

dr hab. inż. Izabela Major, prof. PCz^{1*)}

ORCID: 0000-0003-1234-9317

dr inż. Bogdan Langier¹⁾

ORCID: 0000-0001-5143-6013

dr inż. Jacek Halbiniak¹⁾

ORCID: 0000-0002-2299-5913

Ocena wybranych właściwości oraz trwałości mrozowej betonów modyfikowanych dodatkiem mączki kwarcowej

Assessment of selected properties and frost durability of concrete modified with the addition of quartz powder

DOI: 10.15199/33.2023.11.08

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań dotyczących wpływu mączki kwarcowej jako mineralnego proszku aktywowanego na wybrane właściwości betonów zwykłych bez i z domieszką napowietrzającą. Zastosowanie tego rodzaju dodatków mineralnych może prowadzić do oszczędności materiałowych i kosztowych, jednocześnie zwiększając wydajność i jakość betonu. Do badań użyto mączki pozyskanej ze zmielenia normowego piasku kwarcowego. Analizie poddano wpływ różnej ilości dodatku mączki kwarcowej stosowanej jako uszczelnienie stosu ziarnowego na trwałość betonów narażonych na cykliczne zamrażanie i rozmrażanie oraz wybrane właściwości mieszanki betonowej i betonu. Zrealizowany program badań wykazał, że dodatek mączki kwarcowej pozytywnie wpłynął na badane właściwości kompozytów betonowych. Betony z udziałem mączki kwarcowej uzyskały wyższe wartości wytrzymałości na ściskanie, mniejszą nasiąkliwość, mniejszą głębokość penetracji wody oraz większą trwałość mrozową w stosunku do betonu referencyjnego.

Słowa kluczowe: mączka kwarcowa; proszek reaktywny; beton zwykły; właściwości betonu.

Abstract. The article presents the results of research on the effect of quartz powder as a mineral activated powder on selected properties of ordinary concretes with and without air-entraining admixture. The use of these types of mineral additives can lead to material and cost savings while increasing concrete performance and quality. Powder obtained from grinding standard quartz sand was used for the tests. The impact of different amounts of quartz powder added as a seal to the grain pile on the durability of concrete exposed to cyclic freezing and thawing as well as selected properties of the concrete mix and concrete was analyzed. The completed research program showed that the addition of quartz powder had a positive effect on the tested properties of concrete composites. Concretes containing quartz powder obtained higher values of compressive strength, lower water absorption, lower water penetration depth and greater frost durability compared to the reference concrete.

Keywords: quartz powder; reactive powder; ordinary concrete; concrete properties.

W ostatnich latach rozwój nowych technologii i materiałów pozwolił na doskonalenie właściwości betonu, w tym jego wytrzymałości, trwałości i odporności na różne czynniki atmosferyczne [1, 2]. Stosowanie w betonach drobnoziarnistych dodatków prowadzi do uszczelnienia stosu ziarnowego mieszanki kruszyw [3]. Jednym z obszarów intensywnych badań betonu jest wpływ proszków reaktywnych na jego właściwości, co zostało omówione w pracach [4, 5]. Proszki reaktywne, zwane również dodatkami mineralnymi, są to mikroskalowe cząsteczki, które dodawane są

do mieszanki betonowej w celu uzyskania określonych jej właściwości [6]. Wpływają one pozytywnie na strukturę warstwy stykowej kruszywo grube – zaczyn cementowy, ograniczając jej porowatość, co prowadzi do uzyskania jednorodnej mikrostruktury matrycy cementowej. Zostało to wykazane w pracach [7, 8]. Istnieje wiele rodzajów mineralnych proszków reaktywnych, a jednym z nich jest mączka kwarcowa, która ze względu na właściwości fizyczne i chemiczne może wpływać na zmniejszenie nasiąkliwości, zwiększenie wytrzymałości na ściskanie w wyniku zagęszczenia struktury matrycy cementowej i uzyskanie struktury bez defektów makroskopowych [9]. Mączka kwarcowa jest też

ważnym składnikiem betonów wysoko-
kwarciowych RPC (*Reactive Powder Concrete*), które powinny mieć nie tylko dużą wytrzymałość i szczelność, ale także małą nasiąkliwość [10].

Celem badań była ocena wpływu mączki kwarcowej uzyskanej w wyniku zmielenia normowego piasku kwarcowego na wybrane właściwości betonów zwykłych bez i z domieszką napowietrzającą. W tym kontekście zostały przeprowadzone szczegółowe badania laboratoryjne, które pozwoliły ocenić, w jaki sposób dodatek mączki kwarcowej w ilości 5, 7,5 i 10% masy cementu, dodawanej do kruszywa jako uszczelnienie stosu kruszywowego, wpływa na wytrzymałość na ściskanie, głębokość penetracji wody pod ciśnieniem oraz nasiąkliwość i mrozoodporność badanych betonów. Zbadano rów-

¹⁾ Politechnika Częstochowska, Wydział Budownictwa

^{*)} Adres do korespondencji:
izabela.major@pcz.pl

nież, w przypadku określonej ilości procentowej mączki kwarcowej, jej wpływ na konsystencję mieszanki betonowej i zawartość powietrza. Przeprowadzona analiza miała na celu określenie wpływu różnej ilości zastosowanego dodatku na cechy mechaniczne oraz trwałość betonów napowietrzonych podczas cyklicznego zamrażania i rozmrażania.

Program badań

Plan badań obejmował 8 serii betonów modyfikowanych dodatkiem mączki kwarcowej pochodzącej ze zmielenia normowego piasku kwarcowego. Rozdrobnienie piasku kwarcowego polegało na jego czterokrotnym zmieleniu w dezintegratorze (fotografia 1). Mączkę kwarcową dodawano do kruszywa w ilości 5, 7,5 i 10% masy cementu jako uszczelnienie stosu kruszywowego. Przyjęto następujące oznaczenia badanych serii betonów: R0 – referencyjny; R0N – referencyjny z domieszką napowietrzającą (DN); R5, R7 i R10 – z mączką kwarcową odpowiednio w ilości 5%, 7,5% i 10% oraz R5N, R7N i R10N – odpowiednio jak w przy-

padku serii R5, R7 i R10, ale z domieszką napowietrzającą. Do wszystkich betonów dodano plastyfikator na bazie lignosulfonianów i naftalenów, polecany do produkcji betonów klas C8/10 – C30/37, a w przypadku serii R0N – środek na bazie niejonowych surfaktantów, który powoduje wytwarzanie małych pęcherzyków powietrza (o średnicy 10 – 300 μm) w mieszance betonowej lub zaprawie i działa uplastyczniająco w świeżej mieszance betonowej, a w betonie poprawia jego mrozoodporność i odporność na działanie soli posypowych. Mączkę kwarcową mieszano z cementem, a następnie dozowano do mieszalnika laboratoryjnego. Z każdej serii mieszanki betonowej wykonano po 3 próbki sześciennego o krawędzi 150 mm do badania wytrzymałości, nasiąkliwości, głębokości penetracji wody i 12 sztuk do badania mrozoodporności.

Charakterystyka materiałów

Do mieszanek betonowych zastosowano cement portlandzki CEM I 42,5R, którego właściwości fizykochemi-

czne podano w [11] oraz kruszywo uzyskane z mieszanki żwirowej o uziarnieniu 2 – 16 mm i piasku o ziarnach 0 – 4 mm. Uziarnienie mieszanki kruszyw przedstawiono w tabeli 1.

Mączka kwarcowa składała się z dwóch frakcji: 0 – 0,063 mm w ilości 65,8% oraz 0,063 – 0,125 mm w ilości 34,2%. Analizę jej składu pierwiastkowego wykonano z wykorzystaniem spektrometru fluorescencji rentgenowskiej z dyspersją energii (ED – XRF) – XRF SPECTRO XEPOS. Badania przeprowadzono na trzech próbkach mączki kwarcowej, a średnie wartości przedstawiono w tabelach 2 i 3. Skład chemiczny cementu (oznaczony również za pomocą wskazanego spektrometru) przedstawiono w tabeli 4. Wyniki analizy składu chemicznego mączki kwarcowej wykazały dużą zawartość tlenku krzemu (na poziomie 94,54%) oraz małą zawartość tlenku wapnia (1,14%). Skład badanych serii betonów przedstawiono w tabeli 5.



