

## Struktura porów powietrznych a mrozoodporność betonów napowietrzonych za pomocą mikrosfer

### Air void structure in relation to the frost resistance of air-entrained concrete by with microspheres

#### 1. Wprowadzenie

Technologia napowietrzania mieszanek betonowych jest znana od ponad 60 lat. Nadal zdarzają się jednak niepowodzenia technologiczne, ponieważ umiejętność wyprodukowania i wbudowania betonu napowietrzonego o określonej strukturze porów powietrznych nie jest powszechna (8). Choć skład mieszanki i ilość dodawanej domieszki napowietrzającej będą utrzymywane na stałym poziomie, to jednak stopień napowietrzania może się znacznie różnić, gdyż zależy od wielu czynników (3, 10, 13, 19, 25, 29).

W praktyce budowlanej problemem jest uzyskanie powtarzalnej struktury porów powietrznych zarówno pod względem sumarycznej ich objętości jak i wielkości pęcherzyków powietrza (3). Odpowiednie napowietrzenie betonu jest zagadnieniem problematycznym z co najmniej dwóch powodów. Po pierwsze średnia odległość między pęcherzykami powietrza nie jest bezpośrednio zależna od ilości domieszki napowietrzającej, a po drugie krytyczna wartość tej odległości  $\bar{L}$  dla różnych rodzajów betonu może być różna (12, 27).

Kształtowanie struktury porów w betonie związane jest z dwoma głównymi czynnikami: ogólną zawartością powietrza i wymiarami pęcherzyków powietrznych. Natomiast odporność na zamrażanie zależy jeszcze od trzeciego czynnika: średniej odległości między porami powietrznymi (rysunek 1).

Powszechnie przyjmuje się, że tylko część porów powietrznych ma znaczenie, jeżeli chodzi o odporność betonu na mróz. Czynnikiem decydującym o podziale na pory „użyteczne” ze względu na odporność betonu na zamrażanie i „nieużyteczne” jest parametr  $A_{300}$ , czyli zawartość porów o średnicy mniejszej od 300  $\mu\text{m}$ . Uważa się, że pory o większych średnicach nie mają wpływu na odporność mrozową betonu, a zwiększają tylko jego porowatość.

Natomiast stosowanie napowietrzania powoduje zmniejszenie wytrzymałości betonu na ściskanie. Przyjmuje się, że 1% powietrza powoduje zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie o około 5,5% (13). Należy więc z tego względu dążyć do optymaliza-

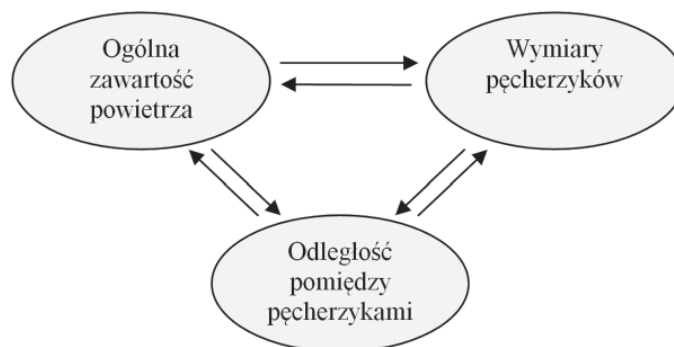
#### 1. Introduction

Although air entrainment has been an accepted practice in concrete technology for more than 60 years, technological failures still happen due to frequent inability to produce and place air entrained concretes with a defined air void system (8). Even when the mixture composition and amount of air-entraining admixtures are kept at the same level, the volume of the entrained air may vary considerably, as it depends on a variety of factors (3, 10, 13, 19, 25, 29).

The major challenge in the construction practice is to obtain reproducible air void systems in terms of their total volume and size. (3). The adequate air entrainment is a problematic issue due to at least two reasons. First, the average distance between the bubbles is not directly dependent on the amount of air entraining agent; second, the critical value of this distance,  $\bar{L}$ , may vary in different concretes (12, 27).

The air void system development is connected with two main factors: a total air content and air bubbles dimensions. The frost resistance, however, depends also on the third factor, which is an average distance between the bubbles (Fig.1).

It is commonly assumed that only some of the voids have an effect on the frost resistance. Air content parameter  $A_{300}$ , relating to the



Rys. 1. Czynniki wpływające na odporność betonu na zamrażanie.

Fig. 1. Factors affecting frost resistance of concrete.

cji stopnia napowietrzenia, czyli do uzyskania właściwej struktury porowatości, przy ograniczeniu do minimum zawartości powietrza w betonie.

Projektowanie trwałego betonu zgodnie z PN-EN 206-1 (23) powinno uwzględniać klasy ekspozycji związane z oddziaływaniem środowiska. W przypadku odporności na mróz znaczenie mają cztery klasy XF1 ÷ XF4, które zależą od nasycenia betonu wodą i stosowania środków odladzających. W przypadku klas XF2, XF3, XF4 norma zaleca napowietrzenie mieszanki betonowej, przy czym minimalna zawartość powietrza wynosi 4%. Ani norma PN-EN 206-1 ani jej krajowe uzupełnienie, czyli PN-B-06265:2004 (22) nie podają żadnych wymagań dotyczących struktury porowatości betonu. W normach innych krajów (2, 16) wymaganą charakterystykę porów opisano albo maksymalną odległością między porami  $\bar{L}$  i minimalną zawartością powietrza w betonie A, albo minimalną zawartością porów mniejszych od 300  $\mu\text{m}$   $A_{300}$  i maksymalną odległością między porami  $\bar{L}$  (7, 8).

Pewne propozycje dotyczące zawartości powietrza w mieszance betonowej oraz parametrów struktury porów powietrznych zostały zawarte w przygotowywanych „Wymaganiach technicznych dla betonowych nawierzchni drogowych” (31). Podano w nich informacje dotyczące średniej oraz minimalnej zawartości powietrza w mieszance betonowej, rozróżniając betony tylko z dodatkiem domieszki napowietrzającej oraz betony zawierające równocześnie domieszkę napowietrzającą i upłynniającą. Ponadto określono kryteria poprawnego napowietrzenia:

- zawartość porów o średnicy mniejszej od 300  $\mu\text{m}$  ( $A_{300}$ ) > 1,5%,
- średnia odległość między porami w betonie  $\bar{L} \leq 0,20$  mm,

Przygotowanie w laboratorium betonu spełniającego te wymagania nie stanowi zazwyczaj większego problemu. Uzyskanie wymaganych parametrów struktury porów powietrznych w warunkach przemysłowych nie jest już jednak łatwe. Brak powtarzalności wielkości i rozmieszczenia porów powietrznych może być spowodowany zmianami temperatury, czasu mieszania oraz pompowania mieszanki, techniką zagęszczania i wykańczania powierzchni betonu. Podstawowym problemem w warunkach przemysłowych jest stosowanie jednocześnie kilku domieszek do betonu. W większości przypadków jest to domieszka napowietrzająca, plastyfikator oraz domieszka opóźniająca wiązanie. We wspomnianych wcześniej „Wymaganiach technicznych dla betonowych nawierzchni drogowych” ilość stosowanych równocześnie domieszek ograniczono maksymalnie do trzech. Wykluczono również stosowanie w przypadku jednego betonu domieszek od różnych producentów.

Badania odporności betonów na powierzchniowe łuszczenie wykonane metodą Boraas przez Peterssona (18) pokazują, że betony wykonane tylko z domieszką napowietrzającą są bardziej odporne na uszkodzenia niż w przypadku, gdy zawierają równocześnie plastyfikator. Wyniki badań Pigeona i in. (20, 21) wykazują, że superplastyfikatory mogą być ważną przyczyną braku powtarzalności w uzyskaniu tego samego rozmieszczenia porów powietrznych. Zastosowanie superplastyfikatorów powoduje zwiększenie

content of pores of diameter below 300  $\mu\text{m}$  separating “useful” from “useless” pores in terms of frost resistance. The pores with larger diameter increase the concrete porosity but are thought to have no effect on frost resistance.

Air entrainment, in turn, reduces the compressive strength of concrete. It is assumed that air content of 1% causes the compressive strength reduction of 5,5% (13). That is why it is necessary to strive for optimizing the degree of air entrainment, i.e. obtaining the appropriate porosity structure at the minimum air content in the concrete.

The determination of durable concrete according to PN-EN 206-1 (23) standard should involve reference to concrete exposure classes. For resistance to frost, classes XF1 ÷ XF4, which refer to water saturation level and action of de-icing salts, should be considered. For classes XF2, XF3, XF4, the code indicates that the concrete mix is air entrained with the minimum air content of 4%. Neither PN-EN 206-1 standard nor its domestic supplemental, PN-B-06265:2004 (22) includes any requirements concerning concrete porosity structure. Standards of other countries (2, 16) describe the air pores either by defining the distance between individual air bubbles  $\bar{L}$  and the minimum air content A, or the minimum content of pores smaller than 300  $\mu\text{m}$ .  $A_{300}$  and the distance between air bubbles  $\bar{L}$  (7, 8).

Some specifications for concrete mix air content and air pore parameters have been included in the recently proposed “Requirements for Concrete Road Surface” (31). This guide book provides data about average and minimum air content in a concrete mix, dividing concretes into those with air entraining agents only and those with both air entraining admixtures and superplasticizers. The requirements of proper air entrainment have also been included:

- the content of air pores with diameters smaller than 300  $\mu\text{m}$  ( $A_{300}$ ) > 1,5%,
- average distance between air bubbles in concrete  $\bar{L} \leq 0,20$  mm.

Producing the mix that complies with the above requirements in a laboratory is usually quite easy. But obtaining the required air pores structure in field conditions is a real problem. Non-reproducibility of air pore size and spacing may be caused by changes in temperature, concrete mixing and pumping time, compaction and finishing methods used. The major problem in field concretes is the use of several admixtures at the same time. In most cases they include an air entraining agent, plasticizer and set retarder. The “Requirements for Concrete Road Surface”, provides maximum acceptable limit of three admixtures that can be used in concrete simultaneously. Admixtures from different manufacturers cannot be used in one concrete.

The tests for the resistance to scaling conducted with the Boraas method by Petersson (18) indicate that concretes produced with an air entraining agent are more resistant to damage than those to which also the plasticizer was added. The results of tests carried out by Pigeon et al. (20, 21) show that superplasticizers can be the important cause of non-reproducibility in obtaining the same air bubbles spacing. The addition of superplasticizers increases the

wymiarów pęcherzyków powietrznych i w konsekwencji większe odległości pomiędzy nimi. Duże zwiększenie odległości między porami powietrznymi może nastąpić bez znacznego zmniejszenia stopnia napowietrzenia (20, 21). Na strukturę porów w betonie wpływ ma również napowietrzające działanie superplastyfikatora (28). Z tego też względu dobór właściwego w danym przypadku układu cement-superplastyfikator-domieszka napowietrzająca powinien być sprawdzony doświadczalnie.

Dodatek popiołu lotnego do mieszanek betonowych ze względu na jego zmienne właściwości, a przede wszystkim obecność węgla, powoduje kłopoty z napowietrzaniem. W miarę wzrostu zawartości popiołu w większym stopniu wzrasta również zapotrzebowanie na domieszkę napowietrzającą (14, 15).

Granulowany żużel wielkopieczowy, podobnie jak popioły lotne, wymaga starannego doboru środka napowietrzającego. Betonny zawierający cement bogaty w żużel są wyjątkowo podatne na uszkodzenia w warunkach łączących występowanie mrozu i soli odładzających (1). Z badań Giergicznego, i in. (5) wynika, że zastosowanie cementu o większej zawartości żużla może spowodować zmniejszenie ogólnej ilości powietrza w stwardniałym betonie. Co więcej obecność żużla powoduje zaburzenia w rozmieszczeniu pęcherzyków powietrza, powodując zmniejszenie zawartości porów mniejszych od 300  $\mu\text{m}$  oraz wzrost średniej odległości między porami powietrznymi  $\bar{L}$ .

Badania laboratoryjne pokazują, że charakterystyka porów powietrznych w napowietrzanych betonach w fazie początkowego mieszania może w znacznym stopniu różnić się od fazy końcowego formowania, prowadzonej 90 minut później (20, 21). Z badań wielu istniejących obiektów, takich jak: wiadukty drogowe, mosty, odcinki nawierzchni dróg, parkingi samochodowe i obiekty lotniskowe wynika, że jest wiele nieprawidłowości dotyczących struktury porów powietrznych, a więc i mrozoodporności betonów (4, 6, 9, 11). Niewłaściwa struktura porów powietrznych występuje w betonach pomimo zastosowania środków napowietrzających, spełniających wymagania normowe (11). Wielu problemów związanych z brakiem powtarzalności w uzyskiwaniu analogicznej struktury porów powietrznych można uniknąć dodając do betonu stałe cząstki o określonych średnicach, puste w środku, tzw. mikrosfery (rysunek 2). Rozwiązanie to pozwala na wprowadzenie do betonu „porów powietrznych” w formie mikrosfer o odpowiednich, stałych wymiarach. Ogólne informacje na temat możliwości napowietrzenia betonu za pomocą mikrosfer podaje Neville (13) powołując się na badania Ozyildirima i Sprinkela (17) oraz Sommera (26)

Badania przedstawione w niniejszym artykule miały na celu określenie zależności pomiędzy strukturą porowatości a mrozoodpornością betonów napowietrzonych za pomocą mikrosfer polimerowych. Ponadto rozważano możliwość obniżenia ogólnej zawartości powietrza poprzez zmniejszenie zawartości dużych pęcherzyków powietrznych w wyniku zastosowania domieszki przeciwspieniającej.

size of air bubbles and, as a result, increases the distances between them. A large increase in distance between the bubbles can occur without any significant decrease in the air entrainment (20, 21). The air bubbles system is also affected by the air entraining due to superplasticizers (28). That is the reason why, in the given case, the selection of an appropriate system: cement-superplasticizer and air entraining agent should be tested experimentally.

Addition of fly ash to concrete mixture impedes air entraining, which is due to the fly ash properties, especially the content of carbon. The higher content of fly ash in concrete, causes the necessity to add more air entraining agent. (14, 15).

Ground granulated blastfurnace slag, similarly to fly ashes, requires a careful selection of air entraining agent. Concretes with cement rich in slag are extremely susceptible to damage in conditions in which they are exposed both to frost and deicing salts (1). Research conducted by Giergiczny et al. (5) indicates that the use of cement with a higher content of slag can cause a decrease of air content in hardened concrete. Moreover, the presence of slag deranges the distribution of air bubbles by decreasing the number of pores with diameters smaller than 300  $\mu\text{m}$  and by increasing the average distance between the air bubbles  $\bar{L}$ .

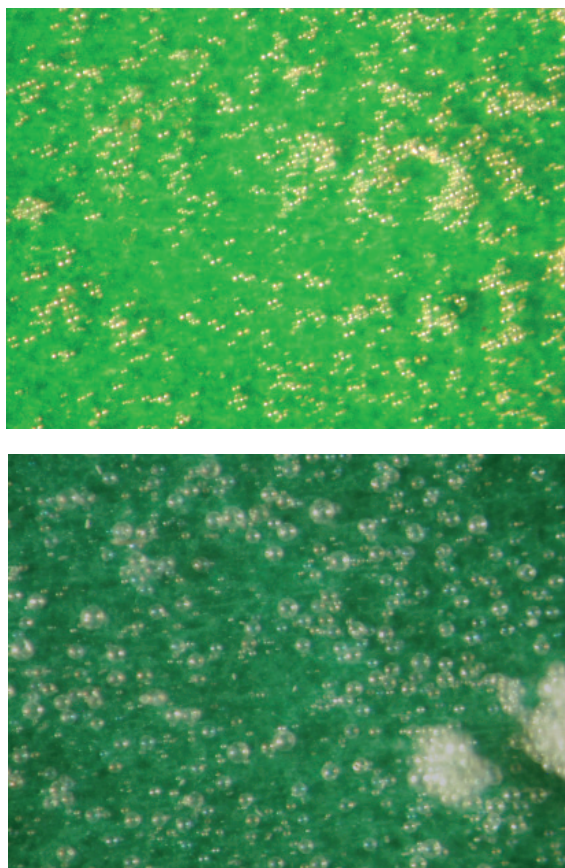
Laboratory tests show that the system of air bubbles in air entrained concretes in the initial phase of mixing can significantly differ from that in the final phase of mix placing, 90 minutes later (20, 21). The examination of numerous existing structures such as road bridges, bridges, sections of road pavement, parking lots and airport facilities reveal a lot of irregularities concerning the air bubbles system and in consequence the concrete frost resistance (4, 6, 9, 11). Improper system of air pores occurs in concretes despite the use air-entraining admixtures which comply with the standards (11). Many of the problems connected with non-reproducibility of air pores system can be avoided by adding hollow solid particles with given diameters, the so called microspheres (Fig. 2). This solution helps introduce into the concrete the „air bubbles” in a form of microspheres of adequate, fixed size. General information about the air entrainment by means of microspheres is provided by Neville (13), who refers to research conducted by Ozyildirim and Sprinkel (17), and Sommer (26)

