

KAROLINA GIBAS¹⁾

MICHAŁ A. GLINICKI²⁾

GRZEGORZ NOWOWIEJSKI³⁾

EVALUATION OF IMPERMEABILITY OF CONCRETE CONTAINING CALCAREOUS FLY ASH IN RESPECT TO ENVIRONMENTAL MEDIA

OCENA SZCZELNOŚCI BETONU Z DODATKIEM POPIOŁU LOTNEGO WAPIENNEGO WOBEC MEDIÓW ŚRODOWISKOWYCH

STRESZCZENIE. Przedstawiono wyniki badań szczelności wobec mediów środowiskowych betonów z popiołem lotnym wapiennym z Elektrowni Bełchatów, zastosowanym jako dodatek do betonu. Część masy spoiwa (15% lub 30%) w betonie zastąpiono popiołem lotnym wapiennym przy założeniu współczynnika efektywności 0,7 lub 1,0. Przeprowadzono badania współczynnika przepuszczalności powietrza metodą Torrenta, głębokości penetracji wody pod ciśnieniem i migracji jonów chlorkowych metodą przyspieszoną. Stwierdzono znaczący pozytywny wpływ popiołu lotnego wapiennego na redukcję współczynnika migracji chlorków, natomiast wpływ na przepuszczalność wody i przepuszczalność powietrza był zbliżony do wpływu na wytrzymałość betonu na ściskanie.

SŁOWA KLUCZOWE: metoda Torrenta, migracja chlorków, popiół lotny wapienny, przepuszczalność powietrza, uzdatnianie popiołu, wodoprzepuszczalność, wytrzymałość na ściskanie.

ABSTRACT. The paper presents the investigation of concrete resistance to penetration by liquid and gaseous environmental media. Calcareous fly ash obtained from Bełchatów Power Station was used as concrete additive. In the mix design a certain portion of binder (15% and 30%) was substituted with calcareous fly ash assuming the efficiency factors of 0.7 or 1.0. The tested parameters included the air permeability coefficient measured with Torrent method, the depth of water penetration under pressure and the coefficient of chloride ions migration measured with the rapid chloride migration test. It was established that the addition of calcareous fly ash resulted in the desired reduction of the value of a chloride migration coefficient while the effect on the permeability of water and air was similar to the effect it had on the compressive strength of concrete.

KEYWORDS: air permeability, calcareous fly ash, chloride migration, compressive strength, fly ash processing, Torrent method, water permeability.

DOI: 10.7409/rabdim.013.012

¹⁾ Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN w Warszawie; kgibas@ippt.pan.pl

²⁾ Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN w Warszawie; mglinic@ippt.pan.pl (✉)

³⁾ Hydrobudowa-1 Betoniarnia – Laboratorium Sp. z o.o., Warszawa; sabson@poczta.onet.pl

1. WPROWADZENIE

Przedwczesne zniszczenie betonu w konstrukcjach inżynierskich stanowi ważny problem techniczny. Agresywne oddziaływanie środowiska jest związane ze zjawiskami transportu mediów ciekłych i gazowych przez beton [1]. Istnieje bezpośredni niemal związek szczelności betonu wobec mediów środowiskowych z trwałością obiektów inżynierskich w warunkach zwykłej eksploatacji, a więc poddanych wpływom długotrwałych oddziaływań zewnętrznych [2]. Tradycyjna ocena szczelności betonu na podstawie nasiąkliwości i stopnia wodoszczelności zazwyczaj nie jest dostatecznie precyzyjna w odniesieniu do betonów silnie modyfikowanych dodatkami mineralnymi i domieszkami chemicznymi. Z tego powodu rozwijane są inne metody oceny szczelności betonu wobec mediów środowiskowych, zwłaszcza metody przyspieszone, dotyczące przepuszczalności gazów lub jonów agresywnych [3, 4].

Stosowanie aktywnych dodatków mineralnych jako dodatków do betonu lub jako składników głównych cementów wieloskładnikowych może mieć zarówno pozytywny, jak i negatywny wpływ na zjawiska transportu [5]. Efektywność popiołów lotnych krzemionkowych jest w tym kontekście dość dobrze rozpoznana, natomiast efektywność popiołów lotnych wapiennych (W), zwłaszcza popiołów krajowych [6], jest poznana tylko fragmentarycznie. Stosowanie popiołów lotnych wapiennych zgodnych z wymaganiami klasy C normy ASTM C618 w ograniczonym zakresie zawartości, do około 20% zastąpienia cementu w betonie, powoduje poprawę albo przynajmniej nie pogarsza właściwości betonu [7]. W porównaniu z amerykańskimi krajowe popioły W różnią się znacznie uziarnieniem – są dość gruboziarniste i bez przetwarzania nie spełniają na ogół wymagania miאלkości według ASTM C618. Opublikowane wyniki wstępnych badań betonów zawierających dodatek popiołu lotnego wapiennego z Elektrowni Bełchatów [8] wykazały pozytywne efekty stosowania dodatku w odniesieniu do współczynnika migracji jonów chlorkowych, głębokości penetracji wody pod ciśnieniem oraz współczynnika przepuszczalności powietrza kT według Torrenta. W pracy [9] stwierdzono znaczną redukcję współczynnika migracji jonów chlorkowych ze wzrostem zawartości popiołów W do 30%, proporcjonalną do wzrostu wytrzymałości na ściskanie. Celem podjętych badań było szersze niż dotychczas rozpoznanie wpływu popiołów lotnych wapiennych z Elektrowni Bełchatów na szczelność betonów wobec agresywnych mediów ciekłych i gazowych. Zakres badań objął w szczególności cztery partie popiołów pobrane

1. INTRODUCTION

Premature deterioration of concrete in civil engineering structures is a serious problem for engineers. The action of aggressive environment is associated with transport of liquid and gaseous media through hardened concrete [1]. An almost direct relationship of concrete impermeability with the durability of structures operated under normal conditions, i.e. exposed to the long-term effect of adverse factors present in the outside environment, can be established [2]. The conventional test methods in which the impermeability of concrete is evaluated using water absorption test or water impermeability class test usually do not provide a sufficient accuracy for concrete containing large amounts of mineral additives and chemical admixtures. Therefore, efforts have been undertaken to develop new test methods to evaluate the resistance of concrete to penetration by the different environmental media, in particular rapid tests used to determine the permeation of gases and ions which have an adverse effect on concrete durability [3, 4].

The active mineral admixtures, whether added directly to concrete mixes or used as a main constituent in blended cements, may either inhibit or promote permeation of aggressive media [5]. While the action of siliceous fly ash in this context is quite well recognized, it is not the case with the calcareous fly ash (W), which is especially true for fly ash obtained from the local sources in Poland [6]. The use of calcareous fly ash, conformed with the requirements of class C of ASTM C618, has a positive or at least neutral effect on the properties of concrete [7] provided that the cement substitution rate is up to ca. 20%. The calcareous fly ash available in Poland is relatively coarser than the material used in USA and, as such, it must be ground in order to meet the fineness criteria of ASTM C618. According to the preliminary test results published in [8], calcareous fly ash obtained from Bełchatów Power Station improved the performance of concrete in terms of the resistance to chloride ion migration, the depth of penetration of water under pressure, and the air permeability kT according to Torrent. As demonstrated in [9], the value of chloride ion migration coefficient decreased strongly when the content of calcareous fly increased up to 30% in proportion to the increase of the compressive strength. The purpose of this research was to obtain a more comprehensive understanding of the effect of calcareous fly ash obtained from Bełchatów Power Station on the resistance of concrete to penetration by aggressive liquid and gaseous media. The scope of testing covered in particular

w okresie 15 miesięcy, aby w ten sposób rozpoznać zmienność właściwości popiołów.

2. OPIS BADAŃ DOŚWIADCZALNYCH

2.1. MATERIAŁY I PRÓBKİ

Program badań obejmował analizę porównawczą przepuszczalności betonów zaprojektowanych przy jednokowej zawartości spoiwa, którego część została zastąpiona popiołami lotnymi wapiennymi. Skład chemiczny oraz właściwości fizyczne zastosowanych popiołów przedstawiono w Tablicach 1 i 2. Oprócz popiołów nieprzetworzonych (ozn. N), stosowano popioły mielone w okresowym młynku kulowym (ozn. M) oraz popioły przesiane przez sito o oczkach 0,125 mm (ozn. NP). Uziarnienie popiołów oznaczono metodą granulometrii laserowej przy użyciu analizatora Malvern Mastersizer 2000.

four batches of fly ash sampled during a period of 15 months to check the stability of fly ash properties over time.

2. EXPERIMENTAL TESTS DESCRIPTION

2.1. MATERIALS AND SPECIMENS

The specimens used for testing permeability of concrete and for the subsequent comparative analysis contained the same amounts of binder, a portion of which was substituted with calcareous fly ash. The chemical composition and the physical properties of used fly ash are presented in Tables 1 and 2. The following types of fly ash were used: unprocessed (N), ground in discontinuous ball mill (M) and sieved through 0.125 mm sieve (NP). Grain size distribution was determined with Malvern Mastersizer 2000 particle size analyzer by laser diffraction.

Table 1. Chemical composition of calcareous fly ash determined with the XRF method

Tablica 1. Skład chemiczny popiołu lotnego wapiennego oznaczony metodą XRF

Batch No. Oznaczenie partii ^{*)}	Content / Zawartość [%]														
	LOI	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃ ^{**)}	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	Mn ₂ O ₃	SrO	ZnO	CaO _{free/wolny} ^{***)}
3	1.85	40.17	24.02	5.93	22.37	1.27	3.07	0.20	0.15	0.33	1.01	0.06	0.16	0.02	1.46
4	2.67	45.17	20.79	4.58	20.60	1.49	2.96	0.19	0.23	0.14	1.37	0.06	0.13	0.02	1.18
5	2.12	40.88	19.00	4.25	25.97	1.73	3.94	0.14	0.13	0.10	1.52	0.04	0.17	0.01	1.07
6	2.73	47.42	20.54	4.47	19.11	1.51	2.26	0.15	0.12	0.12	1.43	0.03	0.10	0.02	1.00
Remarks / Uwagi															
^{*)} fly ash batches sampled on / partie popiołu pobrane kolejno w dniach 28.06.2010, 10.11.2010, 25.03.2011, 13.09.2011															
^{**) elementary analysis method / metoda analizy elementarnej, ^{***)} glycol method / metoda glikolowa}															

Stosowano cement CEM I 42,5R Górażdże i piasek frakcji 0-2 mm. W przypadku mieszanek betonowych z popiołami z partii 3 i 4 kruszywo grube stanowił grys amfibolowy frakcji 2-8 mm oraz granodiorytowy frakcji 8-16 mm z kopalni Ogorzelec. W przypadku mieszanek betonowych z popiołami z partii 5 i 6 zastosowano takie samo kruszywo grube (ozn. K1) albo grys wapienny frakcji 2-8 mm oraz 8-16 mm z kopalni Suchowola, (ozn. K2). Zastosowano także superplastyfikator na bazie eterów polikarboksylianowych (SP, zawartość stałej masy około 35%).

The mixes included cement CEM I 42.5R from the cement plant Górażdże and 0-2 mm sand. The mixes made with fly ash from the batches No. 3 and No. 4. included 2-8 mm amphibolite and 8-16 mm granodiorite from Ogorzelec mine as coarse aggregate. The same type of coarse aggregate was used also for mixes made with fly ash from the batches No. 5 and No. 6 (K1) or 2-8 mm and 8-16 limestone aggregate from Suchowola mine (K2). The mix design included also polycarboxylate ether superplasticizer (SP, ca. 35% of solid content).

Table 2. Physical properties of calcareous fly ash
 Tablica 2. Właściwości fizyczne popiołu lotnego wapiennego

Batch no. and type of fly ash Oznaczenie partii i rodzaj popiołu *)		Density Gęstość [g/cm ³]	Fineness - plus 45 μm fraction Miałość - pozostałość na sicie 45 μm [%]	Blaine specific surface Powierzchnia właściwa według Blaine'a [cm ² /g]	Particle size distribution Uziarnienie	
					d(0.5) **) [μm]	d(0.9) ***) [μm]
3	Unprocessed / Nieprzetwarzany	2.64	55.6	1900	n.t.	n.t.
	Ground / Mielony	2.71	20.0	4060	n.t.	n.t.
4	Unprocessed / Nieprzetwarzany	2.60	57.2	1900	74	237
	Ground / Mielony	2.63	16.7	4700	30	80
5	Unprocessed / Nieprzetwarzany	2.60	46.3	2370	63	219
	Ground / Mielony	2.67	20.8	3520	30	89
	Sieved, minus 125 μm fraction Przesiany < 125 μm	n.t.	n.t.	n.t.	41	108
6	Unprocessed / Nieprzetwarzany	2.41	59.2	2190	79	259
	Ground / Mielony	2.50	20.3	4000	27	75
	Sieved, minus 125 μm fraction Przesiany < 125 μm	n.t.	n.t.	n.t.	52	126

Remarks / Uwagi
 *) sequential designation of the batches sampled from the calcareous fly ash tank at the power station site and the method of processing
 oznaczenie kolejnej partii popiołu W pobranej ze zbiornika w elektrowni oraz sposób uzdatniania popiołu
 **) grain size below which there is 50% of fly ash by volume / wielkość ziarna, poniżej której znajduje się 50% objętości popiołu
 ***) grain size below which there is 90% of fly ash by volume / wielkość ziarna, poniżej której znajduje się 90% objętości popiołu
 n.t. – not tested / nie badano

Na podstawie wcześniejszych doświadczeń do projektowania przyjęto współczynnik efektywności popiołów lotnych W stosowanych jako dodatek typu II do mieszanki betonowej: $k = 0,7$ w przypadku popiołów partii 3 i 4 oraz $k = 1,0$ w przypadku popiołów partii 5 i 6. Zaprojektowano mieszanki betonowe o jednakowej konsystencji (opad stożka 120-150 mm) i wskaźniku wodno-spoiwowym w/b przy zastąpieniu 15% lub 30% masy spoiwa popiołem lotnym W. Skład mieszanek betonowych podano w Tablicy 3. Z uwagi na podwyższoną wododożądność popiołu lotnego W wprowadzono korektę zawartości superplastyfikatora niezbędną do uzyskania projektowanej konsystencji.

Z mieszanek wykonanych w mieszarce o pojemności około 100 litrów wykonano próbki sześciennie o boku 150 mm do badań wytrzymałości na ściskanie betonu oraz przepuszczalności wody: próbki o wymiarach 500 × 500 × 100 mm do badań gazoprzepuszczalności oraz walce o wysokości 200 mm i średnicy 100 mm do oznaczenia współczynnika migracji jonów chlorkowych. Próbkki były przechowywane

The following values of efficiency coefficient have been adopted on the basis of the previous tests for the respective batches of calcareous fly ash used as type II admixture added directly to concrete mix: $k = 0.7$ for the batches No. 3 and No. 4 and $k = 1.0$ for the batches No. 5 and No. 6. The mixes were designed to have the same consistency (120-150 mm slump) and the same water-binder (w/b) ratio, and the substitution of 15% or 30% of cement by calcareous fly ash. The mix design is presented in Table 3. The amount of superplasticizer has been adjusted to balance a higher water demand of calcareous fly ash as compared to cement in order to obtain the specified consistency.

The mixes were produced in a ca. 100 litre concrete mixer and the following specimens were produced: 150 mm cubes for testing compressive strength and water permeability, 500 × 500 × 100 mm blocks for testing air permeability and 200 mm high and 100 mm diameter cylinders for determination of chloride migration coefficient. The produced specimens were conditioned in a climatic test

Table 3. Concrete mix design and the 28-day and 90-day compressive strength of concrete (average of three specimens)

Tablica 3. Skład mieszanek betonowych oraz wytrzymałość na ściskanie betonu w wieku 28 i 90 dni (wartości średnie z trzech próbek)

Composition designation Oznaczenie składu		Content / Zawartość [kg/m ³]						Compressive strength Wytrzymałość na ściskanie [MPa]	
		Cement	Fly ash (W) Popiół lotny W	Sand Piasek	Aggregate Kruszywo 2-8 and/i 8-16 mm	Water Woda	SP	after 28 days po 28 dniach	after 90 days po 90 dniach
w/b = 0.50; k = 0.7	0.50	340	0	623	1218	170	0	44.4	53.2
	3N/15/0.50	296	75	621	1215	174	0.62	47.8	62.1
	3N/30/0.50	237	145	598	1169	172	1.21	43.7	54.1
	3M/15/0.50	295	74	618	1208	174	0.62	47.3	58.1
	3M/30/0.50	239	147	603	1178	171	1.22	42.5	57.8
	4N/15/0.50	294	74	616	1203	173	0.74	46.5	54.1
	4N/30/0.50	231	142	582	1138	165	1.89	43.3	54.7
	4M/15/0.50	295	74	618	1208	174	0.87	47.8	63.1
	4M/30/0.50	235	144	593	1158	168	1.92	49.9	58.0
w/b = 0.60; k = 0.7	0.60	308	0	624	1222	186	0	34.4	40.4
	3N/15/0.60	265	67	619	1215	189	0	41.2	46.4
	3N/30/0.60	218	134	613	1201	189	0	28.0	37.8
	3M/15/0.60	265	67	622	1217	189	0.67	40.6	49.4
	3M/30/0.60	219	135	615	1205	190	0.62	42.3	52.7
	4N/15/0.60	264	67	618	1210	186	0.36	34.7	44.4
	4N/30/0.60	212	130	593	1165	184	1.18	29.6	40.2
	4M/15/0.60	268	68	629	1230	190	0	35.6	45.3
	4M/30/0.60	218	134	609	1196	188	0.61	33.8	46.4
w/b = 0.55; k = 1.0	0.55/K1	321	0	618	1295	178	0	48.6	52.7
	5N/30/0.55/K1	224	96	616	1291	177	1.08	42.8	49.5
	5M/30/0.55/K1	227	97	623	1305	179	0.73	43.1	51.3
	5NP/30/0.55/K1	227	97	623	1308	179	0	43.3	48.8
	6N/30/0.55/K1	224	96	614	1288	177	1.08	40.1	44.7
	6M/30/0.55/K1	228	97	624	1310	180	0.85	42.6	49.8
	6NP/30/0.55/K1	226	97	621	1304	178	0.24	41.2	47.6
w/b = 0.55; k = 1.0	0.55/K2	314	0	602	1264	172	0	50.3	57.5
	5N/30/0.55/K2	220	94	604	1268	173	0.88	41.1	50.6
	5M/30/0.55/K2	221	95	607	1274	174	0.59	43.2	51.7
	5NP/30/0.55/K2	221	95	606	1272	174	0	39.9	46.5
	6N/30/0.55/K2	217	93	597	1251	171	0.70	40.6	47.3
	6M/30/0.55/K2	221	95	606	1272	173	0.59	45.5	53.4
	6NP/30/0.55/K2	221	95	605	1270	173	0.35	40.6	51.0

w komorze klimatycznej w normowych warunkach wysokiej wilgotności i stałej temperatury ($20\pm 2^\circ\text{C}$, $\text{RH} > 95\%$). Wyjątkiem była pielęgnacja próbek do badań gazoprzepuszczalności: przez 21 dni w normowych warunkach wysokiej wilgotności i później w suchych warunkach laboratoryjnych ($18\pm 2^\circ\text{C}$, RH około 60%) do chwili badania.

2.2. METODY BADAŃ

Badanie wytrzymałości na ściskanie przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN 12390-3. Badanie przepuszczalności wody przez beton według PN-B-06250 polegało na poddaniu próbek działaniu wody, doprowadzonej pod ciśnieniem końcowym równym 1,2 MPa do dolnej powierzchni próbki. Po zakończeniu badania próbki ważono, aby wyznaczyć masę wsiąkniętej wody i rozłupywano, aby zmierzyć głębokość penetracji wody pod ciśnieniem.

Do badań gazoprzepuszczalności betonu zastosowano aparaturę Torrenta [10]. Badanie polega na wywołaniu przepływu powietrza przez beton poprzez przyłożenie podciśnienia bliskiego próżni (30 do 50 hPa) do powierzchni badanego elementu. Współczynnik przepuszczalności powietrza kT określany jest automatycznie na podstawie zarejestrowanej szybkości wyrównywania ciśnienia. Kryteria oceny wyników podane są w [10, 11]. Oznaczenie współczynnika kT wykonano w pięciu miejscach na płycie, oznaczając również głębokość penetracji strumienia powietrza oraz wilgotność betonu miernikiem CME4 Tramex i sondą Wennera. Badania wykonano w wieku 60 dni [12].

Do określenia przenikalności chlorków w betonie zastosowano przyspieszoną metodę migracji chlorków, opisaną w normie NT Build 492. Współczynnik migracji chlorków określony został przy nieustalonym przepływie strumienia chlorków, wywołanym zewnętrznym polem elektrycznym, po upływie 28 oraz 90 dni dojrzewania. Pełen opis metody i kryteria oceny podano w [8].

3. WYNIKI BADAŃ I DYSKUSJA

3.1 WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCISKANIE

Wyniki oznaczenia wytrzymałości na ściskanie podane zostały w Tablicy 3. W odniesieniu do betonów zaprojektowanych przy $k = 0,7$ stwierdzono, że iloraz 28 dniowej wytrzymałości betonu z dodatkiem do wytrzymałości betonu bez dodatku mieścił się w granicach 0,86 – 1,23 i wynosił średnio 1,04. Można uznać, że przyjęto właściwy współczynnik efektywności popiołu lotnego W . Na ogół

chamber under high humidity and constant temperature ($20\pm 2^\circ\text{C}$, $\text{RH} > 95\%$) according to the standard. A different procedure was used for the specimens prepared for air permeability testing, which were conditioned at a high humidity for 21 days and thereafter stored at dry laboratory conditions ($18\pm 2^\circ\text{C}$, ca. 60% RH) until testing.

2.2. TESTING PROCEDURES

The compressive strength was tested according to PN-EN 12390-3. The water permeability test according to PN-B-06250 was performed applying water to the underside of specimens at the pressure of 1.2 MPa measured at the outlet. The amount of water penetrated into specimens was determined by weighing the specimens and finally splitting them to measure the depth of water penetration.

Air permeability test was carried out using the Torrent apparatus [10]. During the test air was forced across the concrete specimen by application of negative pressure close to vacuum (30 to 50 hPa) to the surface of the tested specimen. The coefficient of air permeability kT was measured automatically on the basis of the recorded rate of pressure rise. The evaluation criteria given in [10, 11] were used. The kT coefficient and the air penetration depth was determined at five points distributed over the test specimen. The moisture content of concrete was determined with CME4 Tramex meter and Wenner probe. The test were carried out after 60 days from casting [12].

Migration of chlorides was determined with the rapid chloride migration test described in NT Build 492. The value of chloride migration coefficient was determined for a non-steady flux of chloride ions under the action of external electrical field after 28 and 90 days of curing the concrete specimens. A detailed description of the test method and evaluation criteria used is presented in [8].

3. TEST RESULTS AND DISCUSSION

3.1. COMPRESSIVE STRENGTH OF CONCRETE

The compressive strength values are given in Table 3. For the concrete mixes designed with $k = 0.7$, the ratio between 28-day compressive strength of test concrete and reference concrete was in the range of 0.86 – 1.23 with the average value of 1.04. These results confirm that the assumed efficiency coefficient of calcareous fly ash was correct. The compressive strength ratio between the test concrete and

iloraz wytrzymałości betonu z dodatkiem w stosunku do betonu bez dodatku przekraczał 1,0 przy zawartości 15% popiołu lotnego W, a przy zawartości 30% był mniejszy. Świadczy to o pewnym zróżnicowaniu efektywności dodatku w zależności od zawartości. W wieku 90 dni powyższy iloraz wynosił średnio 1,09 lub 1,12 (nieco większy przy większym w/b), co świadczy o przedłużonej intensywności działania dodatku, zgodnie z oczekiwaniem.

W odniesieniu do betonów zaprojektowanych przy $k = 1$ stwierdzono, że iloraz 28 dniowej wytrzymałości betonu z dodatkiem w stosunku do betonu bez dodatku wynosił średnio 0,83 (kruszywo wapienne) lub 0,87 (kruszywo granodiorytowe). Na ogół popiół mielony okazywał się nieco bardziej efektywny niż popiół nieprzetworzony lub przesiany, ale trzeba tu (Tabl. 3) zwrócić uwagę na zmniejszenie wodożądności w wyniku przesiania popiołu, skutkujące korzystnym zmniejszeniem zawartości superplastyfikatora w mieszance. W wieku 90 dni powyższy iloraz wynosił odpowiednio 0,87 i 0,92 – zatem nawet w odniesieniu do wytrzymałości 90 dniowej przyjęto zbyt wysoki współczynnik efektywności popiołu lotnego W.

3.2. WSPÓŁCZYNNIK MIGRACJI JONÓW CHLORKOWYCH

Wyniki badań współczynnika migracji chlorków D_{nssm} w betonach z dodatkiem popiołu lotnego wapiennego przedstawiono na Rys. 1 i 2 jako średnie wartości z badania trzech próbek betonu. Za [8] pokazano też granice rozdzielające klasy „bardzo dobrej”, „dobrej”, „dostatecznej” i „niedostatecznej” odporności na wnikanie chlorków. Widoczny jest radykalny wpływ wskaźnika wodno-spoiwowego na współczynnik migracji chlorków. Zauważa się także znaczący pozytywny wpływ dodatku popiołu lotnego W na zmniejszenie współczynnika D_{nssm} , zwiększający się z upływem czasu dojrzewania.

Ze wzrostem zawartości popiołu lotnego wapiennego w mieszance betonowej zmniejszał się współczynnik migracji chlorków. Najbardziej efektywny okazał się dodatek 30% popiołu mielonego każdej partii (za wyjątkiem mieszanki 4M/30/0.50, 28 dni), który spowodował obniżenie D_{nssm} w stosunku do próbek referencyjnych badanych po 28 dniach dojrzewania od 36% (5M/30/0.55/K2) do 75% (3M/30/0.50), natomiast po 90 dniach dojrzewania od 54% (5M/30/0.55/K1) nawet do 89% (4M/30/0.60). Taka redukcja D_{nssm} spowodowała zmianę kategorii odporności na wnikanie chlorków z „dopuszczalnej” na „dobrą” lub z „niedopuszczalnej” na „dopuszczalną”. Jedynie w przypadku mieszanek betonowych z popiołami

the reference concrete was generally higher than 1.0 at 15% substitution rate and it was lower at 30% substitution rate. This indicates some variation in the efficiency of admixture depending on the amount added to the mix. After 90 days of curing the average value of 1.09 or 1.12 was obtained (slightly higher with a higher water-binder ratio) which confirms the expected prolonged effect of the used admixture.

For the mixes designed with $k = 1$ the 28-day compressive strength ratio between the test concrete and the reference concrete assumed the average values of 0.83 (limestone aggregate) and 0.87 (granodiorite aggregate). Generally the fly ash efficiency was slightly higher for ground fly ash as compared to unprocessed or sieved fly ash. However, it must be noted (Table 3) that sieving lowered the water demand what resulted in reduction of the required content of superplasticizer. After 90 days of curing the compressive strength ratio assumed the values of 0.87 and 0.92 respectively which shows that the assumed calcareous fly ash efficiency was too high even in relation to the 90-day compressive strength.

3.2. CHLORIDE MIGRATION COEFFICIENT

The values of chloride migration coefficient D_{nssm} determined on specimens of concrete incorporating calcareous fly ash and calculated as the average of the results obtained on three specimens are presented in Fig. 1 and 2. The lines indicating the limits of very good, good, acceptable and unacceptable chloride resistance are also shown after [8]. As it can be seen the water-to-binder ratio has a dramatic effect on the value of chloride diffusion coefficient. An addition of calcareous fly ash was found to reduce the value D_{nssm} and this desirable effect has yet improved over the curing time.

The chloride diffusion coefficient decreased also with the increase in the amount of fly ash added to the mix. The best results were obtained for all the fly ash batches (except for 4M/30/0.50 mixture after 28 days) when 30% of ground fly ash was added to the mix, which decreased the value of D_{nssm} in relation to the reference concrete specimens by between 36% (5M/30/0.55/K2) and 75% (3M/30/0.50) after 28 days and between 54% (5M/30/0.55/K1) and the maximum value of 89% (4M/30/0.60) after 90 days of curing. As a result, the level of chloride penetration resistance increased from acceptable to good and from unacceptable to acceptable, as appropriate. The only exception to that were the mixes prepared with fly ash from batches No. 3 and No. 4 with water to binder ratio of $w/b = 0.60$ in which

partii 3 i 4 przy $w/b = 0,60$, pomimo zmniejszenia współczynnika D_{nssm} , kategoria odporności na wnikanie chlorków nie zmieniła się i pozostała „niedopuszczalna”. W przypadku popiołu partii VI zaobserwowano korzystny efekt przesiewania przez sito o oczku 0,125 mm: stwierdzono znaczną redukcję D_{nssm} zwłaszcza po 90 dniach dojrzewania. Nie stwierdzono istotnego wpływu rodzaju zastosowanego kruszywa grubego na D_{nssm} po 28 dniach dojrzewania.

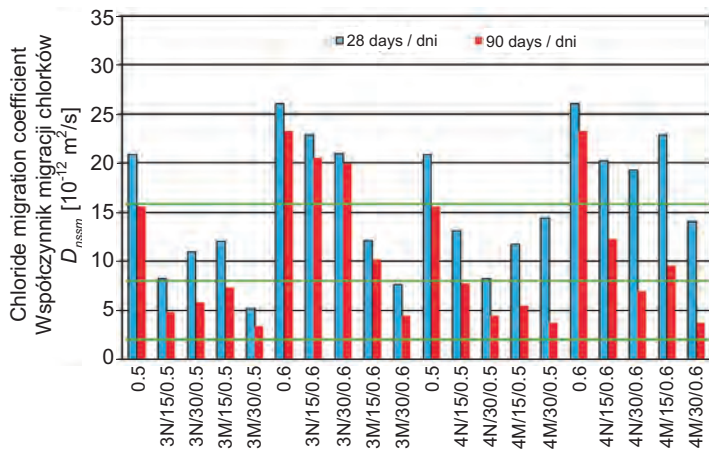


Fig. 1. Chloride migration coefficient of concrete incorporating calcareous fly ash from the batches No. 3 and No. 4 for assumed efficiency of $k = 0.7$ (the horizontal lines are the limits for classification into 4 levels of resistance to chloride migration [8])

Rys. 1. Współczynnik migracji jonów chlorkowych w betonach z popiołem lotnym wapiennym z 3 i 4 partii, zaprojektowanych przy $k = 0,7$ (poziomymi liniami oznaczono granice rozdzielające 4 klasy odporności na migrację chlorków [8])

Nie stwierdzono wyraźnej zależności D_{nssm} od wskaźnika wodno-spoiwowego lub od wytrzymałości betonu na ściskanie (współczynnik dopasowania zależności linowej nie przekraczał 0,3). Zaobserwowany wpływ współczynnika wodno-spoiwowego oraz zawartości popiołu lotnego w odpowiedzi jakościowo rezultatom wcześniejszych badań [8].

Badania wykazały wyraźnie wyższą odporność na migrację chlorków przez beton z dodatkiem popiołu lotnego wapiennego w porównaniu z betonem referencyjnym, a zatem przyjęte współczynniki efektywności w tym przypadku były niedoszacowane. Zestawienie informacji na temat współczynników efektywności popiołów lotnych [13] wskazuje ich znaczące zróżnicowanie w odniesieniu do wytrzymałości betonu i odporności na migrację chlorków. Współczynnik efektywności k w odniesieniu

the decrease of D_{nssm} did not increase the level of chloride penetration resistance. Sieving of fly ash from batch No. 6 through 0.125 mm mesh size sieve was found to improve its performance: it significantly reduced the value of D_{nssm} which was most evident after 90 days of curing. No significant effect of the coarse aggregate type on the value of D_{nssm} was found after 28 days of curing.

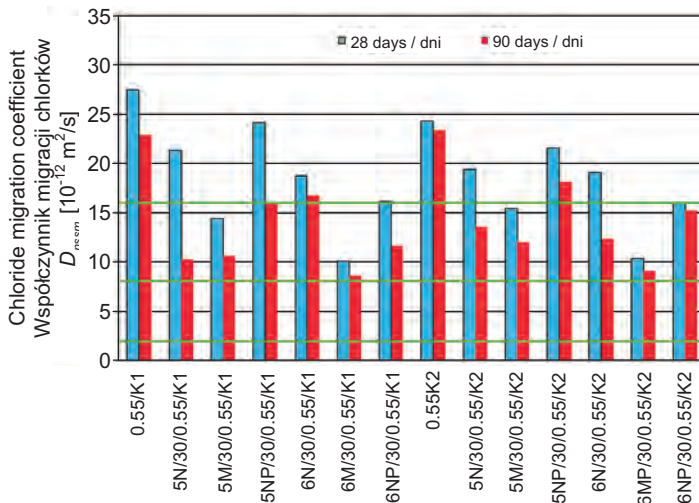


Fig. 2. Chloride migration coefficient of concrete incorporating calcareous fly ash from the batches No. 5 and No. 6 for assumed efficiency of $k = 0.7$ (the horizontal lines are the limits for classification into 4 levels of resistance to chloride migration [8])

Rys. 2. Współczynnik migracji jonów chlorkowych w betonach z popiołem lotnym wapiennym z 5 i 6 partii, zaprojektowanych przy $k = 0,7$ (poziomymi liniami oznaczono granice rozdzielające 4 klasy odporności na migrację chlorków [8])

Similarly, no clear relationship could be found between D_{nssm} and the water to binder ratio or the compressive strength of concrete (the correlation coefficient did not exceed 0.3). The observed influence of the water to binder ratio and the amount of calcareous fly ash is consistent with the earlier findings [8].

According to the obtained results concrete incorporating calcareous fly ash had a much higher resistance to chloride migration, as compared to the reference concrete, which allows concluding that the assumed fly ash efficiency values were too low. The compiled fly ash efficiency data [13] show a significant variation in relation to the concrete strength and to the resistance to chloride migration. The fly ash efficiency coefficient k in relation to the compressive strength was generally much higher than the value given in EN 206-1 and even reached the value

do wytrzymałości jest zazwyczaj znacznie większy niż podany w normie PN-EN 206-1, a współczynnik efektywności w odniesieniu do odporności na agresję chłorową sięga nawet 2. Jak wykazano, jednym współczynnikiem efektywności nie można opisać efektów stosowania popiołów lotnych wapiennych w betonie poddanym różnym oddziaływaniom.

3.3. PRZEPUSZCZALNOŚĆ POWIETRZA

Wyniki badania przepuszczalności powietrza przez beton przedstawiono na Rys. 3 i 4 w formie wartości średnich kT z pięciu oznaczeń. Na podstawie współczynnika kT badane betony można w większości sklasyfikować jako betony dobrej jakości pod względem przepuszczalności powietrza – wartości średnie kT mieściły się w zasadzie w granicach od $0,01 \cdot 10^{-16}$ do $0,1 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ lub były zbliżone do tych wartości granicznych. Wyjątkiem okazały się betony z 30% dodatkiem popiołu 4 partii przy wskaźniku $w/b=0,6$.

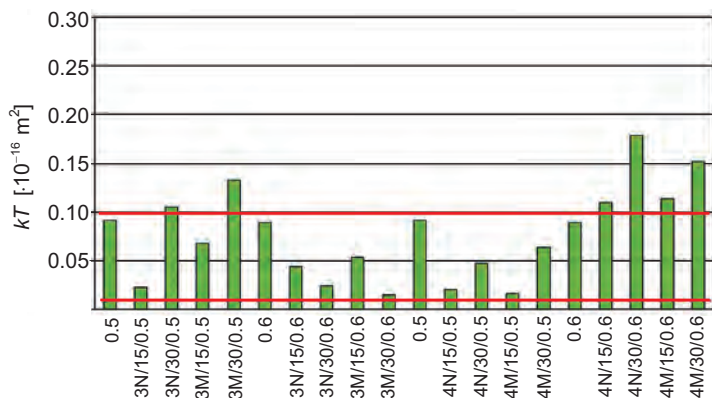


Fig. 3. Coefficient of air permeability kT of concrete incorporating calcareous fly ash from the batches No. 3 and No. 4 for assumed efficiency of $k = 0.7$ (the horizontal lines are the permeability threshold values according to [8])
Rys. 3. Współczynnik przepuszczalności powietrza kT przez beton z popiołem lotnym wapiennym z 3 i 4 partii, zaprojektowany przy $k = 0,7$ (poziomymi liniami pokazano granice klas przepuszczalności według [8])

Z uwagi na dosyć duże rozrzuty wyników, określone współczynnikiem zmienności w granicach od 6% do 47%, nie zaobserwowano konkretnych zależności kT od zmiennych materiałowych. Można zauważyć korzystne tendencje wywołane odsiewaniem frakcji popiołu powyżej $125 \mu\text{m}$, zwłaszcza w przypadku kruszywa amfibolitowego. W betonach zaprojektowanych przy $k = 0,7$ (Rys. 3) zaobserwowano tendencje zmniejszania się współczynnika

of 2 in relation to the resistance to chloride attack. This allows concluding that with only one coefficient it is not possible to describe all the effects the calcareous fly ash has on the concrete exposed to the action of various environmental factors.

3.3. AIR PERMEABILITY OF CONCRETE

The values of air permeability of concrete obtained in the testing are presented in Fig. 3 and 4 as average values of kT obtained in five determinations. On the basis of kT coefficient, the average values of which were generally in the range $0.01 \cdot 10^{-16}$ to $0.1 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ or, in the worst case, did not go much beyond these limits, it can be stated that all of the tested mixtures performed well in terms of air permeability. The exception were the mixes incorporating 30% addition of fly ash taken from the batch No. 4 with water to binder ratio of $w/b = 0.6$.

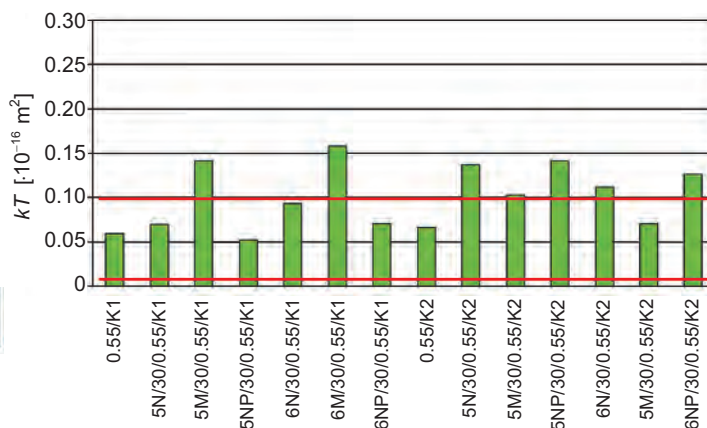


Fig. 4. Coefficient of air permeability kT of concrete incorporating calcareous fly ash from the batches No. 5 and No. 6 for assumed efficiency of $k = 1.0$ (the horizontal lines are the permeability threshold values according to [8])
Rys. 4. Współczynnik przepuszczalności powietrza kT przez beton z popiołem lotnym wapiennym z 5 i 6 partii, zaprojektowany przy $k = 1,0$ (poziomymi liniami pokazano granice klas przepuszczalności według [8])

Due to a quite large dispersion, as demonstrated by the value of the coefficient of variation ranging from 6% to 47%, a clear relationship between kT and the material variables could not be established. A favourable effect of removing particles greater than $125 \mu\text{m}$ by sieving was noted, especially in mixes produced with amfibolite aggregate. The air permeability coefficient values obtained for mixes designed with $k = 0.7$ (Fig. 3) follow a decreasing

przepuszczalności powietrza wskutek zastosowania popiołu lotnego wapiennego. Przy $k = 1,0$ (Rys. 4) zaobserwowano raczej tendencje niewielkiego wzrostu lub stabilizacji kT jako skutek zastosowania dodatku popiołu W. Można zatem uważać, że współczynnik efektywności popiołów w odniesieniu do przepuszczalności powietrza przez beton należałoby przyjąć większy niż 0,7, np. około 0,8. Poszukiwanie korelacji współczynnika kT z wytrzymałością betonu na ściskanie dało rezultat negatywny (współczynnik dopasowania zależności linowej R^2 nie przekraczał 0,27). Przy tak dobranym współczynniku efektywności można oczekiwać zbliżonej przepuszczalności powietrza przez beton z dodatkiem popiołu lotnego W i przez beton referencyjny, pomimo zaobserwowanego dość złożonego wpływu dodatku na kT .

3.4. PRZEPUSZCZALNOŚĆ WODY

Na Rys. 5 i 6 przedstawiono wyniki badania przepuszczalności wody przez beton w formie wartości średnich głębokości penetracji wody L z trzech oznaczeń. Wartości średnie głębokości penetracji L mieściły się w zakresie od 23 do 146 mm. Zatem uzyskane wyniki wodoprzepuszczalności betonu, będącej funkcją głębokości penetracji wody pod ciśnieniem, klasyfikują wszystkie badane betony jako wodoszczelne o stopniu wodoszczelności W12.

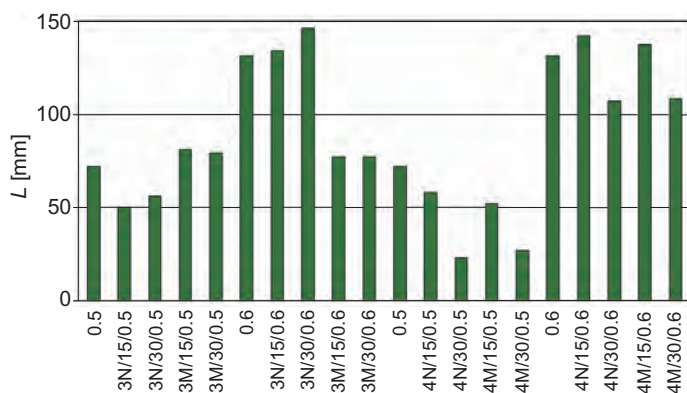


Fig. 5. Depth of water penetration L into concrete incorporating calcareous fly ash from the batches No. 3 and No. 4 for assumed efficiency of $k = 0.7$

Rys. 5. Głębokość penetracji wody L w betonach z popiołem lotnym wapiennym z 3 i 4 partii, zaprojektowanych przy $k = 0,7$

Zaobserwowano wyraźny i spodziewany wpływ wskaźnika wodno-spoiwowego na głębokość penetracji wody pod ciśnieniem. Przy $w/b = 0,6$ beton wzorcowy był na tyle przepuszczalny, że dopiero 30% dodatek popiołu lotnego W

trend for which the addition of calcareous fly ash is responsible. With $k = 1.0$ (Fig. 4) the addition of calcareous fly ash resulted in a slight increase or stabilization in the value of kT . This allows assuming a higher value of the fly ash efficiency coefficient in relation to air permeability, for example ca. 0.8 rather than the original value of 0.7. A correlation between kT and the compressive strength of concrete was not established (the R -squared value did not exceed 0.27). With the efficiency coefficient specified in this way a similar air permeability of concrete with calcareous fly ash and reference concrete may be expected, despite the observed complexity of the effect which the addition has on the value of kT .

3.4. WATER PERMEABILITY OF CONCRETE

The results of testing for water permeability of concrete are presented in Fig. 5 and 6 as the average penetration depth L of three determinations. The average penetration depth L was in the range from 23 mm to 146 mm. With these values of water permeability defined as a function of the depth of penetration by water under pressure all the tested specimens meet the criteria of water permeability class W12.

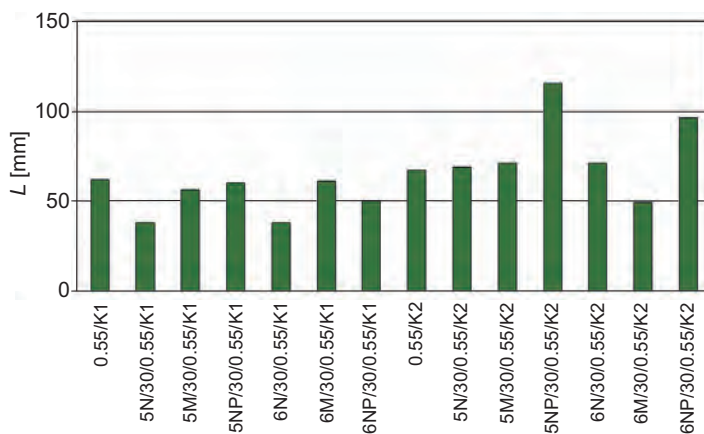


Fig. 6. Depth of water penetration L into concrete incorporating calcareous fly ash from the batches No. 5 and No. 6 for assumed efficiency of $k = 1.0$

Rys. 6. Głębokość penetracji wody L w betonach z popiołem lotnym wapiennym z 5 i 6 partii, zaprojektowanych przy $k = 1,0$

The expected and clear influence of the water to binder ratio on the penetration depth of water under pressure was noted. In reference mixes designed with w/b ratio of 0.6 the permeability was so high that in order to obtain

spowodował znaczną redukcję głębokości penetracji wody. W odniesieniu do betonów zaprojektowanych przy $k = 0,7$ (Rys. 5) stwierdzono, że wzrastającej zawartości popiołu W na ogół odpowiadała zmniejszona przepuszczalność wody. Stwierdzono zbliżoną do liniowej korelację wzrostu L ze zmniejszeniem wytrzymałości na ściskanie (współczynnik dopasowania R^2 wynosił około 0,7). W przypadku betonów zaprojektowanych przy $k = 1,0$ (Rys. 6) głębokość penetracji wody mieściła się w zasadzie w granicach 38 – 71 mm, zatem betony wykazały ekwiwalentną wodoprzepuszczalność. Oznacza to, że współczynnik efektywności dodatku został właściwie dobrany pod tym względem. Wyjątkiem od tego stwierdzenia okazały się betony z kruszywem wapiennym i dodatkiem popiołu przesiewanego, wykazujące nieco wyższą przepuszczalność.

Podobną korelację wzrostu głębokości penetracji wody pod ciśnieniem ze spadkiem wytrzymałości betonu na ściskanie stwierdzono również w badaniach przedstawionych w [14]. W tym przypadku popiół lotny wapienny był stosowany jako jeden ze składników głównych cementów wieloskładnikowych. Korelacja zaobserwowana przy $w/c = 0,55$ była mniej wyraźna przy w/c obniżonym do 0,45.

Trzeba zauważyć, że różnice głębokości penetracji wody stwierdzone zostały przy wysokim ciśnieniu wody, znacznie przekraczającym ciśnienie 0,5 MPa stosowane podczas badań według PN-EN 12390-8. Możliwość rozróżnienia szczelności betonów przy niskim ciśnieniu wody jest znacznie mniejsza. Chociaż znane są różne sposoby interpretacji pomiarów wodoszczelności betonu [15], kryteria oceny inne niż według PN-B-06250 nie zostały ustalone. Porównując masę wsiąkniętej wody w próbki można dodatkowo wyjaśnić zaobserwowane efekty. Przy $w/b = 0,6$ dodatek popiołu nieprzetwarzanego powodował wzrost masy wsiąkniętej wody o 10 g – 60 g, natomiast stosowanie popiołu mielonego powodowało redukcję masy wody sięgającą do 40 g. Przy obniżonym wskaźniku w/b i około dwukrotnym zmniejszeniu masy wsiąkniętej wody efekt mielenia lub przesiewania popiołu był mniej wyraźny, głównie z powodu ograniczonej rozdzielczości metody.

Uzyskane wyniki wskazują, że efektywność popiołu lotnego W jako dodatku do mieszanki betonowej zastępującego część spoiwa nie jest jednakowa w odniesieniu do wytrzymałości na ściskanie i analizowanych miar przepuszczalności. Ekwiwalentną wytrzymałość na ściskanie, przepuszczalność powietrza i wodoprzepuszczalność betonu wzorcowego i betonu z dodatkiem można uzyskać przy

a significant reduction of the penetration depth as much as 30% of calcareous fly ash had to be added. In mixes designed with $k = 0.7$ (Fig. 5) water permeability was found to decrease with the increasing amount of calcareous fly ash. An almost linear relationship was established between the increase of L and the decrease of compressive strength (R -squared value of ca. 0.7). In mixes designed with $k = 1.0$ (Fig. 6) the depth of penetration by water applied under pressure was generally in the range of 38 – 71 mm, i.e. water permeability equivalent to the reference concrete was obtained. It means that in this respect the fly ash efficiency was adopted at a correct level. The exception were the mixes incorporating limestone aggregate and sieved fly ash when a slightly higher water permeability was obtained.

A similar correlation between the increase in water penetration depth and the reduction of the compressive strength of concrete was also found in tests reported in [14]. In this case calcareous fly ash was used as one of the major constituents of blended cements. Such a correlation observed for $w/c = 0.55$ was less clear for the lower water to cement ratio of 0.45.

It must be noted that the penetration depth variation was determined at a very high water pressure applied to the specimens (much above 0.5 MPa), according to the test procedure described in EN 12390-8. Lower pressure would not give such a clear differentiation in terms of water permeability. Although there are various methods of interpretation of water permeability values [15], there is no alternative to the evaluation criteria of PN-B-06250. The observed effects can be additionally explained by comparing the mass of water intruded into the specimens. At $w/b = 0.6$ the mass of intruded water increased by 10 g – 60 g due to addition of unprocessed fly ash and dropped by up to 40 g when ground fly ash was used instead. With a lower value of w/b ratio and halved mass of intruded water the effect of grounding or sieving of the fly ash was less distinct, mainly because of the lower precision of the test method.

According to the obtained results calcareous fly ash has a varying efficiency in substituting a portion of binder in terms of compressive strength and analysed permeability parameters. The equivalent values of compressive strength, air permeability and water permeability between the tested and reference concrete may be obtained with similar efficiency coefficient. A much higher efficiency of calcareous fly ash was noted in relation to the chloride diffusion resistance. The above facts allow concluding

zbliżonym wskaźniku efektywności. Efektywność popiołu lotnego wapiennego w odniesieniu do migracji jonów chlorkowych jest znacznie większa. Zatem koncepcja oceny efektywności popiołu lotnego wapiennego jako dodatku do betonu za pomocą jednego współczynnika efektywności k nie jest skuteczna; należy raczej dążyć do ustalenia kryteriów oceny przepuszczalności w poszczególnych środowiskach agresywnych.

4. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań można sformułować następujące wnioski dotyczące zastosowania popiołu lotnego wapiennego z Elektrowni Bełchatów jako dodatku do betonu, zastępującego 15% lub 30% masy spoiwa:

1. Przy założeniu $k = 0,7$ iloraz wytrzymałości na ściskanie betonu z dodatkiem w stosunku do betonu referencyjnego wynosił średnio 1,04 lub 1,09 – 1,12, odpowiednio w wieku 28 i 90 dni. Przy założeniu $k = 1,0$ analogiczny iloraz wytrzymałości wynosił 0,83 – 0,87 lub 0,87 – 0,92 i był większy w przypadku kruszywa granodiorytowego niż w przypadku kruszywa wapiennego.
2. Ze wzrostem zawartości popiołu lotnego wapiennego w betonie zmniejszał się współczynnik migracji chlorków. Najbardziej efektywny był dodatek 30% popiołu mielonego, który wywołał obniżenie D_{nssm} o 36% – 75% lub 54% – 89%, odpowiednio w wieku 28 i 90 dni. Redukcja D_{nssm} prowadziła do zmiany kategorii odporności na wnikanie chlorków kategorii z „dopuszczalnej” na „dobrą” lub z „niedopuszczalnej” na „dopuszczalną”.
3. Współczynnik przepuszczalności powietrza (według Torrenta) przez beton referencyjny i betony z dodatkami mieścił się w granicach od $0,02 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ do $0,27 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$. Wskutek zastosowania dodatku w betonach zaprojektowanych przy $k = 0,7$ zaobserwowano tendencje zmniejszania się kT , a przy $k = 1,0$ zaobserwowano tendencje niewielkiego wzrostu lub stabilizacji współczynnika przepuszczalności powietrza.
4. W betonach zaprojektowanych przy $k = 0,7$ obecność dodatku powodowała nieznaczne obniżenie lub stabilizację głębokości penetracji wody pod ciśnieniem. Przy $k = 1,0$ betony z dodatkami wykazały przepuszczalność wody zbliżoną do betonu referencyjnego.

that the efficiency coefficient k does not by itself provide a satisfactory measure of the efficiency of calcareous fly ash and therefore specific criteria should be determined for evaluation of permeability depending on the external conditions.

4. CONCLUSIONS

The tests carried out on concrete containing calcareous fly ash from Bełchatów Power Station, added to mixes to substitute 15% or 30% of binder, allow drawing the following conclusions:

1. With the assumed efficiency of $k = 0.7$ the average ratio between the compressive strength of concrete containing calcareous fly ash and the reference concrete was 1.04 after 28 days and ranged from 1.09 to 1.12 after 90 days of curing. With the assumed efficiency of $k = 0.7$ the above ratio ranged from 0.83 to 0.87 or from 0.87 to 0.92 and was higher for coarse aggregates composed of crushed granodiorite and lower for crushed limestone aggregate.
2. The chloride migration coefficient decreased with the content of calcareous fly ash added to concrete. The best results, namely reduction of D_{nssm} by 36% – 75% and 54% – 89% after 28 and 90 days of curing, respectively, were obtained when ground fly ash was used to substitute 30% of binder. With such reduction of D_{nssm} a level of chloride resistance changed from acceptable to good or from unacceptable to acceptable, as appropriate.
3. The coefficient of air permeability (determined using Torrent method) of both fly ash W concretes and reference concretes was in the range from $0.02 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ to $0.27 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$. As a result of using calcareous fly ash addition in the mixes with the assumed efficiency of $k = 0.7$ the value of kT followed a decreasing trend and with $k = 1.0$ it grew only slightly if at all.
4. In mixes for which $k = 0.7$ was assumed the calcareous fly ash addition resulted in a slightly decreasing or even stabilised values of the depth of penetration by water under pressure. With $k = 1.0$ similar values of water permeability were obtained for the test mixes and the reference concrete.

INFORMACJE DODATKOWE

Praca była współfinansowana ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka, nr. projektu POIG .01.01.02-24-005/09.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] Nilsson L.O.: Transport process in the microstructure of concrete and their relevance for durability, in: Microstructural-related Durability of Cementitious Composites, Editors: G. Ye, K. van Breugel, W. Sun and Ch. Miao, RILEM Publications SARL, 2012, 29 - 36
- [2] Brandt A.M.: Cement-Based Composites: Materials, Mechanical Properties and Performance. Taylor&Francis, 2009
- [3] RILEM TC 189-NEC: Non-destructive evaluation of the concrete cover. Comparative test – Part I – Comparative test of ‘penetrability’ methods, Materials and Structures, **38**, 2005, 895 - 906
- [4] Śliwiński J.: Podstawowe właściwości betonu i jego trwałość, Cement Wapno Beton, **76**, 5, 2009, 245- 254
- [5] Scrivener K.: Impact of microstructure on the durability of concrete, in: Microstructural-related Durability of Cementitious Composites, Editors: G. Ye, K. van Breugel, W. Sun and Ch. Miao, RILEM Publications SARL, 2012, 13 - 19
- [6] Giergiczyński Z., Synowiec K., Żak A.: Suitability evaluation of calcareous fly ash as an active mineral additive to concrete. Roads and Bridges - Drogi i Mosty, **12**, 1, 2013, 83 - 97
- [7] Naik T.R., Singh S.S.: Use of high-calcium fly ash in cement-based construction materials. Fifth CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete. Milwaukee, USA, Supplementary Papers, 1995, 144 - 156
- [8] Józwiak-Niedźwiedzka D., Gibas K., Glinicki M.A., Nowowiejski G.: Influence of high calcium fly ash on permeability of concrete in respect to aggressive media. Drogi i Mosty, **10**, 3, 2011, 39 - 61 (in Polish)
- [9] Gibas K., Glinicki M.A.: Influence of calcereous fly ash on concrete resistance to migration of chlorides. International Symposium Brittle Matrix Composites-10, Woodhead Publishing & IPPT PAN, Warsaw, 2012, 367 - 376
- [10] Glinicki M.A., Nowowiejski G., Dąbrowski M., Gibas K.: Wpływ wilgotności betonu i dodatków popiołowych na gazoprzepuszczalność określoną metodą Torrenta. VI Konferencja „Dni Betonu – Tradycja i Nowoczesność”. SPC, Kraków 2010, 711 - 720

ACKNOWLEDGEMENT

This paper 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 ash”.

- [11] Śliwiński J., Tracz T.: Przepuszczalność betonu określana przy przepływie gazu metodą laboratoryjną i połową – porównanie wyników i ich korelacja. VII Konferencja „Dni Betonu – Tradycja i Nowoczesność”, SPC, Kraków, 2012, 949 - 958
- [12] Nowowiejski G.: Wpływ popiołów lotnych wapiennych na współczynnik przepuszczalności gazów i wodoszczelność betonu. VII Konferencja „Dni Betonu – Tradycja i Nowoczesność”, SPC, Kraków, 2012, 597-607
- [13] Bentur A., Mitchell D.: Material performance lessons, Cement and Concrete Research, **38**, 2, 2008, 259 - 272
- [14] Glinicki M.A., Nowowiejski G.: Strength and permeability of concrete with CEM II and “CEM V” cements containing high calcium fly ash. 3rd International Conference on Sustainable Construction Materials and Technology - SCMT 2013, Kyoto, 2013
- [15] Śliwiński J., Tracz T.: Sposób rejestracji i opracowania wyników badań przesiąkliwości betonu wodą. IV Konferencja Naukowo-Techniczna „Zagadnienia materiałowe w inżynierii lądowej”, MATBUD 2003, Politechnika Krakowska, Kraków 2003, 372 - 378

STANDARDS / NORMY

- ASTM C618: 2012 Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete
- NT Build 492:1999 Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments
- PN-B-06250:1988 Beton zwykły
- PN-EN 206-1:2003 Beton Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność
- PN-EN 12390-3:2011 Badania betonu – Część 3: Wytrzymałość na ściskanie
- PN-EN 12390-8:2011 Badania betonu – Część 8: Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem