

Możliwości stosowania kruszyw z recyklingu budowlanego do wytwarzania betonów wibroprasowanych

1. Właściwości mieszanki betonowej wykorzystywanej w technologii wibroprasowania

W chwili obecnej znacząca większość drobnowymiarowych elementów betonowych, w tym praktycznie wszystkie betonowe elementy brukowe, produkowana jest w technologii betonu wibroprasowanego. Podyktowane jest to wręcz idealnym kompromisem pomiędzy ekonomiką masowej produkcji a koniecznością osiągnięcia wysokiej trwałości tych wyrobów oraz bardzo dobrą jednorodnością dużych partii produkcyjnych.

Ze względu na konieczność wyjmowania wyrobów z formy natychmiast po zaformowaniu mieszanki betonowej stosowane w technologii wibroprasowania muszą charakteryzować się praktycznie natychmiastową wytrzymałością pozwalającą na wewnątrzzakładowy transport świeżo zaformowanych wyrobów oraz wykonanie dla nich wszystkich przewidzianych czynności technologicznych. Dlatego też do wibroprasowania stosuje się mieszankę betonową o konsystencji wilgotnej, która w literaturze jest często nazywana ziemiście-wilgotną. Jej charakterystyczną cechą jest bardzo wysoka sztywność, znacznie wyższa niż dla konsystencji wilgotnej betonów zwykłych (Ve-Be >> 31 sekund). Dlatego też często charakteryzuje się ją parametrami i metodami zapożyczonymi z geotechniki (stąd określenie „konsystencja ziemiście-wilgotna”).

Mieszanka taka wyróżnia się bardzo niskim współczynnikiem wodno-cementowym na poziomie 0,34–0,38. Przy optymalnej zawartości cementu w granicach 270–350 kg/m³ (sumie części pylastych na poziomie 350–400 kg/m³) pozwala osiągnąć wyrobom wibroprasowanym wytrzymałości rozformowania na poziomie ok. 0,5 MPa.

Aby uzyskać odpowiednią urabialność takiej mieszanki betonowej, czyli zdolność do szczelnego wypełnienia formy, konieczne jest zastosowanie kilku zabiegów technologicznych. Wśród nich można wyróżnić odpowiednio zestawienie stosu okruchowego kruszywa, zastosowanie odpowiednich domieszek chemicznych (plastyfikatorów, superplastyfikatorów) oraz zapewnienie optymalnej zawartości części pylastych (frakcje ≤ 0,125 mm). W ich skład wchodzi najdrobniejsze frakcje kruszywa, cement i zastosowane dodatki mineralne. Zawartości tych składników dobiera się tak, aby uzyskać jak najlepsze zagęszczenie formowanego elementu, co skutkuje również szybszym osiągnięciem zarówno wczesnych parametrów technologicznych wyrobu, jak również

otrzymaniem wysokich właściwości końcowych elementów wibroprasowanych.

Właściwości stwardniałego betonu wyprodukowanego z mieszanek o konsystencji ziemiście-wilgotnej zależą w głównej mierze od właściwego zagęszczenia mieszanki w trakcie wibroprasowania. Wpływ na to ma wiele czynników, w tym między innymi ilość cementu, stosunek w/c, rodzaj i uziarnienie kruszywa oraz gęstość upakowania wynikająca z efektywności samego procesu zagęszczania. W dłuższym czasie właściwości betonu kształtowane są przez warunki procesu hydratacji cementu, czyli stopnia uwodnienia, reaktywności cementu oraz tworzenia strefy kontaktowej kruszywo-zaczyn. Literatura podaje [21], że maksymalne upakowanie cząstek struktury mieszanki oraz największa wytrzymałość może być zapewniona wyłącznie w niewielkim obszarze określonym zawartością wody zapewniającą optymalne zagęszczenie mieszanki betonowej. Silna zależność właściwości mieszanki betonowej od właściwości stwardniałego betonu jest typowa dla wyrobów produkowanych z mieszanki betonowej o konsystencji ziemiście-wilgotnej. Gęstość upakowania kruszywa grubego i drobnego w szkielecie kruszywowym ma większy wpływ na właściwości stwardniałego betonu powstałego z mieszanki o konsystencji ziemiście-wilgotnej niż wyprodukowanego ze zwykłych mieszanek. Odnosi się to również do sposobu, intensywności oraz czasu trwania zagęszczenia. Im większa gęstość upakowania, tym dokładniej zająbiają się ziarna kruszywa, co skutkuje zmniejszeniem się pustych przestrzeni, które muszą być wypełnione produktami hydratacji cementu. W efekcie wytrzymałość takiego betonu wzrasta. Betony wykonane z mieszanek o konsystencji wilgotnej, z powodu niskiego współczynnika w/c w sprzyjających warunkach i odpowiedniej wilgotności powietrza wykazują właściwość późniejszej hydratacji. W wyniku tego procesu mikrostruktura betonu ulega zagęszczeniu, prowadząc do zwiększenia wytrzymałości na ściskanie stwardniałego betonu. Równocześnie sposób produkcji oraz właściwości surowców sprawiają, że betony produkowane z mieszanek o konsystencji wilgotnej wykazują większą porowatość wynikającą z niedostatecznego odpowietrzenia w trakcie zagęszczania [21]. Może to przyczynić się do wzrostu przepuszczalności betonu, co prowadzi do szybszego wnikania przez pory kapilarne wody, ale jednocześnie zabezpiecza beton przed działaniem mrozu i czynników odładzających. Taka porowatość wynikająca z czynników technologicznych zagęszczania jest w tym przypadku bardzo pożądana, ponieważ mieszanki o tak sztywnej konsystencji nie da się w praktyce napowietrzyć domieszkami chemicznymi.

