



EDMUND CZOPOWSKI¹⁾
 BEATA ŁAŻNIEWSKA-PIEKARCZYK²⁾
 BARBARA RUBIŃSKA-JOŃCZY³⁾
 JANUSZ SZWABOWSKI⁴⁾

PROPERTIES OF CONCRETES BASED ON CEMENTS CONTAINING CALCAREOUS FLY ASH

WŁAŚCIWOŚCI BETONÓW NA CEMENTACH ZAWIERAJĄCYCH POPIÓŁ LOTNY WAPIENNY

STRESZCZENIE. W artykule przedstawiono wyniki badań właściwości betonów wykonanych z jedenastu cementów zawierających popiół lotny wapienny. Jako układ odniesienia przy ocenie ich właściwości przyjęto właściwości betonów o takich samych składach wyjściowych, lecz wykonanych na cemencie CEM I 42,5 R. Badaniami objęto właściwości mieszanki i stwardniałego betonu. Przedstawiono wyniki badań konsystencji mieszanki oraz zawartego w niej powietrza. Testom poddano również wytrzymałość na ściskanie, skurcz, penetrację wody pod ciśnieniem oraz mrozoodporność w 24 betonach o wskaźniku wodno-cementowym $w/c = 0,45$. Badania wykazały, że w znaczącej większości przypadków betony na cementach zawierających popiół lotny wapienny mają korzystniejsze właściwości niż betony odniesienia na cemencie CEM I 42,5 R.

SŁOWA KLUCZOWE: beton, cement, mrozoodporność, popiół lotny wapienny.

ABSTRACT. Results of an investigation concerning properties of concretes made of eleven cements containing calcareous fly ash are shown in the paper. Similar composition of concretes, but based on cement CEM I 42.5R, was used as a frame of reference for evaluation of their properties. The investigation included testing of properties of both fresh and hardened concrete. The paper presents the test results of consistency and air content of the mix, as well as compressive strength, shrinkage, depth of penetration of water under pressure and frost resistance of 24 concretes with $w/c = 0.45$. The results show that the concretes based on cements containing calcareous fly ash have in most cases more beneficial properties than those based on cement CEM I 42.5R.

KEYWORDS: calcareous fly ash, cement, concrete, frost resistance.

DOI: 10.7409/rabdim.013.003

¹⁾ Politechnika Śląska w Gliwicach, Wydział Budownictwa; Edmund.Czopowski@polsl.pl

²⁾ Politechnika Śląska w Gliwicach, Wydział Budownictwa; Beata.Lazniewska-Piekarczyk@polsl.pl

³⁾ Politechnika Śląska w Gliwicach, Wydział Budownictwa; Barbara.Rubinska-Jonczy@polsl.pl

⁴⁾ Politechnika Śląska w Gliwicach, Wydział Budownictwa; Janusz.Szwabowski@polsl.pl (✉)

1. WPROWADZENIE

Poszukiwanie nowych dodatków mineralnych do cementu jest jedną z tendencji rozwoju spoiw budowlanych i uczynienia z nich produktów respektujących zasady zrównoważonego rozwoju. Jednym z takich spoiw jest popiół lotny wapienny, powstający w procesie spalania węgla brunatnego, dotychczas niestosowany w krajowym przemyśle cementowym. Jego zastosowanie jako składnika cementu jest jednym z celów realizowanego Projektu Badawczego „Innowacyjne spoiwa cementowe i betony z wykorzystaniem popiołu lotnego wapiennego”. Wyniki przeprowadzonych w projekcie badań [1] wykazały, że popiół ten może być cennym składnikiem cementów portlandzkich wieloskładnikowych, częściowo zastępującym powszechnie stosowane dodatki mineralne. Wiele wskazuje [2, 3] również na to, że popiół lotny wapienny może być z powodzeniem stosowany jako składnik cementów pucolanowych i wieloskładnikowych. W konsekwencji, dalsze prace badawcze w wyżej wymienionym projekcie doprowadziły do opracowania i wyprodukowania w skali półtechnicznej 11 cementów zawierających popiół lotny wapienny o właściwościach zgodnych z PN-EN 197-1. Należało zatem zbadać jego wpływ (jako spoiwa) na właściwości betonu. Zasadniczym celem badań było określenie jakościowego i ilościowego wpływu 11 wyprodukowanych cementów na właściwości betonu, ocenianych w stosunku do betonu na cemencie CEM I 42,5R. Betony na wyprodukowanych cementach podlegały ocenie porównawczej przy uwzględnieniu zróżnicowania technologii ich mieszania. Rezultaty tych badań przedstawiono w dalszej części artykułu.