The studies presented in this paper are devoted to relationship between porosity structure and the resistance to frost of concretes air entrained by means of polymer microspheres. Another issue considered here was reduction of total air content through decreasing the content of large air bubbles as a result of the anti-foaming admixture addition.

## 2. Experimental part

### 2.1. Materials and methods

The tests were conducted on high performance concrete specimens, air entrained with the addition of polymer microspheres 40 and 80  $\mu\text{m}$  in diameter. Nine series of such concretes were



Rys. 2. Mikrosfery polimerowe D 40, 80  $\mu\text{m}$ .

Fig. 2. Polymer microspheres D 40, 80  $\mu\text{m}$ .

## 2. Część doświadczalna

### 2.1. Materiały i metody

Badania przeprowadzono na próbkach betonów wysokowartościowych, napowietrzonych poprzez zastosowanie mikrosfer polimerowych o dwóch średnicach - 40 i 80  $\mu\text{m}$ . Sporządzono 9 serii tych betonów. Celem badań było określenie wpływu wielkości i ilości mikrosfer na kształtowanie struktury „porów powietrznych” i mrozoodporność betonu. Do wykonania betonów zastosowano następujące składniki:

- cement CEM II/A-S 42,5N, C
- pył krzemionkowy, SF
- piasek naturalny 0 ÷ 2 mm, P
- kruszywo grube - bazalt frakcji 4 ÷ 8, 8 ÷ 16 mm, B
- superplastyfikator polikarboksyłanowy, SPL
- mikrosfery polimerowe, MS, frakcji D = 40  $\mu\text{m}$ , D = 80  $\mu\text{m}$ ,
- domieszka przeciwpianająca (dotyczy betonów serii B), AFA.

Skład próbek podano w tablicy 1.

Zakres badań obejmował wyznaczenie

- dla mieszanki betonowej:
  - konsystencji metodą opadu stożka (SL),
  - gęstości objętościowej ( $g_b$ ),

prepared. The aim of the tests was to determine the concrete frost resistance and the effect of microspheres size and number on air pores system development. The following components were used to prepare the concretes:

- CEM II/A-S 42,5N cement, C
- silica fume, SF
- natural sand 0 ÷ 2 mm, P
- coarse aggregate – basalt; fraction 4 ÷ 8, 8 ÷ 16 mm, B
- polycarboxylate superplasticizer, SPL
- polymer microspheres, MS, fraction D = 40  $\mu\text{m}$ , D = 80  $\mu\text{m}$ ,
- anti-foaming admixture (for B concretes), AFA.

The specimen composition is presented in Table 1.

The tests included the determination of the following properties:

- for the concrete mix:
  - slump (SL),
  - volumetric density ( $g_b$ ),
- for the hardened concrete:
  - porosity characteristics: A – total air content,  $A_{300}$  – content of pores with diameter under 300  $\mu\text{m}$ ,  $\bar{L}$  - spacing factor,
  - compressive strength after 28 and 56 days of curing  $f_{cm28}$ ,  $f_{cm56}$ ,
  - water absorbability  $n_w$ ,
  - frost resistance (FR) of specimens in water.

The strength and absorption tests were conducted on 10x10x10 cm cubes. Frost resistance tests were carried out on 8x8x35 cm beams (freezing the specimens in water according to modified ASTM C 666A method). The polished sections were prepared and porosity was analyzed according to PN-EN 480-11 standard (24). For the automatic image analysis the set of Nikon SMZ 800 microscope, CCD camera and Prior measuring table was used. The mixes had good workability and the slump in the range of 21- 23.5 cm. The polymer microspheres with two different diameters, 40 and 80  $\mu\text{m}$  were added to the concrete mixes. Four different quantity of microspheres of each size was added. The anti-foaming admixture was added to the B concretes. Table 1 presents the properties of all concretes mixes.

### 2.2. Results and discussion

Table 2 presents the results of the tests for hardened concretes.

Concretes of class C 50/60 ÷ C 55/67 can be obtained, depending on the amount of added microspheres. The progress of concrete deterioration under freezing and thawing was assessed on the basis of mass and linear dimensions changes of the samples. The results are presented separately for the not frost resistant specimens (Fig.3) and for the specimens with good frost resistance (Fig.5).