2. Kruszywa z recyklingu budowlanego

– rodzaje i wymagania

Na świecie odnotowuje się ciągły wzrost zużycia kruszyw naturalnych. Największe zużycie kruszyw naturalnych następuje w sektorze budownictwa, gdzie

Tabela 1. Wybrane właściwości kruszywa naturalnego i pochodzącego z recyklingu betonu

Właściwość		Kruszywo naturalne			Kruszywo z recyklingu betonu	
		Piasek 0/2	Żwir 2/8	Żwir 8/16	Frakcja 0/4	Frakcja 4/16
Gęstość objętościowa ρ_a	g/cm ³	2,67	2,63	2,63	2,47	2,53
Nasiąkliwość WA_{24}^*	%	0,33	1,43	1,61	4,18	4,71
Mrozoodporność M_{25}	%	-	0,85±0,24	0,36±0,04	-	1,56±0,14
Wskaźnik płaskości Fl^*	%	-	5	14	-	6

kruszywa mineralne są podstawowym surowcem. Wymusza to zastąpienie naturalnych kruszyw mineralnych kruszywami z surowców alternatywnych. Beton jest podstawowym materiałem konstrukcyjnym naszych czasów, dlatego z punktu widzenia jego produkcji należy rozważyć zagadnienia dotyczące ochrony środowiska, a mianowicie:

- zużycie dużych ilości surowców naturalnych (kruszywa do produkcji cementu i betonu), co skutkuje zmniejszeniem się zasobów naturalnych
- zużycie dużej ilości energii potrzebnej do produkcji betonu, transportu i obróbki surowców
- wytwarzanie dużych ilości odpadów budowlanych z rozbiórki starych budynków
- zrównoważony rozwój jest podstawą oszczędności surowców i energii we wszystkich technologiach.

Powodem wzrostu ilości odpadów budowlanych pochodzących z rozbiórek są:

- duża ilość budynków nienadających się do użytku i wymagających rozbiórki
- rozbiórki budynków niespełniających obecnych wymagań konstrukcyjnych i funkcjonalnych
- tworzenie odpadów budowlanych, które wynikają z niszczycielskich zjawisk naturalnych, jak trzęsienia ziemi czy huragany.

Jednakże jednym z powodów tego, iż beton jest najpowszechniej stosowanym materiałem na świecie, jest jego zdolność do zagospodarowania szerokiego zakresu jakości materiałów, w którym znajdują się materiały pochodzące z recyklingu oraz uboczne produkty procesów przemysłowych, co czyni beton materiałem ekologicznym. Materiały te są stosowane do betonu w postaci kruszywa alternatywnego lub dodatków oraz cementu [3].

Od 2002 roku w zharmonizowanej normie europejskiej PN-EN 12620 Kruszywa do betonu wyróżnia się trzy kategorie kruszywa stosowanego do betonu, wśród któ-

rych znajdują się kruszywa pochodzące z recyklingu. Norma ta nie podaje jednak wskazówek, w jaki sposób można stosować te kruszywa. W 2008 roku wydana została poprawka do normy wprowadzająca kategorie dla kruszywa grubego pochodzącego z recyklingu w oparciu o udział: niezwiązanego kamienia (Ru), gruzu betonowego (Rc), gruzu z elementów murowych (Rb), materiałów bitumicznych (Ra), szkła (Rg), niestabilnego materiału (FL) oraz innych składników (X).

Międzynarodowe stowarzyszenie ekspertów i laboratoriów zajmujących się materiałami konstrukcyjnymi i konstrukcjami RILEM wyróżnia trzy rodzaje kruszywa z recyklingu:

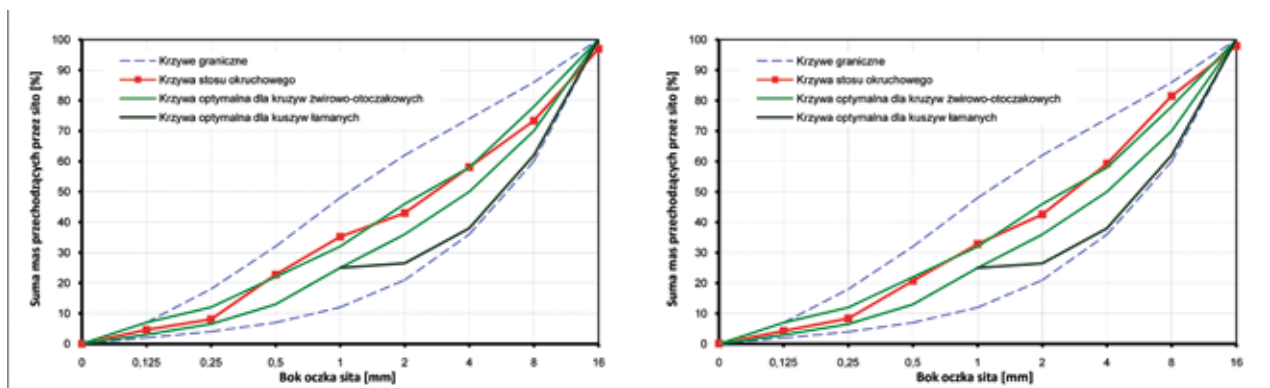
- Typ I – materiał pochodzący z elementów murowych
- Typ II – materiał pochodzący z elementów betonowych
- Typ III – materiał stanowiący mieszaninę co najmniej 80% kruszywa naturalnego i maksymalnie 20% kruszywa z recyklingu.

