

ROBERT GRYGO\*  
ANDRZEJ ŁAPKO\*\*

## Badania\*\*\* nad zastosowaniem betonów recyklingowych w belkach żelbetowych według nowej koncepcji

**Słowa kluczowe:** elementy zginane, recykling betonu, BWW, wzmacnianie konstrukcji, prefabrykacja.

W artykule przedstawiono koncepcję konstruowania nośnych żelbetowych elementów belkowych nowej generacji, formowanych poprzez zespolenie w strefie rozciąganej warstwy betonu recyklingowego z odcinkową warstwą w postaci wkładki żelbetowej, wykonanej z betonu wysokiej wytrzymałości (BWW) w strefie ściskanej. Analiza przeprowadzonych badań wykazała, że w wyniku połączenia warstw złożonych z dwu betonów o celowo zróżnicowanych właściwościach wytrzymałościowych i odkształceniowych można uzyskać element konstrukcyjny o parametrach znacznie korzystniejszych w porównaniu z tradycyjnymi, wykonanymi w całości z betonu recyklingowego lub na kruszywie naturalnym.

### 1. Wprowadzenie

Wobec narastającej ilości wytwarzanych odpadów budowlanych poszukuje się możliwości przetworzenia i ponownego ich zagospodarowania. Na rok 2014, biorąc pod uwagę inwestycje drogowe i budowlane w Krajowym planie gospodarki odpadami [1], prognozowany jest znaczący przyrost odpadów budowlanych. W dużych miastach prowadzone są liczne wyburzenia starych budynków mieszkalnych i przemysłowych w związku z modernizacją tras komunikacyjnych czy zmianą zagospodarowania przestrzennego. Przewiduje się, że po okresie stagnacji i spadku produkcji budowlanej spowodowanych kryzysem, nastąpi wzrost budownictwa, co wpłynie na wytwarzanie takich materiałów (tab. 1).

---

\* Mgr inż., Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Białostocka.

\*\* Prof. dr hab. inż., Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Białostocka.

\*\*\* Badania prowadzone w ramach grantu badawczo-rozwojowego finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

Tabela 1

## Stan obecny i prognoza wytwarzania odpadów

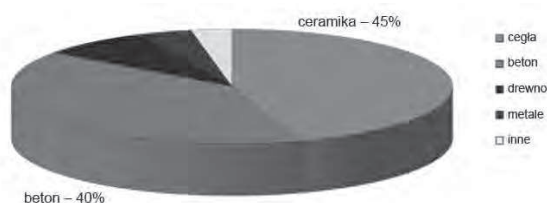
Odpady \ Rok	2011	2014	2015	2016	2018	2019	2022
Pochodzące z budowy, remontów i demontażu obiektów budowlanych [tys. ton]	3 680,0	4 260,0	4 400,0	4 520,0	4 890,0	5 060,0	5 600,0

Źródło: Opracowanie własne.

Szacuje się także, że do 2020 r. poziom przygotowania do ponownego użycia, recyklingu oraz innych form odzysku materiałów budowlanych i rozbiórkowych powinien wynosić, wagowo, minimum 70%. Typowy procentowy podział odpadów budowlanych w UE przedstawiono na rycinie 1. W odpadach budowlanych można wyróżnić:

- gruz budowlany – z konstrukcji betonowych i żelbetowych, a także ceglany;
- stal konstrukcyjna i zbrojeniowa, inne metale;
- drewno;
- materiały wykończeniowe – szkło, materiały izolacyjne, tworzywa sztuczne;
- ziemia z wykopów;
- gruz drogowy.

W ogólnej masie odpadów budowlanych rośnie udział gruzu betonowego, co ma związek z powiększającą się liczbą obiektów budowlanych wykonanych z betonu podlegających rozbiórce. W centrach dużych miast obiekty z lat 50. i 60. ubiegłego



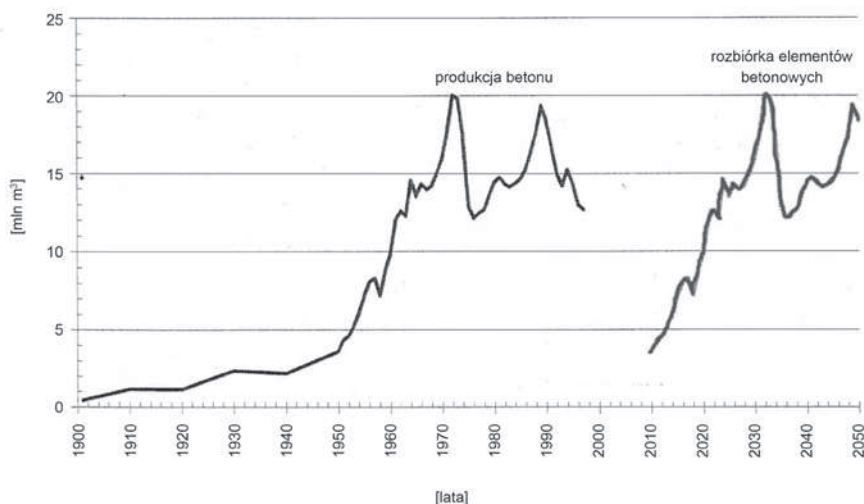
Źródło: Opracowanie własne.

