



Badania betonów z proszków reaktywnych

STEFANIA GRZESZCZYK, ANETA MATUSZEK-CHMUROWSKA

Politechnika Opolska, Wydział Budownictwa i Architektury,
ul. Katowicka 48, 45-061 Opole, s.grzeszczyk@po.opole.pl

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki badań betonu z proszków reaktywnych (RPC). Optymalizację składu mieszanki betonowej mającej na celu największy stopień upakowania ziaren w przestrzeni przeprowadzono w oparciu o krzywą optymalnego uziarnienia wg Funka dla $d_{\max} = 1000 \mu\text{m}$ oraz $d_{\min} = 0,1 \mu\text{m}$. W optymalizacji składu uwzględniono cement, pyły krzemionkowe, mączkę i piasek kwarcowy. Stosowano dodatek włókien stalowych w ilości około 25% masowych. Niski stosunek wody do spoiwa wynoszący 0,2 uzyskiwano poprzez stosowanie najnowszej generacji superplastyfikatorów na bazie polikarboksylianów.

Mieszanka RPC utrzymywała płynną konsystencję w czasie 1 godziny. Średnica rozplywu określona wg normy PN-EN 1015-3 po czasie 60 minut wynosiła 250 mm. Stwardniały beton RPC charakteryzował się wysoką wytrzymałością i trwałością. Wytrzymałość na ściskanie już po dwóch dniach osiągała 145 MPa, a po 28 dniach około 200 MPa. Natomiast wytrzymałość na zginanie wynosiła ponad 50 MPa. Beton po 56 cyklach zamrażania i odmrażania w roztworze soli odladzającej wykazał minimalne złuszczenia solne wynoszące zaledwie $0,0007 \text{ kg/m}^2$. Pozwala to określić jego mrozoodporność jako bardzo dobrą, biorąc pod uwagę kryterium według normy PKN-CEN/TS 12390-9.

Badania mikrostruktury betonu RPC za pomocą mikroskopii skaningowej wykazały, że dominującą fazą jest amorficzna faza uwodnionych krzemianów wapniowych (C-S-H). W większości przypadków pokrywa ziarna kwarcu i wykazuje z nimi ścisły kontakt. Obserwuje się również dobry kontakt tej fazy z nieprzereagowanymi ziarnami cementu. Stwierdzono także występowanie monosiarczanu (AFm). Mikrostruktura betonu jest zwarta, sporadycznie obserwowano pory o wielkości kilkunastu mikrometrów. Wyniki badań porowatości betonu RPC uzyskane za pomocą porozymetru rtęciowego wykazały prawie dwukrotne zmniejszenie porowatości całkowitej betonu w czasie dojrzewania od 2 do 28 dni (od 10,9% do 4,4%). W mikrostrukturze RPC stwierdzono zdecydowaną przewagę mezoporów o małej średnicy, poniżej 20 nm, których ilość wzrasta od 39,8% do 77,1% w czasie od 2 do 28 dni.

Na podstawie otrzymanych wyników badań betonu RPC oraz danych literaturowych stwierdzono, że RPC może być alternatywą dla innych materiałów o zwiększonej odporności na wybuchy.

Słowa kluczowe: beton z proszków reaktywnych, wytrzymałość, trwałość, wybuch

DOI: 10.5604/01.3001.0011.8052

1. Wprowadzenie

Beton z proszków reaktywnych (*Reactive Powder Concrete* — RPC) należy do największych osiągnięć w dziedzinie technologii betonu ostatnich lat [1]. Uzyskuje bardzo dużą wytrzymałość i wykazuje niezwykle dużą trwałość. Wytrzymałość na ściskanie tego betonu zwykle wynosi ponad 200 MPa, w warunkach hydrotermalnych może przekraczać 300 MPa, natomiast przy stosowaniu mikrokruszywa stalowego może osiągać nawet 800 MPa. W tym ostatnim przypadku taki beton zachowuje się w sposób zbliżony do metali [2].

Trwałość betonów z proszków reaktywnych ulega zwiększeniu w wyniku znacznej zawartości cementu w betonie, wynoszącej przeważnie od 800 do 1000 kg/m³. Równocześnie w technologii tego betonu stosuje się bardzo mały stosunek wody do cementu — stosunek wody do cementu łącznie z proszkiem reaktywnym, traktowanych razem jako spoiwo, nie przekracza zwykle 0,20 [2]. Powoduje to zachowanie w betonie znacznej ilości nieprzereagowanego cementu, który w przypadku powstawania rys w tym kompozycie oraz migracji do betonu wody i roztworów agresywnych ulega hydratacji i zamyka te drogi transportu z zewnątrz dla ciekłych substancji [3].