Kruszywo z recyklingu betonu (RCA) podzielono na trzy klasy w zależności od możliwości zastosowania:

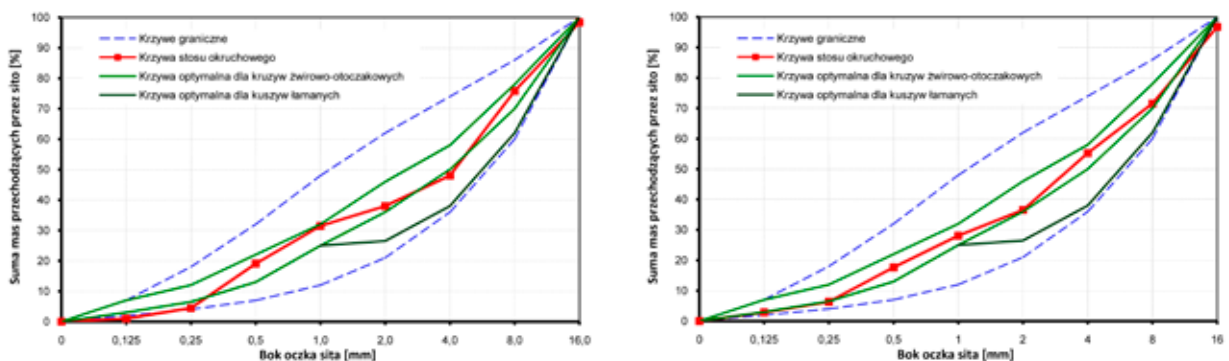
- Klasa A – kruszywa z recyklingu do betonu o szerokim zakresie stosowania, w tym budowli morskich i środowiskowych;
- Klasa B – obejmująca większość kombinacji połączenia kruszywa z recyklingu z kruszywem naturalnym, nadających się do betonu o umiarkowanych warunkach klas ekspozycji;

Tabela 2. Wyjściowy skład mieszanki betonowej stosowanej w badaniach

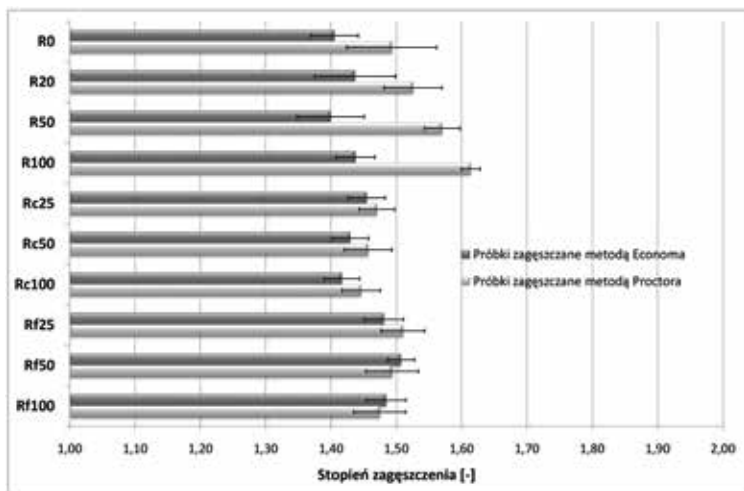
Składnik	Skład na 1m ³ mieszanki [kg]
Cement CEM II/A-V 42,5 R	340
Piasek 0/2	714
Mieszanka żwirowa 2/8 + 8/16 (w proporcji 1:1)	1190
Woda (wartość wyjściowa przed korektą)	122,4
plastyfikator	0,46% masy cementu
w/c	0,36



Rys. 1. i 2. Przykłady kumulacyjnych krzywych uziarnienia dla stosu okruchowego wyjściowej mieszanki betonowej R0 (po lewej) i mieszanki betonowej R50 o składzie zmodyfikowanym kruszywem recyklingowym 0/16 (po prawej)



Rys. 3. i 4. Przykłady kumulacyjnych krzywych uziarnienia dla stosu okruchowego mieszanki betonowej o składzie zmodyfikowanym kruszywem recyklingowym: 4/16 Rc50 (po lewej) i 0/4 Rf50 (po prawej)



Rys. 5. Stoień zagęszczenia mieszanki betonowej w zależności od metody zagęszczania i składu mieszanki betonowej

- Klasa C – kruszywo z recyklingu przeznaczone do betonów tylko najgłodszych klas ekspozycji [4].

3. Rodzaje i wybrane właściwości kruszyw użytych w badaniach

Przedmiotem badań były kruszywa pochodzące z recyklingu drobnowymiarowych elementów betonowych z betonu wibroprasowanego, tj. powstałe w wyniku przekruszenia betonowej kostki brukowej pochodzącej z demontażu:

- Kruszywo niefrakcjonowane pochodzące z recyklingu betonu (RCA) o uziarnieniu ciągłym 0/16
- Kruszywo frakcjonowane pochodzące z recyklingu betonu (RCA) o uziarnieniu 4/16
- Kruszywo frakcjonowane pochodzące z recyklingu betonu (RCA) o uziarnieniu 0/4.

Jako kruszywa uzupełniające zastosowano typowe kruszywa wykorzystywane w produkcji betonowych elementów brukowych z betonu wibroprasowanego:

- piasek płukany o uziarnieniu 0/2
- żwir płukany o uziarnieniu 2/8
- żwir płukany o uziarnieniu 8/16.

Aby porównać właściwości kruszywa recyklingu betonu z właściwościami kruszywa naturalnego, wykonano, oprócz standardowej analizy sitowej, badania ich właściwości fizycznych i geometrycznych, których wyniki zamieszczono w tabeli 1.

Udział frakcji pylastej – czyli ziaren poniżej 0,063 mm dla kruszywa z recyklingu betonowych elementów bru-

kowych jest znacznie wyższy niż w kruszywach naturalnych stosowanych w technologii wibroprasowania betonu. Szczególnie jest to widoczne w przypadku kruszywa z recyklingu betonu o uziarnieniu 0/4, gdzie udział frakcji pylastej stanowi 7,8%, czyli prawie 40 razy więcej niż w naturalnym piasku płukanym. Sytuacja taka powoduje zazwyczaj wzrost wodożądności stosu okrukowego wykorzystywanego do sporządzenia mieszanki betonowej. Jednak w przypadku opisanych we wstępie mieszanek betonowych o konsystencji ziemisto-wilgotnej podwyższona zawartość frakcji pylastych wcale nie musi mieć negatywnego wpływu na ich urabialność, w szczególności przy stosowaniu wibroprasowania jako techniki ich zagęszczania.

4. Badania właściwości mieszanek betonowych o konsystencji ziemisto-wilgotnej zawierających kruszywa z recyklingu budowlanego

Na potrzeby eksperymentu przygotowano szereg mieszanek betonowych o konsystencji ziemisto-wilgotnej, zawierających różne ilości wyżej scharakteryzowanych kruszyw recyklingowych.

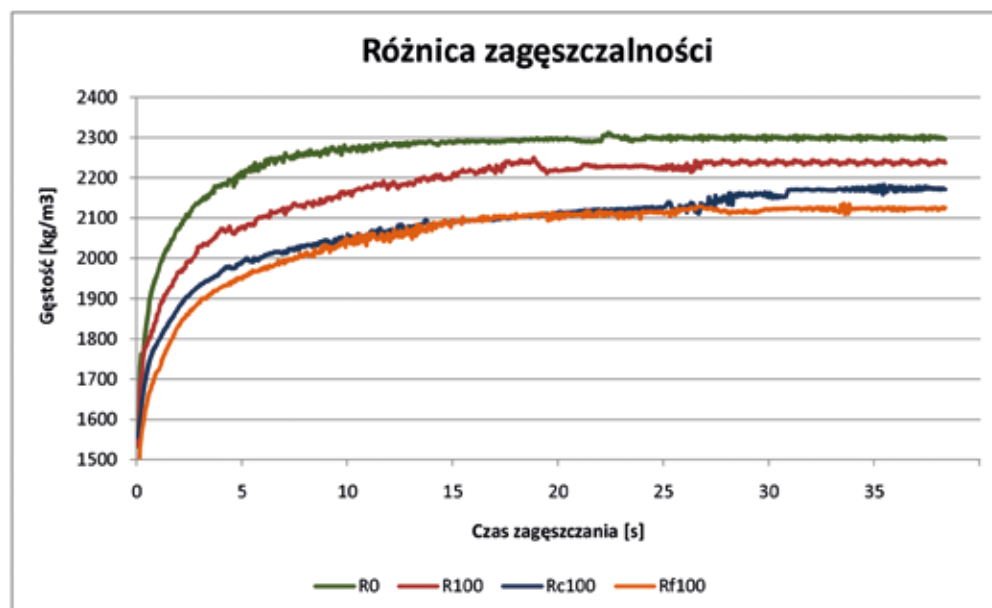
Poniżej opisano symbole, którymi oznaczono mieszanki betonowe:

- R0 – mieszanka betonowa odniesienia, $w/c=0,36$
- R20, R50 i R100 – grupa mieszanek betonowych, w których mieszankę kruszyw naturalnych zastąpiono kruszywem z recyklingu betonu RCA o uziarnieniu 0/16 (odpowiednio w ilości 20%, 50% i 100%)
- Rc25, Rc50 i Rc100 – grupa mieszanek betonowych, w których mieszankę żwirów 2/8 i 8/16 zastąpiono kruszywem z recyklingu betonu RCA o uziarnieniu 4/16 (odpowiednio w ilości 25%, 50% i 100%)
- Rf25, Rf50, Rf100 – grupa mieszanek betonowych, w których piasek płukany 0/2 zastąpiono kruszywem z recyklingu betonu RCA o uziarnieniu 0/4 mm (odpowiednio w ilości 25%, 50% i 100%).

Modyfikacje składów mieszanek betonowych polegały na podstawianiu kruszywa naturalnego zgodnie z opisanym powyżej schematem.

Pomimo że obecnie w technologii betonu wibroprasowanego stosuje się powszechnie popioły lotne jako uzupełnienie zawartości ogólnej sumy części pylastych w mieszance betonowej, w badaniach zrezygnowano z ich stosowania.

Rys. 6. Zależność gęstości mieszanek betonowych od czasu zagęszczania



	R0	R20	R50	R100	Rc25	Rc50	Rc100	Rf25	Rf50	Rf100
	Gęstość [kg/m³]									
Próbki zagęszczane metodą Economa	2300 ± 60	2180 ± 40	2000 ± 40	1950 ± 30	2260 ± 30	2170 ± 30	2120 ± 10	2230 ± 40	2240 ± 30	2210 ± 90
Próbki zagęszczane metodą Proctora	2280 ± 20	2190 ± 80	2000 ± 0	1960 ± 20	2210 ± 30	2120 ± 10	2090 ± 10	2210 ± 10	2210 ± 23	2140 ± 20

5. Podatność na zagęszczenie mieszanki betonowej

Bardzo ważnym parametrem opisującym mieszankę betonową o konsystencji wilgotnej jest jej podatność na zagęszczenie. Mieszanka o konsystencji wilgotnej posiada o wiele sztywniejszą konsystencję w porównaniu do „zwykłej” mieszanki betonowej, dlatego nie można jej badać standardowymi metodami przywołanymi w normie PN-EN 206:2014-04.

Określa się ją najczęściej jako stopień zagęszczenia, czyli stosunek gęstości próbki mieszanki betonowej luźno zasypanej do formy (inaczej mówiąc zagęszczonej pod własnym ciężarem) do gęstości mieszanki betonowej poddanej procesowi wibroprasowania. Do oceny tego wskaźnika wykorzystuje się tzw. aparat Economa, umożliwiający symulację procesu wibroprasowania. Ze względu na analogiczne zachowanie się mieszanek betonowych używanych w produkcji elementów brukowych do mieszanek betonowych stosowanych w geotechnice, do oceny stopnia zagęszczenia można wykorzystać również aparat Proctora.

