

Możliwości stosowania kruszyw z recyklingu budowlanego do wytwarzania betonów wibroprasowanych

THE POSSIBILITY OF USING RECYCLED AGGREGATES FROM CONSTRUCTION TO PRODUCE VIBRO-PRESSED CONCRETE

Streszczenie

Nieustanny rozwój budownictwa drogowego sprawia, że zapotrzebowanie na betonowe elementy brukowe, ciągle rośnie. Produkcja budowlana, generuje znaczne ilości odpadów pochodzących nie tylko z rozbiórek budynków i remontów, których przeważającą częścią jest gruz betonowy, ale również powstających na etapie produkcji samych wyrobów betonowych.

W praktyce każdy gruz betonowy może zostać poddany obróbce, w celu uzyskania pełnowartościowego kruszywa wtórnego. Natomiast problemy stwarza często jego zastosowanie.

Jak wynika z wieloletnich badań, kruszywo pochodzące z recyklingu betonu może być z powodzeniem stosowane do produkcji betonu zwykłego, jako zamiennik części lub całości kruszywa naturalnego. Jeżeli kruszywo pochodzące z recyklingu betonu może być wykorzystane do produkcji betonu zwykłego, to czy zatem istnieje możliwość zastosowania go także jako kruszywo do wytwarzania mieszanki betonowej dla wibroprasowanej betonowej kostki brukowej? Pamiętaj tutaj należy, że mieszanka betonowa używana do formowania metodą wibroprasowania różni się i to znacznie od chociażby betonu towarowego. Jej specyficzne właściwości warunkowały będą stosowanie kruszyw recyklingowych chociażby z punktu widzenia odmiennej ich granulacji niż dla betonów zwykłych.

W niniejszym artykule zostaną przedstawione i przeanalizowane wyniki badań, pozwalające na ocenę przydatności kruszywa wtórnego z betonu, pod kątem wykorzystania do produkcji betonowej kostki brukowej z betonu wibroprasowanego.

Abstract

Continuous development of road construction makes the need for concrete paving elements, it is still growing. Construction output, generates significant amounts of waste derived not only from the demolition of buildings and renovations, of which the predominant part of the concrete rubble, but also generated during the production of concrete products themselves. In practice, each concrete rubble can be treated in order to obtain the full value of the secondary aggregate. Whereas the problems often creates its use.

As is clear from many years of research, recycled aggregate concrete can be successfully used for the production of plain concrete, as a replacement for part or all of the natural aggregate. If the recycled aggregate concrete can be used for the production of ordinary concrete is whether it is possible to use it also as an aggregate in the concrete mix for the preparation of vibro-pressed concrete paving blocks? Remember here should be that the concrete mix used to form the vibro-pressing method different and much of even mix concrete. Its specific properties are conditioned by the use of recycled aggregates even from the point of view of their different grain size than ordinary concrete.

In this paper will be presented and analyzed the test results, allowing the evaluation of the suitability of the secondary aggregate concrete, for use in the manufacture of concrete paving with vibro-pressed concrete.

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 betonowe stosowane w technologii wibroprasowania muszą charakteryzować się praktycznie natychmiastową wytrzymałością pozwalającą na wewnątrz zakładowy transport świeżo zaformowanych wyrobów oraz wykonanie dla nich wszystkich przewidzianych czynności technologicznych. Dlatego też do wibroprasowania stosuje się mieszanki betonowe o konsystencji wilgotnej, która w literaturze jest często nazywana ziemisto – 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 ziemisto – 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 pylistych 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 odpowiednie zestawienie stosu okruszowego kruszywa, zastosowanie odpowiednich domieszek chemicznych (plastyfikatorów, superplastyfikatorów) oraz zapewnienie optymalnej zawartości części pylistych (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 ziemisto – wilgotnej zależą w głównej mierze od właściwego zagęszczenia mieszanki w trakcie wibroprasowania. Wpływ na to ma wiele czynników, w tym między innymi ilości cementu, stosunku w/c, rodzaju i uziarnienia kruszywa oraz gęstości upakowania wynikającej 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 z właściwościami stwardniałego betonu jest typowa dla wyrobów produkowanych z mieszanki betonowej o konsystencji ziemisto – wilgotnej. Gęstość upakowania kruszywa grubego i drobnego w szkieletie kruszywowym ma większy wpływ na właściwości stwardniałego betonu powstałego z mieszanki o konsystencji ziemisto – wilgotnej niż wyprodukowanego ze zwykłych mieszanek. Odnosi się to również do sposobu, intensywności oraz czasu trwania zagęsz-

czenia. Im większa gęstość upakowania, tym dokładniej zazębiają 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 mają skłonności do 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 przyczyniać się do wzrostu przepuszczalności betonu, co prowadzi do szybszego wnikania przez pory kapilarne wody ale jednocześnie zabezpiecza beton przed działaniem mrozu i czynników odladzających. Taka porowatość wynikająca z czynników technologicznych zagęszczania jest w tym przypadku bardzo pożądana, ponieważ mieszanek 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 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 nie nadających się do użytku i wymagających rozbiórki,
- Rozbiórki budynków nie spełniające 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 trzy kategorie kruszywa stosowanego do betonu, wśród których 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;
- Klasa C – kruszywo z recyklingu przeznaczone do betonów tylko najłagodniejszych 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 uziarnieniu 2/8,
- Żwir płukany 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.

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 FI^*	%	-	5	14	-	6

Udział frakcji pyłastej – czyli ziaren poniżej 0,063 mm dla kruszywa z recyklingu betonowych elementów brukowych 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 pyłastej stanowi 7,8%, czyli prawie 40 razy więcej niż w naturalnym piasku płukany. Sytuacja taka powoduje zazwyczaj wzrost wodożądności stosu okrucowego wykorzystywanego do sporządzenia mieszanki betonowej. Jednak w przypadku opisanych we wstępie mieszanek betonowych o konsystencji ziemisto – wilgotnej podwyższona zawartość frakcji pyłastych 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:

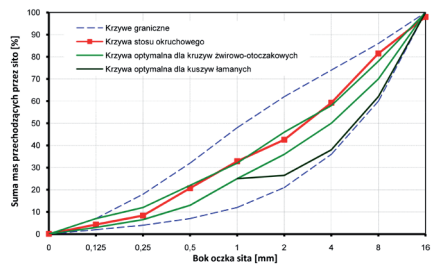
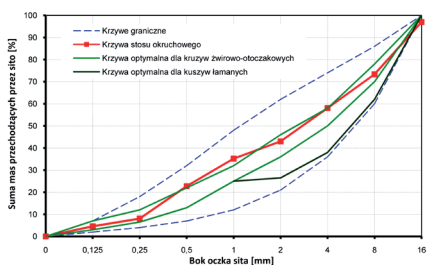
- **R0** – mieszanka betonowa odniesienia, $w/c=0,36$;
- **R20, R50 i R100** – grupa mieszanek betonowych, w których mieszankę kruszyw naturalnych zastąpiono kruszywem z recyklingu betonu RCA o uziarnieniu 0/16 (odpowiednio w ilości 20%, 50% i 100%);
- **Rc25, Rc50 i Rc100** – grupa mieszanek betonowych, 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).

Tabela 2. Wyjściowy skład mieszanki betonowej stosowanej w badaniach

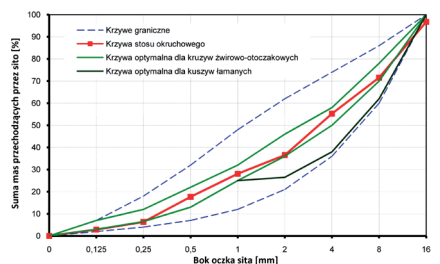
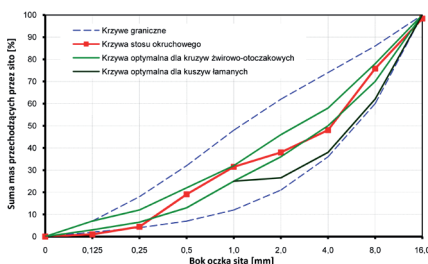
Składnik	Skład na 1m ³ mieszanki [kg]
Cement CEM II/A-V 42,5 R	340
Piasek 0/2	714
Mieszanka żwirowa 2/8 + 8/16 (w proporcji 1:1)	1190
Woda (wartość wyjściowa przed korektą)	122,4
plastyfikator	0,46% masy cementu
w/c	0,36

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 pylistych w mieszance betonowej, w badaniach zrezygnowano z ich stosowania.



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

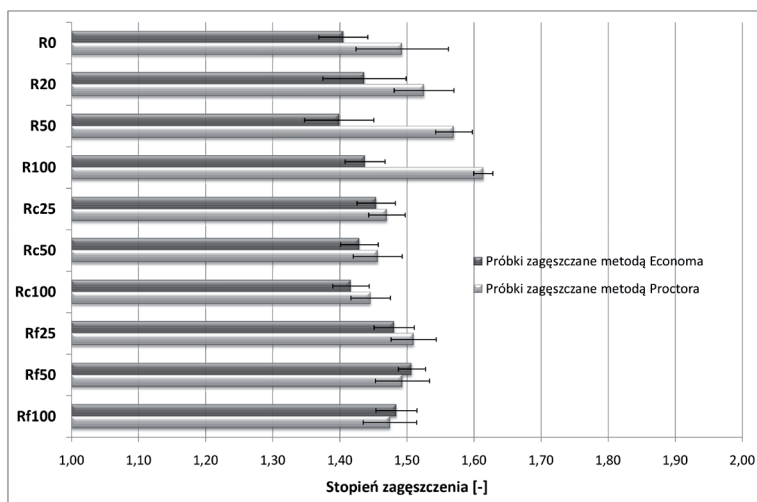


Rys. 3. i 4. Przykłady kumulacyjnych krzywych uziarnienia dla stosu okruskowego mieszanki betonowej o składzie zmodyfikowany kruszywem recyklingowym: 4/16 Rc50 (po lewej) i 0/4 Rf50 (po prawej)

5. Podatność na zagęszczenie mieszanki betonowej

Bardzo ważnym parametrem opisującym mieszankę betonową o konsystencji wilgotnej jest jej podatność na zagęszczanie. 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 próbek 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 Ekonoma, 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 zagęszczania można wykorzystać również aparat Proctora.



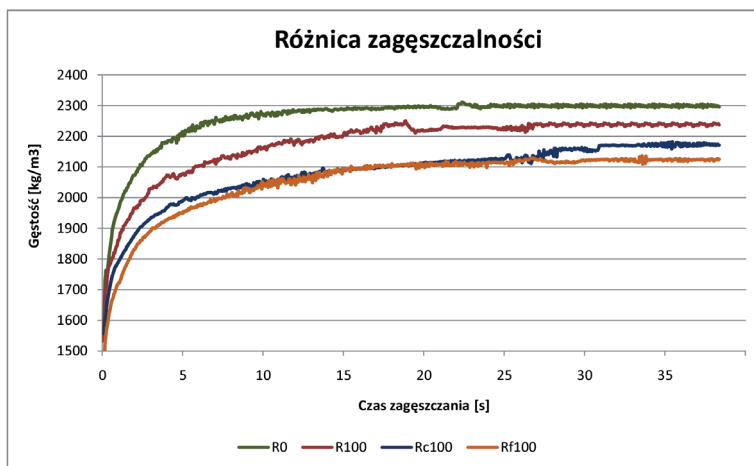
Rys. 5. Stopień zagęszczenia mieszanki betonowej w zależności od metody zagęszczania i składu mieszanki betonowej

Na rysunku 5 przedstawiona została analiza wyników uzyskanych podczas zagęszczania mieszanek betonowych o konsystencji ziemisto – wilgotnej obydwoma opisanymi wyżej metodami. Jak widać wprowadzenie kruszyw recyklingowych nie pogorszyło urobialności 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 zagęszczanie metodą Ekonoma 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 podatności na zagęszczanie. Przykład wspomnianego wyżej porównania przedstawiono na rysunku 6.