Non-air entrained concrete A1 was not resistant to freezing, despite the fact that it had the highest compressive strength and the

- dla stwardniałego betonu:
  - charakterystyki porowatości: A – całkowita zawartość powietrza,  $A_{300}$  – zawartość porów mniejszych od 300  $\mu\text{m}$ ,  $\bar{L}$  – wskaźnik rozstawu porów,
  - wytrzymałości na ściskanie po 28 i 56 dniach dojrzewania  $f_{cm28}$ ,  $f_{cm56}$ ,
  - nasiąkliwości masowej  $n_w$ ,
  - odporności na zamrażanie (Mrz) próbek w wodzie.

Do badań wytrzymałości i nasiąkliwości stosowano kostki 10x10x10 cm. Badania mrozoodporności prowadzono na belkach 8x8x35 cm (zamrażanie próbek w wodzie zmodyfikowaną metodą ASTM C 666A). Przygotowanie zglądów oraz oznaczenie charakterystyk porowatości metodą zliczania cięciw wykonano według PN-EN 480-11 (24). Automatyczną analizę obrazu przeprowadzono z wykorzystaniem zestawu, w skład którego wchodził mikroskop Nikon SMZ 800, kamera CCD oraz stolik pomiarowy Prior. Mieszanki charakteryzowały się dobrą urabialnością i wykazywały opad stożka w granicach od 21 do 23,5 cm. Do mieszanek betonowych dodawano mikrosfery polimerowe o dwóch różnych średnicach 40 i 80  $\mu\text{m}$ . Stosowano cztery różne dodatki mikrosfer każdej wielkości. Do mieszanek serii B dodano domieszkę przeciwspieniającą. Skład i wybrane właściwości betonów przedstawiono w tablicy 1.

## 2.2. Wyniki badań i ich dyskusja

Wyniki badań stwardniałych betonów zebrano w tablicy 2.

Zależnie od ilości dodanych mikrosfer można uzyskać beton klasy C 50/60 ÷ C 55/67. Postęp procesu niszczenia betonu pod działaniem zmiennych temperatur oceniano na podstawie zmian masy oraz wymiarów liniowych próbek. Uzyskane wyniki przedstawiono osobno w przypadku próbek nieodpornych na mróz (rysunek 3) oraz o dobrej odporności (rysunek 5).

Nienapowietrzany beton A1 nie był odporny na zamrażanie pomimo, że miał najwyższą wytrzymałość na ściskanie oraz najniższą nasiąkliwość. Uległ on bardzo szybkiemu zniszczeniu (po

lowest water absorption parameter. The destruction was also very quick (following the significant changes in linear dimensions and mass). The concretes with the lowest amounts of microspheres added (a) (A2, A4) showed a gradual increase in dimensions and mass, which indicated the occurrence of microcracks in those specimens. Specimens A1, A2, A4 after 300 cycles of freezing and thawing are presented in Fig. 4(a). The sample A1 collapsed into two pieces. Lower destruction presented the specimens A2, A4, which proved, however, that they are not resistant to freezing and thawing. In concrete specimens prepared with a larger microspheres addition (A3, A5), the changes of linear dimensions were much lower, and the mass loss did not occur after 300 cycles (Fig. 3). The specimens after 300 freezing/thawing cycles are presented in Fig. 4 (b). The specimens with a high addition of microspheres (concretes B1 ÷ B4) subjected to 300 freezing/thawing cycles in the water showed good frost resistant. These concretes have neither mass nor linear dimensions changes (Fig. 5). The specimens are shown in Fig. 6.

Microscopic examinations on the concrete specimens with microspheres showed the content of the air (A) to be in the range from 2.20 to 4.92%, with the content of pores  $A_{300}$  from 0.61 to 2.83%. The spacing factor  $\bar{L}$  were in the wide range from 0.097 to 0.287 mm. For A series concretes, the  $A_{300}/A$  ratio was relatively low (25 ÷ 37%), which indicated that they contained a considerable amount of macropores (even up to several millimeters in diameter). In concretes of B series, to which anti-foaming admixture was added, micropores amounted to 55-71% of the total air content.

Figures 7 and 8 present the distribution of air pores size in several classes for concretes of series A and B. The increase of macropores all concretes A is connected with the insufficient removal of entrapped air from the concrete mix. The use of the anti-foaming admixture (B series) significantly reduced the amount of those macropores.

Figures 9 and 10 present the relationship between the spacing factor  $\bar{L}$  and air content (A) and pores content  $A_{300}$  under 300  $\mu\text{m}$ .

Tablica 1 / Table 1

SKŁAD I WYBRANE WŁAŚCIWOŚCI MIESZANEK BETONOWYCH.

COMPOSITION AND SELECTED PROPERTIES OF CONCRETE MIXES.