Na rysunku 5 przedstawiona została analiza wyników uzyskanych podczas zagęszczania mieszanek betonowych o konsystencji ziemisto-wilgotnej obydwo ma opisanymi wyżej metodami. Jak widać, wprowadzenie kruszyw recyklingowych nie pogorszyło urabialności tych mieszanek betonowych, jednak wymagało niekiedy znacznej korekty ilości wody zarobowej, przy stałej zawartości plastyfikatora. Zmiany te miały różny charakter w zależności od rodzaju i ilości użytego kruszywa recyklingowego. Przy niewielkich ilościach wprowadzanych kruszyw frakcjonowanych można było zauważyć nawet niewielkie zmniejszenie zapotrzebowania na wodę zarobową. Natomiast kruszywo recyklingowe o uziarnieniu ciągłym generalnie powodowało wzrost współczynnika wodno-cementowego od wartości wyjściowej $w/c = 0,36$ nawet do wartości $w/c = 0,55$ dla mieszanek betonowych wytworzonych przy 100% zastąpienia kruszywa naturalnego.

Ocena podatności na zagęszczenie metodą Economa ma również dodatkową zaletę, tj. możliwość obserwacji przebiegu zagęszczania w czasie rzeczywistym i porównania tych przebiegów ze sobą, oraz możliwość obserwacji zmian wpływu „przesychania” mieszanek betonowych na ich podatność na zagęszczenie. Przykład wspomnianego wyżej porównania przedstawiono na rysunku 6.

Porównywana w tym przypadku podatność na zagęszczenie została oznaczona podczas formowania próbek betonowych R0, R100, Rc100 i Rf100.

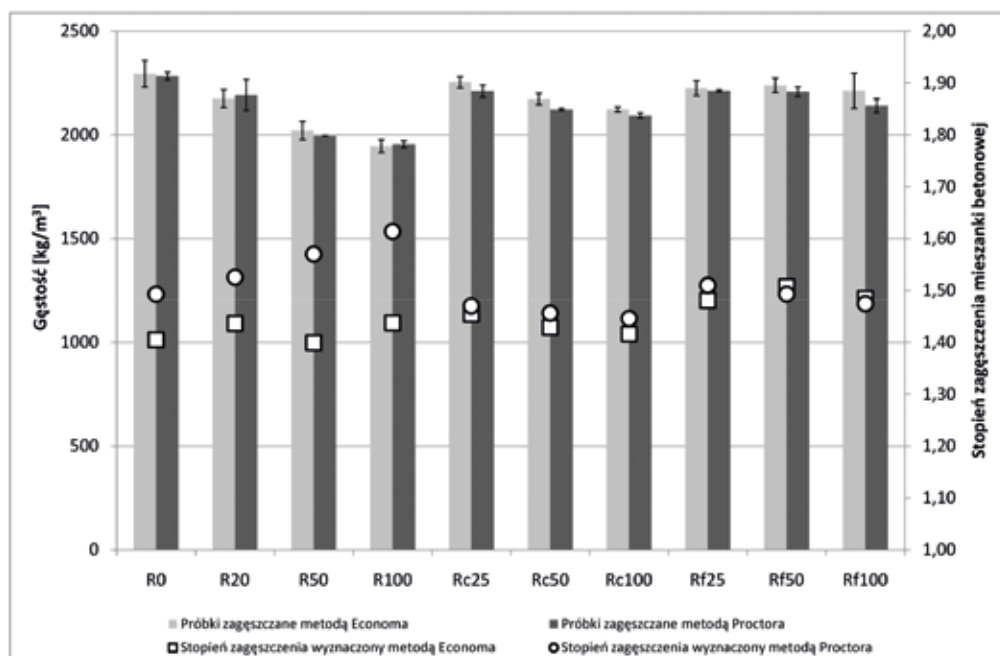
100% zamiana kruszywa naturalnego na recyklingowe pogarsza podatność mieszanki betonowej o konsystencji ziemisto-wilgotnej na zagęszczenie metodą wibroprasowania. Obserwowane jest to nie tylko przy zamianie całkowitej kruszywa, ale również przy zamianie poszczególnych grup frakcji. Przy mniejszych proporcjach stosowanych kruszyw recyklingowych do kruszyw naturalnych tendencja ta jest znacznie mniej widoczna.

Uzyskane wyniki potwierdzają możliwość stosowanie kruszyw recyklingowych w technologii wibroprasowania betonu. Pamiętać jednak trzeba, że ze względu na trwałość produkowanych w ten sposób prefabrykatów betonowych konieczne jest utrzymywanie współczynnika wodno-cementowego w „rozsądnych” granicach, czyli nieprzekraczania wartości 0,45. Dlatego też dla poprawy urabialności konieczne staje się optymalizowanie składu mieszanek betonowych o konsystencji ziemisto-wilgotnej z odpowiednim użyciem dodatków mineralnych i/lub domieszek chemicznych, szczególnie modyfikujących reologię mieszanek betonowych.

6. Badanie właściwości betonów wibroprasowanych z użyciem kruszyw recyklingowych

Testy Economa, jakim poddane zostały wspomniane wyżej mieszanki betonowe, mają dodatkową cechę, a mianowicie pozyskane w ich trakcie próbki betono-

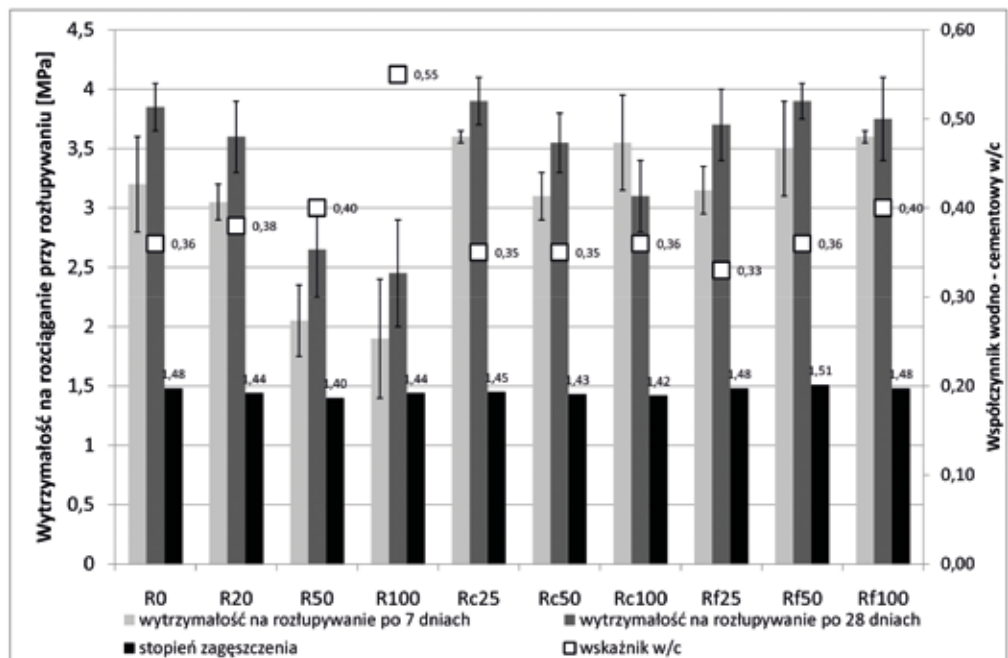
Tabela 3. Gęstość próbek z kruszywem z recyklingu formowanych metodą Economa i metodą Proctora



Rys. 7. Gęstość próbek z kruszywem z recyklingu formowanych metodą Economa i metodą Proctora

Literatura

1. Adamczyk J., Dylewski R. – Recykling odpadów budowlanych w kontekście budownictwa zrównoważonego, *Problemy ekorozwoju* 2010, nr 2, s. 125–131,
2. Frankiewicz W., Normalizacja kruszyw, *Budownictwo, Technologie, Architektura* 2004,(26) nr 2, s. 42–46
3. Kawalec P., Kozioł W., *Kruszywa alternatywne w budownictwie, Nowoczesne budownictwo inżynierskie* 2008, nr 5, s. 34–37
4. Parekh D. N., Modhera C. D. Assessment of recycled aggregate concrete, *Journal of Engineering Research and Studies* 2011 [online], dostęp 22.04.2014, Dostępny w Internecie: <http://www.technicaljournalsonline.com>
5. Akash R. Kumar N., Sudhir M. Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete, *Resources, Conservation and Recycling*, 2007,(50) nr. 1, s. 71–81
6. Wołska-Kotańska Cz. Właściwości i zastosowanie kruszywa z recyklingu betonu, *Magazyn Autostrady* 2005, nr 3, s. 18–22
7. Kijowski G. *Kruszywo z betonu, Budownictwo, Technologie, Architektura* 2006,(34) nr 2, s. 46–47
8. Gołda A. Kórl A. *Drugie życie betonu, Budownictwo, Technologie, Architektura* 2006,(36) nr 4, s. 44–47
9. Swirdziuk M., *Recykling odpadów budowlanych, Inżynier budownictwa* 2011 [online], dostęp 22.04.2014, Dostępny w Internecie: <http://www.inzynierbudownictwa.pl/drukuj,5198>
10. Z. Kohutek, *Beton przyjazny środowisku, Stowarzyszenie Producentów Betonu Towarowego w Polsce, Kraków* 2008
11. Ajdukiewicz A., Kliszczewicz A., *Recykling betonu konstrukcyjnego – cz. II, Inżynier budownictwa* 2009, (60) nr 3, s. 61–64
12. Gołębiowska I., Zajac B. *Nowoczesne metody recyklingu betonu, Inż. Ap. Chem.* 2010, nr 5, s. 136–137
13. Katz A., *Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete Cement and Concrete Rese-*



Rys. 8. Analiza wyników badania wytrzymałości na rozciąganie przy rozluźnianiu

we można, podobnie jak w teście Proctora, wysezonować i poddać badaniom cech fizycznych betonu. Badania próbek rozpoczęto od określenia gęstości stwardniałego betonu. Dla próbek zaformowanych obydwojma metodami, tj. metodą Economa i metodą Proctora, badania te wykonano metodą hydrostatyczną, zgodnie z metodyką zawartą w normie PN-EN 12390-7:2011.

Wynik badania gęstości stanowi średnią z co najmniej pięciu próbek formowanych metodą Economa i trzech próbek formowanych uproszczoną metodą Proctora. Wszystkie wyniki zebrano w tabeli 3 i przedstawiono na wykresie – rysunek 7.

