

Rozmieszczenie porów powietrznych w betonie z dodatkiem fluidalnego popiołu lotnego

Air voids spacing in concrete with addition of fly ash from fluidized bed coal combustion

1. Wprowadzenie

Wprowadzanie nowych technik spalania węgla w energetyce umożliwia zmniejszenie szkodliwych emisji do atmosfery. W ciągu ostatnich 10 lat znacznie zwiększyło się zastosowanie technologii fluidalnego spalania węgla (1). Ta nowoczesna technologia spalania pozwala na zmniejszenie emisji siarki oraz tlenków azotu poprzez stosowanie sorbentów siarki bezpośrednio w kotle i utrzymywanie niższej temperatury w strefie spalania. Produktem ubocznym spalania węgla w kotłach fluidalnych są odpady stałe o właściwościach znacznie różniących się od właściwości fizykochemicznych popiołów lotnych powstających w paleniskach pyłowych. Popioły lotne z kotłów fluidalnych stanowią mieszaninę z produktami z odsiarczania i pozostałościami sorbentów, co sprawia, że często mają dużą zawartość różnych wapniowych związków siarki, CaO oraz wysokie straty prażenia (2). Jak wiadomo (2, 3), popioły lotne o większej zawartości niespalonego węgla, występującego w formie koksiku o dużej powierzchni właściwej, przyczyniają się do adsorpcji domieszek napowietrzających, co w konsekwencji może ujemnie wpłynąć na mikrostrukturę betonu. Według Kūlaotsa et al. (4) adsorpcja środka napowietrzającego związana z obecnością popiołów lotnych, zależy nie tylko od ilości niespalonych cząstek węgla w popiele, ale również od jego powierzchni właściwej i innych czynników, jak na przykład rodzaju spalane go węgla oraz techniki jego spalania. Stwierdzono (5), że największa adsorpcja środków napowietrzających ma miejsce na powierzchni drobnych cząstek węgla mniejszych od 100 μm, a równocześnie popioły lotne klasy C wykazują większą adsorpcję w porównaniu do popiołów lotnych klasy F (klasyfikacja wg normy ASTM C-618-03).

Jednym z perspektywicznych kierunków racjonalnego zagospodarowania odpadów ze spalania fluidalnego może być ich wykorzystanie w przemyśle materiałów budowlanych (6). Chociaż popioły lotne z kotłów fluidalnych stosowane były do betonu napowietrzonego i odpornego na agresję mrozu (7), to systematyczne badania mikrostruktury porów w takim betonie nie były prowadzone. Celem podjętych badań była analiza wpływu popiołów lotnych

1. Introduction

Introduction of new coal combustion technique in power industry makes possible the reduction of harmful emission to the atmosphere. During the last ten years the application of fluidized bed coal combustion was significantly increased (1). This modern combustion technology permits the reduction of sulphur and NO_x emission by application of sulphur sorbents directly in the boiler and maintaining lower combustion temperature. By-product of boilers with fluidized bed coal combustion are the ashes which properties differs significantly from the fly ash from classic boilers. Fly ashes from boilers with fluidized bed coal combustion contains desulphurization products and sorbents residue, which makes that they have high content of different calcium sulphur compounds, free lime and higher loss of ignition (2). It is known (2, 3) that fly ashes of higher coal content, present as coke of high specific surface, adsorb air-entraining admixtures, which in consequence can have a negative influence on concrete microstructure. According to the authors (4) adsorption of air-entraining admixture caused by fly ash is depending not only of unburned coal content, but also of its specific surface and other factors, as for example the kind of coal and combustion technology. It was establish (5) that the highest adsorption of air-entraining admixture occurs on the surface of small coal particles, smaller than 100 μm, and simultaneously fly ash of class C has greater adsorption ability in relation to the fly ash of class F (ash classes according to ASTM C-618-03).

One of the perspective trends of efficient utilization of byproducts of fluidized bed combustion can be their application in the building materials industry (6). Though the fly ash from boilers with fluidized bed was utilized in air-entrained and frost resistance concrete (7), a systematic investigations pores microstructure of such concrete were not made. The influence of fly ash from boilers with fluidized bed coal combustion on the possibility of air-entraining of concrete mix and formation of air pores system in concrete, proper for frost resistance concrete (8).

pochodzących z kotłów fluidalnych w dwóch elektrociepłowniach na możliwość napowietrzania mieszanki betonowej i utworzenia systemu porów powietrznych w betonie, właściwego do uzyskania mrozoodporności betonu (8).

2. Materiały do badań i próbki

Do wykonania próbek zastosowano następujące materiały: cement portlandzki CEM I 32,5R, grys bazaltowy frakcji 2-8 oraz 8-16 mm, piasek naturalny 0-2 mm, wodę wodociągową, domieszki chemiczne: superplastyfikator polikarboksyłanowy FM 787 oraz domieszka napowietrzająca LP-70 na bazie żywic naturalnych. Jako dodatek do betonu zastosowano popioły lotne ze spalania węgla kamiennego w dwóch kotłach fluidalnych ze złożem cyrkulacyjnym, pracujących w EC Żerań i EC Katowice. Podobnie jak we wcześniejszej pracy (7) popioły lotne z kotłów fluidalnych poddano aktywacji mechanicznej poprzez ich zmielenie. Właściwości fizyczne popiołów lotnych z kotłów fluidalnych, ich skład chemiczny, Tablica 1 / Table 1

WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNE POPIOŁÓW LOTNYCH Z KOTŁÓW FLUIDALNYCH
PHYSICAL PROPERTIES OF FLY ASHES FROM FLUIDIZED BED COAL COMBUSTION

Właściwości Properties	Oznaczenie popiołu lotnego z kotłów fluidalnych Fly ash		
	FLW	FLK	
Miałkość, % masy/Fineness, mass %	16,6	15,2	
Gęstość/Density, kg/m ³	2500	2570	
Stołość objętości/Volume stability, mm	0,0	0,5	
Wskaźnik aktywności puczolanej/ Pozzolanic activity, %	28 dni	116	129
	90 dni	102	113

a także skład cementu przedstawiono w Tablicach 1 i 2. Popiół FLW pochodzi z EC Żerań, a FLK z EC Katowice.

Zaprojektowano 7 serii mieszanek betonowych przy stałym współczynniku wodno-spoiwowym w/s=0,42, o jednakowej konsystencji oraz o zmiennej zawartości domieszki upłynniającej i domieszki napowietrzającej. Mieszanki betonowe różniły się zawartością i pochodzeniem fluidalnych popiołów lotnych, które dodawano jako zamiennik części masy cementu. Proporcje składników mieszanki podano w Tablicy 3. Projektowana zawartość powietrza w mieszance wynosiła 6±1%.

Mieszanekę betonową wykonano w mieszarce laboratoryjnej o pojemności 20 litrów, ułożono w formach sześciennych 100x100x100 mm i zagęszczono na stole wibracyjnym. Tak wykonane próbki przechowywano przez 24 godziny pod przykryciem z folii, a następnie rozformowano i pielęgnowano przez 28 dni w temperaturze 18-20°C w warunkach wysokiej wilgotności (na ruszcie nad wodą).

2. Materials

Concrete samples were made from Portland cement CEM I 32.5 R, basalt grit, fractions 2-8 and 8-16 mm, sand 0-2 mm, tap water and the following admixtures: polycarboxylate superplasticizer FM 787 and air-entraining agent LP-70. As a concrete addition two fly ash from fluidized bed coal combustion in Żerań and Katowice power plants were used. These fly ashes were ground as in previous work (7). The physical properties of fly ashes were presented in Table 1 and their chemical composition as well as cement composition was depicted in Table 2.

Seven concrete mixes were designed with constant w/s ratio 0.42 and equal consistency, but changeable addition of superplasticizer and air-entraining admixture. Concrete mixes had different content of fly ash of different origin, but all from fluidized bed coal combustion. These fly ashes replaced part of cement. Mixes composition is presented in Table 3. The designed air content of mixes was 6±1%.

Concrete mixes were prepared in laboratory mixer of 20 liters cubic capacity, then moulded in cubic moulds 100 x 100 x 100 mm and compacted on jolting table. The samples were cured 24 hours under foil cover, then demoulded and stored 28 days at 18-20°C in humid atmosphere (on the grate above water).

3. Methods

The air content in concrete mix was determined according to PN-EN 12350-7:

Tablica 2 / Table 2

SKŁAD CHEMICZNY POPIOŁÓW LOTNYCH Z KOTŁÓW FLUIDALNYCH ORAZ CEMENTU
CHEMICAL COMPOSITION OF FLY ASHES AND CEMENT

Składnik, właściwość Compound, property	Zawartość, % masy/Content, mass %		
	FLW	FLK	CEM
SiO ₂	34,36	47,46	20,38
Al ₂ O ₃	20,82	23,39	5,40
CaO	12,22	7,48	63,04
SO ₃	6,58	3,56	2,50
Cl	0,12	0,08	0,02
CaO wolny/free	1,79	0,35	0,84
MgO	4,02	3,10	1,74
Fe ₂ O ₃	6,29	7,53	2,82
Na ₂ O _{ek} */Na ₂ O _{eq}	2,57	2,65	0,68
Strata prażenia/Loss of ignition	11,77	3,30	1,66
Zawartość węgla/Coal content *)	3,90	-	-

*) oznaczenie metodą analizy termicznej/determined with thermal analysis

3. Metody badań

Określenie zawartości powietrza w mieszance betonowej wykonano zgodnie z normą PN-EN 12350-7:2001. Badania rozmieszczenia porów powietrznych w betonie przeprowadzone zostały przy wykorzystaniu stanowiska do komputerowej analizy obrazu złądów betonowych (rysunek 1). Przygotowanie złądów betonowych przebiegało zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 480-11:2000. Z próbek sześciennych o boku 100 mm wycięto próbki o wymiarach 100x100x20 mm. Po wyszlifowaniu powierzchnia próbki poddana była kontrastowaniu w celu wyodrębnienia porów na badanej powierzchni, tak aby mogły być rozpoznane przez automatyczny system analizy obrazu. Stanowisko do analizy zostało zbudowane z mikroskopu stereoskopowego Nikon SMZ800, kamery Sony DXC950P, stolika skaningowego Marzhauser SCAN 150x150 oraz oprogramowania Image Pro Plus 4.5 z dodatkowym modulem Scope Pro. W pracy (9) podano dokładny opis stosowanej metody pomiarowej.



Rys.1. Widok stanowiska do automatycznej analizy rozmieszczenia porów w betonie

Fig. 1. Test stand for automatic analysis of pores spacing in concrete

4. Wyniki badań i analiza

Podstawowe właściwości mieszanki betonowej oraz wyniki badania rozmieszczenia porów powietrznych w betonie przedstawiono w tablicy 4. Zgodnie z PN-EN 480-11 rozmieszczenie porów, określane metodami stereologicznymi, opisane zostało przez podanie następujących parametrów:

- całkowita zawartość powietrza (A),

2001. The pores spacing in concrete was examined on the test stand for computer image analysis of concrete polished section (Figure 1). Polished sections were prepared according to PN-EN 480-11: 2000. From cubic samples the specimens were cut of dimension 20 x 100 x 100 mm. After polishing of specimens surface it was subjected to contrasting in order to differentiate pores on examined surface to make them recognizable by automatic system of image analysis. The test stand is composed of stereoscope microscope Nikon SMZ800, camera Sony DXC950P, scanning table Marzhauser SCAN 150 x 150 and software Image Pro Plus 4.5 with additional modulus Scope Pro. In previous work (9) the accurate description of measuring method was described.

4. Test results and discussion

Basic properties of concrete mix and results of pores spacing examination in concrete are depicted in table 4. According to PN-EN 480-11 pores spacing, determined with stereoscopic method, was described using the following parameters:

- total air content (A),
- specific surface of air voids (α),
- index of air voids spacing (L).

During experimental establishing of admixtures content indispensable to obtain designed properties of concrete mix it was found that the increasing addition of fly ash from fluidized bed coal combustion, apart of slump loss, causes also significant decrease of air content in the mix. It caused the necessity to increase the addition of air-entraining admixture indispensable to reach of designed air content. On Figure 2 the relationship of indispensable air-entraining admixture content with increasing fly ash addition is shown. The numbers placed close to stakes of the diagram give the obtained air content in concrete mix. The applied higher addition of air-entraining admixture was proportional to the increased content of fly ash from fluidized bed coal combustion. It was found that the obtaining of designed air content in the mix in the range 5-7% prepared with 40% addition of fly ash needs about eight-fold higher increase of air-entraining agent in relation

Tablica 3 / Table 3

PROPORCJE SKŁADU MIESZANEK BETONOWYCH
CONCRETE MIXES COMPOSITION

Oznaczenie serii Series	Cement	Popiół Fly ash	Piasek Sand	Bazalt Basalt 2-8	Bazalt Basalt 8-16	Woda Water	FM 787	LP-70
CEM I	360	0	680	690	720	150	1800	360
FLW20	288	72	680	690	720	150	2160	1440
FLW30	252	108	680	690	720	150	2880	2160
FLW40	216	144	680	690	720	150	3600	2880
FLK20	288	72	680	690	720	150	2160	1440
FLK30	252	108	680	690	720	150	2880	2160
FLK40	216	144	680	690	720	150	3600	2880

Tablica 4 / Table 4

KONSYSTENCJA I ZAWARTOŚĆ POWIETRZA W MIESZANCE BETONOWEJ ORAZ PARAMETRY MIKROSTRUKTURY PORÓW POWIETRZNYCH W BETONIE
MIX CONSISTENCY, ITS AIR CONTENT AND AIR VOIDS MICROSTRUCTURE IN HARDENED CONCRETE

Seria	Opad stożka	Zaw. powietrza	Parametry mikrostruktury porów powietrznych w betonie		
	S mm	V %	\bar{L} mm	α l/mm	A %
CEM I	30	7,6	0,13	33,2	6,25
FLK20	30	7,0	0,13	32,5	6,25
FLK30	40	7,5	0,14	27,1	7,08
FLK40	40	7,2	0,18	24,1	6,03
FLW20	30	7,0	0,13	32,3	6,67
FLW30	20	6,6	0,17	27,6	5,33
FLW40	40	6,8	0,23	20,8	5,26

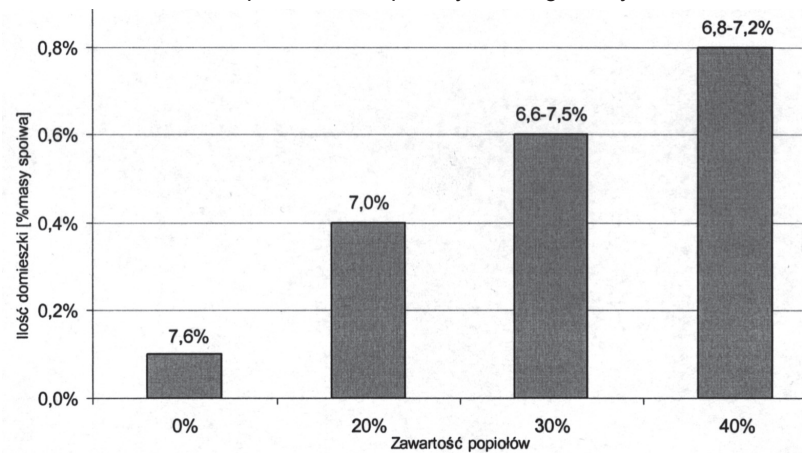
- powierzchnia właściwa porów powietrznych (α),
- wskaźnik rozmieszczenia porów powietrznych (\bar{L}).

W trakcie doświadczalnego ustalania ilości domieszek niezbędnych do uzyskania projektowanych właściwości mieszanki betonowej stwierdzono, że zwiększanie zawartości popiołów lotnych z kotłów fluidalnych, oprócz obniżenia opadu stożka, powodowało również znaczny spadek ilości powietrza w mieszance. Spowodowało to konieczność zwiększenia dodatku domieszki napowietrzającej, niezbędnej do osiągnięcia projektowanej zawartości powietrza. Na rysunku 2 pokazano niezbędny dodatek domieszki w funkcji zawartości popiołu w betonie. Liczby zamieszczone obok słupków wykresu podają uzyskaną zawartość powietrza w mieszance betonowej. Zwiększenie zastosowanej ilości domieszki napowietrzającej był proporcjonalny do wzrostu zawartości popiołów lotnych z kotłów fluidalnych. Okazało się, że uzyskanie projektowanej zawartości powietrza w mieszance w zakresie 5-7%, wykonanej z 40% dodatkiem popiołów fluidalnych, wymaga około ośmiokrotnego zwiększenia ilość domieszki napowietrzającej w stosunku do mieszanki wykonanej z samego cementu portlandzkiego. W przypadku serii FLW, zawierającej popioły lotne z kotłów fluidalnych EC Żerań, zawartość powietrza, pomimo dodania tej samej ilości domieszki napowietrzającej była nieco niższa w porównaniu do zawartości powietrza w mieszance serii FLK.

Analiza wpływu dodatków popiołowych na mikrostrukturę porów powietrznych w betonie opierała się na wskaźniku rozmieszczenia porów oraz ich powierzchni właściwej. Na rysunku 3 przedstawiono zależność wskaźnika rozmieszczenia porów \bar{L} w betonie od zawartości popiołów lotnych z kotłów fluidalnych.

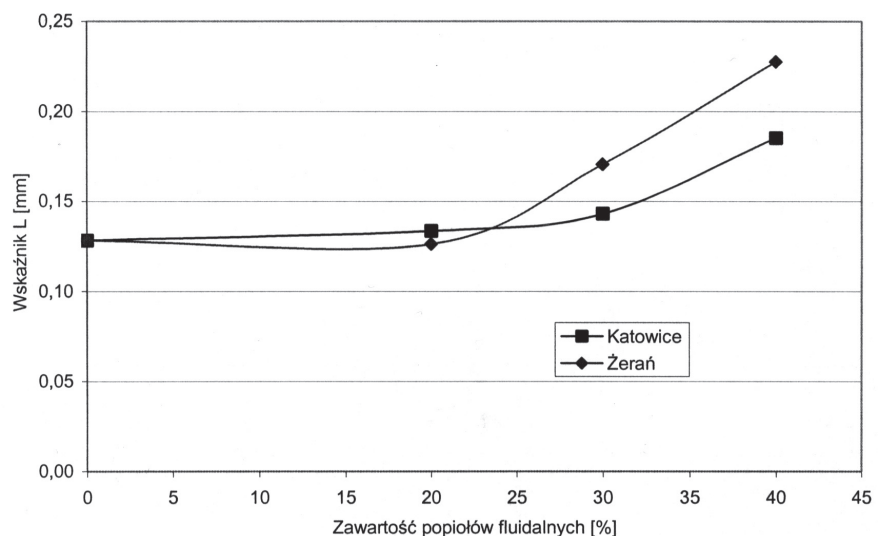
to the mix made of Portland cement alone. In case of series of FLW containing fly ash from Żerań power plant the air content despite of the same air-entraining agent addition was somewhat lower in comparison with air content of the FLK series mixes.

Analysis of the influence of fly ash addition on air voids microstructure in concrete was based on the voids spacing index and their specific surface. On the Figure 3 the dependence of air voids spacing index L in concrete of fly ash content from fluidized bed coal combustion is presented. L index defines the mean distance of whichever point in cement paste from the margin of the nearest air void in hardened concrete. As it was found the increase above 20% leads to systematic increase of voids spacing index i.e. to the higher mean distance between air bubbles formed. Though the air content in hardened concrete was in the range 5-7% the formed microstructure of air voids differed in dependence of quantity and origin of fly ash added. The



Rys. 2. Niezbędny dodatek domieszki napowietrzającej w funkcji procentowej zawartości fluidalnych popiołów lotnych FLK i FLW w betonie (tablica 3)

Fig. 2. Indispensable air-entraining agent addition in function of fly ash from fluidized bed coal combustion in concrete



Rys. 3. Wskaźnik rozmieszczenia porów powietrznych \bar{L} w funkcji zawartości popiołów lotnych z kotłów fluidalnych.

Fig. 3. The spacing factor of air voids system versus the content of fly ash from fluidized bed coal combustion

nych z kotłów fluidalnych. Wskaźnik \bar{L} określa średnią odległość dowolnego punktu w zaczynie cementowym od krawędzi najbliższego poru powietrznego w stwardniałym betonie. Jak stwierdzono, zwiększanie zawartości dodatków popiołowych w betonie powyżej 20% prowadzi do systematycznego wzrostu wskaźnika rozmieszczenia porów powietrznych, to znaczy do zwiększenia średniej odległości pomiędzy powstałymi pęcherzykami powietrza. Choć zawartość powietrza w stwardniałym betonie mieściła się w zakresie 5-7%, powstała mikrostruktura porów powietrznych różniła się w zależności od ilości i pochodzenia zastosowanego popiołu. Dodatek popiołów FLW (EC Żerań) spowodował wyższy wzrost wskaźnika rozmieszczenia porów powietrznych w stosunku do betonów wykonanych z taką samą ilością popiołów FLK (EC Katowice).

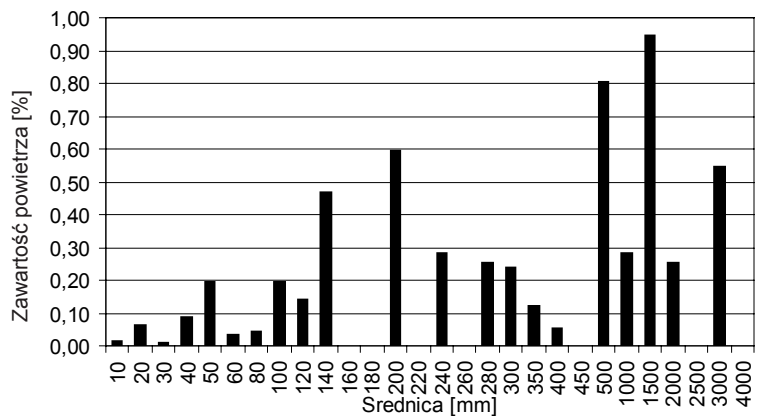
Na podstawie danych w tabelicy 4 można też przeanalizować zależność pomiędzy zawartością popiołu a powierzchnią właściwą porów powietrznych w betonie. Powierzchnia właściwa porów jest ściśle powiązana z wielkością oraz liczbą porów w stwardniałym zaczynie cementowym.

Zatem zaobserwowany spadek powierzchni właściwej porów ze wzrostem zawartości popiołu (powyżej 20%) oznacza, że zwiększanie ich ilości powoduje powstawanie porów o większych średnicach. Biorąc pod uwagę ogólnie przyjęty model zniszczenia betonu na skutek działania mrozu, obserwacja dotycząca rozmiarów powstałych porów powietrznych wydaje się bardzo ważna, gdyż powiązana jest bezpośrednio ze spadkiem ilości drobnych porów powietrznych, które odpowiednio rozmieszczone zapewniają właściwą ochronę betonu.

Oprócz analizy wskaźnika rozmieszczenia porów i ich powierzchni właściwej przeprowadzono analizę rozkładu wielkości porów na podstawie zmierzonych wielkości cięciw. Uproszczenia i sposób określania rozkładu wielkości porów przyjęto zgodnie z normą PN-EN 480-11. Uzyskany rozkład wielkości porów przedstawiono na rysunkach 4-6, jako zawartość porów w określonych przedziałach wielkości (tak zwanych klasach), to jest 0-10 μm , 10-20 μm , 20-30 μm , ... 3000-4000 μm . Wykresy pokazują tendencje zmian rozkładu wielkości porów w betonie o różnej zawartości fluidalnych popiołów lotnych; w przypadku dużej zawartości popiołu zauważa się wzrost udziału większych porów. To spostrzeżenie jest spójne z ustaleniami dotyczącym powierzchni właściwej porów.

5. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań można formułować następujące wnioski. Do uzyskania projektowanej zawartości powietrza w mieszance betonowej niezbędne jest zwiększenie ilości domieszki napowietrzającej, proporcjonalnie do wzrostu zawartości popiołów lotnych z kotłów fluidalnych. W przypadku 20% zawartości popiołu rozmieszczenie porów powietrznych, ocenione na podstawie

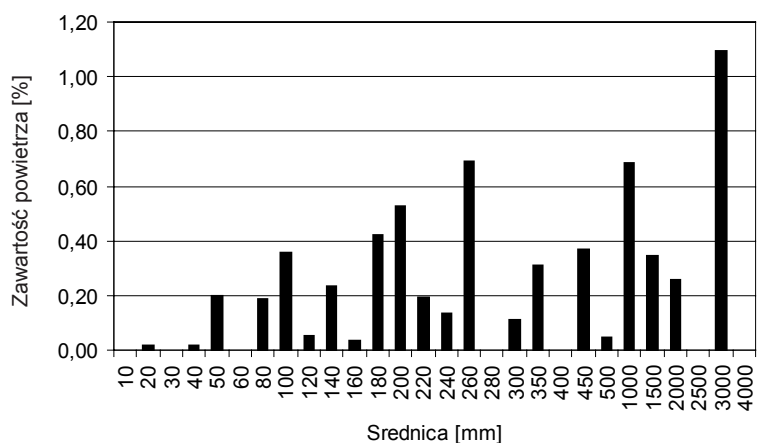


Rys. 4. Rozkład wielkości porów powietrza w betonie bez dodatków popiołowych
Fig. 4. Air voids distribution in reference concrete

fly ash FLW addition caused a higher increase of air voids spacing index than in concrete with the same fly ash content, but FLK.

On the basis of data from Table 4 the relationship between fly ash content and air voids specific surface is closely linked with size and voids number in hardened cement paste. Thus the found decrease of voids specific surface with increase of fly ash content, above 20%, means that this increase causes the voids formation of higher diameter. Taking into account generally accepted model of concrete frost destruction the found dependence concerning air voids size seems to be very important, because is directly linked with decrease of small air voids which well spaced ensure proper concrete protection.

Apart of voids spacing index analysis and their specific surface the distribution of pores size was also analyzed on the basis of measured chord magnitude. The simplifications and methods of voids size distribution determination were adopted from standard PN-EN 480-11. Found air voids size distribution is presented in figures 4-6 as the air content of defined size intervals (class) namely: 0-10 μm , 10-20 μm , 3000 – 4000 μm . The diagrams



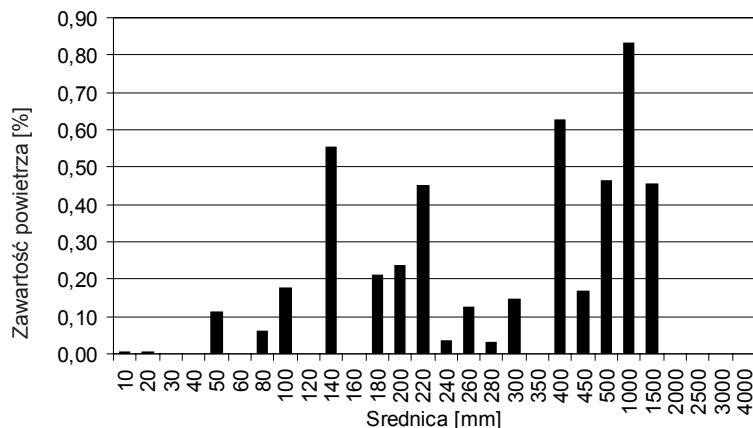
Rys. 5. Rozkład wielkości porów powietrza w betonie z 30% dodatkiem popiołowym
Fig. 5. Air voids distribution in concrete with 30% of fly ash from fluidized bed coal combustion

powierzchni właściwej i wskaźnika rozmieszczenia porów, nie uległo znaczącym zmianom. Przy wzrastającej zawartości popiołów lotnych z kotłów fluidalnych stwierdzono wzrost wskaźnika rozmieszczenia porów powietrznych oraz spadek powierzchni właściwej układu porów. Zastosowanie w betonie napowietrzonym tych dodatków w ilości powyżej 30% wpływało niekorzystnie na tworzenie drobnych pęcherzyków powietrza, które w przeważającej mierze decydują o właściwej ochronie betonu przed agresywnym działaniem mrozu i soli odladzających.

Pracę wykonano w ramach Projektu Badawczego-Rozwojowego, finansowanego ze środków budżetowych na naukę w latach 2006-2008.

Literatura / References

1. W. Nowak (red.), Fluidalne spalanie paliw w energetyce, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, s. 269, Częstochowa 2004.
2. J. Brandstetr, J. Havlica, I. Odler, Properties and use of solid residue from fluidized bed coal combustion, Noyes Publications. Westwood, New Jersey, USA 1997.
3. E. Freeman, et al., Interactions of carbon-containing fly ash with commercial air entraining admixtures for concrete, Fuel, 76, 8, 1997.
4. I. Külaots, A. Hsu, R. H. Hurt, E. M. Suuberg, Adsorption of surfactants on unburned carbon in fly ash and development of a standardized Foam Index Test, Cem. Concr. Res., 2091-2099, 33, 2003.
5. J. P. Baltus, R. B. LaCount, Measurement of adsorption of air entraining admixture on fly ash in cement and concrete, Cem. Concr. Res., 819-824, 31, 2001.
6. M. Gawlicki, W. Rozczynialski, Ocena możliwości wykorzystania w przemyśle cementowym ubocznych produktów spalania powstających w kotłach fluidalnych, IV Konferencja MATBUD 2003, Politechnika Krakowska, Kraków, 25-27 czerwca 2003.
7. M. A. Glinicki, K. Ładyżyński, Wpływ dodatku aktywowanych popiołów lotnych ze spalania fluidalnego na właściwości betonów konstrukcyjnych. VIII Międzynarodowa Konferencja „Popioły w energetyce”, Unia Przedsiębiorstw UPS, Międzyzdroje, 24-27.10.2001, 119-133.
8. M. A. Glinicki, Właściwe i patologiczne napowietrzanie betonów, Budownictwo-Technologie-Architektura, nr 2/2004, 37-40.
9. D. Załocha, J. Kasperkiewicz, Automatyzacja wyznaczania charakterystyki napowietrzenia betonu w świetle normy PrPN-EN 480-11, XLVI Konf. KILiW PAN i KN PZITB, 437-444, Tom 1, Krynica 2001.



Rys. 6. Rozkład wielkości porów powietrza w betonie z 40% dodatkiem popiołowym

Fig. 6. Air voids distribution in concrete with 40% of fly ash from fluidized bed coal combustion

show the trends of changes in voids size distribution in concrete with different content of fly ash from fluidized bed coal combustion. The higher fly ash addition the higher content of greater voids was found. This observation is in good conformity with the data concerning voids specific surface.

5. Conclusions

On the basis of investigation results the following conclusions can be drawn: To obtain the designed air content in concrete mix it is indispensable to increase the air-entraining admixture proportional to increased addition of fly ash from fluidized bed coal combustion. In case of 20% addition of fly ash the distribution of air voids, estimated on the basis of specific surface and index of voids distribution, was not substantially changed. With higher fly ash content the index of voids distribution increases and voids specific surface decreases. In case of air-entrained concrete of this fly ash addition greater than 30% has negative influence on the formation of small air voids which have the significant effect on concrete frost resistance, also in case of deicing salts application.