2. PRZEDMIOT I ZAKRES BADAŃ

Przedmiotem badań były betony na 11 różnych cementach, zawierających popiół lotny wapienny, i na cemencie CEM I 42,5R jako układzie odniesienia. Rodzaje stosowanych cementów podano w Tablicy 1. Zakres badań przedstawiony w niniejszym artykule obejmuje:

- badanie konsystencji mieszanki betonowej – według PN-EN 12350-2,
- badanie zawartości powietrza w mieszance betonowej – według PN-EN 12350-7,
- badanie wytrzymałości betonu na ściskanie – według PN-EN 12390-3,
- badanie skurczu betonu – według PN-B 06714/23,

1. INTRODUCTION

A search for new mineral additives to cement is one of development trends of building binders and of making them adequate for the sustainable development policy. One of the additives is calcareous fly ash, produced during the process of brown coal combustion, which has not yet been used in Polish cement industry. Its application as a cement constituent is one of the aims of the scientific project “Innovative cement based materials and concrete with calcareous fly ashes”. The investigation results [1] show that calcareous fly ash could be a valuable constituent of multicomponent Portland cements, partly substituting commonly used mineral additives. Moreover, it is shown [2, 3] that this additive could be successfully used in pozzolanic and multicomponent cements. Consequently, further investigation conducted as a part of the mentioned project led to formulation and production on half-technological scale 11 cements containing calcareous fly ash, according to PN-EN 197-1. Therefore, it was necessary to investigate its influence (as a binder) on concrete properties. The primary aim of the investigation was to determine the qualitative and quantitative influence of the 11 innovative cements on concrete properties, evaluated in reference with concrete made of cement CEM I 42.5R and in comparison with concretes based on the innovative cements, taking into consideration different mixing technology. The results are presented in a subsequent part of the paper.

2. SUBJECT AND SCOPE OF INVESTIGATION

The subject of the investigation were concretes made of 11 different innovative cements containing calcareous fly ash and cement based on cement CEM I 42.5 R as a reference. Types of cements used in the study are presented in Table 1. The scope of investigation included:

- testing consistency of a concrete mix – according to PN-EN 12350-2,
- testing air content in a concrete mix – according to PN-EN 12350-7,
- testing compressive strength of concrete – according to PN-EN 12390-3,
- testing shrinkage of concrete – according to PN-B 06714/23,
- testing depth of penetration of water under pressure in concrete – according to PN-EN 12390-8,

- badanie penetracji wody pod ciśnieniem w betonie – według PN-EN 12390-8,
- badanie mrozoodporności betonu – według PN-B 06250.

- testing frost resistance of concrete – according to PN-B 06250.

3. OPIS BADAŃ

3.1. MATERIAŁY

Rodzaje, klasę oraz podstawowe właściwości zastosowanych cementów podano w Tablicy 1.

3. DESCRIPTION OF EXPERIMENTS

3.1. MATERIALS

Types, class and basic properties of used cements are presented in Table 1.

Table 1. Properties of cements used in the investigations
Tablica 1. Właściwości cementów zastosowanych w badaniach

Cement	Homogenization method Metoda homogenizacji	Setting time Czas wiązania [min]		Compressive strength after 28 days Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach [MPa]	Specific surface Powierzchnia właściwa [cm ² /g]
		t_p	t_k		
CEM I 42.5 Rejowiec		125	180	52.3	3 980
CEM II/A-W	Interground Współmielony	195	290	56.3	4 190
CEM II/B-W	Interground Współmielony	225	340	49.6	4 030
CEM II/B-W	Blended Mieszany	120	220	49.1	4 120
CEM II/B-M(LL-W)	Interground Współmielony	170	235	47.9	4 450
CEM II/B-M (V-W)	Interground Współmielony	220	300	57.9	4 130
CEM II/B-M(S-W)	Interground Współmielony	200	275	56.4	4 230
CEM II/B-M(S-W) (20%-10%)	Blended Mieszany	220	285	54.0	3 750
CEM II/B-M(S-W) (10% -20%)	Blended Mieszany	225	295	53.6	3 800
CEM IV/B-W	Interground Współmielony	180	310	39.9	4 000
CEM IV/B (V-W)	Interground Współmielony	305	380	36.3	4 130
“CEM V/A (S-W)”*)	Blended Mieszany	270	350	47.5	4 030

Remark / Uwaga

*) according to PN-EN 197-1 calcareous fly ash addition was not included in a multicomponent cement CEM V composition
wg PN-EN 197-1 w składzie cementu wieloskładnikowego CEM V nie przewidziano popiołu lotnego wapiennego

Do wykonania mieszanek betonowych użyto kruszywa naturalnego $D_{\max} = 16$ mm. Mieszanek kruszywową zaprojektowano metodą krzywych granicznych w odniesieniu do betonu wzorcowego (według EN 480). Jako domieszki stosowano:

- domieszkę upłynniającą – superplastyfikator na bazie eteru polikarboksylianowego. Zadaniem tej domieszki było utrzymanie konsystencji badanych mieszanek betonowych na stałym, założonym poziomie. W zależności od zastosowanego cementu, ilość dozowanego superplastyfikatora była zmienna;
- domieszkę napowietrzającą na bazie tensyd syntetycznych. Napowietrzenie mieszanek betonowych miało być utrzymane na poziomie 4%-7%. W zależności od zastosowanego cementu, ilość domieszki napowietrzającej była zmienna.

Skład betonów odniesienia, wykonanych na cemencie CEM I 42,5 R, przedstawiono w Tablicy 2. W przypadku betonów na cementach innowacyjnych skład mieszanki zmieniano stosownie do zmiany gęstości stosowanych cementów. Formowanie i pielęgnację próbek wykonywano zgodnie z PN -EN 12390-2.

Table 2. Composition of reference concretes with $w/c = 0.45$
Tablica 2. Skład betonów odniesienia o wskaźniku $w/c = 0,45$

Constituents / Składniki	Unit / Jednostka	Type of concrete / Rodzaj betonu	
		Plain / Nienapowietrzony	Air-entrained / Napowietrzony
Cement	[kg/m ³]	350	
Water / Woda	[dm ³ /m ³]	158	
Sand / Piasek 0-2 mm	[kg/m ³]	675	650
Gravel / Żwir 2-8 mm	[kg/m ³]	510	485
Gravel / Żwir 8-16 mm	[kg/m ³]	695	665

3.2 BADANIA MIESZANEK BETONOWYCH

Temperatura badanych mieszanek mieściła się w przedziale 18°C - 21°C. Konsystencję mieszanek betonowych badano metodą opadu stożka według PN-EN 12350-2. W stosunku do wszystkich mieszanek założono klasę konsystencji S3, tj. 12-15 cm opadu stożka. Badanie zawartości powietrza w mieszance betonowej wykonywano metodą ciśnieniową według PN-EN 12350-7.

A natural aggregate of $D_{\max} = 16$ mm was used for the cement mix. The aggregate was designed according to particle size distribution limits with reference to a model concrete (in accordance with EN 480). Following admixtures were used:

- fluidifying admixture – superplasticizer based on polycarboxylate ether. The admixture was supposed to sustain the consistency of tested concrete mixes at fixed level. Depending on the used cement, the amount of superplasticizer was different;
- air-entraining admixture based on synthetic surfactants. Entrained air content of the mix was kept at 4%-7%. Depending on the cement type, the amount of air-entraining admixture was different.

The composition of concretes of reference, based on cement CEM I 42.5R, are presented in Table 2. In case of concretes made of innovative cements, the mix compositions were modified according to the changes in density of applied cements. Forming and curing of specimens was conducted according to PN -EN 12390-2.

3.2 TESTS ON CONCRETE MIXES

Temperature of the tested mixes was in the range of 18°C - 21°C. The consistency of concrete mixes was assessed using slump test according to PN-EN 12350-2. For each mix, the consistency class S3 (12-15 cm of slump) was assumed. The test of air content in a concrete mix was conducted by pressure method according to PN-EN 12350-7.

3.3. BADANIA BETONÓW

Badania wytrzymałości na ściskanie betonów przeprowadzono na 3 próbkach sześciennych o boku 100 mm po 2, 7, 28, 90 i 180 dniach dojrzewania próbek w wodzie. Uzyskane wytrzymałości średnie przeliczono na próbki normowe o boku 150 mm. Określenie charakterystycznej wytrzymałości badanych betonów po 28 dniach dojrzewania dokonano na podstawie wytrzymałości próbek sześciennych o boku 150 mm.

Badania skurczu betonów przeprowadzono po 1, 3, 7, 14, 28, 60, 90, 120, 150, 210, 270 i 360 dniach dojrzewania. W każdym z terminów przeprowadzono badanie na trzech próbkach o wymiarach 100 × 100 × 500 mm. Do pomiaru skurczu użyto aparatu Amslera.

Badanie głębokości penetracji wody pod ciśnieniem wykonano na 3 próbkach sześciennych o boku 150 mm po 28 i 90 dniach. Próbki przygotowano jak do badań wytrzymałościowych, zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 12390-2. Powierzchnię, na którą miało być przekazane ciśnienie wody, zdrapano za pomocą drucianej szczotki bezpośrednio po rozformowaniu i umieszczono na urządzeniu do badań tak, aby przykładane ciśnienie wody 500±50 kPa przyłożone było prostopadłe do przygotowanych powierzchni próbek przez 72±2 h. Po upływie wyznaczonego czasu działania ciśnienia usuwano nadmiar wody, a następnie rozłupywano próbki w kierunku prostopadłym do powierzchni, na którą przekazywane było ciśnienie wody. Głębokość penetracji wymierzono z dokładnością do 1 mm. Wynikiem badania była maksymalna głębokość penetracji, wyrażona z zaokrągleniem do 1 milimetra.

Badanie mrozoodporności betonu F150 wykonano standardową metodą zgodnie z normą PN-B-06250. Przeprowadzono je na próbkach sześciennych o wymiarach 10×10×10 cm po upływie 28 i 90 dni dojrzewania w warunkach laboratoryjnych.

4. WYNIKI BADANIA BETONÓW

W Tabelicy 3 przedstawiono uzyskane po 28, 90 i 180 dniach wartości średnie wytrzymałości na ściskanie betonów nienapowietrzonych oraz wyniki oznaczenia zawartości powietrza w mieszankach. Zmiany wytrzymałości na ściskanie betonów na cementach innowacyjnych, uzyskane w terminach 28 i 90 dni, wykazały prawidłowe przyrosty wytrzymałości. Przyrosty po 90 dniach w stosunku do wytrzymałości po 28 dniach są znaczące. Największy

3.3 TESTS ON CONCRETES

Tests of compressive strength of concretes were conducted on 3 cubic specimens with a side of 100 mm after 2, 7, 28, 90 and 180 days of curing in the water. Obtained average compressive strength values were converted into standard 150 mm cubic specimens. Determination of characteristic value of compressive strength of tested concretes after 28 days of curing was performed on basis of the compressive strength of 150 mm cubic specimens.

Tests of shrinkage of concretes were conducted after 1, 3, 7, 14, 28, 60, 90, 12, 150, 210, 270 and 360 days of curing. Each time 3 specimens of 100 × 100 × 500 mm were tested. The measurements of shrinkage were conducted with the use of Amsler's apparatus.

Tests of depth of penetration of water under pressure was conducted on 3 cubic specimens of 150 mm after 28 and 90 days. The specimens were prepared as for strength tests according to PN-EN 12390-2. Immediately after dismantling of the form, the surface which was meant to be put under water pressure was scratched with a wire brush and placed in the testing device so that the water pressure of 500±50 kPa was applied perpendicularly to the prepared surface of a specimen for 72±2 h. After the set time of applying the pressure, the excess of water was removed and subsequently the specimens were split perpendicularly to the surface to which the pressure was applied. The depth of penetration was measured with the accuracy of 1 mm. Obtaining the maximal depth of penetration, rounded up to 1 mm, was a final result of testing.

Tests of frost resistance of concrete F150 was conducted using standard method according to PN-88/B-06250. It was performed on 100 mm cubic specimens after 28 and 90 days of curing in laboratory conditions.

4. TEST RESULTS

The values of average compressive strength after 28, 90 and 180 days of plain concretes and designations of air content in the mix are presented in Table 3. The changes in compressive strength of concretes based on innovative cements, observed the 28th and 90th day, displayed normal strength growth pattern. The strength growth after 90 days in relation to compressive strength after 28 days is significant. The growth of the compressive strength of blended cement CEM II/B-M(S,W)10,20 was the highest, i.e. amounting to 35%. Only minimally smaller was

z przyrostów, wynoszący 35%, uzyskał beton na cemencie mieszanym CEM II/B-M(S,W)10,20. Niewiele niższe przyrosty zarejestrowano w przypadku betonów na cementach: mieszanym CEM II /B-W – 29%, mieszanym CEM II/B-M(S,W) 20,10 – 29% i współmielonym CEM IV/B-W – 28%. Porównując wartości średnie wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach betonów nienapowietrzonych okazuje się, że betony na cementach mieszanych: CEM II/B-M(S,W) 10-20, CEM II/ B-W, „CEM V/A(S,W)” i CEM II/B-M(S,W) 20,10 uzyskały generalnie lepsze wyniki od pozostałych betonów, za wyjątkiem betonu na współmielonym cemencie CEM II/A-W. Stwierdzenie to dotyczy także wytrzymałości po 180 dniach. Z rezultatów przedstawionych w Tablicy 3 wynika, że wymienione betony na cementach mieszanych przewyższają pod względem wytrzymałości na ściskanie beton na cemencie CEM I 42,5R, będący układem odniesienia.

the strength growth of concretes based on: blended CEM II /B-W – 29%, blended CEM II/B-M(S,W) 20,10 – 29% and interground CEM IV/B-W – 28%. Comparing the average values of compressive strength after 28 days of the plain concretes, it appears that the concretes based on innovative blended cements: CEM II/B-M(S,W) 10-20, CEM II/ B-W, “CEM V/A(S,W)” and CEM II/B-M(S,W) 20,10 achieve generally better results than other concretes, with exception of concrete based on the interground cement CEM II/A-W. This statement applies as well to compressive strength after 180 days. From the results shown in Table 3 it can be concluded that the enumerated concretes based on innovative cements surpass the reference concrete based on cement CEM I 42.5R in compressive strength.

Table 3. Compressive strength f_{cm} of plain concretes tested on 100 mm cubic specimens after 28, 90 and 180 days of curing

Tablica 3. Wytrzymałość na ściskanie f_{cm} betonów nienapowietrzonych oznaczona na próbkach sześciennych o boku 100 mm po 28, 90 i 180 dniach dojrzewania

Cement type Rodzaj cementu	Homogenization method Metoda homogenizacji	A_c [%]	Compressive strength / Wytrzymałość na ściskanie f_{cm} [MPa]		
			28 days / dni	90 days / dni	180 days / dni
CEM I		2.6	54.9	65.9	69.8
CEM II/A-W	Interground / Współmielony	2.4	60.9	71.0	79.5
CEM II/B-W	Interground / Współmielony	0.85	54.0	65.9	68.1
CEM II/B-W	Blended / Mieszany	2	59.9	75.9	80.8
CEM II/B-M (LL-W)	Interground / Współmielony	1	50.6	59.0	61.2
CEM II/B-W (V-W)	Interground / Współmielony	4.7	50.5	58.1	64.2
CEM II/B-M (S-W)	Interground / Współmielony	1.4	56.5	63.0	76.2
CEM II/B-M (S20-W10)	Blended / Mieszany	0.9	55.9	74.5	76.6
CEM II/B-M (S10-W20)	Blended / Mieszany	0.8	65.9	81.9	86.2
CEM IV/B-W	Interground / Współmielony	2.3	49.4	62.6	72.5
CEM IV/B (V-W)	Interground / Współmielony	1.4	49.9	59.5	70.5
“CEM V/A (S-W)”	Blended / Mieszany	1.7	58.5	66.4	78.1

Uzyskane wyniki badań skurczu betonów nienapowietrzonych i napowietrzonych po 28 i 360 dniach przedstawiono w Tablicy 4 jako wartości średnie z pomiarów na 3 próbkach. Stwierdzono występowanie różnic w wielkości skurczu zależnych od rodzaju cementu. Betony na cementach innowacyjnych wykazały skurcz mniejszy niż ten w betonach na cemencie CEM I 42,5 R. Największe