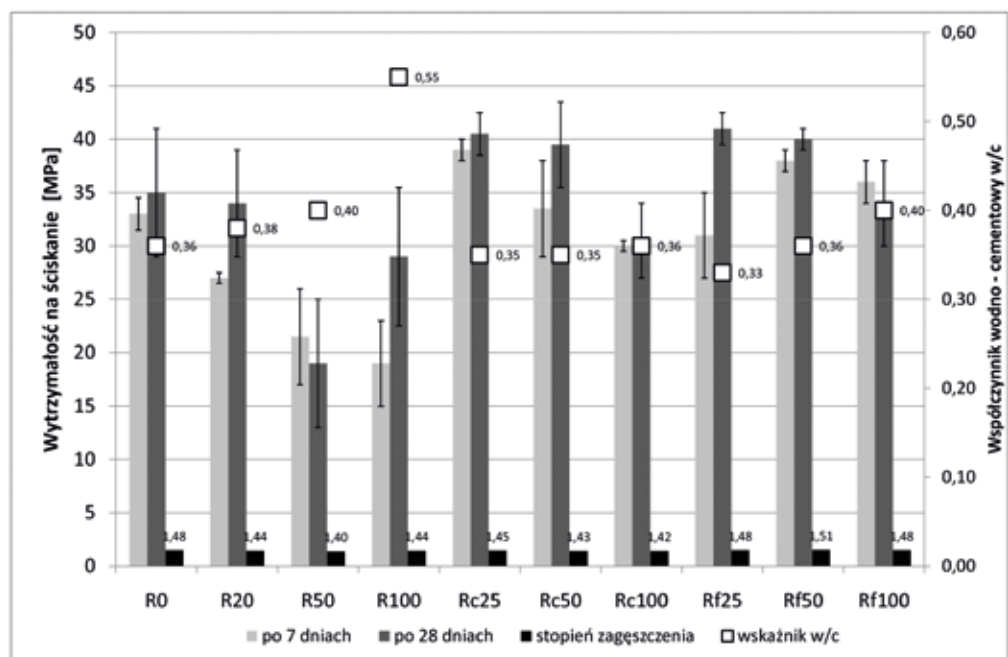
W betonie z kruszywem RCA obserwuje się spadek gęstości wraz ze wzrostem zawartości kruszywa z recyklingu. Obniżenie gęstości betonu wibroprasowanego jest spowodowane głównie przez niższą gęstość kruszywa z recyklingu, w porównaniu do kruszywa naturalnego. Kruszywo RCA zawiera dużo bardzo porowatego zaczynu cementowego oblepiającego ziarna kruszywa. Największe różnice gęstości oraz zdecydowanie największą zmienność tego parametru zaobserwowano

dla próbek zawierających kruszywa RCA o uziarnieniu ciągłym 0/16. W tym przypadku betony, w których stosie okruszowym było co najmniej 50% ogólnej ilości kruszywa, wykazywały się średnią gęstością nie większą niż 2000 kg/m³. Można tutaj stwierdzić, że oprócz niższej gęstości kruszywa recyklingowego wpływ na gęstość betonu wibroprasowanego miał również gwałtownie wzrastający współczynnik wodno-cementowy (związany z podwyższoną wodożądnością kruszywa RCA 0/16). Na znaczne obniżenie gęstości miało również wpływ pogorszenie się urabialności tych mieszanek betonowych.

Natomiast betony zawierające kruszywa RCA charakteryzowały się nie tylko zbliżoną wartością w/c, ale również podobnymi wartościami stopnia zagęszczenia oraz nieznacznie tylko obniżoną gęstością. O ile gęstość betonu z kruszywem RCA o uziarnieniu ciągłym spadła poniżej 2000 kg/m³, to dla kruszyw frakcjonowanych wartość ta oscylowała wokół 2200 kg/m³.

Kolejnym testem, jakiemu poddano próbki z betonu wibroprasowanego zawierającego kruszywa RCA, było

Rys. 9. Analiza wyników badania wytrzymałości na ściskanie



badanie wytrzymałości. Ocenę przeprowadzono według wymagań procedur badawczych zawartych w normach: PN-EN 12390-6:2011 dla wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu oraz PN-EN 12390-3:2011 dla wytrzymałości na ściskanie. Wybór testu odporności na rozciąganie przy rozłupywaniu był podyktowany tym, że norma przedmiotowa na badanie betonowej kostki brukowej, czyli PN-EN 1338:2005+AC:2007, przewiduje właśnie taką ocenę. Zastosowanie jednak wprost procedury badawczej z przytoczonej normy było utrudnione ze względu na kształt próbek, dlatego też skorzystano z analogicznej procedury opisanej w w/w normie na badanie betonów stwardniałych.

Badania zostały wykonane po 7 i 28 dniach, na próbkach walcowych, formowanych metodą Economa, przechowywanych w warunkach opisanych w punkcie 11. Wyniki wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu w zestawieniu ze wskaźnikiem wodno-cementowym i stopniem zagęszczenia w metodzie Economa zostały przedstawione na rysunku 8. Analogiczna analiza wyników badania wytrzymałości na ściskanie przedstawiona została na rysunku 9.

Wytrzymałość betonów z frakcjonowanym kruszywem RCA w ilości nieprzekraczającej 50% odpowiedniej grupy frakcji w stosie okrucowym wykazywały po 28 dniach dojrzewania wartości o kilkanaście procent wyższe niż beton referencyjny. Charakteryzowały się również znacznie mniejszym rozrzutem pojedynczych wyników niż betony, w których zastosowano kruszywo recyklingowe o uziarnieniu ciągłym. Wpływ na to miała nie tylko ogólna ilość zastosowanego kruszywa RCA w poszczególnych betonach, ale także to, że kruszywa frakcjonowane nie wykazywały tak dużego wpływu na zmianę współczynnika w/c i zmianę gęstości betonu, jak kruszywa o uziarnieniu ciągłym.

Znajduje to również potwierdzenie w badaniu nasiąkliwości, analizę wyników którego przedstawiono na rysunku 10.

Ocenę nasiąkliwości jako jednego z parametrów charakteryzujących odporność betonów wibroprasowanych (w tym betonowej kostki brukowej) na działanie czynników atmosferycznych wykonano zgodnie z procedurą zawartą w załączniku E normy PN-EN 1338:2005+AC2007 dla próbek po 28 dniach dojrzewania.

Otrzymane wyniki wskazują, że wzrost zawartości kruszywa recyklingowego o uziarnieniu ciągłym pociąga za sobą znaczny wzrost nasiąkliwości betonu wibroprasowanego. Wpływ na zmienność tego parametru miały oczywiście znaczne zmiany współczynnika wodno-cementowego tych betonów oraz zmiany ich gęstości, będące wynikiem zwiększenia się porowatości otwartej przez sumę porowatości „starego” i „nowego” betonu. Natomiast kruszywa frakcjonowane nie wykazują aż takiego wpływu na ten parametr. Wszystkie wyniki nasiąkliwości dla frakcjonowanych kruszyw RCA mieściły się poniżej przyjętego w normie pułapu 6%. Ponadto dla zawartości frakcjonowanego kruszywa RCA do 50% nasiąkliwość betonów wibroprasowanych była porównywalna z nasiąkliwością betonu referencyjnego.

7. Podsumowanie

Kruszywa z recyklingu będą coraz ważniejszym surowcem w produkcji betonów. Ograniczenia ich stosowania w betonach zwykłych powodują, że szuka się i będzie szukać innych obszarów, gdzie można by je wykorzystać. Technologia produkcji drobnowymiarowych elementów betonowych formowanych poprzez wibroprasowanie mieszanek betonowej o konsystencji ziemiasto-wilgotnej zdaje się być jednym z takich właśnie obszarów. Przedstawione w powyższym artykule wyniki badań laboratoryjnych dają poważne przesłanki co do możliwości szerokiego zastosowania kruszyw RCA w produkcji takich prefabrykatów, jak betonowa kostka brukowa czy też bloczki i pustaki betonowe. Zróżnicowanie parametrów tych wyrobów pozwala na dobranie odpowiedniego składu i proporcji kruszyw RCA, dla uzyskania właściwych wymaganych przez standardy cech użytkowych.

Ponadto technologia wibroprasowania betonów zdaje się być odpowiednia dla zagospodarowania tych grup frakcyjnych kruszyw recyklingowych (frakcje poniżej 4 mm), które niekorzystnie wpływają na cechy fizyczne betonów zwykłych.

dr inż. Grzegorz Łój

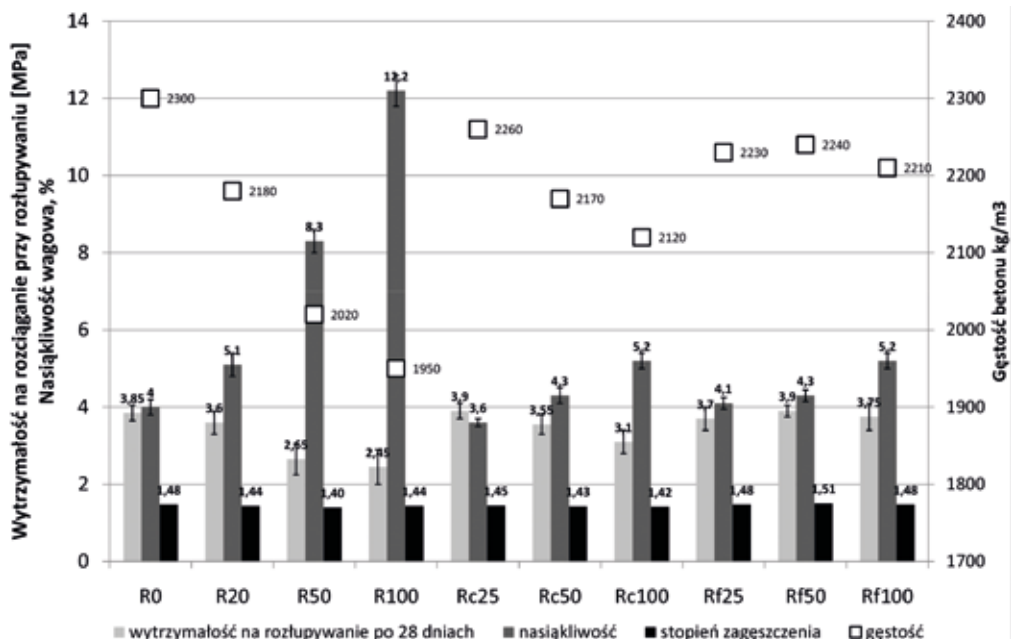
AGH Akademia Górniczo-Hutnicza

im. Stanisława Staszica w Krakowie

Wydział Inżynierii Materiałowej i Ceramiki

Katedra Technologii Materiałów Budowlanych

Rys. 10. Nasiąkliwość próbek z betonu wibroprasowanego zawierającego kruszywo pochodzące z recyklingu betonu



arch 2003, (33) nr 5, s. 703–711

14. Morohashi N., Meyer Ch., S. Abdelgader H. Beton z kruszywem pochodzącym z odzysku, ZBI 2013, nr 4, s. 24–31

15. Evangelista L., de Brito J., Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates, Cement and Concrete Composites 2007, (29) nr 5, s. 397–401

16. Etxeberria M., Vazquez E., Mari A., Barra M. Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete Cement and Concrete Research 2007, (37) nr 5, s. 735–742

17. Hamdam H., Rahman I. A. Zaidi A. M., Assessment of Recycled Aggregate Concrete, Modern Applied Science 2009, (10) nr 3, s. 47–54

18. Brylicki W. „Betonowa kostka brukowa z betonu wibroprasowanego” wyd. Polski Cement, Kraków 1998 r.

19. Brylicki W., Wyroby wibroprasowane: produkcja, domieszki chemiczne, Budownictwo, Technologie, Architektura 2005, numer specjalny, s. 40–43

20. Marchioni M., Lyra J., Oliveira C., Pileggi R. Metoda badania zagęszczenia mieszanek betonowych o konsystencji wilgotnej, ZBI 2013, nr 4, s. 50–60

21. Mechtcherine V., Palzer U. Mieszanki betonowe o konsystencji wilgotnej – aktualny stan techniki i nauki, ZBI 2009, nr 6, s. 54–61

22. PN-EN 1338:2005+AC:2007 Betonowe kostki brukowe. Wymagania i metody badań

23. Pismo nr GDDKiA-DT-WM-zk-520/10/10 z dnia 06.08.2010 r.

24. Łój G., Nowe standardy produkcji i oceny betonowej kostki brukowej, Budownictwo, Technologie, Architektura 2005, numer specjalny, s. 32–35

25. Jackiewicz-Rek W., Konopska-Piechórska M., Cechy prefabrykowanych elementów nawierzchni w świetle norm, Inżynier Budownictwa 2013, dodatek specjalny, s. 49–60