Fot. 1. Piasek normowy (a); mączka kwarcowa zmielona w dezintegratorze (b)
Photo 1. Standard sand (a); quartz powder ground in a disintegrator (b)

Tabela 1. Zawartość procentowa poszczególnych frakcji mączki kwarcowej i kruszywa
Table 1. Percentage content of individual fractions of quartz powder and aggregate

Frakcja [mm]	Mączka kwarcowa	Kruszywo serii referencyjnej R0	Kruszywo serii R5	Kruszywo serii R7	Kruszywo serii R10
0 – 0,063	65,8	0,3	0,9	1,2	1,4
0,063 – 0,125	34,2	0,7	1,0	1,1	1,3
0,125 – 0,25	–	5,8	5,7	5,7	5,7
0,25 – 0,5	–	18,4	18,2	18,2	18,1
0,5 – 1,0	–	11,4	11,3	11,3	11,2
1,0 – 2,0	–	6,5	6,4	6,4	6,4
2,0 – 4,0	–	14,0	13,9	13,8	13,8
4,0 – 8,0	–	16,0	16,0	15,9	15,8
8,0 – 16,0	–	26,8	26,6	26,4	26,3

Tabela 2. Zawartość procentowa głównych pierwiastków w mączce kwarcowej
Table 2. Percentage of major elements in quartz powder

Krzem Si	Aluminium Al	Wapń Ca	Sód Na	Żelazo Fe	Potas K	Magnez Mg
44,2	1,5	0,8	0,6	0,6	0,6	0,1

Tabela 3. Zawartość procentowa głównych tlenków w mączce kwarcowej
Table 3. Percentage of major oxides in quartz powder

Tlenek krzemu SiO ₂	Tlenek aluminium Al ₂ O ₃	Tlenek wapnia CaO	Tlenek sodu Na ₂ O	Tlenek żelaza (III) Fe ₂ O ₃	Tlenek potasu K ₂ O
94,54	2,76	1,14	0,8	0,8	0,7

Tabela 4. Skład chemiczny cementu CEM I 42,5R

Table 4. The chemical composition of CEM I 42,5R cement

Tlenek wapnia CaO	Tlenek krzemu SiO ₂	Tlenek aluminium Al ₂ O ₃	Tlenek żelaza Fe ₂ O ₃	Tlenek siarki SO ₃	Tlenek magnezu MgO	Tlenek sodu Na ₂ O	Tlenek potasu K ₂ O	Chlorki Cl
64,5	19,6	5,1	2,7	2,4	1,6	0,1	0,9	0,061

Tabela 5. Skład mieszanki betonowej na 1 m³ przy c/w = 0,5
 Table 5. Composition of the concrete mixture per 1 m³ at c/w = 0,5

Seria	Mączka kwarcowa [kg]	Piasek [kg]	Żwir		Kruszywo łączące [kg]	Cement (CEM I 42,5R) [kg]	Woda [kg]	Plastyfikator [% m.c.]	Domieszka napowietrzająca [% m.c.]
			2 – 8 mm [kg]	8 – 16 mm [kg]					
R0 R0N	–	684	782	488	1954	340	170	0,6	–
R5 R5N	17	678	775	484	1937				0,6
R7 R7N	25,5	675	771,5	482	1928,5				0,6
R10 R10N	34	672	768	480	1920				0,6

Badania laboratoryjne mieszanek betonowych

Konsystencja. Oznaczanie stopnia ciekłości mieszanki betonowej wykonano metodą opadu stożka zgodnie z normą PN-EN 12350-2:2019-07 [12] (tabela 6). Na rysunku 1 przedstawiono wyniki oznaczenia ciekłości mieszanki

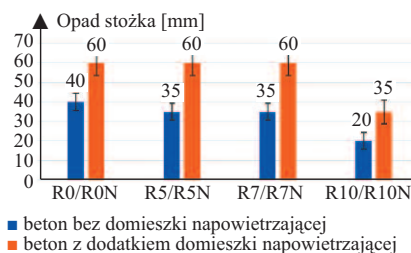
zachowywały się podobnie do mieszanek bez DN.

Zawartość powietrza. Badanie zawartości powietrza w mieszance betonowej zostało przeprowadzone metodą ciśnieniową wg PN-EN 12350-7:2019-08 [13]. Uzyskane wyniki pomiarów przedstawiono na rysunku 2. W badanych mieszankach

Tabela 6. Konsystencja badanych mieszanek betonowych

Table 6. Consistency of tested concrete mixes

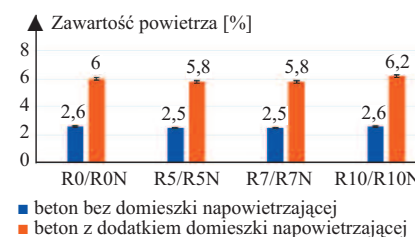
Seria	R0	R0N	R5	R5N	R7	R7N	R10	R10N
Opad stożka [mm]	40	60	35	60	35	60	20	35
Klasa konsystencji	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S1



Rys. 1. Konsystencja badanych mieszanek betonowych

Fig. 1. The consistency of tested concrete mixes

betonowej. Wprowadzenie do składu badanych betonów mączki kwarcowej spowodowało nieznaczne zmniejszenie ciekłości. W serii referencyjnej R0 uzyskano pomiar opadu stożka wynoszący 40 mm. Po dodaniu mączki w ilości 5 i 7,5% (serie R5, R7) uzyskano opad stożka 35 mm, natomiast wyraźny spadek ciekłości odnotowano w serii R10 z dodatkiem 10% mączki. W tym przypadku opad stożka zmniejszył się do 20 mm, ale nie spowodowało to zmiany przypisanej klasy konsystencji S1. Mieszanki betonowe z dodatkiem domieszki napowietrzającej (DN) wykazywały większy opad stożka w porównaniu z mieszankami bez DN, ale po wprowadzaniu stopniowo większej zawartości mączki kwarcowej



Rys. 2. Procentowa zawartość powietrza w badanych mieszankach betonowych

Fig. 2. The percentage of air content in the tested concrete mixes

betonowych nie zaobserwowano istotnego wpływu mączki kwarcowej na zawartość powietrza badaną metodą ciśnieniową.

Badania laboratoryjne betonów

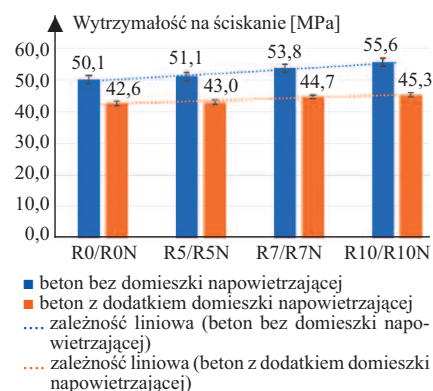
Wytrzymałość na ściskanie. Badanie zostało przeprowadzone wg normy z PN-EN 12390-3:2019-07 [14]. Wszystkie serie badanych mieszanek betonowych przygotowano zgodnie z wytycznymi PN-EN 12390-2:2019-07 [15],

z zachowaniem kolejności dozowania składników oraz czasu mieszania. Mieszanka betonowa była zagęszczana w formach na stole wibracyjnym. Po 24 h próbki zostały rozformowane i umieszczone w wodzie w temperaturze 20°C. Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie oraz odpowiadające im klasy wytrzymałości zestawiono w tabeli 7. Na fotografii 2 przedstawiono próbkę podczas badań, a na rysunku 3 wyniki wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach dojrzewania. Wprowadzenie do mieszanki be-



Fot. 2. Prasa do badania wytrzymałości na ściskanie

Photo 2. Compressive strength testing



Rys. 3. Średnia wytrzymałość na ściskanie badanych betonów po 28 dniach dojrzewania

Fig. 3. The average compressive strength of the tested concretes after 28 days of curing

tonowej mączki kwarcowej spowodowało przyrost wytrzymałości betonów na ściskanie po 28 dniach dojrzewania. Wytrzymałość na ściskanie zwiększyła się od wartości 50,1 MPa (seria R0) do wartości 55,6 MPa przy ilości mączki 10% (seria R10). Podobną zależność stwierdzono w przypadku stosowania w składzie domieszki napowietrzającej

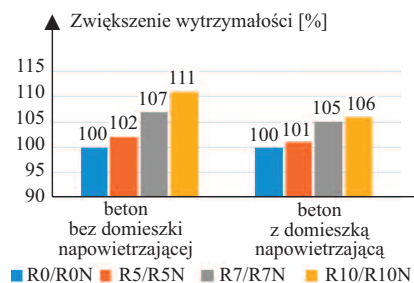
Tabela 7. Średnia wytrzymałość na ściskanie betonów po 28 dniach dojrzewania

Table 7. Average compressive strength of concrete after 28 days of curing

Seria	R0	R0N	R5	R5N	R7	R7N	R10	R10N
f _{cm} [MPa]	50,1	42,6	51,1	43,0	53,8	44,7	55,6	45,3
Odchylenie standardowe s [MPa]	1,56	0,77	0,86	1,49	1,47	1,28	2,05	0,63
Współczynnik zmienności CV [%]	3,1	1,8	1,7	3,5	2,7	2,9	3,7	1,4
Klasa wytrzymałości	C35/45	C30/37	C35/45	C30/37	C35/45	C30/37	C40/50	C30/37

(DN). W betonach bez domieszki napowietrzającej (DN) można zauważyć istotniejszą tendencję poprawy wytrzymałości w wyniku dodania mączki kwarcowej. Największy przyrost średniej wytrzymałości na ściskanie odnotowano w przypadku serii R10 i wyniósł 5,5 MPa w stosunku do serii R0. Linia trendu przebiega wyraźniej w górę w porównaniu z linią trendu betonów z DN.

Na rysunku 4 przedstawiono zmianę wytrzymałości na ściskanie w betonie bez i z domieszką napowietrzającą, wyrażoną w procentach, wynikającą ze wzrostu ilości mączki kwarcowej w składzie betonów. Stwierdzono szczególnie korzystne oddziaływanie dodatku mączki na wytrzymałość betonów w przypadku serii bez domieszki napowietrzającej.



Rys. 4. Wpływ ilości mączki kwarcowej na procentową zmianę wytrzymałości na ściskanie betonów

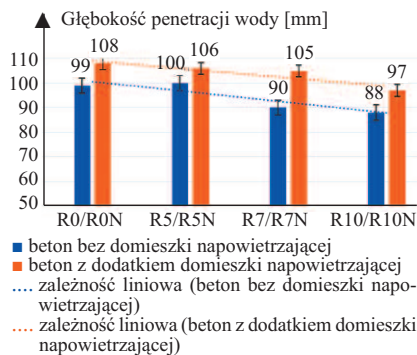
Fig. 4. Influence of the amount of quartz powder on the percentage change of concrete compressive strength

Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem. Badanie zostało zrealizowane zgodnie z PN-EN 12390-8:2019-08 [16]. Próbkę podczas badania pokazano na fotografii 3. Uzyskane wyniki, z uwzględnieniem odchylenia standardowego, przedstawiono na rysunku 5. Wskazują one na niewielką zmianę, która kształtuje się najkorzystniej w przypadku serii betonów z dodatkiem mączki kwarcowej w ilości 10% (serie R10



Fot. 3. Próbkę podczas badania głębokości penetracji wody

Photo 3. Samples during the water penetration depth



Rys. 5. Wyniki badania penetracji wody pod ciśnieniem

Fig. 5. Pressurized water penetration test results

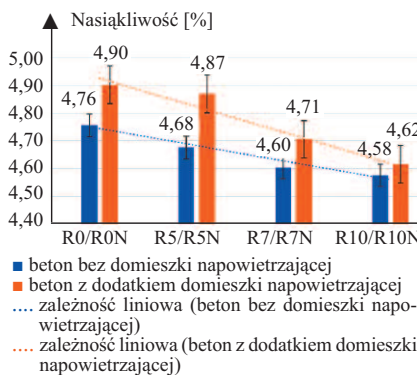
oraz R10N). W seriach tych widać lepsze uszczelnienie betonu niż próbek z mniejszą ilością mączki kwarcowej. Zależność ta występuje zarówno w betonach bez, jak i z domieszką napowietrzającą.

Nasiąkliwość badanych betonów. Badanie absorpcji wody pod ciśnieniem atmosferycznym przeprowadzono na próbkach przygotowywanych zgodnie z PN-EN 12390-2:2019-07 [15], które stopniowo zanurzano w wodzie, gdzie pozostały do pełnego nasycenia i uzyskania stałej masy. Następnie zostały zważone oraz poddane suszeniu do stałej masy w suszarce w temperaturze 95°C. Uzyskane wyniki zestawiono w tabeli 8 oraz na rysunku 6.

Tabela 8. Wyniki badania absorpcji wody w betonach

Table 8. Water absorption test results for the concretes

Seria	R0	R0N	R5	R5N	R7	R7N	R10	R10N
Nasiąkliwość [%]	4,76	4,9	4,68	4,87	4,6	4,71	4,58	4,62
Odchylenie standardowe s [%]	0,024	0,021	0,025	0,022	0,026	0,031	0,029	0,042
Współczynnik zmienności CV [%]	0,5	0,4	0,5	0,4	0,6	0,7	0,6	0,9

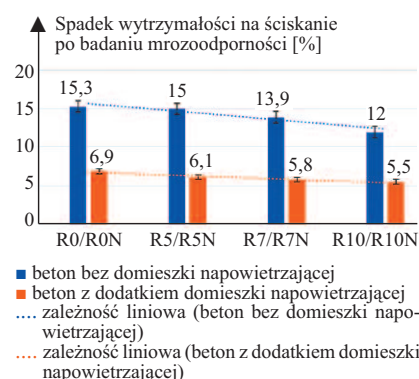


Rys. 6. Wyniki badania nasiąkliwości wodą z uwzględnieniem odchylenia standardowego

Fig. 6. The results of the water absorption test taking into account the standard deviation

Oznaczenie nasiąkliwości wodą wykazało, że wraz ze zwiększaniem ilości mączki kwarcowej w składzie betonów następowało uszczelnienie struktury i nieznaczny spadek nasiąkliwości. Najmniejszą nasiąkliwość wykazały betony serii R10 (4,58%) oraz R10N (4,62%). Wyznaczone linie trendu pokazują większą tendencję do uszczelnienia betonów wraz ze zwiększeniem ilości dodatku mączki kwarcowej.

Mrozoodporność. Badanie trwałości mrozowej betonów zrealizowano zgodnie z PN-B-06265:2022-08 [17] w przypadku 150 cykli zamrażania/rozmarzania. Wyniki badania mrozoodporności betonów metodą bezpośrednią, z uwzględnieniem odchylenia standardowego, przedstawiono na rysunku 7. W przeprowadzonych badaniach nie zaobserwowano spadku masy. Na ich podstawie stwierdzono, że jest to beton mrozoodporny, gdyż spadek wytrzymałości nie przekroczył 20%, a w badaniu ubytku masy w każdym przypadku wyniósł 0%. Rezultaty badań wskazują na korzystne oddziaływanie dodatku mączki kwarcowej na beton bez domieszki napowietrzającej, jak i z DN narażony na cykliczne zamrażanie i rozmrażanie. Nieznacznie korzystniejszy wpływ ilości dodatku mączki można zaobserwować w betonach nienapowietrzonych.



Rys. 7. Wyniki badania mrozoodporności (zmniejszenie wytrzymałości) po 150 cyklach

Fig. 7. The results of the frost resistance test (decrease of strength) after 150 cycles

Omówienie wyników i wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że:

- dodatek mączki kwarcowej wpływa na ciekłość mieszanki betonowej, powodując jej nieznaczne pogorszenie. W badaniach uzyskano największy spadek opadu stożka w przypadku zawartości mączki kwarcowej 10%, który wyniósł 22,2% w betonie bez domieszki napowietrzającej oraz 16% w betonach z DN. Modyfikacja składu betonu za pomocą mączki kwarcowej pozytywnie wpłynęła na jego parametry mechaniczne, co jest wyraźniejsze w betonach bez domieszki napowietrzającej. Beton referencyjny serii R0 uzyskał średnią wytrzymałość na ściskanie $f_{cm} = 50,1$ MPa, a wytrzymałość modyfikowanego betonu z udziałem 10% mączki kwarcowej wyniosła $f_{cm} = 55,6$ MPa i była o 11% większa w porównaniu z betonem referencyjnym (R0). Analogicznie w przypadku betonów z domieszką napowietrzającą wzrost wytrzymałości betonu serii R10N wyniósł 6% w stosunku do betonu serii R0N. W betonach zwykłych nieciągłość struktury matrycy cementowej oraz stref stykowych stanowi najsłabsze ogniwo, które może być inicjatorem mikropęknięć. Zastosowanie drobnych frakcji wypełniacza w postaci np. mączki kwarcowej pozwala na ujednoczenie struktury matrycy cementowej oraz wzmocnienie warstwy stykowej kruszywo – zaczyn cementowy, na co wskazują A. Denisiewicz [10] oraz uzyskane wyniki badań;

- mączka kwarcowa w składzie betonów zwykłych wpływa na uszczelnienie betonu zarówno w betonach bez, jak i z domieszką napowietrzającą. Zastosowanie mączki kwarcowej w badanych betonach zwykłych poprawia analizowane cechy ze względu na jej aktywność puculanową. Beton referencyjny bez dodatku mączki (R0) uzyskał głębokość penetracji wody 99 mm. Dodatek mączki w ilości 10% w betonie serii R10 spowodował spadek głębokości penetracji wody o 11%. Wszystkie serie betonów z dodatkiem mączki kwarcowej wykazały także mniejsze wartości nasiąkliwości w porównaniu z betonami referencyjnymi. Wyniki badań świadczą, że mączka kwarcowa zagęściła strukturę matrycy cementowej, co pozytywnie wpłynęło

na jej uszczelnienie i przełożyło się na wzrost wytrzymałości na ściskanie. Duża szczelność struktury betonu modyfikowanego mączką kwarcową jest również wskazywana w pracy [1] jako cecha charakterystyczna takich betonów;

- dodatek mączki kwarcowej wpływa na poprawę mrozoodporności betonów. W betonach z dodatkiem mączki kwarcowej stwierdzono mniejszy spadek wytrzymałości po 150 cyklach w porównaniu z analogicznymi betonami bez tego dodatku. Beton serii referencyjnej (R0) bez domieszki napowietrzającej uzyskał spadek wytrzymałości po 150 cyklach na poziomie 15,3%. Ten sam beton bez domieszki napowietrzającej z dodatkiem 5, 7,5 oraz 10% mączki kwarcowej wykazał odpowiednio spadek wytrzymałości o 15,0, 13,9 oraz 12,0%. Analogicznie przedstawiają się wyniki badań betonów z domieszką napowietrzającą. Beton referencyjny z domieszką napowietrzającą (seria R0N) uzyskał po 150 cyklach spadek wytrzymałości 6,9%, a betony modyfikowane mączką odpowiednio na poziomie 6,1, 5,8 oraz 5,5%. Świadczy to o pozytywnym wpływie zastosowanej mączki na trwałość betonu podczas cyklicznego zamrażania/rozmarzania, co jest zgodne z uzyskanymi wynikami badań wytrzymałości i szczelności betonu.

W przypadku betonu bez domieszki napowietrzającej, dodatek mączki kwarcowej w ilości 10% masy cementu spowodował poprawę jego właściwości przez wzrost wytrzymałości na ściskanie o 11%, spadek głębokości penetracji wody o 11%, zmniejszenie nasiąkliwości o 3,8% oraz ograniczenie spadku wytrzymałości po badaniu mrozoodporności o 21%.

Podobne zależności stwierdzono w betonie z domieszką napowietrzającą. Dodatek mączki kwarcowej w ilości 10% masy cementu przyczynił się do zwiększenia wytrzymałości na ściskanie o 6,4%, spadku głębokości penetracji wody o 10,2%, zmniejszenia nasiąkliwości o 5,7% oraz ograniczenia spadku wytrzymałości po badaniu mrozoodporności o 20,3%.

W przypadku betonów zwykłych matrycę spoiwową stanowi stwardniały zaczyn cementowy (cement i woda), zaś kruszywo jest wzmacniającym, lecz zazwyczaj biernym chemicznie wypełniaczem. W przypadku betonów zwykłych

z użyciem proszków reaktywnych jest inaczej. Dalsze badania autorów dotyczyć będą wpływu mączki kwarcowej i mączki wapiennej na betony zwykłe, w tym również z uwzględnieniem domieszki napowietrzającej.

Literatura

- [1] Zdeb T, Śliwiński J. Beton z proszków reaktywnych – właściwości mechaniczne i mikrostruktura. Budownictwo, Technologie, Architektura. 2010; 3: 51 – 55.
- [2] Grzeszczyk S. Betony nowej generacji z proszków reaktywnych. Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej. 2015; DOI: 10.5604/12345865.1168727.
- [3] Janus G, Grzeszczyk S. Reactive powder concrete with the blast furnace slag cement. Cement Wapno Beton. 2020; DOI: 10.32047/CWB.2020.25.4.5.
- [4] Sanjuán MA, Andrade C. Reactive powder concrete: durability and applications. Appl. Sci. 2021; DOI: 10.3390/app11125629.
- [5] Kočí V, Vejmelková E, Koňáková D, Pommer V, Grzeszczyk S, Matuszek-Chmurowska A, Mordak A, Černý R. Basic physical, mechanical, thermal and hygric properties of reactive powder concrete with basalt and polypropylene fibers after high-temperature exposure. Constr Build Mater. 2023; DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.130922.
- [6] Heidari A, Shourabi FN. Mechanical properties of ultra-high performance concrete based on reactive powder concrete: Effect of sand-to-cement ratio, adding glass fiber and calcium carbonate. Constr Build Mater. 2023; DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.130108.
- [7] Grzeszczyk S, Matuszek-Chmurowska A, Černý R, Vejmelková E. Mikrostruktura betonów z proszków reaktywnych. Cement Wapno Beton 2018; 1: 1 – 15.
- [8] Kurdowski W, Garbaciak A, Szelać H. Influence of reactive powder types on the properties of concrete reactive powders. Cement Wapno Beton. 2009; 76: 292 – 300.
- [9] Zdeb T. Aktywność puculanowa mączek kwarcowych jako składnika betonów z proszkami reaktywnymi. Cement Wapno Beton. 2007; 1: 34 – 39.
- [10] Denisiewicz A. Betony z proszków reaktywnych i ich zastosowanie w konstrukcjach zespolonych. Przegląd Budowlany. 2014; 11: 18 – 23.
- [11] Świadek jakości cementu – luty 2023, CEMEX Polska.
- [12] PN-EN 12350-2:2019-07 Badania mieszanki betonowej – Część 2: Badanie konsystencji metodą opadu stożka.
- [13] PN-EN 12350-7:2019-08 Badania mieszanki betonowej – Część 7: Zawartość powietrza – Metody ciśnieniowe.
- [14] PN-EN 12390-3:2019-07 Badania betonu – Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań.
- [15] PN-EN 12390-2:2019-07 Badania betonu – Część 2: Wykonywanie i pielęgnacja próbek do badań wytrzymałościowych.
- [16] PN-EN 12390-8:2019-08 Badania betonu – Część 8: Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem.
- [17] PN-B-06265:2022-08 Beton – Wymagania, właściwości użytkowe, produkcja i zgodność – Krajowe uzupełnienie PN-EN 206+A2:2021-08.

Przyjęto do druku: 19.10.2023 r.