Zastąpienie w betonach z proszków reaktywnych kruszywa grubego piaskiem oraz zastosowanie proszków reaktywnych i pyłów krzemionkowych pozwala na eliminację warstwy przejściowej pomiędzy ziarnami piasku a zaczynem cementowym i uzyskanie jednorodnej mikrostruktury materiału o bardzo małej porowatości. W konsekwencji transfer naprężeń pomiędzy zaczynem a piaskiem ulega poprawie, co prowadzi do zmniejszenia oraz eliminacji mikrorys pochodzenia mechanicznego, termicznego czy chemicznego, a tym samym zwiększenia trwałości betonu [4]. W celu maksymalnego zwiększenia gęstości upakowania cząstek w betonach RPC stosowano różne modele obliczeniowe, których dokładną analizę przeprowadził Zdeb w pracy [5]. Korzystając do obliczeń z modelu Funcka i Dingera [6], umożliwiającego uzyskanie szczelnego upakowania stosu okruszowego, otrzymał betony, których wytrzymałość na ściskanie w warunkach normalnych przekroczyła 200 MPa [7].

Beton z proszków reaktywnych stosowany jest przeważnie w specjalnych konstrukcjach, szczególnie mostowych, o znacznych rozpiętościach elementów, konstrukcjach wysokich, lekkich i smukłych o skomplikowanym kształcie.

Znanym producentem betonów z proszków reaktywnych na świecie jest francuska firma cementowa Lafarge, produkująca RPC o nazwie Ductal na skalę przemysłową. Z tego betonu powstało wiele imponujących budowli pod względem architektonicznym [8]. W Polsce beton z proszków reaktywnych nie jest produkowany.

W pracy zaprojektowano beton z proszków reaktywnych, przeprowadzono badania wytrzymałości i cech fizycznych betonu, szczególną uwagę zwrócono na jego mikrostrukturę. Dokonano oceny RPC pod kątem odporności na wybuchy.

2. Materiały do badań

Do przygotowania betonu na bazie proszków reaktywnych (RPC) wykorzystano następujące składniki: cement portlandzki CEM I 52,5 R o powierzchni właściwej 410 m²/kg, pyły krzemionkowe 0/45 μm, mączka kwarcowa 0/0,2 mm, piasek kwarcowy 0/0,5 mm, włókna stalowe o długości 12 mm. Stosowano superplastyfikator nowej generacji na bazie polikarboksylanów, w ilości 2,5% m.c. Skład chemiczny cementu, mączki kwarcowej i piasku kwarcowego przedstawiono w tabeli 1.

TABELA 1

Skład chemiczny składników RPC (% masowy)

Składnik	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O
Cement	21,83	2,00	4,38	65,68	0,93	3,29	0,29
Mączka kwarcowa	99,0	0,05	0,29	< 0,1	< 0,1	–	0,2
Piasek kwarcowy	98,6	0,03	0,75	–	–	–	–

Optymalizację składu mieszanki betonowej, w celu polepszenia stopnia upakowania ziaren w przestrzeni, przeprowadzono w oparciu o krzywą Funka [6].

Skład mieszanki betonowej RPC przedstawiono w tabeli 2.

TABELA 2

Skład mieszanki RPC

Składnik	Stosunek wagowy
Cement	1,00
Pył krzemionkowy	0,20
Mączka kwarcowa	0,12
Piasek kwarcowy	1,03
Woda	0,24
Włókna stalowe	0,27
Superplastyfikator	0,025
w/c	0,24
w/s	0,20

3. Metody badań

3.1. Konsystencja

Badania konsystencji RPC przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN 1015-3 *Metody badań zapraw do murów — Część 3: Określenie konsystencji świeżej zaprawy*

(za pomocą stolika rozplýwu) [9]. Konsystencję określono na podstawie pomiaru średnicy rozplýwu mieszanki.

3.2. Wytrzymałość na ściskanie i zginanie

Wytrzymałość na ściskanie i zginanie próbek betonu RPC przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN 1015-11 *Metody badań zapraw do murów* — Część 11: *Określenie wytrzymałości na zginanie i ściskanie stwardniałej zaprawy* [10]. Badania przeprowadzono każdorazowo na próbkach $40 \times 40 \times 160$ mm. Wytrzymałość na zginanie obliczono według wzoru (3.1):

$$f = 1,5 \frac{Fl}{bd^2}, \quad (3.1)$$

gdzie: f — wytrzymałość na zginanie [MPa];
 F — maksymalne obciążenie [N];
 l — odległość pomiędzy osiami walców [mm];
 b — szerokość próbki [mm];
 d — wysokość próbki [mm].

Wytrzymałość na ściskanie obliczono według wzoru (3.2):

$$f_c = \frac{F}{A_c}, \quad (3.2)$$

gdzie: f_c — wytrzymałość na ściskanie [MPa];
 F — maksymalne obciążenie [N];
 A_c — pole powierzchni przekroju próbki [mm²].

3.3. Odporność betonu na działanie mrozu

Badanie odporności betonu RPC na działanie mrozu w obecności soli odładzającej (3% NaCl) przeprowadzono zgodnie z normą PKN-CEN/TS 12390-9 *Badania betonu* — Część 9: *Oznaczanie odporności na zamrażanie i rozmrażanie w obecności soli odładzających* — *Złuszczenie* [11]. Całkowity test wymagał przeprowadzenia 56 cykli zamrażania i rozmrażania. Odporność na zamrażanie oceniano na podstawie całkowitej ilości masy złuszczonego materiału z powierzchni próbki (225 cm²), przeliczonej na powierzchnię 1 m². Klasyfikacja odporności betonu RPC na działanie mrozu w obecności soli odładzającej przeprowadzona została zgodnie z wymaganiami przedstawionymi w tabeli 3.

TABELA 3

Klasyfikacja mrozoodporności próbek betonowych na podstawie straty masy

Mrozoodporność	Strata masy po 56 cyklach badania mrozoodporności [kg/m ²]
Bardzo dobra	< 0,1
Dobra	< 0,5
Dopuszczalna	< 1,0
Niedopuszczalna	> 1,0

3.4. Elektronowa mikroskopia skaningowa z mikroanalizą rentgenowską

Badania mikrostruktury betonu RPC przeprowadzono za pomocą elektronicznej mikroskopii skaningowej (SEM). Badania wykonano przy użyciu mikroskopu skaningowego NOVA NANO SEM 200. Obserwacji dokonano przy powiększeniach od 200 do 10 000 razy. Próbkę do badań przygotowano poprzez powierzchniowe napylenie warstwy złota w warunkach wysokiej próżni. Dla wybranych punktów otrzymano widma EDAX, gdzie na osi pionowej znajduje się liczba impulsów na sekundę, a na osi poziomej energia w keV.

3.5. Porozymetria rtęciowa

Badania porowatości matrycy cementowej betonów RPC wykonano przy użyciu porozymetru rtęciowego PoreMaster 60, w zakresie ciśnień od 1 do 400 MPa (4 000 atm). Podstawę metody stanowi zależność pomiędzy wartością ciśnienia (p) a promieniem porów penetrowanych (r_p) przez rtęć. Zależność tę przedstawia równanie (3.3):

$$r_p = \frac{-2 \cdot \gamma \cdot \cos \theta}{p}, \quad (3.3)$$

gdzie: r_p — promień porów [m];
 γ — napięcie powierzchniowe rtęci [N/m];
 θ — kąt zwilżania powierzchni rtęcią [rad];
 p — ciśnienie [N/m²].

Dla rtęci na granicy z powietrzem napięcie powierzchniowe γ wynosi 480 N/m, a na granicy z mineralnym szkieletem betonu przyjmuje się następujący kąt zwilżania — $\theta = 141,3^\circ$. Po podstawieniu tych wartości do powyższego równania otrzymuje się bezpośredni związek pomiędzy wielkością ciśnienia (p) a promieniem porów (r):

$$r_p = \frac{75}{p}. \quad (3.4)$$

Wyniki badań otrzymuje się w postaci objętościowego udziału wielkości porów oraz krzywych rozkładu wielkości porów w granicach od 0,0035 do 1000 μm .

4. Wyniki badań i ich interpretacja

4.1. Wyniki badań konsystencji mieszanki betonowej

Wyniki badań konsystencji mieszanki betonowej z proszków reaktywnych w czasie jednej godziny metodą stolika rozplywu przedstawiono w tabeli 4.

TABELA 4

Średnica rozplywu mieszanki betonowej [mm]

Czas [min]	5	15	30	60
Średnica rozplywu [mm]	270	270	260	250

Jak widać z danych zamieszczonych w tabeli, mieszanka betonowa utrzymuje płynność pozwalającą na jej transport i układanie w czasie do jednej godziny. Średnica rozplywu po jednej godzinie wynosi 250 mm. Należy podkreślić, że utrzymanie płynności mieszanki betonowej w dłuższym czasie, biorąc pod uwagę bardzo niską wartość współczynnika woda–spoiwo, wynoszącego 0,2 w mieszance zawierającej dużą ilość pyłów, jest dużym osiągnięciem.

4.2. Wyniki badań wytrzymałości

Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie i zginanie betonów z proszków reaktywnych zamieszczono w tabeli 5.

TABELA 5

Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie i zginanie betonu [MPa]

Wytrzymałość na ściskanie				
24 godz.	2 dni	7 dni	14 dni	28 dni
96,1	145,4	167,5	184,6	198,3
Wytrzymałość na zginanie				
36,2	48,7	50,8	51,9	52,6

Beton otrzymany z proszków reaktywnych już po dwóch dniach osiąga wytrzymałość na ściskanie 145 MPa, natomiast po 28 dniach wytrzymałość sięga około 200 MPa. Beton osiąga także wysoką wytrzymałość na zginanie, która po 28 dniach wynosi ponad 50 MPa. Jest to wartość znacznie wyższa od wytrzymałości na zginanie

betonu BWW. Beton BWW wykonano z cementu CEM I 42,5R, stosowano kruszywo bazaltowe, dodatek 10% mas. pyłów krzemionkowych, 1,5% mas. superplastyfikatora w stosunku do masy cementu, $w/c = 0,35$. Wytrzymałość na ściskanie BWW wynosiła 80 MPa, a wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu około 7 MPa.



Rys. 1. Próbkę betonu BWW po badaniu wytrzymałości na zginanie



Rys. 2. Próbkę betonu RPC po badaniu wytrzymałości na zginanie

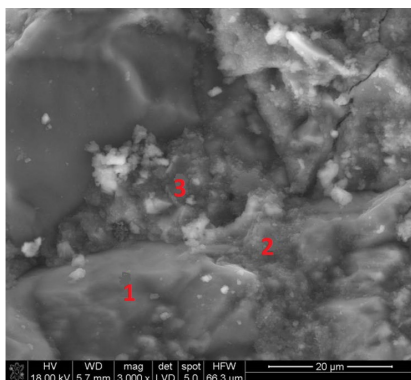
Na rysunkach 1 i 2 przedstawiono próbkę betonu BWW i RPC po badaniu wytrzymałości na zginanie. Widać wyraźnie różnicę w zachowaniu się betonów pod wpływem obciążenia w teście trójpunktowego zginania. Próbkę betonu z proszków reaktywnych zachowała swój pierwotny kształt, widoczne jest jej niewielkie zarysowanie, podczas gdy próbka z betonu wysokowartościowego bez włókien rozpadła się całkowicie.

4.3. Wyniki badań mrozoodporności

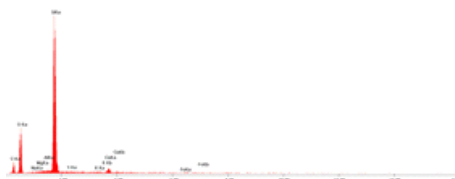
Wyniki badań odporności betonu RPC na działanie mrozu i środków odladzających, przeprowadzone według normy PKN-CEN/TS 12390-9, wykazały bardzo dużą odporność na działanie tych czynników. Masa złuszczeń próbki betonu po 56 cyklach wynosi zaledwie $0,0007 \text{ kg/m}^2$. Pozwala to na ocenę mrozoodporności betonu jako „bardzo dobrą” (tab. 3), według kryteriów przyjętych przez powyższą normę [11].

4.4. Mikrostruktura betonów

Wyniki badań mikrostruktury betonów z proszków reaktywnych metodą mikroskopii skaningowej po 2, 7 i 28 dniach dojrzewania przedstawiono na rysunkach 3-6.



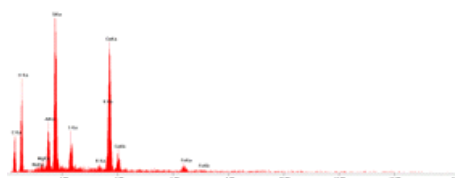
Rys. 3. Mikrostruktura RPC po 2 dniach dojrzewania. Widoczne ziarna kwarcu (1), faza C-S-H na ziarnach kwarcu (2) i faza C-S-H obok fazy glinianowej AFm (3). Widoczny bardzo dobry kontakt fazy C-S-H z kwarcem



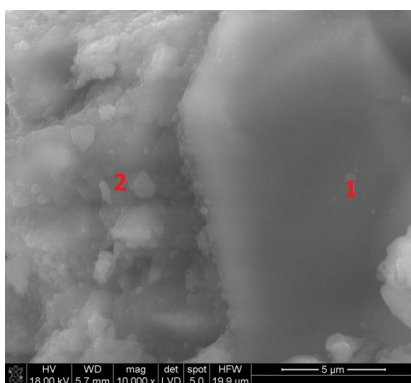
Rys. 3.1. Mikroanaliza rentgenowska w punkcie 1 zaznaczonym na rysunku 3



Rys. 3.2. Mikroanaliza rentgenowska w punkcie 2 zaznaczonym na rysunku 3



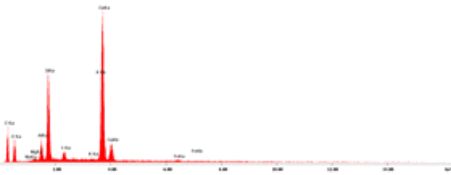
Rys. 3.3. Mikroanaliza rentgenowska w punkcie 3 zaznaczonym na rysunku 3



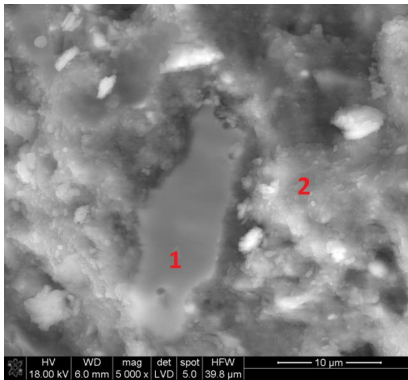
Rys. 4. Mikrostruktura RPC po 7 dniach dojrzewania. Widoczna faza C-S-H związana z kwarcem (1) i faza C-S-H (2)



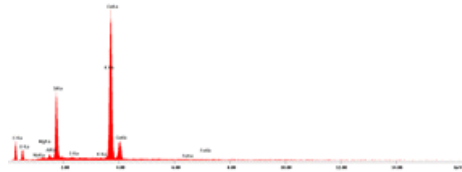
Rys. 4.1. Mikroanaliza rentgenowska w punkcie 1 zaznaczonym na rysunku 4



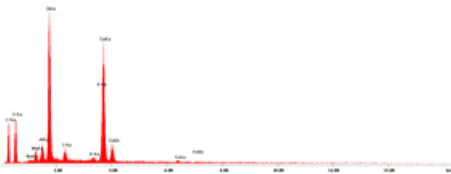
Rys. 4.2. Mikroanaliza rentgenowska w punkcie 2 zaznaczonym na rysunku 4



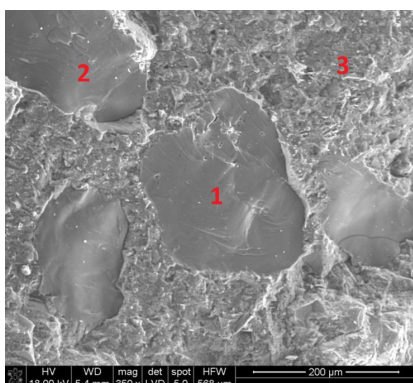
Rys. 5. Mikrostruktura RPC po 7 dniach dojrzewania. Widoczne ziarno cementu (1) i faza C-S-H (2)



Rys. 5.1. Mikroanaliza rentgenowska w punkcie 1 zaznaczonym na rysunku 5



Rys. 5.2. Mikroanaliza rentgenowska w punkcie 2 zaznaczonym na rysunku 5



Rys. 6. Mikrostruktura RPC po 28 dniach dojrzewania. Widoczne ziarna kwarcu (1 i 2) oraz faza C-S-H (3)



Rys. 6.1. Mikroanaliza rentgenowska w punkcie 1 zaznaczonym na rysunku 6



Rys. 6.2. Mikroanaliza rentgenowska w punkcie 2 zaznaczonym na rysunku 6

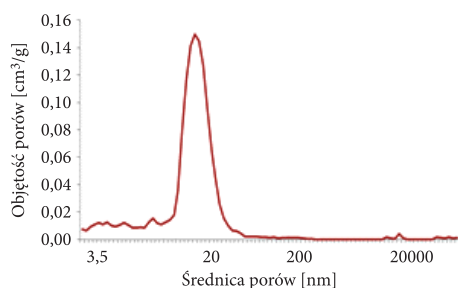


Rys. 6.3. Mikroanaliza rentgenowska w punkcie 3 zaznaczonym na rysunku 6

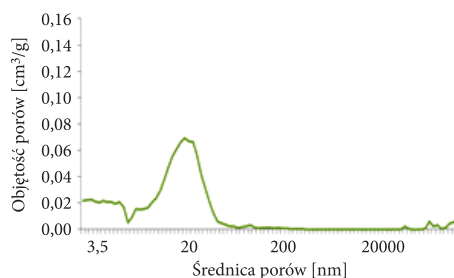
Obserwacje mikrostruktury RPC pod mikroskopem skaningowym po czasie dojrzewania 2, 7 i 28 dni wykazały obecność przede wszystkim zbitej fazy C-S-H związanej z ziarnami kwarcu. Obserwuje się także niezhydratyzowane ziarna cementu wykazujące dobry kontakt z fazą C-S-H. Jest to wynik reakcji jonów wapniowych powstających w wyniku hydratacji cementu z pyłami i tworzenia się zwiększonej ilości fazy C-S-H, podstawowego hydratu powstającego w zaczynie cementowym, odpowiedzialnego za wytrzymałość betonu.

4.5. Porowatość betonów

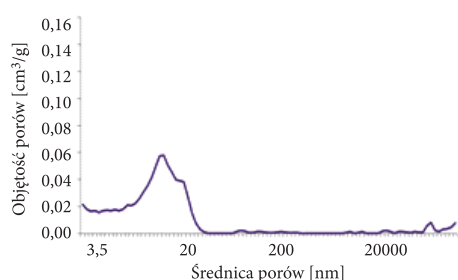
Wyniki badań porowatości całkowitej oraz udziału objętościowego porów w betonach oznaczonych metodą porozymetrii rtęciowej po 2, 7, 14 i 28 dniach przedstawiono na rysunkach 7-10 i w tabeli 6.



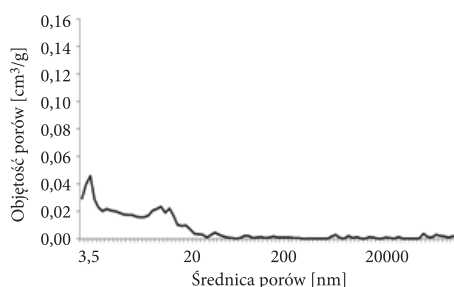
Rys. 7. Krzywa różniczkowa rozkładu objętości porów w funkcji ich średnicy w RPC po dwóch dniach dojrzewania



Rys. 8. Krzywa różniczkowa rozkładu objętości porów w funkcji ich średnicy w RPC po siedmiu dniach dojrzewania



Rys. 9. Krzywa różniczkowa rozkładu objętości porów w funkcji ich średnicy w RPC po 14 dniach dojrzewania



Rys. 10. Krzywa różniczkowa rozkładu objętości porów w funkcji ich średnicy w RPC po 28 dniach dojrzewania

TABELA 6

Porowatość całkowita oraz procentowy udział porów o różnej wielkości w betonie RPC

RPC po czasie	Porowatość całkowita [%]	Procentowy udział porów [%]				
		< 20 nm	20-200 nm	200-2000 nm	2000-20000 nm	> 20000 nm
2 dni	10,9	39,8	55,5	2,5	0,5	2,0
7 dni	8,2	64,9	25,1	1,5	0,2	8,2
14 dni	6,8	76,1	5,5	2,8	1,1	12,3
28 dni	4,4	77,1	8,0	3,6	2,5	8,2

Jak widać z danych zamieszczonych w tabeli 6, całkowita objętość porów w próbkach betonów stopniowo zmniejsza się z upływem czasu, od 10,9% po dwóch dniach dojrzewania do 4,4% po 28 dniach. Interesująca jest zdecydowana przewaga w mikrostrukturze betonów z proszków reaktywnych mezoporów o małej średnicy, poniżej 20 nm, a także zmiana układu mezoporów o średnicy od 20 nm do 200 nm

w czasie. Z upływem czasu wzrasta udział porów o średnicy poniżej 20 nm (z 39,8% do 77,1%), natomiast zdecydowanie zmniejsza się ilość porów większych, w zakresie od 20 do 200 nm (z 55,5% do 8,0%). Taka zmiana układu porów korzystnie wpływa na trwałość betonu.

Jak wiadomo, układ porów w matrycy cementowej (ilość i rodzaj) wpływa na właściwości betonu związane z jego trwałością. Przyjmuje się, że o przepuszczalności matrycy cementowej decyduje obecność ciągłych porów kapilarnych o średnicy przekraczającej 0,12 μm [12]. Pory nieciągłe, pory żelowe, czy też pory butelkowe nie wpływają w istotny sposób na przepuszczalność zaczynu. Istotne znaczenie z punktu widzenia trwałości ma porowatość kapilarna.

5. Beton RPC alternatywą dla materiałów o zwiększonej odporności na wybuchy

Znany jest fakt, że wprowadzenie do betonu zbrojenia rozproszonego w postaci włókien stalowych umożliwia uzyskanie materiału o większej odporności na nagłe obciążenia (uderzenia i wybuchy), charakteryzującego się zwiększoną zdolnością do przenoszenia naprężeń rozciągających [13, 14]. Betony nowej generacji, *Ultra High Strength Concrete* (UHSC) i *Reactive Powder Concrete* (RPC) o wysokiej wytrzymałości na ściskanie, powyżej 150 MPa, wykazują większą odporność na wybuchy niż beton zwykły [15]. W przypadku konstrukcji z betonu o wyższej klasie zniszczenia spowodowane obciążeniem wybuchem mają charakter lokalny, zaś w przypadku konstrukcji wykonanej z betonu o niższej klasie obszar z uszkodzeniami betonu jest znacznie bardziej rozległy [16].

Stąd należy się spodziewać, że zaprojektowany beton RPC zawierający około 25% wagowych krótkich włókien stalowych, o wysokiej wytrzymałości na ściskanie, będzie wykazywał zwiększoną odporność na wybuchy.

Biorąc pod uwagę stosowanie betonu RPC w konstrukcjach zespolonych, np. mostowych [17], mające na celu nie tylko wzmocnienie konstrukcji, lecz także zmniejszenie jej masy, uwzględniające przy tym doskonałą przyczepność RPC do betonu rodzimego, beton RPC może znaleźć także zastosowanie do budowy dodatkowych osłon pochłaniających energię fali uderzeniowej przy wybuchach.

6. Wnioski

1. Otrzymano beton z proszków reaktywnych o wysokiej wytrzymałości na ściskanie (około 200 MPa) i zginanie (ponad 50 MPa) oraz bardzo dobrej odporności na działanie mrozu i soli odladzającej (złuszczenia solne po 28 dniach wynoszą zaledwie 0,0007 kg/m^2).

2. Beton RPC charakteryzuje się zwartą mikrostrukturą zawierającą głównie fazę C-S-H, wykazującą bardzo dobry kontakt z ziarnami kwarcu i nieprzereagowanego cementu. W mikrostrukturze tego betonu przeważają mezopory o małej średnicy poniżej 20 nm (77,1% po 28 dniach).
3. Beton RPC może być alternatywą dla innych materiałów o zwiększonej odporności na wybuchy, wymaga to jednak specjalistycznych badań w tym zakresie.

Artykuł został opracowany na podstawie referatu wygłoszonego na XXXI Międzynarodowej Konferencji Naukowo-Technicznej „Inżynieria bezpieczeństwa — Ochrona przed skutkami nadzwyczajnych zagrożeń, EKOMILITARIS 2017”, Zakopane 12-15.09.2017.

Źródło finansowania pracy — środki statutowe Politechniki Opolskiej.

Artykuł wpłynął do redakcji 2.10.2017 r. Zweryfikowaną wersję po recenzjach otrzymano 31.01.2018 r.

LITERATURA

- [1] GRZESZCZYK S., *Betony nowej generacji z proszków reaktywnych*, Biuletyn WAT, vol. 64, nr 3, 2015, s. 103-111.
- [2] RICHARD P., CHEYREZY M., *Composition of Reactive Powder Concretes*, Cement and Concrete Research, vol. 25, 1995, s. 1501-1511.
- [3] KURDOWSKI W., *Chemia cementu i betonu*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2010.
- [4] SO H., JANG H., KHULGADAI J., SO H.-y., *Mechanical properties and Microstructure of Reactive Powder Concrete using Ternary Pozzolan Materials at Elevated Temperature*, ESCE Journal of Civil Engineering, 19/4, 2015, s. 1050-1057.
- [5] ZDEB T., *Ultra-high performance concrete — properties and technology*, Bulletin of the Polish Academy of Science, Technical Science, vol. 61, no. 1, 2013, s. 183-193.
- [6] FUNK J., DINGER D., *Predictive process control of crowded particulate suspensions — applied to ceramic manufacturing*, Kluwer Academic Publishers — Boston/ Dordrecht/ London, 1994.
- [7] ZDEB T., ŚLIWIŃSKI J., *The influence of selected material and technological factors on mechanical properties and microstructure of reactive powder concrete (RPC)*, Archives of Civil Engineering, vol. 57, no. 2, 2011, s. 227-246.
- [8] LUKASIK J., *DUCTAL®: Ultra-High Performance Concrete with Ductility*, Science of Cement and Concrete, Kurdowski Symposium, Kraków, 2000, 331-332.
- [9] PN-EN 1015-3 *Metody badań zapraw do murów — Część 3: Określenie konsystencji świeżej zaprawy (za pomocą stolika rozplywu)*.
- [10] PN-EN 1015-11 *Metody badań zapraw do murów — Część 11: Określenie wytrzymałości na zginanie i ściskanie stwardniałej zaprawy*.
- [11] PKN-CEN/TS 12390-9 *Badania betonu — Część 9: Oznaczanie odporności na zamrażanie i rozmrażanie w obecności soli odładzających — Zluszczanie*.
- [12] NEVILLE A.M., *Właściwości betonu*, Stowarzyszenie Producentów Cementu, Kraków, 2012.
- [13] CICHOCKI K., DOMSKI J., KATZER J., RUCHWA M., *Elementy betonowe odporne na uderzenia z niekonwencjonalnym zbrojeniem*, Rocznik Ochrona Środowiska, vol. 16, nr 2, 2014.
- [14] BENGAR H.A., YAVARI M.R., *Simulation of the Reactive Powder Concrete (RPC) Behavior Reinforcing with Resistant Fiber Subjected to Blast Load*, Rehabilitation in Civil Engineering, vol. 4, Issue 1, 2016, s. 63-77.

- [15] KIM J.H.J., YI N.H., OH I.S., LEE H.S., CHOI J.K., CHO Y.G., *Blast loading response of ultra high performance concrete and reactive powder concrete slabs*, Proceedings of Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures, 2010, s. 1715-1722.
- [16] RUCHWA M., *Ocena odporności konstrukcji żelbetowej na działanie wybuchu*, Biuletyn WAT, vol. 59, nr 4, 2010.
- [17] PERRY V., KRISCIUNAS R., STOFKO B., *Mackenzie River twin bridges: North America's largest field-cast ultra-high-performance concrete connections project*, PCI Journal, 2014, s. 40-48.

S. GRZESZCZYK, A. MATUSZEK-CHMUROWSKA

Investigation of Reactive Powder Concrete (RPC)

Abstract. Results of investigations of reactive powder concrete (RPC) are presented in the paper. Optimization of the concrete composition was performed to achieve the highest degree of grains packing based on the optimal graining curve according to Funk for $d_{\max} = 1000 \mu\text{m}$ and $d_{\min} = 0.1 \mu\text{m}$. Cement, silica fume, quartz and sand powder were considered in the composition. Steel fibers addition of 25% by mass was applied. A very low water-to-binder ratio, amounting to 0.2, was reached applying novel generation of superplasticizers based on polycarboxylates.

The RPC mixture remained fluid during 1 hour. The diameter of slump flow according to PN-EN standard amounted to 250 mm after 60 minutes.

The hardened concrete RPC displayed high strength and durability. Compressive strength reached 145 MPa after 2 days and about 200 MPa after 28 days; the bending strength exceeded 50 MPa after 28 days. After 56 freezing/thawing cycles in the deicing salt solution, the concrete has shown minimal salt scaling of only 0.0007 kg/m^2 . Therefore, frost resistance of the concrete studied can be rated as very good according to PN-EN standard.

The SEM pictures proved the amorphous phase of hydrated calcium silicates (C-S-H) is the dominant phase within the RPC microstructure. Usually, the C-S-H phase tightly covers the quartz grains and is in close contact with the unreacted cement grains. Crystallites of the monosulphate (AFm) were also found. The concrete microstructure was compact; pores of a few micrometers were rarely observed. The RPC porosity was measured using the mercury porosimetry. Porosity reduction by almost twice (from 10.9% down to 4.4%) was found after the RPC curing from 2 to 28 days. In the same period, a fraction of small mezopores (diameter below 20 nm) increased from 39.8% to 77.1%.

Based on the research results data, presented the RPC concrete can be regarded as an interesting alternative to other construction materials of enhanced explosion resistance.

Key words: Reactive Powder Concrete, strength, durability, explosion resistance

DOI: 10.5604/01.3001.0011.8052