

Wpływ rodzaju proszku mineralnego na właściwości betonów z proszków reaktywnych

The influence of reactive powder types on the properties of concrete of reactive powders

1. Wprowadzenie

Beton z proszków reaktywnych BPR jest rozwinięciem technologii zaczynów zwanych „zagęszczonym układem, zawierającym równomiernie rozmieszczone drobnutkie cząstki” [skrót ang. DSP]. Materiały te zawierały obok cementu przede wszystkim pył krzemionkowy, a ponadto miały bardzo mały stosunek w/c, w granicach od 0,12 do 0,20. Pył krzemionkowy spenia podwójną rolę: materiału wypełniającego pory oraz reagenta wizcego wodorotlenek wapniowy, odszczepiony w wyniku hydrolizy ortokrzemianw (1, 2). W praktyce przy wytwarzaniu przemysłowym można dodawa różne wypełniacze, wlkna lub kruszywa, a także zmienia warunki dojrzewania, a przede wszystkim temperatur, uzyskując szereg produktów o bardzo różnych właściwościach. W Danii od dawna jest wytwarzany produkt o nazwie Densit. Materiał ten można uznać za prekursora betonu z proszków reaktywnych.

BPR zajmowało się wielu autorów i w literaturze znaleźć można szereg publikacji z tego zakresu (3 – 23). Na uwagę zasluguj prace Cheyrezy i in. (3) oraz Richarda i Cheyrezy'ego (4), którzy w mieszankach jednej serii stosowali tylko pył krzemionkowy oraz w drugiej serii mielony piasek kwarcowy o $d_{50} = 10 \mu\text{m}$ i w niektórych wlkna stalowe. Proporcje składników były następujące: cement 1, pył krzemionkowy 0,25, piasek 1,1; a w drugiej serii zmniejszono iloc pyłu krzemionkowego do 0,23 i dodano maczk kwarcową 0,39, a udział wody wynosi 0,17 [w/s = 0,14]. Proporcje składników „stosu okrucowego” wynosiły: 74/26. W celu uzyskania najkorzystniejszego upakowania autorzy stosowali model De Larrarda i Sedrana (5). Udziały objętościowe kruszywa i spoiwa wynosiły odpowiednio: 52/48. Wszystkie mieszanki były prasowane przed i w trakcie wiązania oraz poddawane niskociśnieniowej obróbce cieplnej.

BPR, obok dużego udziału cementu zawiera proszki reaktywne, którymi są przede wszystkim mączki kwarcowe, a mniejszym stopniu dodatki mineralne o właściwościach pucolanowych lub hydraulicznych. Wszystkie te dodatki mineralne mają bardzo duże rozdrobnienie. Natomiast kruszywo stanowi piasek kwarcowy zwykle o uziarnieniu mniejszym od 600 μm lub nawet 400 μm .

1. Introduction

The concrete of reactive powders CRP is the development of the Densified Systems containing homogeneously arranged ultra-fine Particles (DSP) Technology. These materials apart of cement contained mainly the microsilica and additionally had a very low w/c ratio in the range 0.12 to 0.20. Microsilica played a double role as the material filling the pores and simultaneously binding the calcium hydroxide from the orthosilicate hydrolysis (1, 2). In practice, in industrial production, it is possible to add various fillers, fibres or aggregates and also changing of curing conditions and chiefly the temperature, obtaining several products of different properties. In Denmark from several years a product named Densit is produced. This material can be regarded as precursor of CRP. Several authors were engaged in CRP research and in technical literature many papers from this field can be found (3-23). The works of Cheyrezy et al. are worth to mention (3) and Richard and Cheyrezy (4) which in the investigated mix of first series used only microsilica and in second series ground quartz sand of $d_{50} = 10 \mu\text{m}$ and in some experiments also steel fibres. The proportions of the components were as follows: cement 1, microsilica 0.25, sand 1.1 and in second series the content of microsilica was lower (0.23) and 0.39 of quartz powder was added and water share was 0.17 [w/s = 0.14]. The proportion of grain mix was 74/26. In order to obtain the best packing density the author used De Larrard and Sedran model (5). All mixes were pressed before and during setting and the heat treatment was applied.

CRP, apart of high cement content, contains reactive powders, which are mainly quartz powders, and in the lower extend mineral addition of pozzolanic or hydraulic properties. All these mineral additions have very high fineness. As aggregate quartz sand composed of grains lower than 600 μm or even 400 μm is used.

Ratio of the powder, or even some powders, to sand should be so chosen to assure a very high packing density of grain mixtures. Some powders are used chiefly for improvement of packing density of grain mix, but often the good packing can be obtained

Proporcje proszku, lub kilku proszków, oraz piasku powinny być tak dobrane aby zapewniały one bardzo dużą szczelność stosu okruszowego. Kilka proszków stosuje się przede wszystkim w celu poprawy szczelności stosu okruszowego, jednak często można zapewnić dobre upakowanie za pomocą jednego proszku, co stanowi w praktyce znaczne uproszczenie procesu technologicznego.

W związku z założoną dużą wytrzymałością BPR udział cementu jest bardzo znaczny i zawiera się przeważnie w granicach od 800 do 1000 kg w m³. Równocześnie powinien to być cement najwyższej klasy, to znaczy CEM I 52,5R. Dodatek pyłu krzemionkowego wynosi zwykle 20% masy cementu, a stosunek w/s powinien być bliski 0,20, lub nawet niższy. Wymaga to stosowania znacznego dodatku superplastifikatora z grupy polikarboksylanów.

W celu maksymalnie szczelnego upakowania stosu okruszowego złożonego z proszków i piasku korzysta się z zależności opracowanych przez De Larrarda (5) lub Funka i Dingera (6) Szczególnie ten ostatni model jest często stosowany (7). Można go przedstawić w formie wzoru:

$$Y_i = \frac{(D_i^n - D_{Min}^n)}{(D_{Max}^n - D_{Min}^n)} \cdot 100 \%$$

gdzie:

Y_i – kumulacyjny % zawartości i-tej frakcji,

D_i – średnica ziarna i-tej frakcji, μm ,

D_{Min} – średnica minimalnego ziarna, μm ,

n – stała równa 0,37.

Zależność tę można przedstawić w formie krzywej wielomianowej.

Bardzo ważne znaczenie ma także dobranie takiego składu mieszanki betonowej aby posiadała ona dobrą urabialność. Są przypadki, że w tym celu trzeba zrezygnować z najlepszego upakowania, najbliższego krzywej Funka i wybrać proporcje proszków i piasku nieco bardziej oddalone od krzywej opisanej podanym wyżej wzorem.

Celem przeprowadzonych doświadczeń było zbadanie wpływu kilku rodzajów proszków i porównanie ich z mączką kwarcową pod kątem właściwości BPR, szczególnie wytrzymałości.

2. Materiały i metody

Do przygotowania betonu zastosowano następujące materiały:

- Cement portlandzki CEM I 52,5R, [tablice 1 i 2], gęstość 3,05 g/cm³,
- piasek z Osiecznicy OS 43, $D_{50} = 110 \mu\text{m}$ i $D_{max} = 500 \mu\text{m}$,
- mielony granulowany żużel wielkopiecowy, $D_{50} = 22 \mu\text{m}$, $D_{max} = 150 \mu\text{m}$,
- mielony krzemionkowy popiół lotny, $D_{50} = 12 \mu\text{m}$, $D_{max} = 140 \mu\text{m}$,
- mączkę kwarcową z Osiecznicy W 12, $D_{50} = 16 \mu\text{m}$, $D_{max} = 200 \mu\text{m}$

with one powder only which gives in practice a great simplification of technological process.

In connection of CRP high strength the share of cement is high, mostly in the range of 800 to 1000 kg for one m³. Simultaneously cement of highest class should be used e. g. CEM I 52,5 R. The addition of microsilica is 20% of cement mass and water to binder ratio should be in the range 0.15 to 0.20. It means the high addition of superplasticizer of the polycarboxylate group.

In order to assure the high packing density of grain mixture composed of sand and powders the De Larrard (5) or Funk and Dinger (6) models can be applied. Particularly the last model is frequently used (7). It can be presented in the form of formula:

$$Y_i = \frac{(D_i^n - D_{Min}^n)}{(D_{Max}^n - D_{Min}^n)} \cdot 100 \%$$

where:

Y_i – cumulative content in % of i – fraction,

D_i – grain diameter of i – fraction, μm ,

D_{max} – diameter of maximal grain, μm ,

D_{min} – diameter of minimal grain, μm ,

n – constant equal 0.37.

This formula can be presented as multinomial curve.

The good workability of designed concrete mix is very important. There are cases in which the best packing according to Funk must be omitted and the ratio of powder to sand a little distant from Funk's curve must be choose.

The goal of research presented in the paper was to examine the influence of three different powders in comparison to quartz powder, on the properties of CRP, particularly on strength.

2. Materials and methods

For concrete samples preparation the following materials are applied:

- Portland cement CEM I 52,5 R (tables 1 and 2), density 3.05 g/cm³,
- sand from Osiecznica OS43, $D_{50} = 110 \mu\text{m}$ and $D_{max} = 500 \mu\text{m}$,
- ground granulated blastfurnace slag GGBS, $D_{50} = 22 \mu\text{m}$, $D_{max} = 150 \mu\text{m}$,
- ground siliceous fly ash, $D_{50} = 12 \mu\text{m}$, $D_{max} = 140 \mu\text{m}$,
- quartz powder w/z from Osiecznica, $D_{50} = 16 \mu\text{m}$, $D_{max} = 200 \mu\text{m}$,
- corundum powder, $D_{50} = 8 \mu\text{m}$, $D_{max} = 90 \mu\text{m}$.

The grading curves of these powders are shown in Fig. 1 and their chemical composition in Table 3. In Tables 1 and 2 the physical properties as well as its chemical and phase composition of cement are given. In Table 3 the chemical composition of powders and in Table 4 the grading is presented.

– mączkę korundową, $D_{50} = 8 \mu\text{m}$, $D_{\text{max}} = 90 \mu\text{m}$.

Krzywe ziarnowe tych mączek pokazano na rysunku 1 oraz w tablicy 4, a ich skład chemiczny w tablicy 3.

W tablicach 1 i 2 podano właściwości oraz skład chemiczny i fazowy cementu, natomiast w tablicy 3 skład chemiczny mączek, a w tablicy 4 ich uziarnienie.

Jak wynika z tablicy 1 cement wyróżniał się bardzo dużą wytrzymałością na ściskanie, szczególnie wczesną, po dwóch dniach twardnienia.

Żużel miał dużą zawartość szkła oraz moduł $\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3 / \text{SiO}_2$ na poziomie 1,45. Jest to typowy skład żużla wielkopiecowego w Polsce, natomiast w Niemczech ten współczynnik aktywności przekracza 1,6; przede wszystkim ze względu na większą zawartość glinu (24). Pył krzemionkowy zawierał 94% SiO_2 , natomiast z domieszek najwięcej było alkaliów [$\text{Na}_2\text{O}_e = 1,5\%$] oraz pewne ilości węgla [str. prażenia 1,4%]. Krzemionkowy popiół lotny miał typowy skład, a zawartość szkła wynosiła około 65%.

2.1. Skład mieszanki betonowej

Skład mieszanek przyjęto na podstawie doświadczeń przeprowadzonych w ramach Grantu 04 002 02, uzupełnionych o badania przeprowadzone przez Zdeba (25). Był on następujący:

$$V_k/V_z = 4/6 = 0,667$$

$$P_k/C = 0,1$$

$$W/C = 0,43$$

$$W/S^* = 0,39 [S^* = P_k + C]$$

$$W/S = 0,22$$

S = spoiwo – cement + pył krzemionkowy + proszek reaktywny

Zastosowano następujące oznaczenia:

V_k i V_z – odpowiednio objętości kruszywa i zaczynu,

P_k – pył krzemionkowy, C – cement, a W – woda.

Udział poszczególnych składników mieszanek betonowych podano w tablicy 5.

Jako superplastyfikator stosowano VISCOCRETE 20 GOLD firmy SIKA. Domieszka odpowietrzająca była produktem firmy BASF; o nazwie Rheomix 880

Jak podano na początku tego punktu stosowano trzy rodzaje proszków reaktywnych: mączkę kwarcową W12 w mieszance – M1, krzemionkowy popiół lotny V – mieszanka M2, wielkopiecowy

Tablica 2 / Table 2

SKŁAD CHEMICZNY I FAZOWY* CEM I 52,5R, % MAS.

CHEMICAL AND PHASE COMPOSITION OF CEM I 52.5R, % MASS

SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	Fe_2O_3	SO_3	Na_2O_e	Cl ⁻	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
22,98	65,58	1,06	4,82	2,10	3,10	0,80	0,009	59	17	9	8

*Uwaga: skład fazowy obliczono metodą Bogue'a.

*Remark: Bogue's phase composition

Tablica 1 / Table 1

WŁAŚCIWOŚCI CEM I 52,5R

PROPERTIES OF CEM I 52.5R

Właściwości fizyczne/Physical properties	
Właściwa ilość wody/Water demand, %	29
Początek wiązania/Setting time, begin, min	150
Koniec wiązania/Setting time, end, min	230
Powierzchnia właściwa/Specific surface, m^2/kg	450
Gęstość właściwa/Density, g/cm^3	3,05
Wytrzymałość na ściskanie po 2 dniach, MPa Compressive strength MPa, after 2 days	32,6
Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach, MPa Compressive strength MPa, after 28 days	58,0

As it is seen from Table 1 cement had a very high compressive strength, particularly after 2 days.

The slag had high glass content and the factor $\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3 / \text{SiO}_2$ on the level 1.45. It is typical for blastfurnace slag in Poland, however in Germany this coefficient of activity is higher than 1.6, mainly because of higher alumina content (24). Microsilica contained 94% of SiO_2 and from admixtures the higher content had alkalis [$\text{Na}_2\text{O}_e = 1.5\%$] and some coal content [ignition loss 1.4%] the siliceous fly ash had the typically chemical composition and the content of glass was equal 65%.

2.1. Concrete mixture composition

The mixture composition was chosen on the basis of experiments executed in Grant 0400202, completed by the research carried out by Zdeb (25).

It was as follows:

$$V_k/V_z = 4/6 = 0.667$$

$$P_k/C = 0,1$$

$$W/C = 0,43$$

$$W/S^* = 0,39 [S^* = P_k + C]$$

$$W/S = 0,22$$

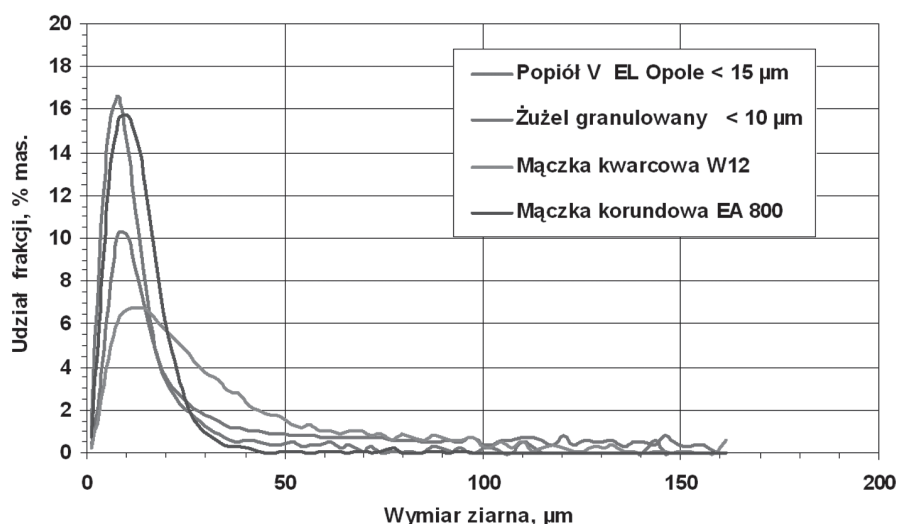
$$W/B = 0.22 \text{ B = binder = cement + } P_k + \text{ reactive powder}$$

The following designation is used:

V_k and V_z – volumes of aggregate and of the paste, respectively

P_k – microsilica, C – cement and W – water

The share of the mixture components is given in Table 5. As a superplasticizer VISCOCRETE 20 Gold of SIKA was used.



Rys. 1. Uziarnienie proszków reaktywnych

Fig. 1. Grading of reactive powders: green FA, red slag, light blue quartz powder, blue corundum

żużel granulowany Ż – mieszanka M3 oraz mączkę korundową Ma – mieszanka M4. Udział proszku reaktywnego był w mieszankach stały i wynosił, jak to podano w tablicy 5 460 kg w jednym m³.

Rozpływ mieszanek badany zgodnie z normą EN 1015-3 był następujący:

M1 – 17,5 cm, M2 – 19,0 cm, M3 – 17,0 cm oraz M4 – 18,0 cm .

Mieszanki betonowe do badań przygotowano zgodnie z normą PN-EN 480-1 „Domieszki do betonu, zaprawy i zaczynu – Metody badań – Część 1: Beton wzorcowy i zaprawa wzorcowa do

The antifoaming agent was Rheomix 880 of BASF.

As it is mentioned on the beginning of this point three kinds of reactive powders were used: quartz powder W12 in mix M1, siliceous fly ash V in mixture M2, ground blastfurnace granulated slag Ż in mixture M3 and corundum powder Ma in mix M4. The content of reactive powder in the mixes was constant and was equal 460 kg, in one m³, as it is shown in Table 5.

The flow diameter measured according to the standard EN 1013-3 was the following:

M1 – 17.5 cm, M2 – 19.0 cm, M3 – 17.0 cm, and in M4 – 18.0 cm.

The concrete mixes were produced according to the standard PN-EN 480-1 “The admixtures to concrete, mortar and paste – Methods of testing Part 1: Standard concrete and standard mortar for testing” and PN-En 196-1 “Methods of cement testing – Part 1: Strength measurements”. The concrete mix was prepared in the following sequence of the components homogenization:

- sand aggregate,
- part of water with superplasticizer and antifoaming agent,
- binding components; cement, microsilica and reactive powder,
- remaining part of water.

Tablica 3 / Table 3

SKŁAD CHEMICZNY I FAZOWY PROSZKÓW REAKTYWNYCH

CHEMICAL AND PHASE COMPOSITION OF REACTIVE POWDERS

Składnik Component	Rodzaj reaktywnego proszku/Kind of reactive powder			
	Mączka kwarcowa Quartz W12	Żużel granulowany Granulated slag S	Popiół lotny krzemionkowy Siliceous fly ash V	Mączka korundowa Corundum
	Udział składnika % masy/Component content, mass %			
Strata prażenia Ignition loss	-	0,15%	1,7%	Ślady Trace
SiO ₂	> 99,0%	38,9 %	52,8%	0,10%
Al ₂ O ₃	zawartości akcesoryczne wszystkich domieszek traces	6,12%	27,8%	> 98,0 %
Fe ₂ O ₃		0,49%	7,82%	
CaO		44,5%	3,90%	
MgO		5,97%	1,1%	
SO ₃		0,08%	0,15%	
Na ₂ O	0 β kwarc β quartz	0,54%	0,56%	zawartości śladowe traces
K ₂ O		0,58%	3,11%	
Faza szklista Glass		99,1%	65%	
Gęstość Density	2,70	2,90	2,60	3,95

Tablica 4 / Table 4

SKUMULOWANY ROZKŁAD UDZIAŁÓW ZIARN MNIEJSZYCH OD WYMIARU OCZKA SITA
CUMULATIVE GRAIN SIZE DISTRIBUTION OF FRACTION LOWER THAN THE SIEVE MESH

Sito w μm Sieve, μm	Rodzaj proszku/Kind of powder			
	Popiół V EL Opole/FA $D_{50} = 15 \mu\text{m}$	Żużel/Slag $D_{50} = 10 \mu\text{m}$	Mączka kwarcowa Quartz powder W12	Mączka korundowa Corundum Powder EA 800
	Udział ziarn mniejszych, % mas./ Grain size of fraction lower, % mass			
0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	0,3	0,1	0,1	0,2
4	4,4	1,1	0,8	2,6
8	25,7	10,2	6,7	19,6
12	50,7	26,2	16,7	44,1
16	67,7	39,3	27,3	66,7
24	81,6	53,0	46,1	91,2
32	87,0	59,8	59,8	96,9
48	91,0	67,2	76,3	98,7
64	93,6	72,2	84,2	99,2
96	95,7	79,9	94,1	99,9
128	96,9	87,0	98,0	100,0
$D_{med.} (D_{50\%}) \mu\text{m}$	11,8	21,7	26,2	12,9
$D_{mod} \mu\text{m}$	9,0	9,0	14,5	11,5

badania” i PN-EN 196-1 „Metody badania cementu – Część 1: Oznaczenie wytrzymałości”. Mieszanek betonową przygotowujemy w następującej kolejności mieszania składników:

- kruszywo piaskowe,
- część wody z domieszką upłynniającą i odpowietrzającą,
- składniki spoiwowe; cement, pył krzemionkowy, proszek reaktywny,
- pozostała część wody.

Próbki mieszanek przygotowano zgodnie z PN-EN 480-1 formowano w postaci kostek 10x10x10 cm, stosując zagęszczanie metodą wibracji. Były one przeznaczone do badań wytrzymałości na ściskanie. Natomiast próbki mieszanek przygotowanych tak samo według normy PN-EN 480-1, lecz w postaci beleczek 4x4x16 cm i zagęszczane na stoliku potrząsalnym służyły do oznaczeń wytrzymałości na zginanie i ściskanie oraz skurczu, po niskociśnieniowej obróbce cieplnej i autoklawizacji. Skurcz próbek badano według metody zawartej w instrukcji PB-01 Instytutu Dróg i Mostów.

2.2. Warunki dojrzewania betonu

Stosowano trzy warianty dojrzewania próbek:

A. Dojrzewanie w warunkach normalnych;

próbki betonu w formie kostek o wymiarach 10x10x10 cm, dojrzewały w komorze klimatyzowanej w temperaturze 20°C i wilgotności względnej WW 95%,

B. Niskociśnieniowa obróbka cieplna;

próbki betonu w formie beleczek o wymiarach 4x4x16 cm poddawano obróbce cieplnej w temperaturze 80°C,

The mixes samples, produced according to PN-EN IV 480-1 were moulded as 10x10x10 cm cubes and compacted using vibration. They were provided for compressive strength measurement. The mixes samples prepared similarly according to the standard PN-EN 480-1, but as 4x4x16 cm bars and compacted on jointing table were used for bending and compressive strength as well as for shrinkage measurements, after low pressure heat treatment and autoclaving. The samples shrinkage was tested according to PB-01 instruction of the Institute of Bridges and Roads.

2.2. Curing conditions

Three methods of samples curing were applied:

- A. Curing in standard conditions; the cubes of concrete samples of dimensions 10x10x10 cm were cured in conditioning chamber at 20°C and RH 95%,

Tablica 5 / Table 5

UDZIAŁ SKŁADNIKÓW W 1 m³ MIESZANKI BETONOWEJ
CONTENT OF THE COMPONENT IN 1 m³ OF CONCRETE MIXTURE

Składnik betonu w kg Component in kg	
Cement C	554
Piasek/Sand P	1080
Pył krzemionkowy/Microsilica Pk	55,4
Proszek reaktywny/Reactive powder	460
Woda/Water	235
Superplastyfikator SP (2% w stosunku do cementu) SP (2 % of cement mass)	11
Domieszka odpowietrzająca/AFA	1,7

Stosowano następujące etapy obróbki cieplnej:

- wstępne dojrzewanie w warunkach normalnych przez okres 1h,
- wzrost temperatury do 80°C w ciągu 1h,
- czas izotermicznego wygrzewania wynosił 4 h,
- chłodzenie do temperatury otoczenia w ciągu 1h.

Dalsze dojrzewanie w komorze klimatyzowanej w temperaturze 20°C i 95% WW.

C. Autoklawizacja;

stosowano takie same próbki betonowe 4x4x16cm, jak w procesie obróbki cieplnej,

temperatura autoklawizacji wynosiła 200°C, a ciśnienie 1,5 MPa.

Fazy cyklu autoklawizacji:

- dojrzewanie próbek przed rozformowaniem w komorze w temperaturze 20°C i wilgotności względnej 95%,
- wzrost temperatury do 200°C w ciągu 1 h,
- czas autoklawizacji: 6 h,
- chłodzenie do temperatury otoczenia w ciągu 1 h.

Dalsze dojrzewanie w komorze klimatyzowanej w 20°C i 95% WW.

3. Wyniki badań

3.1. Wytrzymałość próbek betonowych

Wytrzymałość próbek betonów 1 – 4 uzyskanych z mieszanek M1, M2, M3 i M4 dojrzewających; w normalnych warunkach, poddanych obróbce niskoprężnej oraz autoklawizacji, zamieszczono w tablicach 6. – 9.

4. Omówienie wyników

Przeprowadzone doświadczenia wykazały, że najlepszą wytrzymałość osiągnął beton uzyskany z mieszanki M2, zawierającej jako proszek reaktywny granulowany żużel wielkopiecowy. Jej wytrzymałość na ściskanie była znacznie większa, przewyższając pozostałe próbki betonów o 40 do 60 MPa. Jedynie w przypadku niskociśnieniowej obróbki cieplnej wytrzymałość betonu z proszkiem żużlowym była tylko nieznacznie wyższa od próbki z proszkiem kwarcowym. Natomiast po autoklawizacji była szczególnie wysoka i wyniosła bezpośrednio po zakończeniu obróbki prawie 190 MPa, a po dalszych 28 dniach dojrzewania w komorze klimatyzowanej 201 MPa.

Znacznie gorsze wyniki dały kompozyty betonowe z dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego oraz proszku korundowego. Szczególnie złe wytrzymałości wykazywały te dwa kompozyty po niskociśnieniowej obróbce cieplnej [mieszanki M3 i M4]. Próbki z mączką kwarcową [beton 1] osiągnęły po obróbce znacznie lep-

B. Low pressure heat treatment the bars 4x4x16 cm of concrete were heat treated at 80°C, the following cycles of heat treatment were applied:

- preliminary curing in normal conditions for 1 h,
- increase of temperature to 80°C during 1 h,
- isothermic heating during 4 h,
- cooling to the ambient temperature during 1 h.

Further curing in conditioning chamber at 20°C and 95% RH.

C. Autoclaving

The same concrete bars 4x4x16 cm were used as for the heat treatment.

The autoclaving temperature was 200°C and the pressure 1.5 MPa.

The cycles of autoclaving were as follows:

- curing of the samples before demoulding in the chamber at 20°C 95%
- RH increase of temperature to 200°C during 1h
- autoclaving 6h,
- cooling to ambient temperature during 1h.

Further curing in conditioning chamber at 20°C and 95% RH.

3. Results of investigation

3.1. Strength of concrete samples

Strength of concrete samples 1-4 produced from the mixes M1, M2, M3 and M4 and cured in normal conditions, heat treated or autoclaved are given in Tables 6-9.

4. Discussion

The experiments have shown that the best strength revealed the concrete produced of mix M2 in which as the reactive powder the granulated blastfurnace slag was used. Its compressive strength was higher of 40 to 60 MPa than the other samples. In case of low pressure heat treatment the strength of the sample with slag powder was only slightly higher than the concrete samples with

Tablica 6 / Table 6

WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCISKANIE PRÓBEK BETONÓW DOJRZEWAJĄCYCH W WARUNKACH NORMALNYCH
COMPRESSIVE STRENGTH OF CONCRETE SAMPLES CURED IN NORMAL CONDITIONS

Próbki betonu Samples	Wytrzymałość na ściskanie po upływie dni: Compressive strength after days:		
	7	28	90
1	78,8	106,3	117,3
2	114,1	141,1	161,3
3	71,9	101,9	115,6
4	65,7	97,5	112,6

Tablica 7 / Table 7

WYTRZYMAŁOŚĆ BETONÓW PODDANYCH NISKOCIŚNIENIOWEJ OBRÓBCE CIEPLNEJ
STRENGTH OF CONCRETE SAMPLES HEAT TREATED

Próbki betonu Samples	Wytrzymałość bezpośrednio po obróbce cieplnej Strength directly after heat treatment		Wytrzymałość po obróbce cieplnej i 28 dniach dojrzewania w wodzie o temp. 20°C ±1°C Strength after heat treatment and 28 days curing in water at 20°C ±1°C	
	zginanie bending	ściskanie compression	zginanie bending	ściskanie compression
	MPa			
1	8,3	63,4	10,6	84,4
2	9,4	68,5	11,3	91,6
3	6,4	46,0	8,2	48,8
4	6,2	41,4	7,5	43,8

Tablica 8 / Table 8

WYTRZYMAŁOŚĆ BETONÓW PODDANYCH AUTOKLAWIZACJI
STRENGTH OF AUTOCLAVED CONCRETE SAMPLES

Próbki betonu Samples	Wytrzymałość bezpośrednio po autoklawizacji Strength directly after autoclaving		Wytrzymałość po autoklawizacji i 28 dniach dojrzewania w wodzie o temp. 20°C ±1°C Strength after autoclaving and 28 days curing in water at 20°C ±1°C	
	zginanie bending	ściskanie compression	zginanie bending	ściskanie compression
	MPa			
1	11,0	117,3	15,2	139,7
2	18,4	181,8	19,2	201,0
3	16,3	107,0	16,7	119,3
4	13,6	127,9	14,4	138,1

szą wytrzymałość, mniejszą tylko od kompozytu z mączką żużlową. Małą wytrzymałość uzyskał także kompozyt z krzemionkowym popiołem lotnym po autoklawizacji, ustępując wszystkim badanym próbkom tak bezpośrednio po autoklawizacji jak i po późniejszym dojrzewaniu w komorze klimatyzowanej przez 28 dni. Wyjaśnienie przyczyn tak małej wytrzymałości próbek z krzemionkowym popiołem lotnym wymaga dalszych badań.

Należy także podkreślić, że próbki zawierające żużel jako proszek reaktywny miały najmniejszy skurcz, mniejszy od próbek M1 i M3, odpowiednio z mączką kwarcową i popiołem lotnym, o około 50% po 28 dniach i o około 40% po 60 i 90 dniach dojrzewania.

W związku z małą wytrzymałością próbek betonu 2 po niskociśnieniowej obróbce termicznej [tablica 7] sporządzono dodatkową serię próbek z proszkiem żużlowym. Mieszanka betonowa miała inny skład i zawierała znacznie więcej cementu i pyłu krzemionkowego. Skład mieszanki w przeliczeniu na jeden m³ był następujący:

Cement – 1100 kg, pył krzemionkowy – 220 kg, żużel – 380 kg, piasek – 957 kg, woda – 265 kg.

Stosunek w/c = 0,24 a w/s = 0,16; były więc one znacznie mniejsze niż w poprzednich mieszankach. Uzyskany beton osiągnął po

quartz powder. However, after autoclaving the strength of the samples with slag was significantly high and directly after this treatment was almost 190 MPa and after additional 28 days curing in conditioning chamber reached 200 MPa.

Much worse results were found for concrete samples with siliceous fly ash and corundum. Particularly bad results revealed this two concretes after low pressure heat treatment [mixes M3 and M4]. The samples with quartz powder [concrete 1] revealed after heat treatment much better strength, lower only than the composite with slag powder. Low strength was found for autoclaved concrete with siliceous fly ash after lower than all examined concrete directly after autoclaving as well as after curing in conditioning chambers for 28 days. The explanation of this low strength of samples with FA needs further studies.

It should be underlined that the samples with slag as reactive powder had the lowest shrinkage, lower than for samples M1 and M3 with FA and quartz powder of about 50% after 28 days and about 40% after 60 and 90 days of curing.

In connection with low strength of concrete 2 after low pressure heat treatment (Table 7) the additional series of samples

Tablica 9 / Table 9

SKURCZ PRÓBEK BETONÓW
SHRINKAGE OF CONCRETE SAMPLES

Próbki betonu Concrete samples	Skurcz po upływie dni: Shrinkage after days:		
	28	60	90
	mm/m		
1	0,50	0,56	0,63
2	0,27	0,33	0,40
3	0,52	0,58	0,61
4	0,73	0,79	0,83

with slag powder was produced. The concrete mix had an other composition and contained much more cement and microsilica. The composition of the mix in one m³ was the following:

Cement - 1100 kg, microsilica 220 kg, slag – 380 kg, sand – 957 kg, water – 265 kg.

Ratio w/c = 0.24 and w/b = 0.16 were also much lower than in the first series mixes. The produced concrete after hardening in normal condition revealed the following strength:

dojrzewaniu w warunkach normalnych następującą wytrzymałość na ściskanie:

po 2 dniach 110,8 MPa, po 7 dniach 137,7 MPa, po 28 150,8 MPa i po 90 dniach 175,3 MPa.

Po niskociśnieniowej obróbce cieplnej bezpośrednio 20,4 MPa na zginanie i 133,1 MPa na ściskanie, a po 28 dniach 25,1 MPa na zginanie i 144,3 MPa na ściskanie. W końcu po autoklawizacji 30,3 MPa na zginanie i 206,5 na ściskanie, a po 28 dniach 33,9 MPa na zginanie i 217,1 MPa na ściskanie.

Zmiana składu mieszanki przyniosła bardzo znaczny wzrost wytrzymałości na ściskanie po obróbce cieplnej, jak również bardzo duże zwiększenie wytrzymałości na zginanie w przypadku dojrzewania betonu we wszystkich badanych warunkach. Spowodowało to zwiększenie stosunku sztywności zginania/ściskanie z około 10% w przypadku próbek M2 (Tablica 7) do około 15–17% w przypadku próbek uzyskanych z dodatkowej mieszanki. Dotyczyło to próbek betonu 2 dojrzewającego w warunkach normalnych i autoklawizowanych. Największy wzrost stosunku zginanie/ściskanie wystąpił w przypadku próbek poddawanych niskociśnieniowej obróbce termicznej. Natomiast w przypadku dojrzewania w warunkach normalnych i po autoklawizacji praktycznie nie było różnic w wytrzymałości na ściskanie.

5. Końcowe uwagi

Wytworzone z mieszanek z różnymi proszkami reaktywnymi betony wykazały bardzo korzystne właściwości fizyczne, pomimo stosunkowo małej zawartości cementu oraz pyłu krzemionkowego, [10% cementu] jak dla BPR. Kompozyty twardniejące w warunkach normalnych wykazały po 7 dniach dojrzewania wytrzymałość na ściskanie od 79 do 114 MPa, a po 28 dniach od 100 do 140 MPa.

Z badanych mieszanek zdecydowanie najlepszą wytrzymałość uzyskał beton z dodatkiem wielkopieczowego żużla granulowanego jako proszku reaktywnego. 114 MPa po dojrzewaniu w warunkach normalnych przez 7 dni i 140 MPa po 28 dniach, a 189 MPa bezpośrednio po autoklawizacji i 200 MPa po dalszym dojrzewaniu w komorze klimatyzowanej w 20°C i 95% WW.

Zwiększenie ilości cementu do 1100 kg w m³ i pyłu krzemionkowego do 20% cementu pozwoliło na dwukrotne zwiększenie wytrzymałości na zginanie, a także znaczny wzrost wytrzymałości na ściskanie w przypadku obróbki cieplnej próbek betonowych. Jest bardzo prawdopodobne, że dalsze poszukiwania najkorzystniejszych składów mieszanek mogą doprowadzić do uzyskania kompozytów o lepszych właściwościach od znalezionych w prezentowanej pracy.

Podziękowanie

Badania przedstawione w niniejszej pracy zostały wykonane w ramach Grantu R04 002 02.

after 2 days 110.8 MPa, after 7 days 137.7 MPa, after 28 days 150.8 MPa and after 90 days 175.3 MPa. Directly after the low pressure heat treatment: 20.4 MPa on bending and 133.1 MPa on compression and after 28 days 25.1 MPa on bending and 144.3 MPa on compression. Finally, directly after autoclaving 30.3 MPa on bending and 206.5 on compression and after 28 days 33.9 on bending and 217.1 on compression.

The composition change of the mix gave high increase of compressive strength directly after heat treatment, but high increase of bending strength. However, in case of curing in normal condition and after autoclaving it was practically no difference in compressive strength.

5. Final comments

Concretes produced from the mixes with different reactive powders revealed very favourable physical properties, despite of relatively low cement and microsilica (10% of cement) content, as for CRP. Composite cured in normal condition had after 7 days of hardening compressive strength in the range 79-114 MPa and after 28 days 100 to 140 MPa.

From examined mixtures significantly highest strength reached the concrete with granulated blastfurnace slag as reactive powder. It was 114 MPa after 7 days and 140 MPa after 28 days of curing in normal conditions, 189 MPa directly after autoclaving and 200 MPa after further curing in conditioning chamber at 20°C and 95% RH.

Increasing of cement content to 1100 kg/m³ and microsilica to 20% of cement mass provided twofold increase of bending strength and also a significant increase of compressive strength in case of heat treatment of concrete. It caused the increase of the ratio bending/compressive strength from about 10% in the case of concrete 2 (Table 7) to about 15–17% in the case of concrete obtained from additional mix. It concerned samples of concrete 2 cured in normal conditions and autoclaved. The lowest increase of the ratio bending/compressive strength was found in the case of the samples after heat treatment. It seems very probable that further experiments to find favourable mixes composition can give composite of higher physical properties than presented in this work.

Literatura / References

1. L. Hiorth, Phil. Trans. Roy. Soc. A310, s. 167 (1983).
2. H. H. Bache, Second Int. Conf. On Superplasticizers in Concrete, 10-12 June 1981, Ottawa-Ontario-Canada.
3. M. Cheyrezy, V. Maret, L. Frouin, Cem. Concr. Res., 25, s. 1491 (1995).
4. P. Richard, M. Cheyrezy, Cem. Concr. Res. 24, s. 1501 (1995).
5. F. De Larrard, Th. Sedran, Cem. Concr. Res., 24, s. 997 (1994).
6. J. Funk, D. Dinger, Predictive process control of crowded particulate suspensions applied to ceramic manufacturing, Kluwer Academic Publ. Boston 1994.
7. Intern Symp. Ultra High Performance Concr., Kessel 2004.
8. P. C. Aïtcin, Konf. Dni Betonu, Polski Cement, s. 7-36, Szczyrk 2002.
9. P. C. Aïtcin, Bétons à Hautes Performances, Eyrolles Paris 2001.
10. O. Bonneau, C. Vernet, M. Moranville, P. C. Aïtcin, Cem. Concr. Res., 30, s. 1861 (2000).
11. Y. Chan, S. H. Chu, Cem. Concr. Res., 34, s. 1167-1172 (2004).
12. L. Coppola, R. Troli, T. Cerulli, M. Collepardi, L'Industria Italiana del Cemento, s. 112-125 (1996).
13. V. Corinaldesi, Morconi Proc. 9th CANMET/ACI Intern. Conf., s. 63-71, Warszawa 2007.
14. A. Feylessoufi, M. Crespin, P. Dion, F. Bergaya, H. Van Damme, Advan. Cem. Based Mat., 6, s. 21-27 (1997).
15. A. Cwirzen, V. Penttala, C. Vornanen, Cem. Concr. Res. 38, s. 1217-1226 (2008).
16. K. Droll, Symp. Ultra H P C, s. 285 – 301, Kessel 2004.
17. D. Heinz, L. Horst-Michael, Ibbid. s. 685-694.
18. J. Jungwirth, A. Muttoni, Ibbid. s. 533-544.
19. A. Korpa, R. Trettin, Ibbid. s. 155-164.
20. N. M. P. Low, J. J. Beaudoin, Cem. Concr. Res. 23, s. 905-916 (1993).
21. E. Shaheen, N. G. Sheive, ACI Mat. Jour. Nov/Dec. 2006.
22. H. A. Toutanji, T. El-Korchi, R. N. Katz, G. L. Leatherman, Cem. Concr. Res. 23, s. 618-626 (1993).
23. R. Bonermann, M. Schmidt, 6th Inter. Symp. HS/HPC, s. 863-872, Leipzig 2002.
24. W. Kurdowski, Chemia Cementu, PWN Warszawa 1991.
25. T. Zdeb, J. Śliwiński, Inżynieria i Budownictwo, s. 693 (2008).

Warunki prenumeraty na 2010 r.

Wpłaty na prenumeratę można dokonywać na ogólnie dostępnych blankietach w Urzędach Pocztowych (przekazy pieniężne) lub Bankach (polecenie przelewu), przekazując środki na adres: Stowarzyszenie Producentów Cementu, 30-003 Kraków, ul. Lubelska 29, lok. 4/5.

Konto: PKO BP S.A. I O/Kraków nr 45 1020 2892 0000 5102 0226 6583

Na blankiecie wpłaty należy czytelnie podać nazwę zamawianego czasopisma, liczbę zamawianych egzemplarzy, okres prenumeraty oraz własny adres i nr NIP.

„Cement-Wapno-Beton” – dwumiesięcznik
Cena 1 egz. – 40 zł,

Prenumerata roczna – 240 zł
Prenumerata roczna – 160 € lub 240\$

Zamówienia na prenumeratę można przysyłać bezpośrednio na e-mail lub faxem do redakcji podając adres i nr NIP. Ogłoszenia przyjmuje: Redakcja „Cement-Wapno-Beton”, ul. Lubelska 29, 30-003 Kraków, tel.: + 48 12 423 33 55; fax: +48 12 423 33 45.

Adres do korespondencji: Redakcja „Cement-Wapno-Beton”, ul. Lubelska 29, 30-003 Kraków
e-mail: cwb@polskicement.pl

Czasopismo jest również dostępne w wersji elektronicznej

Redakcja nie bierze odpowiedzialności za treść publikowanych ogłoszeń