

dr inż. Łukasz Mrozik*
 dr inż. Anna Kaczmarek*
 mgr inż. Marek Doering**
 mgr inż. Paweł Socha**

Dodatki mineralne w produkcji wibroprasowanych elementów betonowych

Mineral additives in production of vibropressed concrete elements

W artykule przedstawiono badania dodatków mineralnych stosowanych w produkcji wibroprasowanych elementów galanterii betonowej. Oprócz powszechnie stosowanych dodatków, czyli mikrokrzemionki oraz popiołów lotnych, omówiono modyfikację struktury betonu odpadem w postaci pyłów pochodzących z produkcji kruszyw łamanych. Jest to dodatek zdobywający obecnie coraz większą popularność. Wykazano, że istnieje proporcjonalna zależność pomiędzy wytrzymałością zaprawy oznaczaną na normowych beleczkach a wytrzymałością betonu wibroprasowanego.

W pierwszym etapie przeprowadzono serię badań reaktywności tych dodatków. Wykorzystano w tym celu procedury oznaczania klasy cementu wg normy PN-EN 196-1:2006 *Metody badania cementu – Część 1: Oznaczanie wytrzymałości*. Zestawienie zapraw użytych do badań przedstawiono w tabeli 1. Do oznaczenia użyto piasku o uziarnieniu zbliżonym do normowego.

Tabela 1. Zaprawy cementowe użyte do oznaczania aktywności dodatków mineralnych

Oznaczenie zaprawy	Cement	Dodatek
Z-0	CEM I 42,5 R	–
Z-1	CEM I 42,5 R	popiół lotny (25% m.c.)
Z-2	CEM I 42,5 R	mikrokrzemionka (5% m.c.)
Z-3	CEM I 42,5 R	pyły kamienne (5% m.c.)
Z-4	CEM I 42,5 R	pyły kamienne (15% m.c.)
Z-5	CEM I 42,5 R	pyły kamienne (25% m.c.)
Z-6	CEM I 42,5 R	pyły kamienne (30% m.c.)

Badania polegały na określeniu względnego przyrostu 28-dniowej wytrzymałości na ściskanie $f_{z,d}$ beleczek wykonanych z zaprawy z dodatkami w stosunku do analogicznej cechy zaprawy z czystym cementem f_z . Pozwoliło to oszacować reaktywność poszczególnych dodatków (tabela 2).

Tabela 2. Wyniki badań reaktywności dodatków mineralnych do betonu

Zaprawa	Wytrzymałość zaprawy $f_{z,d}$ [MPa]	Miara reaktywności dodatku $f_{z,d}/f_z$ [MPa]
Z-0	39,1	–
Z-1 / popiół lotny (25% m.c.)	26,6	0,68
Z-2 / mikrokrzemionka (5% m.c.)	44,7	1,14
Z-3 / pyły kamienne (5% m.c.)	45,6	1,17
Z-4 / pyły kamienne (15% m.c.)	37,9	0,97
Z-5 / pyły kamienne (25% m.c.)	34,9	0,89
Z-6 / pyły kamienne (30% m.c.)	35,1	0,90

* Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy, Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska

** Ceg-Tor Toruń

W celu określenia wpływu dodatków na modyfikację struktury betonu wibroprasowanego zrealizowano próbne receptury mieszanek. Do badań użyto popiołów lotnych oraz pyłów kamiennych, natomiast pominięto w analizie wytrzymałości pyły krzemionkowe ze względu na duży stan wiedzy na ich temat [2], [3] oraz wysoki koszt produkcji na skalę przemysłową.

Gotowe wyroby (kostka brukowa) przebadano pod względem wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu wg normy PN-EN 1338:2005 *Betonowa kostka brukowa – Wymagania i metody badań*. Zestawienie wykonanych mieszanek przedstawiono w tabeli 3, a wyniki badań w tabeli 4.

Tabela 3. Mieszanki betonowe użyte do badań

Oznaczenie mieszanki	Cement	Kruszywo	Dodatek
M-0	CEM I 42,5 R	piasek 0/2: 48% wag. żwir 2/16: 52% wag.	–
M-1	CEM I 42,5 R	piasek 0/2: 48% wag. żwir 2/16: 52% wag.	popiół lotny (25% m.c.)
M-2	CEM I 42,5 R	piasek 0/2: 48% wag. żwir 2/16: 52% wag.	pyły kamienne (5% m.c.)
M-4	CEM I 42,5 R	piasek 0/2: 48% wag. żwir 2/16: 52% wag.	pyły kamienne (25% m.c.)

Tabela 4. Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu betonu wibroprasowanego z dodatkami mineralnymi

Mieszanka	Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu [MPa] po:		
	1 dniu	9 dniach	28 dniach
M-0	3,75	4,22	5,38
M-1/popiół lotny (25% m.c.)	1,99	2,97	3,36
M-2/pyły kamienne (5% m.c.)	2,66	3,78	4,47
M-3/pyły kamienne (25% m.c.)	2,52	3,89	4,80

Analiza wyników badań

Mieszanka betonowa z dodatkiem popiołu lotnego. Popioły lotne są obecnie najpowszechniej stosowanym, otrzymywanym sztucznie dodatkiem mineralnym. Należą do grupy dodatków pucolanowych, tj. charakteryzujących się aktywnością wobec składników cementu. Z uwagi na zbliżone do cementu uziarnienie są dobrym zamiennikiem tego spoiwa. Powszechnie stosowane ilości popiołów lotnych wynoszą 30% masy cementu. Kilkuletnie nasze doświadczenie w stosowaniu popiołów lotnych do betonu wibroprasowanego pozwoliło określić maksymalny udział tego dodatku w stosunku do wyjściowej masy spoiwa na poziomie 25%. Przy wyższej ilości nie udało się opracować receptury zapewniającej uzyskanie wymaganej wytrzymałości normowej.

Istotnym efektem zastosowania popiołu lotnego jest zmiana kinetyki rozwoju wytrzymałości. Jak bowiem wiadomo z literatury, m.in. z pracy [2], mieszanki z tym dodatkiem charakteryzują się wolniejszym tempem przyrostu wytrzymałości. Potwierdzają to nasze badania (tabela 4), jednocześnie wykazując istnienie tej prawidłowości w procesie dojrzewania betonu zagęszczanego przez wibroprasowanie.

Główną zaletą dodatku popiołu lotnego jest istotne obniżenie kosztów produkcji, przy jednoczesnym zachowaniu wysokich walorów estetycznych i odpowiednich cech wytrzymałościowych gotowego wyrobu. Jest to zatem rozwiązanie optymalne z ekonomicznego punktu widzenia.

Mieszanka betonowa z dodatkiem mikrokrzemionki. Zagadnieniu modyfikacji struktury betonu dodatkiem aktywnej mikrokrzemionki poświęcono wiele prac, m.in. [3]. Zalety tego dodatku są zatem powszechnie znane. Należy do nich zaliczyć przede wszystkim zwiększoną wytrzymałość (tabela 2). Jest ona rezultatem uszczelnienia struktury betonu (polegającego na zredukowaniu ilości porów kapilarnych) oraz reakcji z rozpuszczonymi w wodzie jonami wapniowymi.

Panuje pogląd, że udział mikrokrzemionki w ilości 30% całkowicie eliminuje portlandyt. Zgodnie z pracą [2], najczęściej stosowany udział tego dodatku nie przekracza jednak 15%, przy czym zauważalny przyrost wytrzymałości obserwuje się już przy dodatku w ilości 5%, co potwierdzają nasze badania (tabela 2).

Dodatek mikrokrzemionki już w niewielkiej ilości korzystnie modyfikuje strukturę porów, zmniejszając udział pustek kapilarnych na rzecz równomiernie rozproszonych porów żelowych [3]. Bezpośrednim efektem jest znaczne zmniejszenie przepuszczalności betonu.

Z uwagi na znaczny koszt produkcji wyrobów betonowych z dodatkiem mikrokrzemionki uznano, że optymalną ilością jest 5%, przy której zauważa się przyrost wytrzymałości przy jednoczesnym uszczelnieniu struktury, co nie tylko ogranicza ryzyko powstawania wykwitów solnych, lecz także poprawia takie cechy techniczne, jak urabialność mieszanki betonowej i ścieralność powierzchni gotowego wyrobu.

Mieszanka betonowa z dodatkiem pyłu kamiennego. Trzecim analizowanym dodatkiem mineralnym były pyły kamienne powstające przy produkcji kruszyw łamanych. Jest to zatem surowiec odpadowy, którego przetworzenie nadaje produkcji walory proekologiczne. W skład pyłów wchodzi wszystkie minerały najpopularniejszych skał magmowych, a mianowicie bazaltu oraz granitu. Wśród nich znajdują się m.in. kwarc, skalenie, dolomit, magnetyt, kalcyt oraz pirokseny.

Przeprowadzone przez nas badania granulometryczne wykazały, że uziarnienie pyłów kamiennych odpowiada rzędem wielkości uziarnieniu cementu. Udział wagowy ziaren poniżej 90 μm wynosił 81%, a udział ziaren poniżej 125 μm – 98%. Taki skład granulometryczny stwarza możliwości częściowej redukcji cementu, gdyż dodatek ten będzie znakomitym wypełniaczem.

Wpływ dodatku pyłów kamiennych na wytrzymałość betonu zweryfikowano laboratoryjnie na beleczkach z zapraw cementowych. Jak pokazują wyniki (tabela 1), przy 5% udziale pyłów w stosunku do początkowej ilości cementu następuje przyrost wytrzymałości wynikający z efektu wypełnienia struktury wytrzymałymi drobinami minerałów skał magmowych. Przy większej ilości tego dodatku wytrzymałość spada, lecz nawet przy 30% udziale uzyskane wyniki są lepsze niż w przypadku dodatku popiołów lotnych. Weryfikację uzyskanych wy-

ników przeprowadzono podczas produkcji betonu wibroprasowanego. Z uwagi na zaobserwowane ograniczenia urabialności mieszanki i konieczność utrzymania parametrów geometrycznych wyrobów określono maksymalną ilość dodatku pyłów kamiennych na poziomie 25%. Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu (tabela 4) była o ok. 10% wyższa niż w przypadku mieszanki z 5% tego dodatku. Ważną jest ponadto duża wytrzymałość odniesiona do analogicznej cechy betonu bez dodatków. Należy też wspomnieć o wpływie niektórych minerałów, które mogą być w składzie analizowanych pyłów, na pęcznienie alkaliczne. W związku z tym należy zbadać ten parametr w przypadku każdej partii pyłów. Zaproponowane rozwiązanie zapewnia relatywnie dobre parametry wytrzymałościowe, przy jednoczesnym obniżeniu kosztów produkcji. Ważny jest także efekt ekologiczny polegający na wbudowaniu materiału odpadowego do nowego produktu.

Wnioski

Popioły lotne pozwalają na produkcję wibroprasowanego betonu ze zredukowaną do 25% ilością cementu. Stwierdzono obniżenie dynamiki narastania wytrzymałości oraz zauważalnie niższą wytrzymałość 28-dniową. Z uwagi na niską cenę tego surowca jest to rozwiązanie optymalne z ekonomicznego punktu widzenia.

Dodatek mikrokrzemionki wyraźnie obniża ryzyko wystąpienia wykwitów solnych na powierzchni gotowego wyrobu. Dodatkową korzyścią jest przyrost wytrzymałości wczesnej oraz normowej. Ze względu na wysoką cenę zaproponowano udział tego surowca w ilości 5% w odniesieniu do wyjściowej masy spoiwa. Jest to minimalna ilość, przy której zauważa się poprawę estetyki wyrobu.

Pył kamienny jest wypełniaczem pozwalającym uzyskać dosyć dużą wytrzymałość (szczególnie w porównaniu z betonami z dodatkiem popiołów lotnych). Umożliwia on zredukowanie ilości cementu nawet do 25%. Ze względu na dobre parametry techniczne uzyskanego betonu oraz niski koszt pozyskania pyłu kamiennego należy wskazać to rozwiązanie jako najbardziej opłacalne.

Streszczenie

W artykule przedstawiono badania dodatków mineralnych stosowanych w produkcji wibroprasowanych elementów galanterii betonowej. Oprócz powszechnie stosowanych dodatków, czyli mikrokrzemionki i popiołów lotnych, omówiono modyfikację struktury betonu odpadem w postaci pyłów pochodzących z produkcji kruszyw łamanych. Jest to dodatek zdobywający obecnie coraz większą popularność.

Słowa kluczowe: beton, prefabrykacja, wibroprasowanie, dodatki.

Abstract

In this paper, the analysis of mineral additives used in production of vibropressed concrete decoration elements has been presented. In addition to the commonly used additives such as fly ash and microsilica, modification of structure with powder from aggregate dedusting has been discussed. This additive is actually gaining increasing popularity.

Literatura

- [1] Brylicki W.: Kostka brukowa z betonu wibroprasowanego. Wydawnictwo Polski Cement, Kraków 1998.
- [2] Kurdowski W.: Chemia cementu i betonu. Wydawnictwo Polski Cement, Kraków 2010; Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2010.
- [3] Nocuń-Wczelik W.: Pył krzemionkowy – właściwości i zastosowanie w betonie. Wydawnictwo Polski Cement, Kraków 2005.