

Wybrane właściwości betonów z dodatkiem frakcjonowanego popiołu lotnego krzemionkowego i fluidalnego

Selected properties of concretes with an addition of fractionated siliceous and fluidised bed fly ash

1. Wprowadzenie

Problem efektywnego wykorzystania ubocznych produktów spalania węgla w technologii spoiw cementowych oraz w technologii betonu jest od wielu lat przedmiotem prowadzonych w kraju badań. Szczególnie liczne są prace dotyczące różnych odmian popiołów lotnych jako zamiennika części cementu (1-9).

Celem prezentowanych w artykule badań była ocena wpływu, zastąpienia 25% cementu dwoma frakcjonowanymi* popiołami lotnymi, na wybrane właściwości techniczne betonów. W każdym przypadku rozpatrywano beton zwykły i napowietrzony. Analizowanymi właściwościami były: wytrzymałość na ściskanie i na rozciąganie przy rozłupywaniu oraz ich rozwój, nasiąkliwość wodą, wodoszczelność mierzona maksymalną głębokością penetracji wody, mrozoodporność oraz przepuszczalność dla gazu oceniana metodą RILEM-Cembureau (10, 11).

Właściwości betonów z takim spoiwem porównane zostały z właściwościami betonu referencyjnego, wykonanego z cementu portlandzkiego. W wyniku porównania właściwości nienapowietrzanych betonów z cementu z dodatkiem popiołu z właściwościami także nienapowietrzonego betonu referencyjnego dokonano próby określenia cząstkowych wskaźników efektywności dodatku popiołów jako zamiennika spoiwa cementowego.

2. Charakterystyka składników badanych betonów

Podstawowymi składnikami analizowanych betonów były: cement portlandzki CEM I 32,5R, kruszywo komponowane z piasku 0/2 mm oraz żwirów 2/8 mm i 8/16 mm oraz woda wodociągowa. Jako dodatki mineralne stosowano dwa frakcjonowane popioły lotne:

- popiół krzemionkowy Połaniec o uziarnieniu 0/100 μm (oznaczenie P0/100),

* Usunięto frakcje: w przypadku P0/100 większą od 100 μm , w przypadku T > 30 frakcję mniejszą od 30 μm .

1. Introduction

The problem of effective usage by-products of coal firing in the production of cements and concrete has been researched in Poland for many years. Studies of different fly ash as a substitute of cement are particularly numerous (1-9).

The purpose of research presented in this paper was to assess how replacement of 25% of cement with two types of fractionated* fly ash influences selected technical properties of concrete. In each case, ordinary and air-entrained concrete was considered. The following properties were analysed: compressive and tensile splitting strength and their development, water absorption, water tightness measured by the maximum penetration depth, frost resistance and gas permeability assessed using the RILEM-Cembureau method (10, 11).

The properties of concretes from blended binder were compared with those of reference concrete made of Portland cement without mineral addition. By comparing the properties of non-air-entrained concrete from blended binder with the properties of reference concrete, an attempt was made to determine the effectiveness of the addition of fractionated fly ash as a substitute of cement.

2. Components of concretes

The concretes were made of the following basic components: Portland cement CEM I 32.5R, aggregate composed of 0/2 mm sand, 2/8mm and 8/16 mm gravel, and tap water. Two fractionated fly ash were used as mineral additions:

- Połaniec siliceous fly ash with the grain size from 0 to 100 μm (notation: P0/100),
- Turów fluidised-bed fly ash with the grain size exceeding 30 μm (notation: T > 30).

* The following fractions were separated; in the case of P0/100 over 100 μm , in the case of T > 30 under 30 μm .

- popiół lotny fluidalny Turów o uziarnieniu większym od 30 μm (oznaczenie T > 30).

W celu uzyskania odpowiedniej konsystencji mieszanki betonowej oraz jej napowietrzenia stosowano odpowiednie domieszki.

Bardziej szczegółowe charakterystyki stosowanych składników podano w tablicach 1-3.

Tablica 1 / Table 1

WŁAŚCIWOŚCI CEMENTU CEM I 32,5R

PROPERTIES OF CEM I 32.5R

Właściwość fizyczne/Physical property	Jedn. Unit	Wartość Value
Wytrzymałość na zginanie wg PN-EN 196-1 Flexural strength according to PN-EN 196-1		
- po 2 dniach/- after 2 days	N/mm ²	5,0
- po 28 dniach/- after 28 days	N/mm ²	7,2
Wytrzymałość na ściskanie wg PN-EN 196-1 Compressive strength according to PN-EN 196-1		
- po 2 dniach/- after 2 days	N/mm ²	20,8
- po 28 dniach/- after 28 days	N/mm ²	47,6
Czas wiązania wg PN-EN 196-3 Setting time according to PN-EN 196-3		
- początek/- initial	min	200
- koniec/- final	min	296
Powierzchnia właściwa Blaine'a według PN-EN 196-6 Blaine specific surface according to PN-EN 196-6	cm ² /g	3200
Wodożądność według PN-EN 196-3 Water demand according to PN-EN 196-3	% masy	25,5

Tablica 2 / Table 2

SKŁAD TLENKOWY CEMENTU CEM I 32,5R

CHEMICAL COMPOSITION OF CEM I 32.5R

Tlenek / Component	Zawartość % mas. / Content mass %
SiO ₂	21,70
Al ₂ O ₃	5,04
Fe ₂ O ₃	2,23
CaO	63,9
MgO	2,37
SO ₃	3,21

Charakteryzując zastosowane kruszywo należy dodać, że żwir 2/8 i 8/16 mm są kruszywami o skontrolowanej mrozoodporności F₁. Jamistość całego kruszywa, złożonego w 35% z piasku, 34% ze żwiru 2/8 mm i 31% żwiru 8/16 mm, wynosiła 24% objętościowych.

Tablica 3 / Table 3

SKŁAD TLENKOWY STOSOWANYCH DODATKÓW MINERALNYCH, % MAS.

CHEMICAL COMPOSITION OF MINERAL ADDITIONS, % BY MASS

Dodatek Addition	Str. pr. Loss on ign.	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
Popiół/Ash P0/100	5,66	50,99	25,19	6,41	3,29	1,87	0,37	3,05	0,69	0,68	1,19
Popiół/Ash T>30	3,18	34,29	22,30	6,53	20,32	1,45	7,67	1,48	1,03	0,10	1,43

In order to obtain the right consistency of concrete mix and its air entrainment, the appropriate admixtures were used.

The 2/8 and 8/16 gravel has F₁ frost resistance. The voids content of prepared aggregate composed of 35% of sand, 34% of 2/8 mm gravel and 31% of 8/16 mm gravel, amounted to 24% by volume.

In order to achieve the planned consistency of the mix, a plasticizer (calcium lignosulphonates) and a superplasticizer (polycarboxylate ethers) were used. The fresh concrete mix was air-entrained using an air-entraining agent based on synthetic surfactants.

3. The concretes composition

Reference concrete made of Portland cement only and concretes in which 25% by mass of cement was replaced with the fly-ash specified above were tested. In the case of concretes with added fly-ash, two varieties were considered: non-air-entrained and air-entrained.

It was assumed that the total binder quantity (S = 350 kg/m³), water/binder ratio (w/b = 0.45) and the consistency of the concrete mix (S3: slump between 100 and 150 mm) would be the same in all analysed concretes. Concretes of these composition can be used in the majority of exposure classes distin-

guished under PN-EN 206-1:2003: *Concrete. Part 1: Specification, performance, production and conformity*. To a large extent, these assumptions determined the compositions of concrete mixes. This is because with a constant binder content and water/cement ratio, the content of paste and of aggregate was practically constant as well. Slight changes in the proportions of paste and aggregate by volume were caused only by the difference in the density of cement and the fly-ash types which replaced part of it. The condition that the concrete mix must be tight after compacting was used to determine the aggregate content, then a trial batch was made and the necessary content of plasticizers and superplasticizers (and in the case of air-entrained mixes, also of the air entraining agent) was established.

The compositions of analysed concretes are presented in Table 4.

W celu nadania mieszance założonej konsystencji stosowano domieszkę plastyfikującą (lignosulfoniany wapniowe) i upłynniającą (etery karboksylanowe). Do napowietrzenia mieszanek użyto domieszki napowietrzającej na bazie tensydów syntetycznych.

3. Skład betonów

Badaniami objęto beton referencyjny wykonany z samego cementu oraz betony, w których 25% masy cementu zastąpiono wymiennymi wyżej popiołami. W przypadku betonów z dodatkiem popiołu rozpatrywano dwa ich warianty: nienapowietrzony i napowietrzony.

Założono, iż składy wszystkich betonów będą podobne pod względem łącznej ilości spoiwa ($S = 350 \text{ kg/m}^3$), wskaźnika wodno-spoiwowego ($w/s = 0,45$) oraz, konsystencji mieszanki betonowej (S3: opad stożka od 100 do 150 mm). Betony o takim składzie mogą być stosowane w większości przypadków klas ekspozycji rozróżnianych przez PN-EN 206-1:2003 *Beton. Cz. 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność*. Założenia te zdeterminowały w dużej mierze składy mieszanek betonowych. Przy stałej zawartości spoiwa i stałym w/c praktycznie stałą była bowiem zawartość zaczynu i zawartość kruszywa. Niewielkie zmiany objętościowych proporcji zaczynu i kruszywa wywołane były jedynie zróżnicowaniem gęstości cementu i popiołów, którymi zastąpiono jego część. Z wa-

Tablica 4 / Table 4

SKŁADY BETONÓW NIENAPOWIETRZONYCH I NAPOWIETRZONYCH

THE COMPOSITION OF NON-AIR-ENTRAINED AND AIR-ENTRAINED CONCRETES

Beton / Concrete	Jednostka Unit	Referencyjny Reference	T->30	T->30-N*	P-0/100	P-0/100-N*
Składnik / Component						
Cement CEM I 32,5R	kg/m ³	350	263			
Popiół/Fly ash Turów T>30 μm	% mc kg/m ³	-	25 88			-
Popiół / Fly ash Połaniec P0/100 μm	% mc kg/m ³	-	-		25 88	
Woda/Water	dm ³ /m ³		158			
Stosunek w/c (w/s) / w/c (w/b) ratio	-		0,45			
Kruszywo/Aggregate from „Dwudniaki” - piasek / sand 0/2 mm - żwir / gravel 2/8 mm - żwir / gravel 8/16 mm	kg/m ³	666 649 594	663 646 591		654 637 583	
Domieszki / Admixtures: - plastyfikator / plasticizer - superplastyfikator / superplasticizer - napowietrzająca / air entrainer	% ms	0,90 1,10	0,90 2,20 -	0,90 1,80 0,06	0,90 1,80 -	0,90 1,50 0,06
Zawartość/Content of: - zaczynu cementowego / cement paste - zaprawy / mortar	dm ³ /m ³ dm ³ /m ³	270 508	275 511		284 517	
Właściwości mieszanki / Mix characteristics: - opad stożka / cone slump - gęstość objętościowa / bulk density - zawartość powietrza (metoda ciśnieniowa) - air content (pressure method)	mm kg/dm ³ % obj. volume %	110 2,33 2,0	105 2,31 3,1	110 2,09 6,0	105 2,29 3,1	125 2,25 5,1

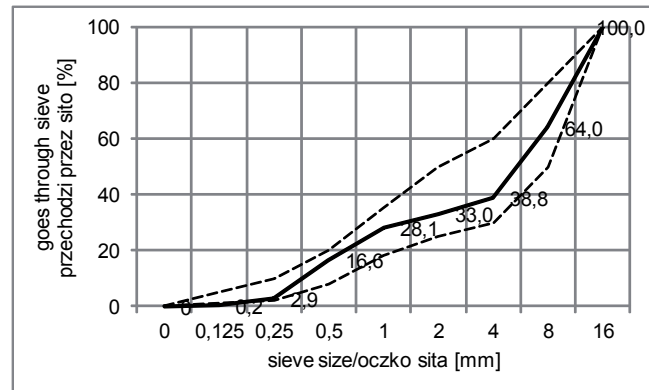
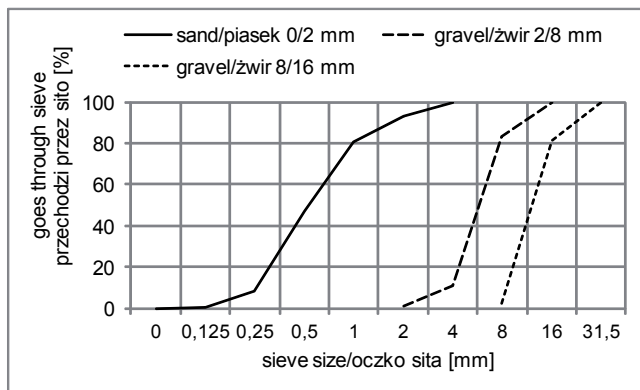
*mieszanki napowietrzane / air-entrained mixes

The binder composed of 75% of Portland cement and 25% of fly ash T > 30 has to high content of SO₃, equal 4.3%. However, the addition of fly ash was maintained because of full comparability of both binders in two concretes series. Non fulfilling the requirement of standard for SO₃ content cannot have unfavourable influence on concrete properties. The twenty years of experience of the Institute of Cement Industry in Poland with concrete produced of rapid hardening Portland cement class 55, which could have 4.5% SO₃ used in very important constructions has shown that it was never any loss of durability.

4. Samples and conditions of their curing

Concrete mixes were produced in a BT 350 semi-industrial mixer the working volume of the drum equal to 350 dm³. The mixer is equipped in the automatic feeder of components. Due to the broad range of tests, the mix batches had the volume of approximately 150 dm³. Thus the conditions of mixes producing were similar to industrial conditions.

Cubic samples 100 or 150 mm in size and 150/300 mm cylindrical samples were produced in plastic moulds. The mix was compacted on a laboratory jointing table. The moulded samples were stored under a layer of foil for the first 24 hours. After the demoulding,



Rys. 1. Uziarnienie kruszyw składowych oraz skomponowanego z nich kruszywa do badanych betonów

Fig. 1. Grain composition of aggregates and the grading curve of composed aggregate

runku szczelności mieszanki betonowej po zagęszczeniu ustalano zawartość kruszywa, a następnie wykonywano zarób próbny i ustalano niezbędną zawartość domieszek plastyfikujących i upłynniających, a w przypadku mieszanek napowietrzanych także domieszki napowietrzającej.

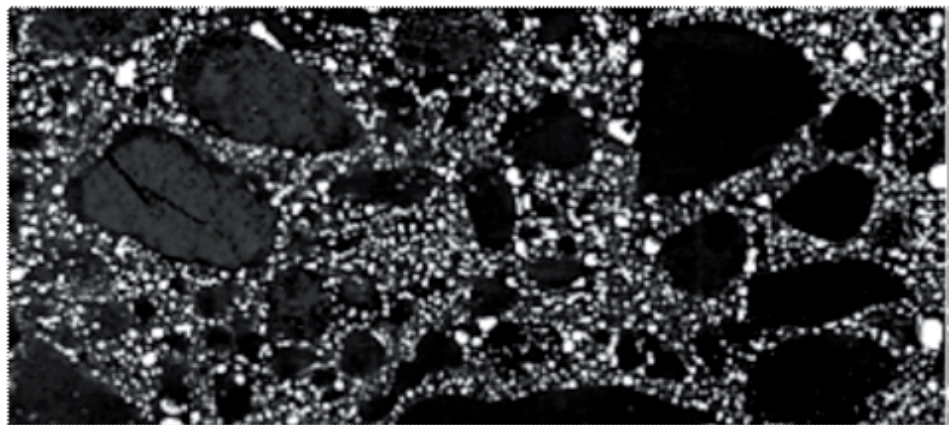
Składy analizowanych betonów podano w tablicy 4.

Spoiwo zawierające 75% cementu i 25% popiołu T > 30 miało za dużą zawartość SO_3 , wynoszącą 4,3%. Utrzymano jednak dodatek popiołu w celu zachowania pełnej porównywalności spoiw w obu seriach betonów. Niezgodna z obecnymi normami zawartość SO_3 nie może wpłynąć niekorzystnie na właściwości betonu co wynika z wieloletnich doświadczeń Instytutu Przemysłu Wiążących Materiałów Budowlanych, ze stosowania cementu szybkotwardniejącego 55, który zawierał 4,5% SO_3 .

4. Próbkki i warunki ich dojrzewania

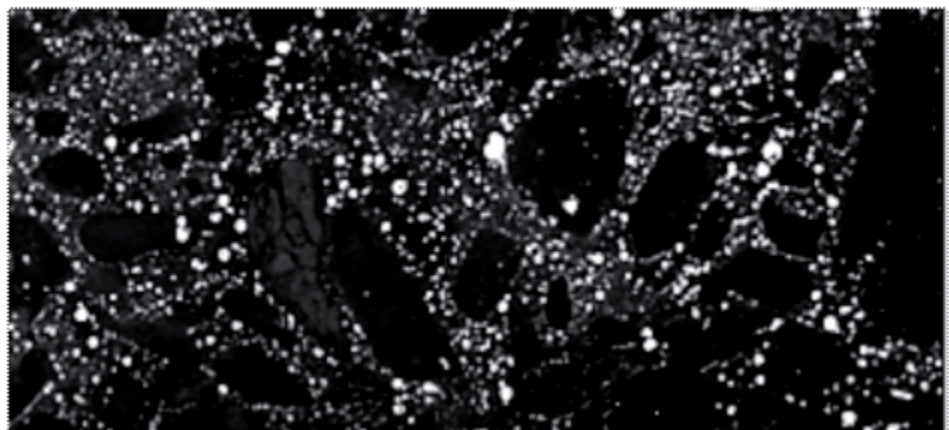
Mieszanki betonowe wykonywano w półprzemysłowej mieszarce typu BT 350, wyposażonej w misę o pojemności roboczej 350 dm³. Mieszarka jest wyposażona w automatyczny dozownik składników. Ze względu na szeroki zakres badań, objętość wykonywanych zarobów wynosiła około 150 dm³. Warunki wykonywania mieszanek były więc zbliżone do warunków przemysłowych.

Próbki sześciennie o boku 100 lub 150 mm oraz próbki walcowe 150/300 mm przygotowano w formach z tworzywa sztuczne-



Rys. 2. Struktura porów napowietrzonego betonu T>30-N ($A = 11,51\%$; $A_{300} = 4,23\%$; $L = 0,085$ mm)

Fig. 2. Structure of pores in air-entrained T>30-N concrete ($A = 11.51\%$; $A_{300} = 4.23\%$; $L = 0.085$ mm)



Rys. 3. Struktura porów napowietrzonego betonu P0/100-N ($A = 8,71\%$; $A_{300} = 2,74\%$; $L = 0,146$ mm)

Fig. 3. Structure of pores in air-entrained P0/100-N concrete ($A = 8.71\%$; $A_{300} = 2.74\%$; $L = 0.146$ mm)

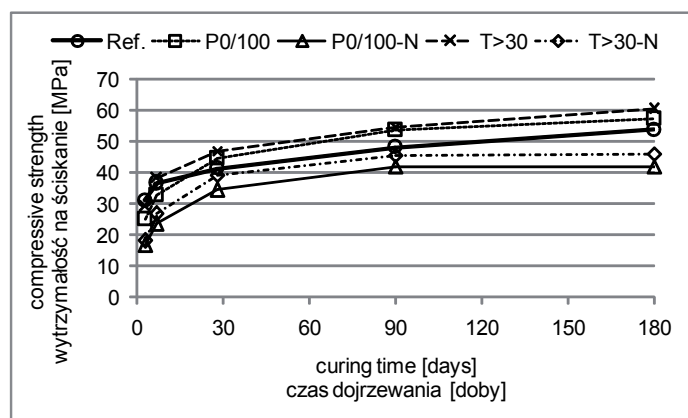
they were kept for another 27 days in tight containers over water (relative air humidity > 90%, temperature $20 \pm 5^\circ C$). Subsequently, the samples were cured in laboratory conditions until testing.

go. Mieszanki zagęszczano na laboratoryjnym stole wibracyjnym. Przez pierwsze 24 h próbki przechowywano pod folią. Po ich zformowaniu przechowywano je przez kolejne 27 dni w szczelnych pojemnikach nad wodą (wilgotność względna powietrza > 90%, temperatura $20 \pm 5^\circ\text{C}$). Do chwili badania, próbki dojrzewały w tych warunkach laboratoryjnych.

5. Wyniki badań właściwości betonów i ich analiza

5.1. Charakterystyka struktury porów w betonach napowietrzonych

Na rysunkach 2 i 3 pokazano strukturę porów napowietrzonych betonów, w których obok cementu składnikami spoiwa były frakcjonowany krzemionkowy popiół lotny Połaniec (P0/100) oraz popiół lotny fluidalny Turów ($T > 30$). Badania przeprowadzono za pomocą urządzenia Rapid Air 457 do automatycznej analizy pustek w betonie stwardniałym. Badania prowadzono zgodnie z normą PN-EN 480-11:2008 *Domieszki do betonu, zaprawy i zaczynu. Metody badań. Oznaczenie charakterystyki porów powietrznych w stwardniałym betonie*.



Rys. 4. Rozwój wytrzymałości na ściskanie nienapowietrzonego betonu referencyjnego (Ref.) oraz nienapowietrzonych i napowietrzonych (N) betonów z dodatkiem popiołów P0/100 i T>30

Fig. 4. Development of the compressive strength of non-air-entrained reference concrete (Ref.) as well as non-air-entrained and air-entrained (N) concretes with fly-ash added: P0/100 and T>30

Pod względem zawartości porów o rozmiarach < $300 \mu\text{m}$ (A_{300}) oraz wskaźnika rozmieszczenia porów (L), napowietrzenie spełnia najczęściej stawiane wymagania betonom mrozoodpornym przez normy krajów europejskich (12). Natomiast zbyt duża była całkowita zawartość porów (A). W przypadku obydwu betonów jest ona znacznie większa od zawartości powietrza w mieszance betonowej (patrz tablica 4).

5.2. Wytrzymałość na ściskanie i na rozciąganie przy rozłupywaniu

Rozwój wytrzymałości na ściskanie betonu referencyjnego oraz betonów nienapowietrzanych i napowietrzanych z dodatkiem po-

5. Results of the properties testing concrete and their analysis

5.1. The air voids structure in air-entrained concretes

Figures 2 and 3 show the pores structure in air-entrained concretes in which the binder was composed of fractionated Połaniec siliceous fly ash (P0/100) and Turów fluidized-bed fly ash ($T > 30$). In the tests the Rapid Air 457 device for the automatic analysis of voids in hardened concrete was used. The tests were in accordance with the standard PN-EN 480-11:2008 *Admixtures For Concrete, Mortar And Grout. Test methods. Determination of Air Void Characteristics in Hardened Concrete*.

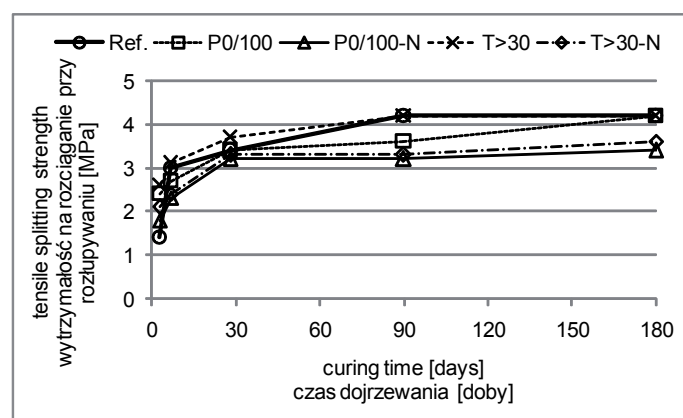
The content of pores with the size < $300 \mu\text{m}$ (A_{300}) and the pore distribution factor (L), air entrainment concrete meets the most common requirements for frost-resistant concrete stipulated by standards of European countries (12). However, the total pore content (A) was too high. For both concretes, it is much higher than the content of air in the concrete mix (see Table 4).

5.2. Compressive and tensile strength in splitting

The development of the compressive strength of reference concrete as well as non-air-entrained and air-entrained concretes produced with an addition of both fly-ash types is presented in Fig. 4. Similarly, Fig. 5 shows the development of the tensile splitting strength of these concretes. The tests were carried out on 150 mm cube samples in accordance with the standards PN-EN 12390-3:2011 *Testing hardened concrete. Part 3: Compressive strength of test specimens* and PN-EN 12390-6:2011 *Testing hardened concrete. Part 6: Tensile splitting strength of test specimens*.

The development of the compressive strength and the tensile splitting strength is typical and similar for all concrete types.

As far as the compressive strength of non-air-entrained concretes with addition of both fractionated fly-ash it is several percent higher



Rys. 5. Rozwój wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu nienapowietrzonego betonu referencyjnego (Ref.) oraz nienapowietrzonych i napowietrzonych (N) betonów z dodatkiem popiołów P0/100 i T>30

Fig. 5. Development of the tensile splitting strength of non-air-entrained reference concrete (Ref.) as well as non-air-entrained and air-entrained (N) concretes with fly-ash added: P0/100 and T>30

piołów, pokazano na rysunku 4. Analogicznie, na rysunku 5 przedstawiono rozwój wytrzymałości tych betonów na rozciąganie przy rozłupywaniu. Badania prowadzono na próbkach sześciennych o boku 150 mm zgodnie z normami PN-EN 12390-3:2011 *Badania betonu. Cz.3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań* i PN-EN 12390-6:2011 *Badania betonu. Cz. 6: Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu próbek do badań*.

Wzrost wytrzymałości na ściskanie i wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu jest typowy i podobny, praktycznie bez względu na rodzaj betonu.

W przypadku wytrzymałości na ściskanie betony nienapowietrzane zawierające dodatek popiołów frakcjonowanych wykazują wytrzymałość o kilka do kilkunastu procent wyższą od betonu referencyjnego. Po 28 dniach dojrzewania betony nienapowietrzane, w tym referencyjny, wykazały wytrzymałość na poziomie około 45 MPa, zaś betony napowietrzane na poziomie około 35 do 40 MPa.

Napowietrzenie powoduje oczekiwane zmniejszenie wytrzymałości. Wielkość tego obniżenia w przypadku wytrzymałości 28 dniowej i późniejszych wynosi około 20%.

Generalnie w podobny sposób kształtuje się wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu oraz jej wzrost. W tym przypadku najwyższe wartości wytrzymałości osiągnęły nienapowietrzany beton referencyjny i beton z dodatkiem popiołu fluidalnego T > 30.

Wskaźnik kruchości badanych betonów napowietrzonych i nienapowietrzonych, określony stosunkiem wytrzymałości na rozciąganie do wytrzymałości na ściskanie, jest typowy dla betonów zwykłych i wynosi średnio około 8%.

5.3. Nasiąkliwość wodą

Nasiąkliwość wodą określano po 28 i 90 dniach dojrzewania w sposób zgodny z PN-88/B-06250 *Beton zwykły*. Stosowano próbki sześciennie o boku 150 mm. Wyniki pokazano na rysunku 6.

Nasiąkliwość wszystkich badanych betonów mieści się w granicach od 4,7 do 5,7% mas. Dodatek popiołów, a także napowietrzenie, z technicznego punktu widzenia nie mają istotniejszego wpływu na tę cechę, której wartość uznać można za normalną, dla zwykłych betonów cementowych.

5.4. Przepuszczalność wody

Wyniki pomiaru przepuszczalności dla wody, wykonanych zgodnie z normą PN-EN 12390-8:2011 *Badania betonu. Cz.8: Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem*, pokazano na rysunku 7. Badaniom poddano próbki sześciennie o boku 150 mm po 90 dniach dojrzewania.

W świetle wyników badań, wpływ dodatku popiołu w spoiwie, podobnie jak napowietrzenie betonu, jest niewielki. Niemniej wyraźnie widać, iż obecność popiołu fluidalnego T > 30 w spoiwie najkorzystniej wpływa na ograniczenie dostępności wody do betonu. Oznaczone głębokości penetracji wody wykazują w krańco-

than of the reference concrete. After 28 days of curing, non-air-entrained concretes, including the reference concrete, had the strength of around 45 MPa, while for air-entrained concretes, it is in the range from 35 to 40 MPa.

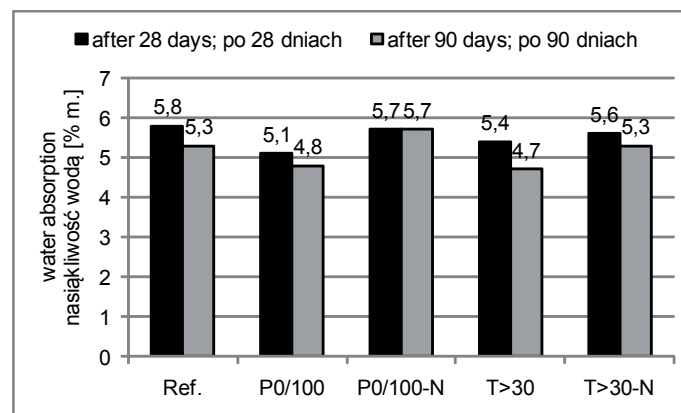
Air-entrainment understandably reduces strength. This reduction amounts to about 20% in the case of the strength after 28 and after longer period.

The tensile splitting strength and its development is generally similar. In this case, the highest strength has the non-air-entrained reference concrete and the concrete with T > 30 fluidized-bed fly ash addition.

The brittleness index of the air-entrained and non-air-entrained concretes, defined as the ratio of tensile to compressive strength, is typical for ordinary concrete and in average approximate to 8%.

5.3. Water absorption

Water absorption was determined after 28 and 90 days of curing in accordance with PN-88/B-06250 *Ordinary concrete*. 150 mm cube samples were used. Results are presented in Fig. 6.



Rys. 6. Nasiąkliwość nienapowietrzonego betonu referencyjnego (Ref.) oraz nienapowietrzonych i napowietrzonych (N) betonów z dodatkiem popiołów P0/100 i T > 30

Fig. 6. Water absorption of non-air-entrained reference concrete (Ref.) as well as non-air-entrained and air-entrained (N) concretes with fly-ash added: P0/100 and T > 30

The water absorption of all tested concretes is in the range from 4.7 to 5.7% by mass. From the technical point of view, the addition of both types of fly-ash in the binder and the air-entraining have no significant impact on this property, which can be considered as normal, for ordinary cement concretes.

5.4. Water permeability

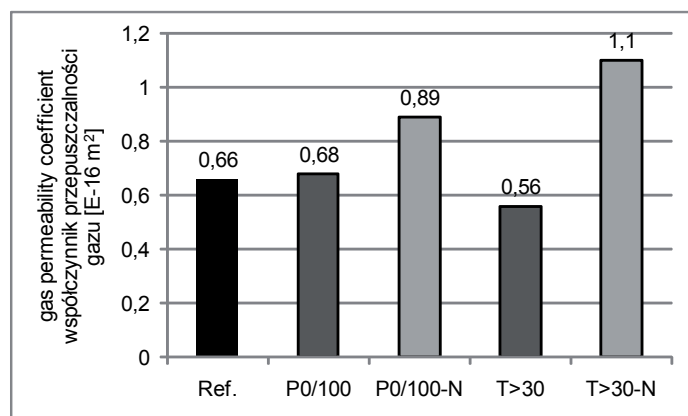
The water permeability results measured in accordance with the standard PN-EN 12390-8:2011 *Testing hardened concrete. Part 8: Depth of penetration of water under pressure*, are shown in Fig. 7. For the tests the 150 mm cube samples after 90 days of curing were used.

wych przypadkach różnice wynoszące 11 mm, przy czym w każdym przypadku są one dużo mniejsze od 50 mm, czyli od wartości stanowiącej granicę konieczną do zaliczenia betonu w wyrobach budowlanych jako wodoszczelnego.

5.5. Mrozoodporność

Badania mrozoodporności prowadzono metodą tradycyjną (tzw. mrozoodporność wewnętrzna) w sposób podany w normie PN-88/B-06250 *Beton zwykły*. Badania próbek sześciennych o boku 100 mm obejmowały 150 cykli zamrażania i rozmrażania w automatycznej komorze zamrażalniczej. Wiek betonu w chwili badania wynosił 28 dni. Wyniki badań zawarto w tablicy 5.

Generalnie wszystkie betony nienapowietrzone nie spełniły wymagań stawianych betonom klasy mrozoodporności F150. Bliskim spełnienia tych wymagań był tylko beton ze spoiwa zawierającego popiół fluidalny T > 30. Natomiast napowietrzenie zapewniło uzyskanie przez obydwa betony z dodatkiem frakcjonowanych popiołów mrozoodporności stopnia F150.



Rys. 8. Przepuszczalność nienapowietrzonego betonu referencyjnego (Ref.) oraz nienapowietrzonych i napowietrzonych (N) betonów z dodatkiem popiołów P0/100 i T > 30

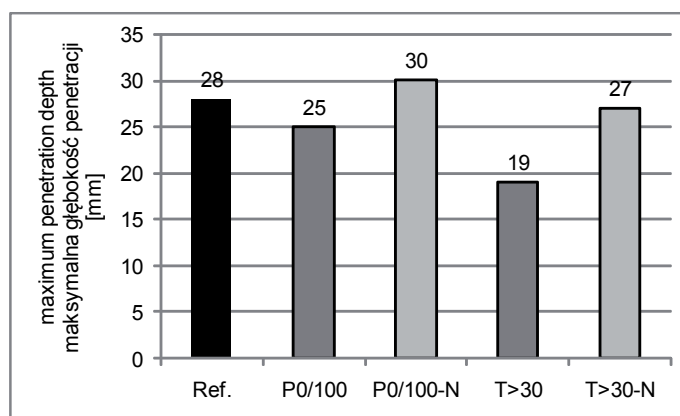
Fig 8. Permeability of non-air-entrained reference concrete (Ref.) as well as non-air-entrained and air-entrained (N) concretes with added fly ash types: P0/100 and T > 30

Tablica 5 / Table 5

WYNIKI BADANIA MROZODPORNOŚCI WEWNĘTRZNEJ (150 CYKLI)

RESULTS OF INTERNAL FROST RESISTANCE TESTING (150 CYCLES)

Beton / Concrete	Strata masy Mass loss, %	Strata wytrzymałości na ściskanie, Compressive strength loss, %
Referencyjny (nienapowietrzony) Reference (non-air-entrained)	15	63
P0/100 (nienapowietrzony) (non-air-entrained)	defragmentacja po 100 cyklach disintegrated after 100 cycles	
P0/100-N (napowietrzony) (air-entrained)	0,2	9
T>30 (nienapowietrzony) (non-air-entrained)	7,0	23
T>30-N (napowietrzony) (air-entrained)	0,3	3



Rys. 7. Maksymalna głębokość penetracji wody w nienapowietrzonym betonie referencyjnym (Ref.) oraz nienapowietrzonych i napowietrzonych (N) betonach z dodatkiem popiołów P0/100 i T > 30

Fig. 7. Maximum depth of water penetration into non-air-entrained reference concrete (Ref.) as well as non-air-entrained and air-entrained (N) concretes with fly-ash added: P0/100 and T > 30

Test results indicate that the effect of fly-ash in the binder, as well as of air-entrainment of the concrete, is low. It is, however, clearly visible that the addition of the T > 30 fluidized-bed fly ash to the binder has the most beneficial impact on restricting the access of water to concrete. In extreme cases, the measured water penetration depths differ by 11 mm, but in every case they are much lower than 50 mm, which is of crucial importance for concrete in constructions which can be considered as watertight.

5.5. Frost resistance

Frost resistance was tested using the traditional method (so-called internal frost resistance) according to the standard PN-88/B-06250 *Ordinary concrete*. The tests on 100 mm cube samples consisted of 150 freeze-thaw cycles in an automatic freezing box. The concrete samples were tested after 28 days. Test results are presented in Table 5.

In general, non-air-entrained concretes do not meet the requirements for concrete of the F150 frost resistance degree. Only the results of concrete made with a binder containing the T > 30 fluid-

Tablica 6 / Table 6

ZESTAWIENIE ŚREDNICH WŁAŚCIWOŚCI NIENAPOWIETRZONYCH BETONÓW Z DODATKIEM POPIOŁÓW I BETONU REFERENCYJNEGO ORAZ OBLICZONE WSPÓŁCZYNNIKI EFEKTYWNOŚCI POPIOŁÓW JAKO CZĘŚCIOWEGO ZAMIENNIKA CEMENTU CEM I 32,5R

AVERAGE PROPERTIES OF NON-AIR-ENTRAINED CONCRETES WITH FLY-ASH ADDITION AND OF THE REFERENCE CONCRETE, AND CALCULATED EFFECTIVENESS COEFFICIENT FOR FLY-ASH TYPES AS PARTIAL REPLACEMENT OF CEM I 32.5R

Właściwość / Property	Beton/Concrete			$k_{P0/100}$	$k_{T>30}$
	Ref.	P0/100	T>30		
Wytrzymałość na ściskanie / Compressive strength, MPa:					
- po 7 dniach / after 7 days	36,6	32,7	38,0	0,89	1,04
- po 28 dniach / after 28 days	41,3	44,5	47,0	1,08	1,14
- po 90 dniach / after 90 days	48,1	53,7	54,6	1,12	1,13
- po 180 dniach / after 180 days	53,6	57,4	60,2	1,07	1,12
Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu, MPa:					
Tensile splitting strength, MPa:					
- po 7 dniach / after 7 days	3,0	2,7	3,1	0,90	1,03
- po 28 dniach / after 28 days	3,4	3,4	3,7	1,00	1,09
- po 90 dniach / after 90 days	4,2	3,6	4,2	0,85	1,00
- po 180 dniach / after 180 days	4,2	4,2	4,2	1,00	1,00
Nasiąkliwość, % mas. / Absorption, mass %:					
- po 28 dniach / after 28 days	5,8	5,1	5,4	0,88	0,93
- po 90 dniach / after 90 days	5,3	4,8	4,7	0,90	0,89
Maksymalna głębokość penetracji wody, Maximum water penetration depth, mm	28	25	19	0,89	0,68
Przepuszczalność dla gazu, Gas permeability, E-16 m ²	0,66	0,68	0,56	1,03	0,85

5.6. Przepuszczalność gazu

Przepuszczalność gazu przez betony określano na próbkach o średnicy 150 mm i wysokości 50 mm wycinanych z wcześniej przygotowanych walców 150/300 mm. Badanie prowadzono metodą RILEM-Cembureau (10) przy zastosowaniu zgodnego z jej wymaganiami urządzenia. Badaniom podlegały próbki w wieku 90 dni. Zgodnie z zaleceniami RILEM (11) przed badaniem próbki suszono do stałej masy w temperaturze 105°C. Wyniki badań pokazano na rysunku 8.

Betony nienapowietrzone mają bardzo podobną przepuszczalność określaną przy skrośnym przepływie azotu. Współczynnik przepuszczalności zawiera się w granicach od 0,56 do 0,68 · 10⁻¹⁶ m². W przypadku obydwu betonów z dodatkiem popiołów ich napowietrzenie powoduje wzrost przepuszczalności, który w ekstremalnym przypadku betonu z dodatkiem popiołu T > 30 jest dwukrotny. Zakładając za Torrentem i Frenzerem (13), że współczynnik przepuszczalności azotu określany laboratoryjną metodą RILEM-Cembureau jest równy współczynnikowi przepuszczalności powietrza mierzonemu połową metodą Torrenta i stosując zaproponowaną przez wymienionych autorów klasyfikację jakości betonu w otulinie na podstawie przepuszczalności, wszystkie badane betony, w tym napowietrzone, można uznać za betony przeciętnej jakości.

ized-bed fly ash were close to this requirement. Air entrainment, characterised earlier, meant that two concretes with added fractionated fly-ash achieved full frost resistance of the F150 degree.

5.6. Gas permeability

The gas permeability of concretes was determined using samples 150 mm in diameter and 50 mm high cut from previously prepared 150/300 mm cylinders. The test procedure was according to the RILEM-Cembureau method (10) and using an apparatus compliant with this requirements. The samples were tested after 90 days of curing. In accordance with the guidelines (11), prior to testing, the samples were dried at the temperature of 105°C to obtain constant mass. Test results are presented in Fig. 8.

The non-air-entrained concretes revealed very similar permeability determined with nitrogen. The permeability coefficient ranges from 0.56 to 0.68 · 10⁻¹⁶ m². In the case of both concretes with fly-ash added, air entraining causes the increase of their permeability and the highest is for concrete with the T>30 fly-ash addition. If we assume, after Torrent and Frenzer (13), that the nitrogen permeability coefficient determined using the RILEM-Cembureau method is equal to the air permeability coefficient measured by the Torrent field method, and if we use the above authors' classification of the quality of air-entrained concrete based on its permeability, all tested concretes, can be considered as of medium quality.

6. Próba oceny współczynnika efektywności dodatku popiołów

W celu oceny efektywności badanych frakcjonowanych popiołów lotnych jako zamiennika 25% masy cementu portlandzkiego CEM I 32,5R dokonano porównania poszczególnych właściwości betonów nienapowietrzonych wykonanych z udziałem popiołów z właściwościami betonu referencyjnego z cementu CEM I 32,5R. Porównanie to oparto na obliczonych współczynnikach efektywności $k_{P_{0/100}}$ i $k_{T>30}$ będących ilorazami poszczególnych właściwości betonu z dodatkiem popiołu do wartości tej właściwości w przypadku betonu referencyjnego (14). Zbiór tych współczynników, może stanowić podstawę do ustalenia współczynnika globalnego, jak to pokazano w normie PN-EN 206-1:2003 *Beton. Cz.1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność*, w przypadku popiołu krzemionkowego i pyłu krzemionkowego. Zestawienie współczynników podano w tablicy 6.

Z zamieszczonego zestawienia wynika, że w przypadku wytrzymałości na ściskanie i na rozciąganie przy rozłupywaniu, współczynniki efektywności popiołów oscylują wokół jedności. Oznacza to, że w przypadku zastąpienia popiołami 25% masy cementu CEM I 32,5 obydwa popioły są pełnowartościowymi zamiennikami cementu.

W przypadku nasiąkliwości, wodoszczelności i przepuszczalności gazu wyniki są w dużej mierze podobne, z tym, że dodatek popiołów powoduje uzyskanie przez beton korzystniejszych wartości w porównaniu z betonem referencyjnym.

7. Podsumowanie

Przedstawione wyniki badań dotyczyły betonów o stałym składzie przede wszystkim w zakresie zawartości spoiwa i wskaźnika wodno-spoiwowego. Uzyskane klasy betonu spełniają wymagania stawiane betonom eksploatowanym w większości normowych klas ekspozycji. Wyjątek stanowią tylko klasy XA, XD4, XS2 i XS3. Badane betony uznać więc można jako reprezentacyjne dla szerokiej grupy zwykłych betonów, średnich wytrzymałości.

W odniesieniu do zakresu przeprowadzonych badań zasadnym jest podstawowe stwierdzenie, że frakcjonowane popioły lotne: krzemionkowy popiół Połaniec o uziarnieniu 0/100 μm oraz popiół lotny fluidalny Turów o uziarnieniu powyżej 30 μm , są pełnowartościowymi zamiennikami części cementu portlandzkiego CEM I 32,5R. Wszystkie badane właściwości betonów ze spoiwem, w którym 25% masy cementu portlandzkiego zastąpiono tymi popiołami, są bowiem albo takie same, albo korzystniejsze od właściwości betonu wykonanego z czystego cementu portlandzkiego.

Prezentowane badania zostały wykonane w ramach projektu badawczego IniTech nr ZPB/61/65832/IT2/10 finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

6. An attempt to assess the effectiveness of fly-ash addition

In order to assess the effectiveness of the fractionated fly-ash types replacing 25% by mass of the CEM I 32.5R Portland cement, individual properties of non-air-entrained concretes with fly ash addition were compared to the properties of the reference concrete of CEM I 32.5R. This comparison is based on calculated coefficient of effectiveness $k_{P_{0/100}}$ and $k_{T>30}$ which are the ratios of a given property of concrete with fly ash addition to this property for the reference concrete (14). The set of these coefficient can be used to determine the global ratio, as is done under standard PN-EN 206-1:2003 *Concrete. Part 1: Specification, performance, production and conformity*, for siliceous fly ash and silica fume. The results are presented in Table 6.

The Table 6 shows that in the case of the compressive strength and the tensile splitting strength, effectiveness coefficients of fly ash types are close to 1. This is the proof that replacement of 25% by mass of the CEM I 32.5 both fly ash are valuable substitutes of cement.

The situation is generally similar in the case of water absorption, water tightness and gas permeability, but for both types of fly ash these properties are better than for the reference concrete.

7. Summary

The presented test results concerned the concretes of constant composition primarily of binder content, water/binder ratio and the concrete strength class, met the requirements for concretes used in the majority of exposure classes, specified in standards. The only exceptions are the classes XA, XD4, XS2 and XS3. The analysed concretes can therefore be considered to belong to the broad group of average strength ordinary concretes.

The scope of tests completed justifies a basic statement that fractionated fly ash types: Połaniec siliceous fly ash with the grain size under 100 μm and Turów fluidized-bed fly ash with grain sizes over 30 μm are fully valuable substitutes for a part of CEM I 32.5R Portland cement. All tested properties of concretes containing a binder in which 25% by mass of Portland cement was replaced with both fly ash types are either the same or, even better than the properties of concrete made of Portland cement.

The presented research was carried out as part of the IniTech research project nr ZPB/61/65832/IT2/10 financed by the National Centre for Research and Development.

Literatura / References

1. Z. Giergiczny, Rola popiołów lotnych wapniowych i krzemionkowych w kształtowaniu właściwości współczesnych spoiw budowlanych i tworzyw cementowych, Monografia 325, Politechnika Krakowska, Kraków 2006.
2. Z. Giergiczny, J. Małolepszy, J. Szwabowski, J. Śliwiński, Cementy z dodatkami mineralnymi w technologii betonów nowej generacji, Góraźdże Cement, wyd. Instytut Śląski, Opole 2002.
3. Praca zbiorowa pod red. A. M. Brandta: Zastosowanie popiołów z kotłów fluidalnych w betonach konstrukcyjnych, Studia z zakresu inżynierii nr. 72, PAN, KILiW, IPPT, nr 72 (2010).
4. K. Łaskawiec, P. Gębarowski, G. Zapotoczna-Sytek, J. Małolepszy, Zastosowanie popiołów ze spalania węgla kamiennego w kotłach fluidalnych do produkcji betonów komórkowych (Appling of ashes from fluidized bed combustion boilers for the production of autoclaved aerated concrete), Cement Wapno Beton, 1, 14-22 (2012).
5. W. Jackiewicz-Rek, P. Woyciechowski, Ocena podatności na karbonatyzację napowietrzonych betonów z dużą zawartością popiołu, Cement Wapno Beton, 5, 249-256 (2011).
6. E. Giergiczny, Z. Giergiczny, Wpływ zmiennej jakości popiołów lotnych na właściwości kompozytów cementowo-popiołowych, Cement Wapno Beton, 3, 157-163 (2010).
7. H. Yaprak, Wykorzystanie odpadów przemysłowych w produkcji przyjaznego dla środowiska betonu, Cement Wapno Beton, 4, 210-216 (2010).
8. Z. Giergiczny, T. Pużak, Popiół lotny jako składnik betonu z cementów żużlowych, Cement Wapno Beton, 2, 67-74 (2009).
9. M. A. Glinicki, M. Zieliński, Rozmieszczenie porów powietrznych w betonie z dodatkiem fluidalnego popiołu lotnego, Cement Wapno Beton, 3, 133-138 (2007).
10. J. J. Kollek, The determination of permeability to oxygen by the Cembureau method – A recommendations, Materials & Structures, 22, 230-238 (1989).
11. RILEM Technical Recommendation: Tests for gas permeability of concrete, TC 116-PCD: Permeability of concrete as criterion of its durability, Materials and Structures, Vol. 32, April, 174-179 (1999).
12. M. A. Glinicki, Europejskie wymagania na beton napowietrzony w klasie środowiska XF, Drogownictwo, 3, 86-88 (2005).
13. R. J. Torrent, G. Frenzer, A method for the rapid determination of the coefficient of permeability of the "covercrete", Int. Symp. Non-Destructive Testing in Civil Engineering, 985-992, Berlin 1995.
14. M. A. Glinicki, G. Nowowiejski, K. Gibas, Ocena szczelności betonu z dodatkiem popiołu lotnego wapiennego wobec mediów środowiskowych, Roads and Bridges – Drogi i Mosty, 12 1 (2013).