadzony obowiązek segregacji odpadów budowlanych i rozbiórkowych, jednak jego wejście zostało przesunięte na 1 stycznia 2025 r. Nowelizacja ustawy wprowadzi segregację na różne frakcje, w tym: drewno, metal, szkło, tworzywa sztuczne, gips, odpady mineralne: beton, cegły, materiały ceramiczne, kamienie. W większości krajów wysoko rozwiniętych jest to od lat powszechne. Polacy próbując dorównać tym państwom, nieustannie prowadzą badania dotyczące możliwości recyklingu odpadów. Zakres oraz innowacyjność badań z roku na rok wzrasta.

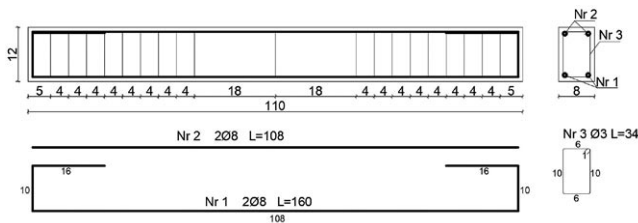
Duży problem stanowi ponowne użycie betonu, jednakże wraz ze wzrostem rozwoju technologii powstają nowe rozwiązania. Obecnie istnieje kilka metod recyklingu, zaczynając od najprostszych polegających jedynie na oddzieleniu stali z żelbetu i przekruszeniu materiału, kończąc na metodach pozwalających odseparować poszczególne składniki.

Recykling odpadów betonowych jest ważnym aspektem w dzisiejszych czasach, zarówno ze względów środowiskowych, ale także ekonomicznych. Duże ilości gruzu zapewnione przez wszelkiego rodzaju rozbiórki konstrukcji betonowych w różnych miejscach przyczyniają się do tego, że kruszywo z recyklingu będzie bardziej opłacalnym kruszywem pod względem logistycznym, ponieważ jest szeroko dostępne.

Jedną z prób kwalifikacji kruszywa z recyklingu uwzględnia ich przydatność do różnego rodzaju zastosowań w zależności od materiału wyjściowego. Wyróżnia się w ten sposób trzy klasy: klasa I – materiał będący pełnowartościowym kruszywem, można stosować do betonów konstrukcyjnych, klasa II – materiał do betonów niekonstrukcyjnych, używany jako dodatek do kruszyw naturalnych, klasa III – materiał na podłoża nawierzchni i posadzek. W krajach Unii Europejskiej prowadzone są prace nad ujednoczeniem wytycznych co do właściwości oraz obszaru zastosowania kruszywa z recyklingu. Według wytycznych RILEM kruszywo z recyklingu można podzielić na trzy kategorie:

- RCAC I – materiał pochodzący z elementów murowych,
- RCAC II – materiał pochodzący z elementów betonowych,
- RCAC III – materiał stanowiący mieszaninę co najmniej 80% kruszywa naturalnego oraz maksymalnie 20% kruszywa z recyklingu [3].

Zalecenia te opierają się głównie na założeniu, że kruszywo recyklingowe nie może zawierać substancji opóźniających czas wiązania betonu o więcej niż 15% w porównaniu z czasem wiązania odpowiadającego mu betonu kontrolnego [1].



Rys. 1. Schemat zbrojenia belek żelbetowych [5]

Wykorzystując gruz budowlany jako zamiennik kruszywa naturalnego, ograniczamy zużycie cennego surowca, minimalizując tym negatywny wpływ na środowisko [4]. Autorzy pracy proponują wykorzystanie kruszywa z recyklingu w żelbetowych belkowych elementach konstrukcji, zastępując kruszywo naturalne kruszywem z recyklingu.

2. Przygotowanie próbek i elementów badawczych

Badania miały na celu ocenę pracy belkowych elementów żelbetowych w zakresie doraźnym z wykorzystaniem części kruszywa z recyklingu w betonie. Badania podzielono na trzy etapy:

- Etap I. Uzyskanie kruszywa wtórnego poprzez pokruszenie gruzu betonowego;
- Etap II. Wykonanie oraz analiza wytrzymałościowa próbek badawczych: kostek 10x10x10 cm, pryzm 40x10x10 cm oraz walców $\varnothing 15$ wysokości 30 cm;
- Etap III. Badania doraźne belek żelbetowych o przekroju prostokątnym o wymiarach 110x12x8 cm oraz analiza wyników.

Tabela 1. Receptura stosowana do wykonania próbek z kruszywem z recyklingu [5]

Składnik		[kg/m ³]
Cement CEM I 52,5 R		350
Kruszywo grube – gruz budowlany	4,0–8,0	828,1
Kruszywo grube – naturalne	2,0–4,0	354,9
Kruszywo drobne - piasek	0–2,0	637
Woda		178 [l/m ³]

Tabela 2. Receptura stosowana do wykonania próbek na kruszywie naturalnym [5]

Składnik		[kg/m ³]
Cement CEM I 52,5 R		350
Kruszywo grube – gruz budowlany	4,0–8,0	828
Kruszywo grube – naturalne	2,0–4,0	355
Kruszywo drobne – piasek	0–2,0	637
Woda		178 [l/m ³]

Zbrojenie belek wykonano zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 1. Wykonane jest ze stali BSt 500S spełniające warunki Aprobataj Technicznej [12]. Strzemiona przewidziano jako pręty gładkie $\varnothing 3$.

3. Badania eksperymentalne

Przeprowadzone badania miały na celu określenie wpływu zastąpienia kruszywa naturalnego grubego kruszywem wtórnym oraz ocenę przydatności kruszywa z recyklingu betonu do stosowania w elementach konstrukcyjnych. Badania z etapu III wykonano w dwóch krokach.

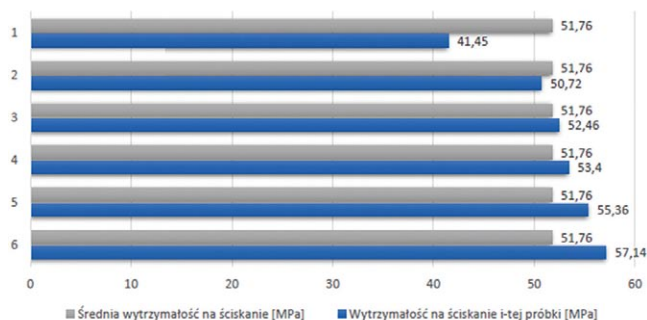
Krok I obejmował wykonanie oraz analizę wytrzymałościową próbek badawczych m.in.: wytrzymałości na ściskanie próbek kostkowych 10x10x10 cm, pryzm 10x10x40 cm oraz próbek walcowych o średnicy 15 cm i wysokości 30 cm. W etapie I uzyskano kruszywo wtórne. Badania przeprowadzono zgodnie z normami PN-EN 12390-1 [7], PN-EN 12390-2 [9], PN-EN 12390-3 [10] oraz PN-EN-12390-5 [11]. Badania wykonano na maszynie wytrzymałościowej firmy Controls znajdującej się na wyposażeniu Katedry Konstrukcji Budowlanych Wydziału Budownictwa i Nauk o Środowisku Politechniki Białostockiej. Badania przeprowadzono na sześciu próbkach kostkowych, trzech pryzmach oraz trzech walcach. Graficzne porównanie średniej wytrzymałości na ściskanie zbadanej na 6 próbkach kostkowych z wytrzymałościami poszczególnych próbek przedstawiono na rysunku 2.

Średnia wytrzymałość na ściskanie została obliczona na podstawie wytrzymałości sześciu sześciennych próbek.

Badania wytrzymałościowe betonów z kruszywem z recyklingu i kruszywem naturalnym wykonano dla:

- 6 próbek sześciennych, otrzymując: średnią wytrzymałość na ściskanie dla betonu z użyciem kruszywa z recyklingu równą 51,76 MPa (odchylenie standardowe 1,12; współczynnik zmienności 10,67%),
- 3 próbek prostopadłościennych, otrzymując średnią wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu dla betonu z użyciem kruszywa z recyklingu równą 2,93 MPa (odchylenie standardowe 0,84; współczynnik zmienności 9,55%),
- 3 próbek walcowych, otrzymując średni moduł sprężystości równy 30,13 GPa (odchylenie standardowe 0,18; współczynnik zmienności 1,79%).

Dla betonu zwykłego na bazie kruszywa naturalnego otrzymano: średnią wytrzymałość na ściskanie 43,2 MPa (odchylenie standardowe 1,26; współczynnik zmienności 3,73%), 3,26 MPa (odchylenie standardowe 0,28; współczynnik



Rys. 2. Graficzne porównanie średniej wytrzymałości na ściskanie z wytrzymałościami poszczególnych próbek sześciennych [5]

Rys. 3. Stend badawczy z belką przygotowaną do badań [5]



Rys. 4. Schemat obciążenia elementów badawczych

zmienności 3,58%), 32,3 MPa (odchylenie standardowe 0,20; współczynnik zmienności 1,93%).

Krok II obejmował badania doraźne trzech belek żelbetonowych o przekroju prostokątnym w skali półtechnicznej o wymiarach 110x12x8 cm oraz analizę otrzymanych wyników. Badania obejmowały m.in: pomiar odkształceń, pomiar ugięć, obserwację zarysowania, nośność. Przeprowadzone zostały na stendzie badawczym (rys. 3) Katedry Konstrukcji Budowlanych Wydziału Budownictwa i Nauk o Środowisku Politechniki Białostockiej.

Belka swobodnie podparta, obciążona równymi siłami skupionymi wynoszącymi $F/2$. Schemat początkowy obciążenia przedstawiono na rysunku 4.

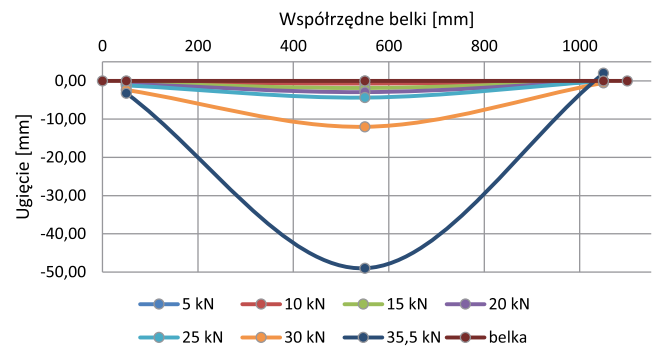
Pomiary ugięć belek żelbetonowych dokonywane były za pomocą dwóch czujników zegarowych oraz czujnika elektrycznego o dokładności pomiaru 0,01 mm. Średnie wartości ugięć przedstawiono na rysunku 5.

Odształcenia betonu mierzone były za pomocą ekstensometru Demec'a (rys. 2) o bazie pomiarowej 15 cm. Pomiary dokonywano po wdrożeniu siły o 5 kN na trzech poziomach. Odczyty odkształceń betonu z ekstensometru na wysokości przekroju belki przedstawiono dla wybranych poziomów siły na rysunkach 6, 7 i 8.

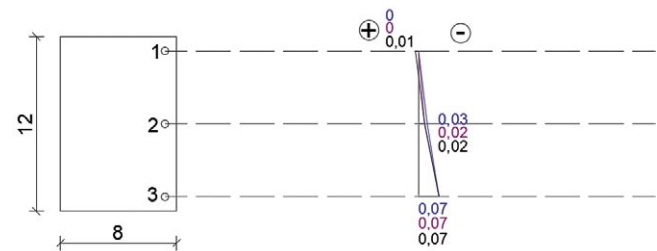
Obserwacja rozwoju rys

Zarysowanie żelbetonowych elementów konstrukcji jest zjawiskiem bardzo złożonym z uwagi na występowanie tu wielu czynników. Zarysowanie elementów w zaawansowanym stanie obciążenia może być sygnałem wyczerpania nośności. Pojawienie się rys, ich zasięg i szerokość pozwalają w dużym stopniu kontrolować stopień wyłączenia elementu. Pomiar szerokości rys i obraz zarysowania są ważnymi elementami oceny eksploatowanej konstrukcji pod względem bezpieczeństwa. Do obserwacji rys w badanych belkach wykorzystano mikroskop Brinella. W trakcie badania elementu żelbetonowego zaznaczano przebieg rys i zakres ich penetracji. Rozwój rys notowano po wdrożeniu siły o 5 kN. Przebieg zarysowania obserwowano przy wybranych poziomach obciążenia. Rozwój zarysowania obrazują rysunki 9 i 10.

Wybrane żelbetonowe belki po zniszczeniu z widocznym zarysowaniem pokazano na rysunku 9 i 10. W belce z użyciem kruszywa z recyklingu (rys. 8) widoczne jest większe nasilenie rys w strefie stałego momentu niż w belce z użyciem kruszywa naturalnego (rys. 9). Pierwsza rysa w belce z kruszywem z recyklingu pojawiła się przy sile 5 kN, a w belce z kruszywem



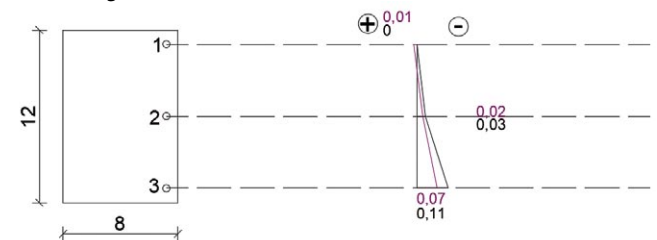
Rys. 5. Średnie wartości ugięć badanych belek z użyciem kruszywa z recyklingu [5]



Rys. 6. Odształcenia betonu na wysokości przekroju dla 15 kN (czarna linia i fioletowa – belka z użyciem kruszywa z recyklingu, a niebieska linia belka jednorodna z betonu z użyciem kruszywa naturalnego) [5]



Rys. 7. Odształcenia betonu na wysokości przekroju dla 20 kN (czarna linia i fioletowa – belka z użyciem kruszywa z recyklingu, a niebieska linia belka jednorodna z betonu z użyciem kruszywa naturalnego) [5]



Rys. 8. Odształcenia betonu na wysokości przekroju dla 25 kN (czarna linia i fioletowa – belka z użyciem kruszywa z recyklingu, a niebieska linia belka jednorodna z betonu z użyciem kruszywa naturalnego) [5]



Rys. 9. Rozwój rys w wybranej badanej belce z użyciem kruszywa z recyklingu [5]



Rys. 10. Rozwój rys w wybranej badanej belce z użyciem kruszywa naturalnego [5]

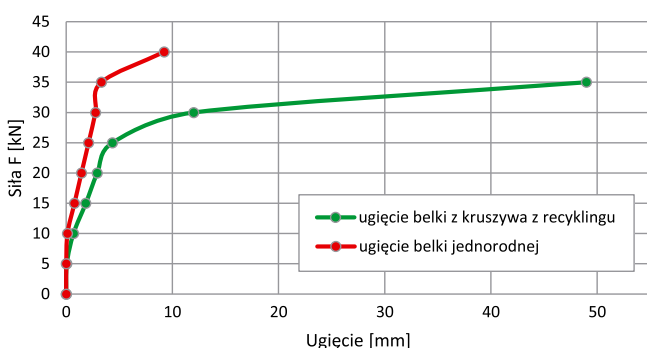
naturalnym przy sile 10 kN. Średnia szerokość rys przy np. obciążeniu 15 kN wyniosła odpowiednio: 0,025 i 0,010.

Nośność na zginanie

Badania wytrzymałościowe prowadzone były do momentu zniszczenia. Jako zniszczenie określa się utworzenie przegubu plastycznego, czyli uszkodzenie betonu w strefie ściskanej i uplastycznienie stali, co można zaobserwować jako nagły przyrost ilości rys oraz gwałtowny trzask. Siła niszcząca została zanotowana jako wytrzymałość belek na zginanie i przedstawiona w tabeli 3 wraz z momentem zginającym. Nośność na zginanie dla belek z użyciem kruszywa z recyklingu była wyższa w porównaniu do belek jednorodnych wykonanych z betonu z użyciem kruszywa naturalnego.

4. Podsumowanie

Wzrost populacji na świecie niesie za sobą wzrost ilości produkowanych odpadów. Ilości odpadów z roku na rok są coraz większe, a znaczną ich część stanowią odpady budowlane. Budynki, których nie można dalej eksploatować, są wyburzane, przez co tworzą się bardzo duże ilości gruzu budowlanego. Gruz jest odpadem, który można wykorzystać ponownie. Coraz większa liczba ludności jest równoznaczna z coraz



Rys. 11. Porównanie wartości ugięcia belki z kruszywa z recyklingu z ugięciem belki jednorodnej [5]

Tabela 3. Średnia siła niszcząca i wartość momentu zginającego

Oznaczenie belki	Średnia siła niszcząca F [kN]	Moment zginający M_{Ed} [kNm]
Belka jednorodna	22,303	7,36
Belka z kruszywem z recyklingu	34,750	11,47

większym zapotrzebowaniem na surowce naturalne, które są bardzo cenne, jednakże jest ich coraz mniej. Stosowanie gruzu betonowego jako kruszywa wtórnego może ograniczyć wydobycie nieodnawialnych zasobów naturalnych.

Zaproponowano zastosowanie kruszywa z recyklingu jako zamiennika kruszywa grubego do produkcji betonu zwykłego konstrukcyjnego. Zakres pracy, charakter badań oraz ilość elementów badawczych powodują, iż konieczna jest weryfikacja otrzymanych wyników. Jednakże zawartość pracy jest niewielkim elementem mogącym przybliżyć świadomość oraz wiedzę o kruszywach wtórnych.

Wyniki w zakresie ugięć i nośności dla belek naturalnych były wyższe o 8–10% w porównaniu z próbkami wykonanymi z użyciem kruszywa z recyklingu.

Przeprowadzone badania pokazały, iż zastosowanie kruszywa wtórnego jako zamiennik pełnowartościowego kruszywa grubego w konstrukcjach betonowych jest możliwe. Pomimo różnic beton na bazie kruszyw wtórnych może zostać użyty jako beton konstrukcyjny, jednak należy wziąć pod uwagę zmianę niektórych parametrów i uwzględnienie tego podczas projektowania mieszanki. Podczas projektowania konstrukcji z użyciem kruszywa z recyklingu należy zachować większy margines bezpieczeństwa niż przy konstrukcjach z kruszywem naturalnym.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Bołtryk M., Pawluczuk E., Ocena przydatności kruszywa wtórnego, Zeszyty naukowe Politechniki Białostockiej, Budownictwo – Zeszyt 31/2007, str. 75–86
- [2] Brandt A. M., Trwałość obiektów inżynierskich a zrównoważony rozwój, [w:] Problemy naukowo-badawcze budownictwa: praca zbiorowa, T.4. Zrównoważony rozwój w budownictwie, Łapko A. (red.), Broniewicz M. (red.), Prusiel J. A. (red.), Wydawnictwo Politechniki Białostockiej, Białystok, 2008, str. 169–183
- [3] Golda A., Król A., Drugie życie betonu, Budownictwo-Technologie-Architektura, październik-grudzień 2006, str. 44–47
- [4] Sadowska-Buraczewska B., Kruszywa z recyklingu w budownictwie, Inżynieria Ekologiczna 40, 2014, str. 74–81
- [5] Świerzbina A., Badania belek żelbetonowych o przekroju prostokątnym z użyciem kruszywa z recyklingu pod obciążeniem doraźnym, praca inżynierska, Politechnika Białostocka, 2023
- [6] Zając B., Gołębiowska I., Ewolucja technologii recyklingu betonu, Inżynieria i Aparatura Chemiczna 49, 5/2010, str. 134–135
- [7] PN-EN 12390-1: Badania betonu. Kształt, wymiary i inne wymagania dotyczące próbek do badania i form., PKN, Warszawa, 2001
- [8] PN-EN 12390-13:2021-12: Badania betonu – Część 13: Wyznaczanie siecznego modułu sprężystości przy ściskaniu, PKN, Warszawa, 2021
- [9] PN-EN 12390-2: Badania betonu, Wykonywanie i pielęgnowanie próbek do badań wytrzymałościowych, PKN, Warszawa, 2001
- [10] PN-EN 12390-3: Badania betonu. Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań, PKN, Warszawa, 2001
- [11] PN-EN 12390-5: Badania betonu. Wytrzymałość na zginanie próbek do badań, PKN, Warszawa, 2001
- [12] Aprobata Techniczna ITB AT-15-4648/2006: Stalowe pręty żebrowane BSt 500S do zbrojenia betonu, Warszawa, 5 grudnia 2006