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



Rys. 6. Zależność gęstości mieszanek betonowych od czasu zagęszczania

100% zamiast kruszywa naturalnego na recyklingowe pogarsza podatność mieszanki betonowej o konsystencji ziemiasto – wilgotnej na zagęszczanie metoda 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 nie przekraczania wartości 0,45. Dlatego też dla poprawy urabialności konieczne stają się optymalizowanie składu mieszanek betonowych o konsystencji ziemiasto – 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 Ekonoma jakim poddane zostały wspomniane wyżej mieszanki betonowe mają dodatkową cechę, a mianowicie pozyskane w ich trakcie próbki betonowe można, podobnie jak w teście Proctora, wysezonować i poddać badaniom cech fizycznych betonu.

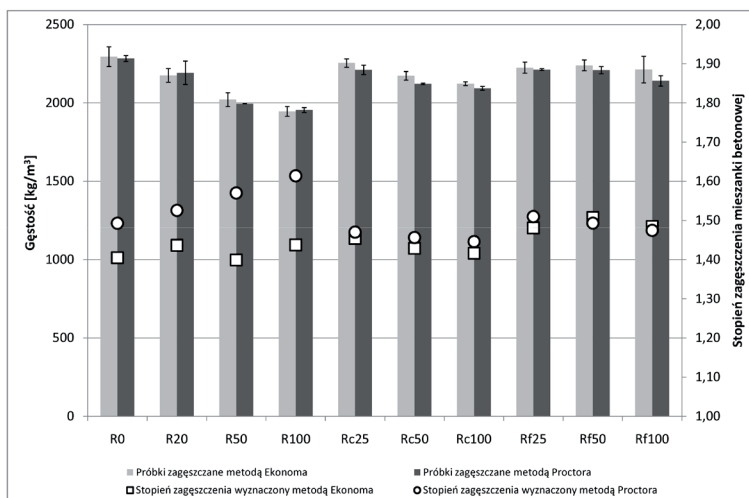
Badania próbek rozpoczęto od określenia gęstości stwardniałego betonu. Dla próbek zaformowanych obydwoma metodami tj. metodą Ekonoma i metoda Proctora badania

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.

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

	R0	R20	R50	R100	Rc25	Rc50	Rc100	Rf25	Rf50	Rf100
	Gęstość [kg/m ³]									
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



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

W betonie z kruszywem RCA obserwuje się spadek gęstości wraz z 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.

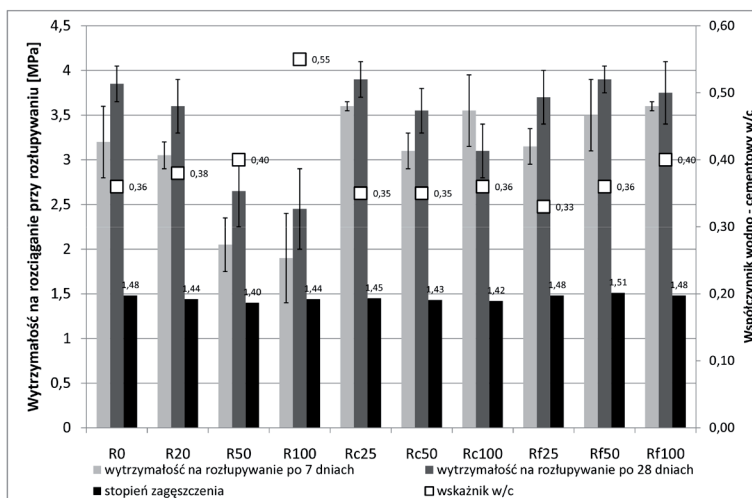
Największe różnice gęstości oraz zdecydowanie największą zmienność tego parametru zaobserwowano dla próbek zawierających kruszywa RCA o uziarnieniu ciągłym 0/16. W tym przypadku betony, w których stosie okruszowym było co najmniej 50% ogólnej ilości kruszywa wykazywały się średnią gęstością nie większą 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 wodorzadnością kruszywa RCA 0/16). Na znaczne obniżenie gęstości miało również wpływ pogorszenie się urabialności tych mieszanek betonowych.

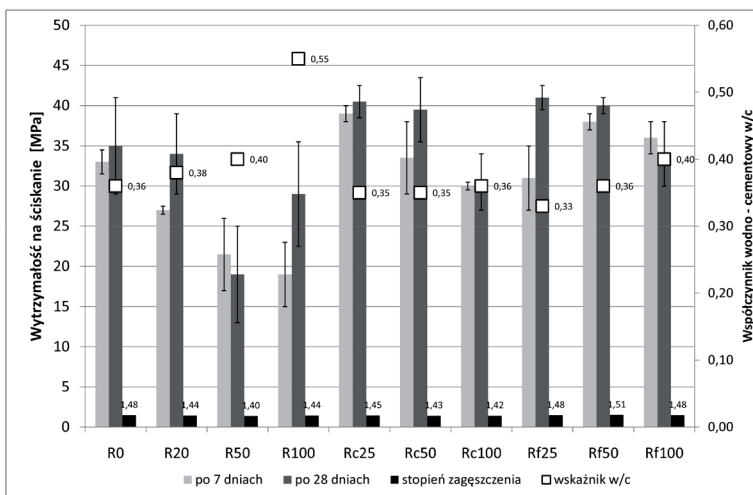
Natomiast betony zawierające frakcjonowane kruszywa RCA charakteryzowały się nie tylko zbliżoną wartością w/c, ale również podobnymi wartościami stopnia zagęszczenia oraz nieznacznie tylko obniżoną gęstością. O ile gęstość betonu z kruszywem RCA o uziarnieniu ciągłym spadła poniżej 2000 kg/m^3 , to dla kruszyw frakcjonowanych wartość ta oscylowała wokół 2200 kg/m^3 .

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



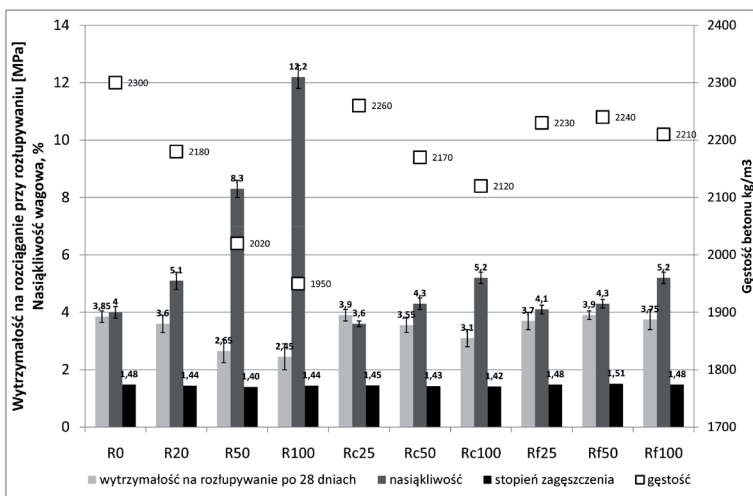
Rys. 8. Analiza wyników badania wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu



Rys. 9. Analiza wyników badania wytrzymałości na ściskanie

Wytrzymałość betonów z frakcjonowanym kruszywem RCA w ilości nieprzekraczającej 50% odpowiedniej grupy frakcji w stosie okruszowym 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.



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

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 mieszanki 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.

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 inżynierijne* 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] Wolska-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] Golda 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., Zając 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 Research 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 1998r.,
- [19] Brylicki W., Wyroby wibroprasowanie: 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,