Shrinkage test results after 28 and 360 days for air-entrained and plain concretes are presented in Table 4 as average values of measurements conducted on 3 specimens. Differences were found in the size of shrinkage depending on the type of cement. All the concretes made of innovative cements exhibited lower shrinkage than the concrete based on cement CEM I 42.5R. The greatest

odkształcenia skurczowe, podobnie jak w przypadku betonu z cementem CEM I 42,5 R, zauważono w okresie do 28 dni, natomiast stabilizacja odkształceń następowała w większości przypadków po upływie 120 i 150 dni. Betony napowietrzane wykazały mniejszą podatność na skurcz niż betony nienapowietrzane. Napowietrzenie betonów spowodowało obniżenie i odkształcenie skurczów po 360 dniach dojrzewania w granicach 10% do 20% w stosunku do betonów nienapowietrzonych. Betony z cementami CEM II, CEM IV/B-W, CEM IV/B (V-W) i „CEM V/A (S-W)” wykazały skurcz mniejszy prawie o połowę niż w przypadku betonów z CEM I.

shrinkage deformations, as in case of concrete based on cement CEM I 42.5R, was observed in the period up to 28 days, whereas the stabilization of deformation occurred mostly after 120 and 150 days. The air-entrained concretes exhibited lower susceptibility to shrinkage than the plain ones. Air-entraining of concrete caused a reduction in the shrinkage deformation after 360 days of curing, in range of 10% to 20% in relation to plain concretes. Concretes with cement CEM II, CEM IV/B-W, CEM IV/B (V-W) and “CEM V/A (S-W)” exhibited shrinkage which was lower by nearly a half in comparison with concrete with CEM I.

Table 4. Shrinkage of concrete after 28 and 360 days and the depth of penetration of water under pressure for plain and air-entrained concrete after 28 days

Tablica 4. Skurcz betonu po 28 i 360 dniach i głębokość penetracji wody pod ciśnieniem w przypadku betonów nienapowietrzonych i napowietrzonych po 28 dniach

Cement type Rodzaj cementu	Homogenization method Metoda homogenizacji	Plain concrete / Beton nienapowietrzony			Air-entrained concrete / Beton napowietrzony		
		Shrinkage / Skurcz $\varepsilon \cdot 10^{-6}$		Depth of penetration of water Głębokość penetracji wody [mm]	Shrinkage / Skurcz $\varepsilon \cdot 10^{-6}$		Depth of penetration of water Głębokość penetracji wody [mm]
		After 28 days Po 28 dniach	After 360 days Po 360 dniach		After 28 days Po 28 dniach	After 360 days Po 360 dniach	
CEM I		438.5	551.7	87.7	276.2	488.7	68.3
CEM II/A-W	Interground Współmielony	247.4	422.5	69.3	134.8	377.2	104.3
CEM II/B-W	Interground Współmielony	136.5	421.4	30.7	198.3	348.7	84.3
CEM II/B-W	Blended Mieszany	211.5	401.7	116.7	98.3	341.4	66.0
CEM II/B-M (LL-W)	Interground Współmielony	151.6	331.5	81.7	117.7	301.8	61.7
CEM II/B-W (V-W)	Interground Współmielony	152.7	351.8	85.0	106.4	313.2	93.3
CEM II/B-M (S-W)	Interground Współmielony	193.0	293.0	97.3	127.0	271.0	79.0
CEM II/B-M (S20-W10)	Blended Mieszany	138.0	236.0	85.3	79.0	198.0	76.7
CEM II/B-M (S10-W20)	Blended Mieszany	91.0	202.0	71.7	53.0	171.0	99.3
CEM IV/B-W	Interground Współmielony	57.0	248.0	89.0	51.0	226.0	75.3
CEM IV / B (V-W)	Interground Współmielony	78.0	251.0	113.3	71.0	224.0	88.0
“CEM V/A (S-W)”	Blended Mieszany	209.0	354.0	118.7	184.0	319.0	75.7

Wyniki badań penetracji wody w betonach nienapowietrzonych i napowietrzonych po 28 dniach przedstawiono w Tablicy 4 w postaci wartości średnich z trzech próbek. Stwierdzono znaczne różnice w głębokości penetracji wody zależne od rodzaju cementu, zwłaszcza po 28 dniach dojrzewania. Betony nienapowietrzane wykonane na cementach z popiołem wapiennym, poza betonami na cementach CEM II/B-W – mieszanym i CEM II/B-M(S,W), charakteryzują się mniejszą głębokością penetracji niż beton odniesienia na cemencie CEM I. Z uzyskanych rezultatów badań betonów napowietrzonych wynika, że po 28 dniach tylko betony na cementach CEM II/B-W mieszanym i CEM II/B-M(LL,W) wykazują mniejszą głębokość penetracji niż beton wykonany z CEM I. Badane betony wykazały niezadawalającą podatność na penetrację wody pod ciśnieniem.

The test results of water penetration in air-entrained and plain concretes after 28 days are presented in Table 4 as average values from 3 specimens. Based on the results of conducted tests, considerable differences in depth of water penetration dependant on the type of cement were observed, especially after 28 days of curing. Plain concretes with calcareous fly ash except for the concretes based on blended CEM II/B-W and CEM II/B-M(S,W), exhibit lower depth of penetration than the reference concrete based on cement CEM I. It can be concluded from the obtained results of air-entrained concretes that after 28 days only the concretes based on cements CEM II/B-W (blended) and CEM II/B-M(LL,W) exhibit lower depth of water penetration than the concrete based on CEM I. Tested concretes were distinguished by unsatisfactory vulnerability to penetration of water under pressure.

Table 5. Strength reduction Δf_c and mass loss Δm of air-entrained concretes due to 150 freeze/thaw cycles after 28 and 90 days of curing

Tablica 5. Spadek wytrzymałości Δf_c i ubytek masy Δm betonów napowietrzanych poddanych 150 cyklom zamrażania i odmrażania po 28 i 90 dniach dojrzewania

Concrete based on cement Beton na cemencie	Homogenization method Metoda homogenizacji	Air content in the mix Zawartość powietrza w mieszance [%]	After 28 days of curing and 150 freeze/thaw cycles Po 28 dniach dojrzewania i 150 cyklach zamrażania/odmrażania		After 90 days of curing and 150 freeze/thaw cycles Po 90 dniach dojrzewania i 150 cyklach zamrażania/odmrażania	
			Δf_c [%]	Δm [%]	Δf_c [%]	Δm [%]
CEM I		5.0	5.9	0.6	4.6	0.1
CEM II/A-W	Interground Współmielony	4.9	3.9	-0.2	3.3	0.0
CEM II/B-W	Interground Współmielony	4.9	0.4	0.2	5.5	-3.1
CEM II/B-W	Blended Mieszany	6.2	4.3	-0.2	3.2	-0.2
CEM II/B-M (LL-W)	Interground Współmielony	5.2	3.8	0.8	2.5	0.1
CEM II/B-W (V-W)	Interground Współmielony	4.8	-1.2	0.0	0.0	0.0
CEM II/B-M (S-W)	Interground Współmielony	4.5	2.8	0.0	2.5	0.1
CEM II/B-M (S20-W10)	Blended Mieszany	4.0	1.6	-0.9	1.0	-0.2
CEM II/B-M (S10-W20)	Blended Mieszany	5.2	4.0	1.0	1.0	-0.3
CEM IV/B-W	Interground Współmielony	7.5	-3.2	-0.2	5.5	-0.4
CEM IV/B (V-W)	Interground Współmielony	4.3	-8.6	0.7	7.9	-0.2
“CEM V/A (S-W)”	Blended Mieszany	7.0	6.7	0.0	5.1	-0.4

Wyniki badania mrozoodporności betonów napowietrzonych po 28 i 90 dniach dojrzewania oraz wyniki oznaczenia zawartości powietrza w mieszankach przedstawiono w Tablicy 5. Napowietrzony beton na cementach z popiołem lotnym wapiennym po 28 i 90 dniach, tak samo jak beton odniesienia na cemencie CEM I, uzyskały stopień mrozoodporności F150. Porównanie wyników badania zawartości powietrza w mieszance i wyników badania mrozoodporności badanych betonów sugeruje, że podobnie jak w wielu innych badaniach mrozoodporności betonów nie występuje wyraźna korelacja między zawartością powietrza w mieszance a mrozoodpornością betonu. Ważniejszy w tym zakresie jest wpływ technologii wprowadzania dodatku do cementu i homogenizacji całego spoiwa. Analizując wpływ sposobu homogenizacji popiołu lotnego wapiennego na mrozoodporność badanych betonów trudno dopatrzeć się prawidłowości w tym względzie.

5. WNIOSKI

Wyniki przeprowadzonych badań wykazały, że w znaczącej większości przypadków betony na cementach zawierających popiół lotny wapienny mają właściwości co najmniej porównywalne z właściwościami betonu odniesienia na cemencie CEM I. W ogólnej ocenie, spośród betonów na cementach zawierających dodatek popiołu wapiennego najkorzystniejsze właściwości uzyskał beton na cemencie CEM II/B-M (S10,W20). Uzyskał on też najwyższą klasę C45/55, podczas gdy beton odniesienia miał klasę C35/45. Tylko trzy spośród betonów nienapowietrzonych na cementach: mieszanym CEM II/B-W, współmielonym CEM II/B-M(LL,W) i współmielonym CEM II/B-W(V,W) uzyskały klasę C30/37, tj. niższą od klasy betonu odniesienia C35/45.

INFORMACJE DODATKOWE

Praca była współfinansowana ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka, w projekcie nr POIG 01.01.02-24-005/09 „Innowacyjne spoiwa cementowe i betony z wykorzystaniem popiołu lotnego wapiennego”.

The results of the frost resistance tests of air-entrained concretes after 28 and 90 days as well as air content in the mix are presented in Table 5. Air-entrained concretes based on cements with calcareous fly ash after 28 and 90 days of curing gained the frost resistance grade F150, same as the reference concrete based on CEM I. The comparison of the air content in the mix and the frost resistance of concrete suggests that, similarly to other cases of frost resistance tests, no evident correlation occurs between the frost resistance and the air content in the mix. The influence of technology of calcareous fly ash introducing to cement as well as homogenization of the binder are more important in this case. After analysing the influence of homogenization of the mentioned additive on frost resistance of tested concretes it is hard to discern any definitive patterns.

5. CONCLUSIONS

The results of conducted tests indicate that in majority of cases the concretes based on cements with calcareous fly ash have properties which are at least comparable to the properties of reference concrete based on CEM I. Among the concretes based on cements with addition of fly ash, the best properties were obtained by concrete based on cement CEM II/B-M (S10,W20). Moreover, it achieved the highest class C45/55, while the reference concrete had barely C35/45. Only three from all the plain concretes, based on blended cement CEM II/B-W as well as on interground cements CEM II/B-M(LL,W) and CEM II/B-W(V,W), reached C30/37, i.e. a lower class than the reference concrete class C35/45.

ACKNOWLEDGEMENT

This investigation was co-financed by the European Union from the European Regional Development Fund. No. POIG.01.01.02-24-005/09 “Innovative cement based materials and concrete with high calcium fly ashes”.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] Drożdż W., Garbacik A., Dziuk D., Giergiczy Z.: Właściwości cementów portlandzkich wieloskładnikowych CEM II/B-M z udziałem popiołu lotnego wapiennego. VII Konferencja „Dni Betonu – Tradycja i Nowoczesność”, Stowarzyszenie Producentów Betonu, Kraków, 8-10 października 2012, 493 - 502
- [2] Giergiczy Z., Garbacik A., Baran T.: Popioły lotne wapienne jako składnik pucolanowo-hydrauliczny cementów i aktywny dodatek do betonów, w: Energia i środowisko w technologiach materiałów budowlanych, ceramicznych, szklarskich i ogniotrwałych. Redakcja naukowa J. Dudy, K. Szamała. Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych, Wydawnictwo Instytut Śląski, Opole, 2010, 215 - 228
- [3] Namagga C., Atadero R.A.: Optimization of fly ash in concrete. High lime fly ash as a replacement for cement and filler material. World of Coal Ash Conference (WOCA), Lexington, USA, 4-7 May, 2009, www.flyash.info/2009/070-atadero2009.pdf

STANDARDS / NORMY

- PN-B 06250:1988 Beton zwykły
- PN-EN 197-1:2012 Cement – Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku (oryg.)
- PN-B 06714/23:1984 Kruszywa mineralne – Badania – Oznaczanie zmian objętościowych metodą Amslera
- PN-EN 12350-2:2011 Badania mieszanki betonowej – Część 2: Badanie konsystencji metodą opadu stożka (oryg.)
- PN-EN 12350-7:2011 Badania mieszanki betonowej – Część 7: Badanie zawartości powietrza – Metody ciśnieniowe (oryg.)
- PN-EN 12390-2:2011 Badania betonu – Część 2: Wykonywanie i pielęgnacja próbek do badań wytrzymałościowych
- PN-EN 12390-3:2011 Badania betonu – Część 3: Wytrzymałość na ścislenie próbek do badań
- PN-EN 12390-8:2011 Badania betonu – Część 8: Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem