

Wpływ stopnia rozdrobnienia metakaolinu na właściwości samozagęszczalnych betonów do robót podwodnych

Stefania Grzeszczyk¹, Krystian Jurowski²

*Katedra Inżynierii Materiałów Budowlanych, Wydział Budownictwa, Politechnika Opolska,
e-mail: ¹s.grzeszczyk@po.opole.pl, ²k.jurowski@po.opole.pl*

Streszczenie: W pracy opisano badania wpływu metakaolinu o różnym stopniu rozdrobnienia w ilości 20% w stosunku do masy cementu na właściwości samozagęszczalnych betonów do robót podwodnych. Wykazano, że metakaolin o większym stopniu rozdrobnienia zwiększa skuteczność działania domieszki DZL i superplastyfikatora w mieszance betonowej. Uwidacznia się to mniejszą wymywalnością zaczynu z mieszanki i większym jej upłynnieniem w porównaniu do mieszanki zawierającej metakaolin o mniejszej zawartości frakcji drobnych.

Ponadto stwierdzono, że samozagęszczalny beton do robót podwodnych zawierający metakaolin o większym stopniu rozdrobnienia uzyskuje większą wytrzymałość na ściskanie oraz charakteryzuje się większą odpornością na działanie mrozu i środków odladzających.

Słowa kluczowe: Samozagęszczalny beton do robót podwodnych, metakaolin, stopień rozdrobnienia

1. Wprowadzenie

Betony samozagęszczalne do robót podwodnych są bardzo dogodnym rozwiązaniem w wykonawstwie konstrukcji inżynierskich takich, jak na przykład filary mostów czy nabrzeżne budynki [1,2]. Właściwości tych mieszanek ułatwiają ich pompowanie i układanie w deskowaniu. Ponadto zapewniają samopoziomowanie i nie wymagają wibrowania mechanicznego w często trudno dostępnych miejscach. Uzyskanie odpowiednich właściwości mieszanki betonowej wymaga zastosowania domieszek chemicznych, superplastyfikatora w celu uzyskania upłynnienia mieszanki oraz domieszki zwiększającej lepkość, ograniczającej wymywanie zaczynu [3].

Odporność mieszanki betonowej na wymywanie zaczynu jest uzależniona między innymi od zawartości frakcji drobnych w spoiwie. Z tego względu do betonów do robót podwodnych jako dodatki mineralne stosuje się głównie pyły krzemionkowe oraz popioły lotne [4].

Istnieje wiele prac poświęconych badaniom wpływu metakaolinu na właściwości betonu. Ich autorzy zgodnie twierdzą, że zaletą stosowania tego dodatku mineralnego w betonie jest przede wszystkim zwiększenie wytrzymałości na ściskanie we wczesnym okresie dojrzewania np. [5]. Ponadto, metakaolin powoduje poprawę mikrostruktury porów, zmniejszenie przepuszczalności betonu i zwiększenie odporności na działanie mrozu [6,7]. Są także badania stwierdzające, że zwiększenie stopnia rozdrobnienia metakaolinu wymaga stosowania większej ilości superplastyfikatora w celu uzyskania określonych wartości parametrów mieszanki samozagęszczającej się [8]. Skład ziarnowy cementu

i dodatków mineralnych w cemencie jest ważnym czynnikiem wpływającym na skuteczność działania superplastyfikatora [9,10]. Zdania na ten temat są podzielone, jest to wynikiem wielu nakładających się czynników. Do nich przede wszystkim należy zaliczyć zawartość dodatku mineralnego w cemencie oraz skład ziarnowy dodatku mineralnego [11]. Nie bez znaczenia jest stopień rozdrobnienia cementu i jego rodzaj (zawartość C_3A) [12].

W pracy przeprowadzono badania wpływu stopnia rozdrobnienia metakaolinu wprowadzonego do cementu na skuteczność działania superplastyfikatora i domieszki zwiększającej lepkość w mieszance samozagęszczającej się do robót podwodnych oraz na właściwości stwardniałego betonu.

2. Materiały do badań

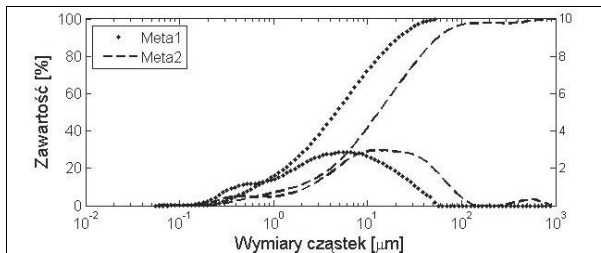
2.1. Cement i domieszki chemiczne

Do otrzymania mieszanek betonowych zastosowano cement portlandzki CEM I 42,5R. Skład chemiczny klinkieru portlandzkiego przedstawiono w tabeli 1. Skład fazowy klinkieru, obliczony według wzorów Bogue'a, jest następujący: C_3S -53,3%, C_2S -17,7%, C_3A -11,5%, C_4AF -10,2% mas. Jako dodatek mineralny do cementu stosowano metakaolin o większym i mniejszym stopniu rozdrobnienia odpowiednio: Meta1 i Meta2 (rys.1). Skład chemiczny metakaolinu przedstawiono w tabeli 1, a skład ziarnowy oznaczony przy pomocy laserowego analizatora uziarnienia (MASTERSIZER MS14) przedstawiono na rys. 1.

Zastosowane domieszki chemiczne to superplastyfikator polikarboksyłanowy (SP) oraz domieszka zwiększająca lepkość (DZL) na bazie eterów polioksyetylenowych celulozy.

Tabela 1. Skład chemiczny klinkieru i metakaolinu

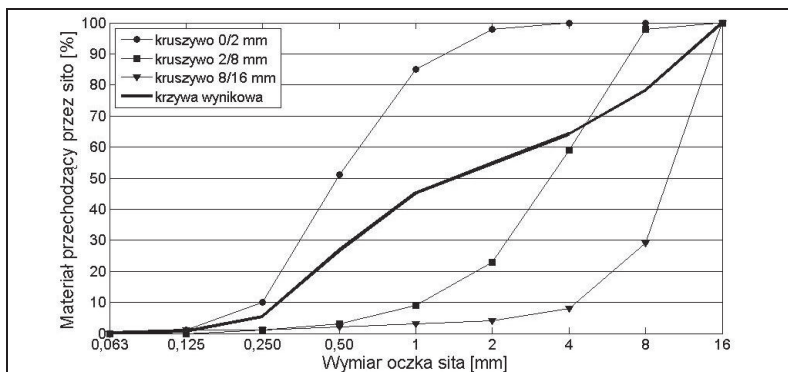
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O
	[%]							
Klinkier	20,2	6,5	3,4	-	65,0	1,5	1,0	0,2
Metakaolin	52,7	40,6	1,93	0,4	0,3	0,3	1,6	0,0



Rys. 1. Skład ziarnowy i kumulacyjna krzywa uziarnienia metakaolinu Meta1 i Meta2

2.2. Mieszanki betonowe

Mieszanki betonowe samozagęszczające się do robót podwodnych z dodatkiem metakaolinu Meta1 i Meta2 (odpowiednio M1 i M2) zaprojektowano zgodnie z metodą Okamury i Ozawy [13]. Wymagany rozplływ mieszanki oraz odporność na wymywanie zaczynu osiągnięto przez odpowiedni dobór ilości superplastyfikatora i domieszki DZL. Stosowano kruszywo naturalne, frakcje: 0/2 mm, 2/8 mm i 8/16 mm, które zmieszano w stosunku, odpowiednio 5/2/3. Krzywą uziarnienia zastosowanego kruszywa oraz krzywe uziarnienia poszczególnych frakcji przedstawiono na rys. 2. Skład mieszanek betonowych podano w tabeli 2. Ilość domieszek chemicznych SP i DZL w mieszance wyniosła odpowiednio 1,9% i 1,2% w stosunku do masy cementu.



Rys. 2. Krzywa uziarnienia stosowanego kruszywa i poszczególnych frakcji

Tabela 2. Skład mieszanek betonowych [kg/m³]

Beton	Spoiwo		Woda	Kruszywo, frakcja [mm]			SP [%mas]	DZL [%mas]
	Cement	Metakaolin		0/2	2/8	8/16		
M1	463	116 (Meta1)	239	700	280	420	1,9	1,2
M2	454	114 (Meta2)	239	700	280	420	1,9	1,2

3. Metody badań

Pomiary reologiczne zaczynów przeprowadzono przy użyciu viskozymetru rotacyjnego o współosiowych cylindrach typu RV2. Właściwości reologiczne zostały określone na podstawie uzyskanych krzywych płynięcia przy rosnących i malejących szybkościach ścinania w zakresie od 0 do 140 s⁻¹. Granicę płynięcia i lepkość plastyczną wyznaczono w oparciu o model Binghama. Badania reologiczne wykonano w stałej temperaturze 21°C.

Konsystencję mieszanki badano metodą J-pierścienia według normy PN-EN 12350-12:2012. Określono średnicę rozplywu (d_{gr}), czas rozplywu (T_{500}) oraz parametr przepływalności (PJ) mieszanki. Gęstość mieszanki betonowej oznaczono zgodnie z normą PN-EN 12350-6:2011, a badaną zawartość powietrza w mieszance betonowej zgodnie z normą PN-EN 12350-7:2011.

Oznaczenia wymywalności zaczynu z mieszanki betonowej przeprowadzono zgodnie z normą ASTM CRD-C 61-89A.

Badania wytrzymałości na ściskanie wykonano wg PN-EN 12390-3:2011 po 7, 14 i 28 dniach. Próbkę betonu pielęgnowano w wodzie zgodnie z PN-EN 12390-2:2011.

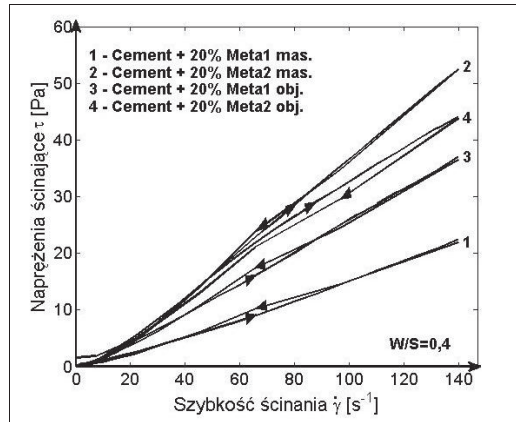
Odporność na zamrażanie/rozmarzanie w obecności soli odladzającej oznaczono zgodnie z normą PKN-CEN/TS 12390-9:2007. Oceny mrozoodporności betonu dokonano na podstawie wymagań zawartych w normie SS 137244:2005.

4. Wyniki badań i ich dyskusja

Wyniki badań konsystencji mieszanek betonowych przedstawiono w tabeli 3. Jak wynika z danych zamieszczonych w tabeli 3 przy zastosowaniu jednakowej ilości superplastyfikatora mieszanka betonowa (M1) zawierająca metakaolin o większym stopniu rozdrobnienia (Meta1) wykazuje większy stopień upłynnienia (średnica rozplywu jest większa, natomiast czas rozplywu T_{500} mniejszy). Ponadto mieszanka ta osiąga większą odporność na wymywanie zaczynu. Większe upłynnienie stwierdzono także w zaczynach z cementu zawierającego metakaolin Meta1 wobec superplastyfikatora.

Tabela 3. Wyniki badań mieszanki betonowej

Mieszanka	Gęstość [kg/m ³]	Zawartość powietrza [%]	PJ [mm]	dśr [mm]	T500 [s]	Wymywalność [%]
M1	1890	3,75	1,2	630	11	3,3
M2	1960	3,43	1,6	570	20	3,9



Rys. 3. Krzywe płynięcia zaczynów z cementem zawierającym 20% metakaolinu o różnym stopniu rozdrobnienia w obecności 2% superplastyfikatora

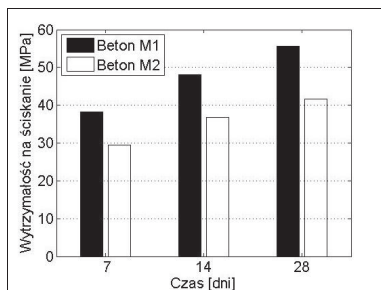
W celu wykazania wpływu stopnia rozdrobnienia metakaolinu na upłynnienie zaczynów cementowych w obecności superplastyfikatora wykonano badania reologiczne zaczynów z cementów zawierających 20% masowych, a także 20% objętościowych metakaolinu ze względu na różnice gęstości metakaolinu Meta1 i Meta2. Gęstość metakaolinu Meta1 wynosi 2,42 g/dm³, a Meta2 2,23 g/dm³. Ilość superplastyfikatora w zaczynie wynosiła 2% mas. w stosunku do masy cementu. Wyniki badań pozwoliły stwierdzić, że zarówno w jednym jak i w drugim przypadku zaczyny zawierające metakaolin Meta1 charakteryzują się mniejszą lepkością plastyczną, odpowiednio 0,17 i 0,28 Pa·s, w porównaniu do lepkości zaczynów z cementu zawierającego metakaolin Meta2 o mniejszym stopniu rozdrobnienia, które wynoszą odpowiednio 0,41 i 0,33 Pa·s. Powyższe pozwoliło stwierdzić, że upłynnienie zaczynu w obecności superplastyfikatora wzrasta ze wzrostem stopnia rozdrobnienia metakaolinu w cemencie, a więc ze wzrostem udziału cząstek drobnych w mikrowypełniaczu. Metakaolin Meta1 zawiera 75% mas. cząstek poniżej 10μm, podczas gdy Meta2 44% mas. Korzystny wpływ cząstek drobnych na upłynnienie zaczynów cementowych w obecności superplastyfikatora wykazali także autorzy prac [11,12].

Tabela 4. Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie i odporności na działanie mrozu w obecności środków odladzających betonów M1 i M2

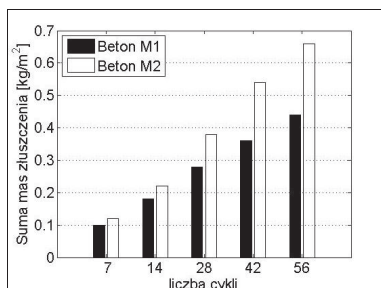
Rodzaj betonu	Wytrzymałość na ściskanie po dniach [MPa]				Suma mas złuszczenia po cyklach [kg/m ²]			
	7	14	28	7	14	28	42	56
M1	38,2	48,0	55,7	0,10	0,18	0,28	0,36	0,44
M2	29,5	36,8	41,6	0,12	0,22	0,38	0,54	0,66

Stwierdzono niewielkie zmniejszenie stopnia wymywalności zaczynu z mieszanki betonowej wraz ze wzrostem rozdrobnienia metakaolinu.

Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie po 7, 14 i 28 dniach przedstawiono tabeli 4 i na rysunku 4 (niepewność pomiaru 2,2 MPa). Z badań wynika, że wytrzymałość na ściskanie betonu (M1) zawierającego metakaolin o większym stopniu rozdrobnienia jest w każdym wieku betonu większa o ponad 20% od wytrzymałości betonu M2.



Rys. 4. Wytrzymałość na ściskanie betonów M1 i M2 po 7, 14 i 28 dniach



Rys. 5. Wyniki badania mrozoodporności betonów M1 i M2 w obecności soli odładzającej

Wyniki badań odporności na działanie mrozu w obecności soli odładzającej przedstawiono w tabeli 4 oraz na rysunku 5. Jak widać lepszą odporność na działanie mrozu w obecności środków odładzających wykazuje beton z dodatkiem metakaolinu o większym stopniu rozdrobnienia. Po 56 cyklach suma masy złuszczenia dla betonów M1 i M2 osiąga wartość odpowiednio $0,44 \pm 0,06$ i $0,66 \pm 0,12$ kg/m^2 . Wartości te klasyfikują mrozoodporność tych betonów jako „dobrą” dla betonu M1 i „dostateczną” dla betonu M2.

5. Wnioski

Wykazano wpływ stopnia rozdrobnienia metakaolinu stosowanego jako mikrowypełniacz w samozagęszczających się mieszankach betonowych do robót podwodnych na właściwości mieszanki betonowej i stwardniałego betonu.

Stwierdzono, że mieszanki betonowe zawierające metakaolin o większym stopniu rozdrobnienia wykazują większe upłynnienie mieszanki i charakteryzują się mniejszą wymywalnością zaczynu, a stwardniały beton osiąga większą wytrzymałość na ściskanie oraz większą odporność na działanie mrozu i środków odładzających.

Korzystny wpływ metakaolinu o większym stopniu rozdrobnienia na upłynnienie samozagęszczającej się mieszanki betonowej do robót podwodnych, potwierdzony badaniami reologicznymi zaczynów cementowych, wskazuje na możliwość zmniejszenia w tym przypadku ilości superplastyfikatora w mieszance betonowej przy zachowaniu wymaganych parametrów mieszanki.

Literatura

- 1 Kańska S., Sołtysik R. Przykłady zastosowania technologii betonowania pod wodą w remontach budowli hydrotechnicznych. *Przegląd Budowlany*, 7-8 (2010) 54-57.
- 2 Kańska S. Doświadczenia z betonowania fundamentu cylindrycznej wieży ujęcia wody z zastosowaniem betonów podwodnych. *Inżynieria i Budownictwo* 10 (2011) 519-522.
- 3 Horszczaruk E., Flis I., Wąż S. Betony podwodne – właściwości, projektowanie, technologie. Dni betonu 2004, SPC – Polski Cement.
- 4 Horszczaruk E. Domieszki i dodatki do betonów podwodnych. *Materiały Budowlane* 3 (2009) 42-43.
- 5 Madandoust R. S., Mousavi Y. Fresh and hardened properties of self-compacting concrete containing metakaolin. *Construction and Building Materials* 35 (2012) 752–760.
- 6 Assem A.A., Lachemi H. M., Khandaker, Hossain M.A. Effect of metakaolin and silica fume on the durability of self-consolidating concrete. *Cement and Concrete Composites* 34 (2012) 801–807.
- 7 Karahan O., Khandaker M.A. Hossain, Ozbay E., Lachemi M., Sancak E. Effect of metakaolin content on the properties self-consolidating lightweight concrete. *Construction and Building Materials* 31 (2012) 320–325.
- 8 Melo K. A., Carneiro A. M.P. Effect of Metakaolin's finesses and content in self-consolidating concrete. *Construction and Building Materials* 24 (2010) 1529–1535.
- 9 Nehdi M., Mindess S., Aitcin P.C. Rheology of high-performance concrete: Effect of ultrafine particles. *Cement and Concrete Research* 28 (1998) 687-697.
- 10 HH Bache. Densified cement-based ultrafine particle-based materials. *Proc 2nd Int Conf in Superplasticizers in Concrete Ottawa*, 185-213.
- 11 Grzeszczyk S., Janowska-Renkas E. The influence of limestone fillers on the properties of fresh cement paste containing superplasticizers. *Construction and Building Materials* 26 (2012) 411-415.
- 12 Grzeszczyk S. *Reologia zawiesin cementowych*. PAN, Warszawa 1999.
- 13 Okamura H., Ozawa K. Mix-design for self-compacting concrete. *Concrete Library of JSCE* 25 (1995) 107-120.

The influence of the fineness of metakaolin on the properties of self-compacting underwater concrete

Stefania Grzeszczyk¹, Krystian Jurowski²

*Department of Building Materials Engineering, Faculty of Civil Engineering,
Opole University of Technology, e-mail: ¹s.grzeszczyk@po.opole.pl, ²k.jurowski@po.opole.pl*

Abstract: The paper presents the research results of the influence of metakaolin of different fineness that is applied as a microfiller (20% of the cement mass) on the properties of self-compacting underwater concrete.

It is demonstrated that the metakaolin with higher fineness improves the efficiency of antiwashout admixture and superplasticizer in concrete mixture. It was revealed that the higher resistance to washout of cement paste from the concrete mixture and higher flowability in comparison to the mixture containing metakaolin with lower content of fine fraction (below 10µm). In addition, the positive effect of the higher fineness of metakaolin on the compressive strength and freeze thaw scaling resistance was proven in the self-compacting underwater concrete.

Keywords: Self-compacting underwater concrete, metakaolin, fineness degree