Ryc. 1. Podział odpadów budowlanych w UE

wieku położone są w bardzo atrakcyjnych lokalizacjach. Często rozbierane są po to, by na ich miejscu wznieść obiekty większe i architektonicznie okazałe, czego przykładem może być budowa najwyższego budynku w Polsce – wieżowca Sky Tower we Wrocławiu, w miejscu in-

nego wysokościowca, wykonanego w technologii monolitycznej. C. Hoffmann i F. Jakobs [2] prognozują dla UE po roku 2010 lawinowy wzrost ilości rozbiórkowych elementów betonowych (ryc. 2). W ogólnej liczbie odpadów komunalnych pochodzących z dużych aglomeracji, liczących około 500 tys. mieszkańców, typowy gruz budowlany stanowi około 18% wszystkich odpadów [3].

Badania betonów wykonanych z wykorzystaniem kruszyw wtórnych prowadzone są od lat w wielu krajach. Japońskie Stowarzyszenie Wykonawców Budowlanych opublikowało w 1977 r. propozycję normy budowlanej „Standardy wykorzy-



Ryc. 2. Ilość wyprodukowanego betonu oraz szacunkowa ilości elementów betonowych poddanych rozbiórce według Hoffmann [2]

stania kruszyw z recyklingu oraz betonów na kruszywach z recyklingu” [4]. W roku 1984 w byłym Związku Radzieckim wprowadzono normę na użycie betonów z recyklingu, regulującą stosowanie kruszywa grubego z recyklingu do betonów konstrukcyjnych. W Rotterdamie zorganizowano w 1985 r. pierwszą międzynarodową konferencję poświęconą problematyce wykonawstwa betonów na kruszywach wtórnych. Jednak dopiero w latach 90. ubiegłego wieku zwrócono większą uwagę na możliwości wykorzystania betonów recyklingowych. Kraje rozwinięte zaczęły kłaść większy nacisk na poszanowanie energii, jej odnawialne źródła oraz recykling odpadów. W roku 1994 w Osnabrück wybudowano pierwszy w Niemczech budynek mieszkalny z betonu recyklingowego (ryc. 3). Na przełomie lat 1993/1994 w Szwajcarii znormalizowano po raz pierwszy recykling odpadów budowlanych.

W Holandii od 1996 r. obowiązuje instrukcja zawierająca przepisy dotyczące stosowania materiałów budowlanych na bazie recyklingu. Na przykład w holenderskich normach znalazł się zapis o możliwości zastąpienia 20% kruszywa grubego kruszywem z recyklingu, bez konieczności zmian parametrów obliczeń zarówno materiałowych, jak i konstrukcyjnych. Dania w 1990 r.



Ryc. 3. Niemiecka Federalna Fundacja Ochrony Środowiska (DBU). Osnabrück – pierwszy w Niemczech budynek wykonany z betonów na kruszywach z recyklingu [4]

opublikowała dyrektywę w sprawie kruszywa pochodzącego z recyklingu. Kruszywa wtórne można stosować do betonów zbrojonych, jak i niezbrojonych do wytrzymałości na ściskanie wynoszącej 40MPa. W Wielkiej Brytanii od 1991 r. stosuje się kruszywo z recyklingu do wytwarzania elementów konstrukcyjnych o niedużej wytrzymałości.

## 2. Właściwości betonów na kruszywach z recyklingu

Analiza wpływu kruszywa z recyklingu na właściwości fizyczne mieszanek betonowych [5–6] wykazała, że głównym problemem jest wysoka nasiąkliwość kruszyw z recyklingu. Mieszanki z kruszywem z recyklingu w stanie suchym charakteryzują się bardzo dużym spadkiem konsystencji w porównaniu do mieszanek z kruszywem naturalnym. Na pogorszenie się konsystencji zasadniczy wpływ ma ilość kamienia cementowego otaczającego kruszywo pierwotne. Ilość zaprawy otaczającej kruszywo może być różna i sięgać nawet 50% jego objętości. Kamień cementowy jako najbardziej porowaty składnik kruszywa odpowiada w największym stopniu za absorpcję składników ciekłych mieszanki. Z tego powodu niektóre wytyczne [4–5] ograniczają lub nawet zdecydowanie odradzają stosowanie frakcji drobnych wykonanych z kruszywa recyklingowego.

Pogorszenie się prawie wszystkich parametrów obserwujemy również w przypadku właściwości mechanicznych. Analizując publikacje krajowe, jak i zagraniczne [6–11], można stwierdzić także dużą rozbieżność w wynikach badań. W porównaniu do betonów na kruszywie naturalnym wytrzymałość na ściskanie betonów z recyklingu spada od 8 do nawet 40%. Mniejsza o 10–20% jest także wytrzymałość na rozciąganie. Moduł sprężystości betonu okazuje się mniejszy o 10–40%, natomiast skurcz betonów na kruszywie wtórnym jest prawie dwukrotnie większy. Znacząca zmienność parametrów spowodowana jest użyciem do badań zróżnicowanych kruszyw wtórnych, uzyskanych z materiałów rozbiórkowych o różnej wytrzymałości pierwotnej, wahającej się od 5 do 40MPa. Zróżnicowanie wyników badań rodzi obawy projektantów, wykonawców oraz producentów mieszanek przed stosowaniem takich kruszyw do betonów. Innym problemem jest brak krajowych wytycznych i norm projektowych, co w skuteczny sposób zniechęca zainteresowane podmioty, mające na uwadze zastosowanie betonów z recyklingu w konstrukcjach nośnych.

## 3. Badania własne nad zastosowaniem kruszywa z recyklingu w konstrukcjach nośnych

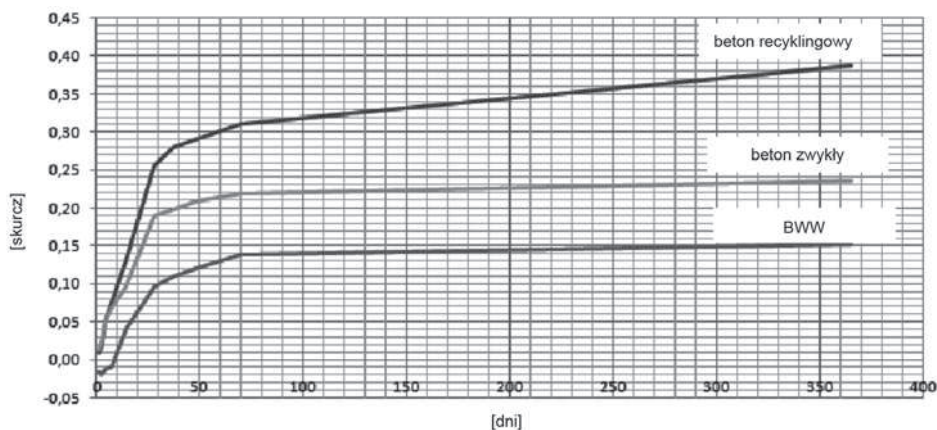
Analizując własne wyniki badań opisanych w pracach [6, 12–14], zauważono różnice w zachowaniu się belek z betonów z recyklingu, w porównaniu do wyników badań belek na kruszywie naturalnym. Belki na kruszywie wtórnym wcześniej ulegały zarysowaniu oraz wykazywały większe ugięcia przy porównywalnych

obciążeniach. W zależności od stopnia zbrojenia belki z recyklingu w porównaniu do belek referencyjnych z betonów na kruszywach naturalnych wykazywały mniejszą od 5 do 7% nośność na zginanie. Nie zaobserwowano natomiast różnic w modelu zniszczenia – wszystkie belki, zgodnie z oczekiwaniem, niszczyły się przez uplastycznienie zbrojenia w strefie rozciąganej. Wyniki badań belek żelbetowych w skali półtechnicznej pod długotrwałym obciążeniem wykazały, że ugięcia długotrwałe belek wykonanych na kruszywie wtórnym, badane w ciągu 100 dni, są większe o około 20% niż w belce na kruszywie naturalnym. Opóźnione odkształcenia średnie w strefie ściskanej belki z recyklingu są większe o 46% od odkształceń belki na kruszywie naturalnym, natomiast średnie odkształcenia w strefie rozciąganej są porównywalne.

Badania te wykazały możliwość zagospodarowania odpadów betonowych do powtórnego użycia jako kruszywa recyklingowego w konstrukcjach betonowych, przy czym należy jednak uwzględnić pogorszone właściwości takich betonów, głównie w zakresie zwiększonej odkształcalności doraźnej i reologicznej. Badania nie wykazały natomiast wyraźnego obniżenia nośności na zginanie, w porównaniu do nośności belek wykonanych na kruszywach naturalnych.

#### **4. Koncepcja wytwarzania żelbetowych belek na kruszywach z recyklingu wzmocnionych wkładkami z BWW**

Nośność i sztywność na zginanie nośnych elementów żelbetowych wykonanych z betonów recyklingowych wynika głównie z nośności strefy ściskanej betonu, zależnej od obarczonych niepewnością, możliwych do wystąpienia rozrzutów wytrzymałości betonu na ściskanie. Ponieważ w obszarach zarysowanych w stadiach zaawansowanych obciążeń (II faza pracy) wysokość strefy ściskanej jest niewielka (stanowi od kilku do kilkunastu procent całkowitej wysokości przekroju), można tak ukształtować konstrukcyjnie żelbetowy element zginany, aby w strefie jego największego wyężenia umieścić wkładkę z betonu wysokowartościowego (BWW), o wysokiej wytrzymałości i niskich parametrach skurczu i pęczania. Dodatkowym czynnikiem zwiększającym efektywność takiego rozwiązania są narastające w czasie różnice skurczu pomiędzy warstwą wzmacniającą z BWW, o zdecydowanie mniejszych długotrwałych odkształceniach skurczowych, i warstwą główną elementu z betonu recyklingowego, o większych odkształceniach skurczowych. Efekt ten w elemencie zespolonym zbudowanym na podstawie takiej koncepcji powoduje w nim częściową redukcję naprężeń ściskających, w porównaniu do konstrukcji elementu z betonu jednorodnego. Wykres przedstawiający wynik badań skurczu betonu recyklingowego, zwykłego i BWW pokazano na rycinie 4.

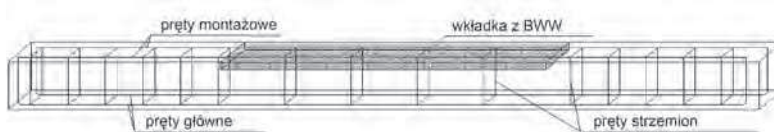


Źródło: Badania własne.

Ryc. 4. Skurcz betonów różnych typów w funkcji czasu

## 5. Badania modelowych belek żelbetowych nowej koncepcji

Uwzględniając wymienione przesłanki naukowe i rezultaty wcześniejszych badań własnych [15–16], przeprowadzono serię badań modelowych belek żelbetowych w zakresie elementów zginanych, wykonanych z betonu recyklingowego ze wzmocnieniem w postaci wkładki wykonanej z BWW, umieszczonej w strefie ściskanej, zespolonej z betonem zwykłym i szkieletem zbrojeniowym strefy rozciąganej, w obszarze największego wyężenia elementu. Schemat technologiczny takiego rozwiązania pokazano na rycinie 5.



Źródło: Opracowanie własne.

Ryc. 5. Schemat technologiczny konstrukcji belki żelbetowej wzmocnionej wkładką z BWW

Zbadano cztery serie belek modelowych (po trzy elementy w każdej serii) o identycznym stopniu zbrojenia, lecz zróżnicowanej charakterystyce betonów. Opis serii badawczych zestawiono w tabeli 2. Belki pracowały jako swobodnie podparte w rozpiętości 1020 mm. Przekroje poprzeczne wynosiły 80x120 mm, a stopień zbrojenia na zginanie wynosił 1,75%.

T a b e l a 2

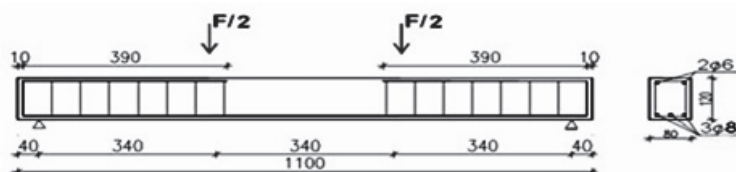
## Charakterystyka serii belek modelowych

Oznaczenie serii belek	Układ prętów	Pole przekroju $A_{s1}$ [cm <sup>2</sup> ]	Wymiary $b \times h$ [mm]	Wysokość efektywna $d$ [mm]	Stopień zbrojenia $\rho$ [%]
N					
R					
RW	3Ø8	1,51	80x120	107	1,75
W					

Ź r ó d ł o: Badania własne.

Pierwszą serię, N, stanowiły belki referencyjne jednorodne na kruszywie naturalnym. Drugą, R – stanowiły belki referencyjne jednorodne z betonu na kruszywie grubym z recyklingu. Właściwą serię RW – belki nowej generacji na kruszywie z recyklingu, wzmocnione w strefie ściskanej wkładką z BWW, natomiast czwartą serię belek, typu W, wykonano w całości z BWW na kruszywie naturalnym. Układ zbrojenia belki modelowej z wkładką pokazano na rycinie 6. Belki obciążano układem dwóch sił skupionych aż do zniszczenia. W badaniach rejestrowano ugięcia w środku rozpiętości i na podporach, odkształcenia betonu oraz stan zarysowania (wartość momentu rysującego oraz układ i szerokość rys).

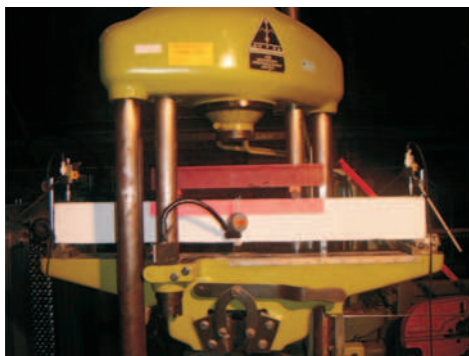
Recepty betonów zastosowanych do wytworzenia serii badawczych opublikowano w pracy [15]. Ugięcia belek mierzono czujnikami indukcyjnymi z tzw. sprę-



Ź r ó d ł o: Opracowanie własne.

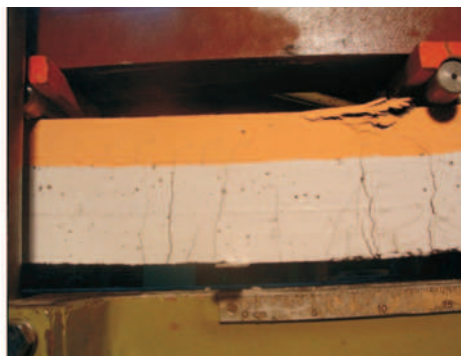
Ryc. 6. Schemat badanych belek nowej koncepcji (RW) i sposób obciążania

żną zwrotną firmy Megatron–München o zakresie pomiarowym 25 i 50 mm, z dokładnością 0,001 mm. Pomiar rejestrowano w sposób ciągły rejestratorem diagnostycznym KSR-32 firmy Sensor z częstością próbkowania wynoszącą 2 s. Do konfiguracji systemu i wstępnej obróbki wyników posłużono się programem LAB-View, a następnie wyniki skatalogowano i przetworzono w programie Excell. Na rycinie 7 pokazano stanowisko badawcze belek modelowych, a na rycinie 8 widok belki modelowej RW po zniszczeniu. W tabelach 3–7 przedstawiono sprowadzone (po wyeliminowaniu przemieszczeń podpór) wartości średnie ugięć belk modelowych z badanej serii; kolejno belki: na kruszywie z recyklingu (R1, R2, R3), na kruszywie naturalnym (N1, N2, N3), belki z wkładką z BWW (RW1, RW2, RW3) oraz belki z BWW (W1, W2, W3).



Źródło: Ze zbiorów autorów

Ryc. 7. Stanowisko badawcze belek modelowych



Źródło: Ze zbiorów autorów

Ryc. 8. Belka typu RW po zbadaniu

Jak wynika z porównania wybranych wyników badań próbnych, belki na betonie z recyklingu (seria R) wykazały nieco większą odkształcalność pod obciążeniem

Tabela 3  
Ugięcia belek serii R

Siła $P$ [kN]	Wartości ugięć $f$ [mm]			
	R1	R2	R3	średnio
0	0	0	0	0,00
5	0,45	0,69	0,88	0,67
6	0,55	0,81	1,01	0,79
8	0,81	1,09	1,30	1,07
10	1,06	1,41	1,66	1,38
12	1,61	1,82	2,00	1,81
14	1,99	2,26	2,38	2,21
16	2,35	2,61	2,70	2,55
18	2,67	2,95	3,03	2,88
20	3,04	3,33	3,40	3,26
22	3,40	3,70	3,75	3,62
24	3,81	4,15	4,21	4,06
26	4,32	4,66	4,68	4,55
28	4,69	5,06	5,09	4,95
30	5,08	5,48	5,50	5,35
32	5,60	5,99	5,97	5,85
34	6,15	6,54	6,48	6,39
36	6,71	7,12	7,05	6,96
38	7,44	7,68	7,55	7,56

Źródło: Opracowanie własne.

Tabela 4  
Ugięcia belek serii N

Siła $P$ [kN]	Wartości ugięć $f$ [mm]			
	N1	N2	N3	średnio
0	0	0	0	0
5	0,47	0,33	0,44	0,41
6	0,57	0,41	0,54	0,51
8	0,88	0,67	0,88	0,81
10	1,17	0,97	1,19	1,11
12	1,49	1,27	1,63	1,46
14	1,68	1,57	1,92	1,72
16	2,06	1,86	2,32	2,08
18	2,36	2,20	2,59	2,38
20	2,68	2,59	2,99	2,75
22	3,01	2,86	3,40	3,09
24	3,42	3,2	3,77	3,46
26	3,80	3,56	4,14	3,83
28	4,26	3,90	4,51	4,22
30	4,72	4,47	4,98	4,72
32	5,20	5,15	5,54	5,30
34	5,56	5,33	5,97	5,62
36	6,06	5,69	6,52	6,09
38	6,80	7,33	7,39	7,17

Źródło: Opracowanie własne.



Tabela 5  
Ugięcia belek serii RW

Siła $P$ [kN]	Wartości ugięć $f$ [mm]			
	RW1	RW2	RW3	średnio
0	0	0	0	0
5	0,30	0,45	0,53	0,43
6	0,40	0,52	0,59	0,50
8	0,63	0,81	0,90	0,78
10	0,87	0,99	1,07	0,98
12	1,14	1,21	1,27	1,21
14	1,38	1,42	1,46	1,42
16	1,65	1,58	1,71	1,65
18	1,92	1,88	1,97	1,92
20	2,14	1,97	2,32	2,14
22	2,46	2,48	2,50	2,48
24	2,67	2,79	2,90	2,79
26	2,97	3,12	3,26	3,12
28	3,32	3,46	3,60	3,46
30	3,63	3,72	3,81	3,72
32	3,87	4,04	4,20	4,04
34	4,22	4,36	4,50	4,36
36	4,55	4,68	4,81	4,68
38	4,95	5,03	5,10	5,03
40	5,20	5,40	5,52	5,37
42	5,51	5,71	5,91	5,71
44	5,81	6,12	6,42	6,12
46	6,21	6,50	6,65	6,45
48	6,65	6,83	7,01	6,83
50	7,04	7,23	7,41	7,23

Źródło: Opracowanie własne.

Tabela 6  
Ugięcia belek serii W

Siła $P$ [kN]	Wartości ugięć $f$ [mm]			
	W1	W2	W3	średnio
0	0	0	0	0
5	0,12	0,15	0,14	0,14
6	0,15	0,18	0,18	0,17
8	0,22	0,25	0,27	0,25
10	0,30	0,33	0,36	0,33
12	0,38	0,42	0,45	0,42
14	0,48	0,50	0,55	0,51
16	0,64	0,67	0,70	0,67
18	0,76	0,84	0,92	0,84
20	0,97	1,10	1,07	1,05
22	1,15	1,26	1,36	1,26
24	1,67	1,70	1,60	1,66
26	1,97	1,88	1,79	1,88
28	2,14	2,08	2,01	2,08
30	2,44	2,35	2,26	2,35
32	2,63	2,55	2,46	2,55
34	2,84	2,76	2,67	2,76
36	3,14	3,02	2,89	3,02
38	3,39	3,24	3,09	3,24
40	3,67	3,53	3,38	3,53
42	3,93	3,80	3,67	3,80
44	4,21	4,08	3,95	4,08
46	4,52	4,36	4,20	4,36
48	4,83	4,64	4,44	4,64
50	–	5,04	4,71	4,88
52	–	–	5,09	5,09

Źródło: Opracowanie własne.

krótkotrwałym niż belki typu N. Maksymalne ugięcia w stanie silnego wyciężenia (przy sile 30kN) wyniosły w belkach typu N 4,72 mm i były o 13% mniejsze niż w belkach typu R.

W tabeli 7 zestawiono średnie wartości ugięć doraźnych belek modelowych dla kilku wybranych poziomów obciążenia. Porównanie wskazuje, że zastosowanie wkładki z BWW w belkach RW powoduje znaczące zmniejszenie ugięć zarówno w porównaniu do belek bez wkładki typu R, jak i belek referencyjnych typu N.

Zależności eksperymentalne siła–ugięcie we wszystkich zbadanych belkach modelowych o stopniu zbrojenia 1,75% przedstawiono na rycinie 9, natomiast w tabeli 8 zestawiono średnie wartości sił niszczących belki modelowe. Badania wykazały, że belki z wkładką uzyskały znacząco większą nośność w porównaniu do belek jednorodnych N i R.

Tabela 7

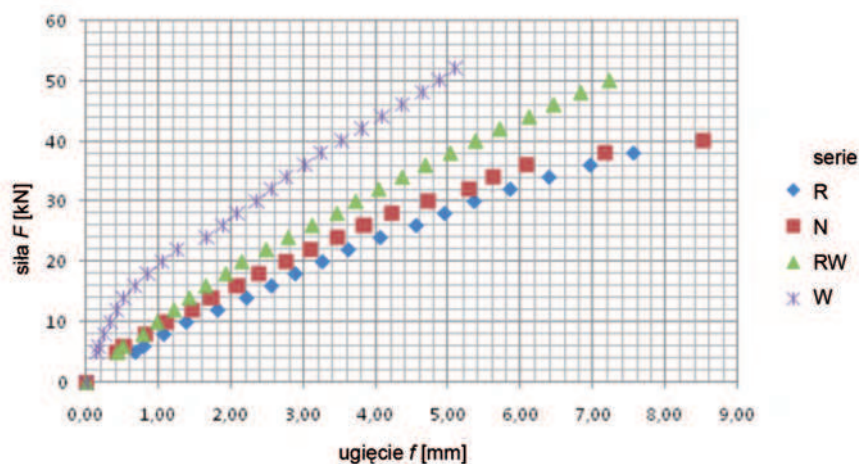
## Ugięcia średnie belek żelbetowych

Siła $P$ [kN]	Wartości ugięć $f$ [mm]			
	R	N	RW	W
10	1,38	1,11	0,98	0,33
20	3,26	2,75	2,14	1,05
30	5,35	4,72	3,72	2,35
40	–	–	5,37	3,53
50	–	–	7,23	4,88

Źródło: Badania własne.

Tabela 8

## Uśrednione siły niszczące przy zginaniu modelowych belek żelbetowych



Źródło: Badania własne.

Ryc. 9. Porównanie średnich ugięć belek modelowych

Typ belek	Średnia siła niszcząca przy zginaniu $N_{Rd}$ [kN]			
	R	N	RW	W
[kN]	38,0	38,2	50,0	51,0

Źródło: Badania własne.

Jak wynika z porównania nośności zbadanych belek modelowych, średnie wartości sił niszczących belek N i R okazały się niemal jednakowe. Natomiast belki RW z wkładką wzmacniającą zostały zniszczone przy znacząco wyższej sile, wynoszącej 50 kN. Oznacza to, że przyrost nośności belek RW wzmocnionych wkładką z BWW wyniósł niemal 32%. Nośność belek RW (z wkładką wzmacniającą) wykonanych według nowej koncepcji okazała się niemal równa nośności belek jednorodnych typu W, całkowicie wykonanych z BWW.

W tabeli 9 przedstawiono ocenę ilościową redukcji ugięć modelowych belek żelbetowych na kruszywie z recyklingu typu R w stosunku do wszystkich pozostałych badanych belek modelowych. Porównanie wykonano na podstawie obliczenia wskaźnika  $k_f$  według wzoru (1):

$$k_f = \frac{\alpha_{N,R}}{\alpha_{R,RW}}, \quad (1)$$

gdzie:  $\alpha$  [mm] – ugięcia belek danej serii zmierzone przy wybranej sile obciążającej belkę.

T a b e l a 9

Współczynniki redukcji ugięć belek modelowych o stopniu zbrojenia  $\rho=1,75\%$

Typ belki	$P = 10$ kN		$P = 20$ kN		$P = 30$ kN		$P = 40$ kN	
N R	$\frac{1,11}{1,38}$	0,80	$\frac{2,75}{3,26}$	0,85	$\frac{4,72}{5,35}$	0,88	$\frac{8,53}{8,52}$	1,00
RW R	$\frac{0,98}{1,38}$	0,71	$\frac{2,14}{3,26}$	0,65	$\frac{3,72}{5,35}$	0,69	$\frac{5,37}{8,52}$	0,63
RW N	$\frac{0,98}{1,11}$	0,88	$\frac{2,14}{2,75}$	0,78	$\frac{3,72}{4,72}$	0,79	$\frac{5,37}{8,53}$	0,63

Ź r ó d ł o: Badania własne.

Dalsze planowane badania wykonywane na elementach w skali naturalnej pozwolą na dodatkową ocenę wpływu efektu skali na efektywność zaproponowanego nowego rozwiązania konstrukcyjnego belek żelbetowych z betonu na kruszywie recyklingowym.

## 5. Wnioski

1. Badania na modelowych belkach żelbetowych potwierdziły występowanie korzystnych efektów wzmocnienia elementów zespolonych, wykonanych z betonu recyklingowego z zastosowaniem wkładek z BWW. Analiza porównawcza wyników badań w zakresie ugięć modelowych belek żelbetowych o stopniu zbrojenia na zginanie  $\rho = 1,75\%$  pozwoliła stwierdzić, że ugięcia belek z recyklingu są większe od 12 do 20% w porównaniu do belek wykonanych w całości na kruszywie naturalnym.

2. Zastosowanie wkładki z BWW w belkach na kruszywie z recyklingu nowej koncepcji zasadniczo zmniejszyło zakres ich ugięć i zwiększyło nośność na zginanie. Analizując wyniki badań, można zauważyć, że ugięcia tych belek są od 12 do 22% mniejsze niż ugięcia belek typu N (z betonu na kruszywie naturalnym) i od 29 do 37% mniejsze niż ugięcia belek modelowych typu R, w całości wykonanych z betonu na kruszywie recyklingowym.
3. Nośność belek żelbetowych wykonanych według nowej koncepcji okazała się około 32% większa od nośności belki na kruszywie z recyklingu, jak również belki na kruszywie naturalnym, i zaledwie 2% mniejsza niż nośność belki z BWW.
4. Przedstawiona koncepcja belek żelbetowych z wkładkami wzmacniającymi posłużyć może upowszechnieniu stosowania betonów recyklingowych bez obawy co do jakości stosowanych kruszyw. Możliwe jest zatem wykorzystanie koncepcji stosowania wkładek wzmacniających z BWW w produkcji prefabrykatów żelbetowych z przeznaczeniem na konstrukcje nośne.

## Literatura

- [1] Krajowy plan gospodarki odpadami 2014 r., Uchwała Rady Ministrów nr 217 z dnia 24 grudnia 2010 r., MP 2010, nr 10, poz. 101, art. 1183.
- [2] Hoffmann C., Jacobs F., *Recyclingbeton aus Beton- und Mischabbruchgranulat Sachstandsbericht*, EMPA, Juli 2007.
- [3] Hupka J., Rzechuła J., *Gruz budowlany na składowiskach odpadów komunalnych*, „Recykling” 2004, nr 3, s. 12.
- [4] Roos F., *Ein Beitrag zur Bemessung von Beton mit Zuschlag aus rezykliertem Gesteinskornung nach DIN 1045-1*, Dissertation TU, München 2002.
- [5] Golda A., Giergiczny Z., *Wpływ dodatku kruszywa z recyklingu na konsystencję mieszanek betonowych*, [w:] *IX Sympozjum Naukowo-Techniczne Góraźdże Cement S.A.: Reologia w technologii betonu*, Gliwice 2007, s. 15–26.
- [6] Łapko A., Grygo R., *Beton z recyklingu jako wartościowy materiał na konstrukcje żelbetowe*, „Ekologia i Technika” 2011, nr 3, s. 139–144.
- [7] Chen H.-J., Yen T., Chen K.-H., *Use of building rubbles as recycled aggregates*, „Cement and Concrete Research” 2003, No 33, s. 125–132.
- [8] Limbachiva M.C., Koulouris A., Roberts J.J., Fried A.N., *Performance of recycled aggregate concrete*, [w:] *RILEM International Symposium on Environment – Conscious Materials and Systems for Sustainable Development*, 2004, s. 127–136.
- [9] Xiao J., Zhang Ch., *On statistical characteristics of compressive strength of recycled aggregate concrete*, „Structural Concrete” 2005, Vol. 4, s. 149–153.
- [10] Mas B., Cladera A., Del Olmo T., Pitach F., *Mechanical properties of concrete with low grade recycled aggregates*, [w:] *Proceedings fib Symposium PRAGUE 2011*. Topic 2: Poster Session, 2011, s. 655–658.

- [11] Lorena L.P., Concu G., *Influence of replacement percentage of recycled aggregates on recycled aggregate concrete properties*, [w:] *Proceedings fib Symposium PRAGUE 2011*. Topic 5: Poster Session, 2011, s. 1249–1252.
- [12] Łapko A., Grygo R., *Zastosowanie betonu na kruszywie recyklingowym w konstrukcjach żelbetowych*, [w:] *Perspektywy rozwoju nowych technologii w budownictwie i przygotowanie kadr inżynierskich*, Grodno 2010, s. 247–251.
- [13] Łapko A., Grygo R., *Long term deformations of recycled aggregate concrete (RAC) beams made of recycled concrete*, [w:] *Modern building materials, structures and techniques: the 10th international conference*, Vilnius, Lithuania 2010, May 19–21, s. 367–372.
- [14] Łapko A., Grygo R., *Flexural capacity and deformability of RC beams with the use of recycled aggregate concrete*, [w:] *Sbornik naučných trudov Instituta stroitel'stva i arhitektury*, MGSU výp. 3, 2011, s. 53–57.
- [15] Łapko A., Grygo R., *Wytwarzanie żelbetowych prefabrykatów wzmocnionych wkładkami z BWW*, „Materiały Budowlane” 2011, nr 2, s. 28–29.
- [16] Grygo R., Chyży T., Łapko A., *Modeling of local strengthening of RC beams made of recycled aggregate concrete using HPC*, [w:] *International Conference on Engineering UBI2011* – 28–30 Nov 2011, University of Beira Interior – Covilhã, Portugal.

ROBERT GRYGO  
ANDRZEJ ŁAPKO

#### RESEARCH OF THE USE OF RECYCLING AGGREGATE CONCRETE IN RC BEAMS BY THE NEW CONCEPT

**Keywords:** flexural elements, recycling of concrete, high performance concrete, strengthening of construction, prefabrication.

The paper presents the concept of constructing load-bearing reinforced concrete beams by the new generation, formed by the fusion of recycled aggregate concrete (RAC) in the tension area and the layer of High Performance Concrete (HPC) in the compression zone. Analysis carried out preliminary tests showed that the merger of two layers of composite concretes of intentionally different strength and deformation properties can be a structural element of a much more favorable characteristics compared to traditional solutions entirely made of recycled aggregate concrete or ordinary concrete.