Nr	Rodzaj MS	C kg/m <sup>3</sup>	SF kg/m <sup>3</sup>	S kg/m <sup>3</sup>	W/S	P kg/m <sup>3</sup>	B kg/m <sup>3</sup>	MS % m.s.	SPL % m.s.	AFA % m.s.	g <sub>b</sub> kg/m <sup>3</sup>	SL cm
A1	-	379	38	417	0,40	648	1378	-	1,20	-	2611	22,0
A2	MS-40a	367	37	404	0,40	629	1336	0,35	1,20	-	2534	23,0
A3	MS-40b	362	36	398	0,40	619	1316	0,70	1,20	-	2496	23,5
A4	MS-80a	372	37	409	0,40	637	1352	0,35	1,20	-	2565	23,0
A5	MS-80b	371	37	408	0,40	635	1350	0,70	1,20	-	2561	23,5
B1	MS-40c	371	30	400	0,41	635	1349	0,86	1,22	0,37	2553	22,0
B2	MS-40d	367	29	396	0,42	628	1334	1,11	1,36	0,37	2526	23,0
B3	MS-80c	373	30	404	0,41	639	1358	0,86	1,36	0,37	2572	21,0
B4	MS-80d	369	29	398	0,42	631	1341	1,11	1,36	0,37	2540	22,0

Oznaczenia: % m.s. - % masy spoiwa

Designation: % m.s. - % of binder mass

znacznej zmianie wymiarów liniowych oraz ubytku masy). Betony z najmniejszym dodatkiem mikrosfer (a) (A2, A4) wykazały stopniowy wzrost wymiarów i masy, co świadczy o powstawaniu mikrorys w tych próbkach. Próbki A1, A2, A4 po 300 cyklach zamrażania-rozmrażania przedstawiono na rysunku 4 (a). Próbka betonu A1 rozpadła się na dwie części. Mniejsze uszkodzenia wystąpiły w próbkach A2, A4, które jednak wykazały brak odporności na mróz. W przypadku próbek betonu wykonanych z większym dodatkiem mikrosfer (A3, A5) zmiany wymiarów liniowych były znacznie mniejsze, a ubytek masy nie wystąpił po 300 cyklach (rysunek 3). Wygląd próbek po 300 cyklach zamrażania-rozmrażania przedstawiono na rysunku 4 (b). Natomiast próbki betonu z dużym dodatkiem mikrosfer (betony B1 ÷ B4) poddane 300 cyklom zamrażania-rozmrażania w wodzie okazały się mrozo odporne. Betony te nie wykazały ani zmian masy ani zmian wymiarów liniowych (rysunek 5). Wygląd próbek pokazano na rysunku 6.

TABLICA 2 / TABLE 2

WŁAŚCIWOŚCI PRÓBEK STWARDNIAŁYCH BETONÓW.  
 PROPERTIES OF THE HARDENED CONCRETE SPECIMENS.

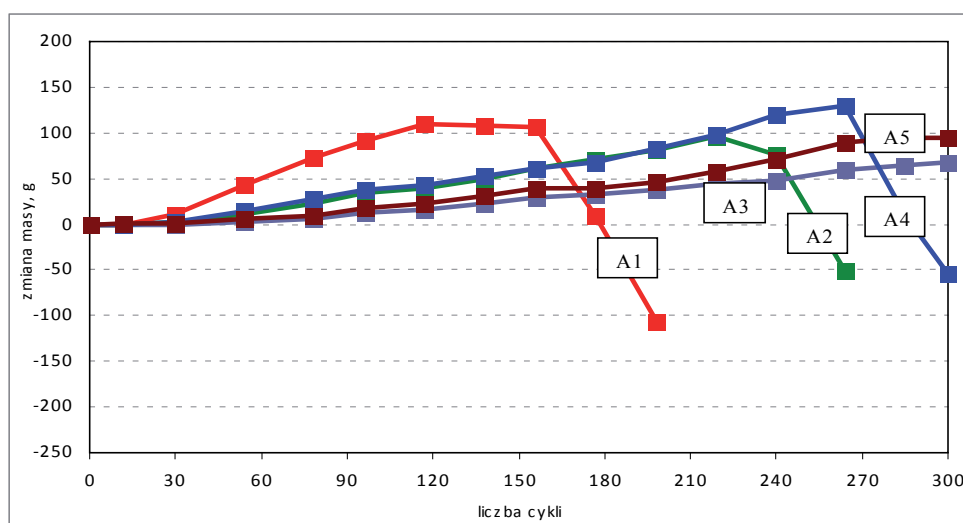
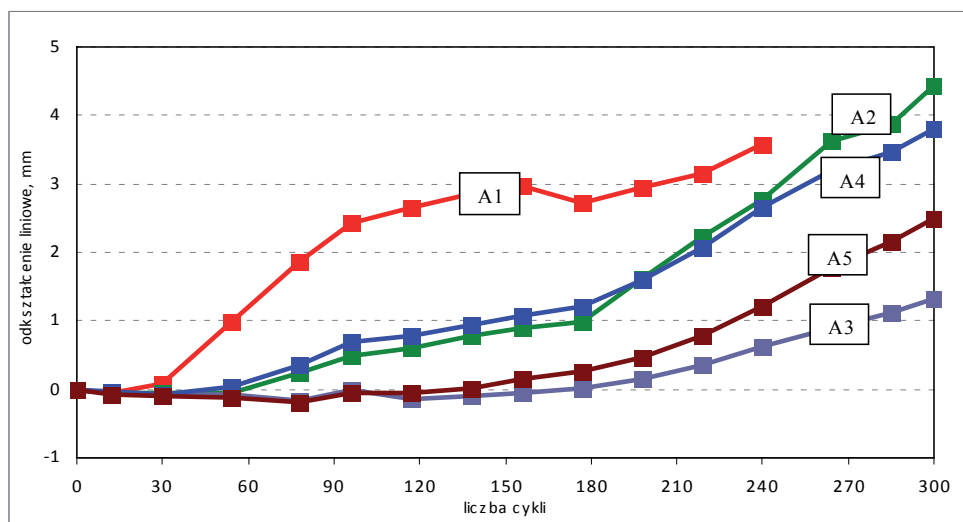
Nr	A %	A <sub>300</sub> %	A <sub>300</sub> /A	$\bar{L}$ mm	n <sub>w</sub> %	f <sub>cm28</sub> MPa	f <sub>cm56</sub> MPa
A1	1,13	0,18	16	0,825	2,10	87,2	98,0
A2	2,62	0,66	25	0,249	2,44	81,7	83,3
A3	4,92	1,44	29	0,205	2,51	71,0	77,0
A4	2,20	0,61	28	0,287	2,38	81,2	88,3
A5	2,52	0,92	37	0,226	2,56	81,8	82,3
B1	3,06	1,68	55	0,115	2,54	80,8	82,7
B2	4,35	2,83	65	0,097	2,43	74,3	81,0
B3	3,64	2,60	71	0,106	2,43	77,3	83,2
B4	3,89	2,61	67	0,117	2,45	75,0	82,0

Additionally, on Figures 9 and 10 the curves found earlier by authors (30) for 18 series of concretes which were air entrained in a traditional way.

Na podstawie badań mikroskopowych próbek betonów z dodatkiem mikrosfer stwierdzono, że ilość powietrza (A) wynosiła od 2,20 do 4,92%, przy zawartości porów A<sub>300</sub> od 0,61 do 2,83%. Wskaźnik rozstawu porów  $\bar{L}$  przyjmował wartości mieszczące się w szerokich granicach od 0,097 do 0,287 mm. Stosunek A<sub>300</sub>/A dla betonów serii A jest stosunkowo mały (25 ÷ 37%) co wykazuje, że betony zawierają znaczną ilość makroporów (nawet do kilku mm). W przypadku próbek betonów serii B, w których zastosowano domieszkę przeciwspienającą pory mniejsze od 300 μm stanowią od 55 do 71% ogólnej zawartości powietrza.

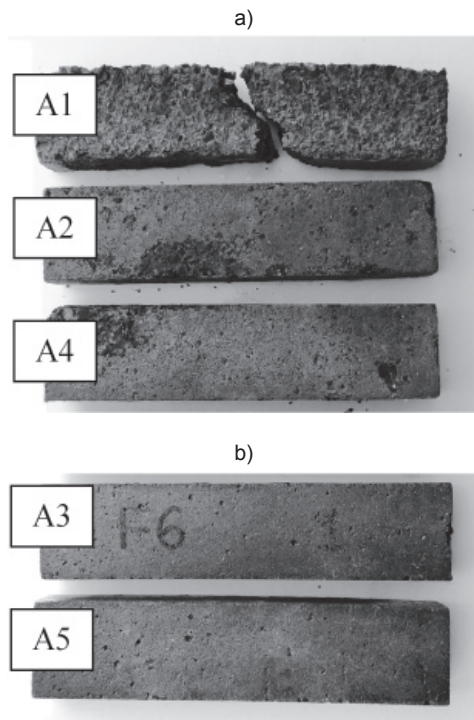
Na rysunkach 7 i 8 przedstawiono rozkład częstości cięciw zarejestrowanych w poszczególnych klasach wymiarowych porów w przypadku próbek betonów serii A oraz B. Dla wszystkich betonów serii A widoczny jest wzrost udziału makroporów związany z niedostatecznym odpowietrzeniem mieszanki betonowej. Zastosowanie domieszki przeciwspieniającej (seria B) znacznie zmniejszyło obecność tych makroporów.

Na rysunkach 9 i 10 przedstawiono związek między wskaźnikiem rozsta-



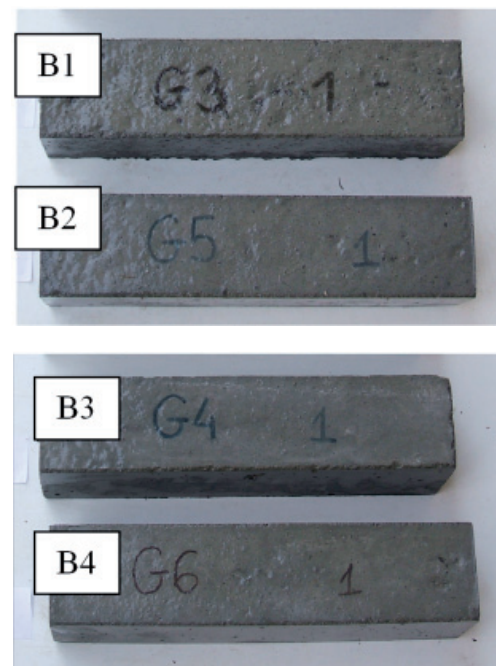
Rys. 3. Zmiany masy i wymiarów liniowych próbek A1 ÷ A5 po zamrażaniu i rozmrażaniu w wodzie.

Fig. 3. Mass and linear dimensions changes of specimens A1 ÷ A5 after freezing and thawing in water.



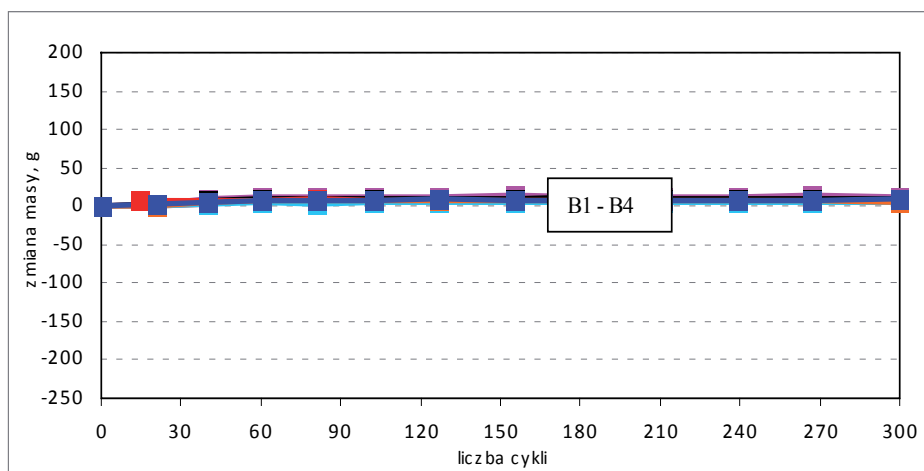
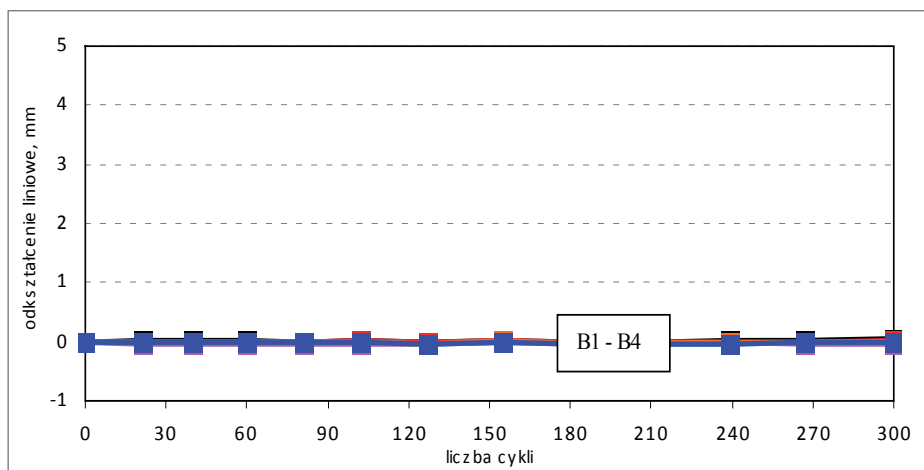
Rys. 4. Próbkę A1, A2, A4 (a) oraz A3, A5 (b) po 300 cyklach zamrażania i rozmrażania w wodzie.

Fig. 4. Specimens A1, A2, A4 (a) and A3, A5 (b) after 300 cycles of freezing and thawing in the water.



Rys. 6. Próbkę B1, B2, B3, B4 po 300 cyklach zamrażania-rozmrażania w wodzie.

Fig. 6. Specimens B1, B2, B3, B4 following 300 cycles of freezing and thawing in the water.



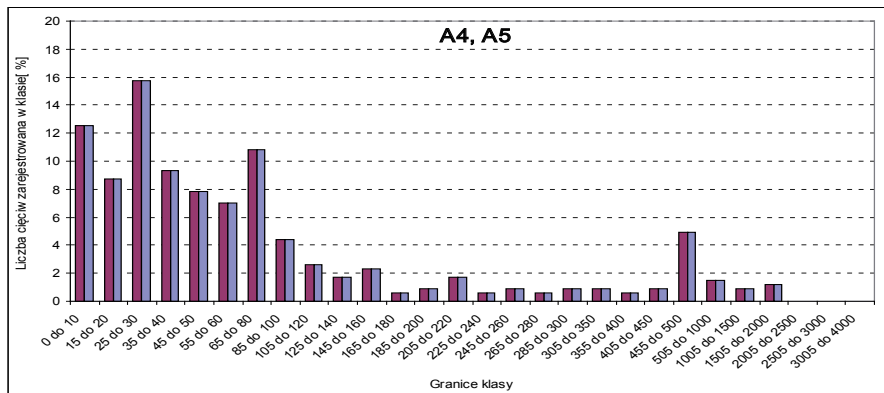
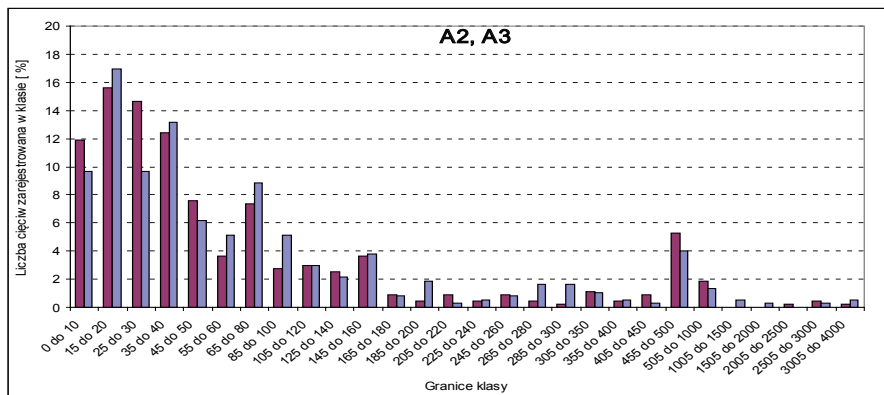
Rys. 5. Zmiana masy i wymiarów liniowych próbek betonu B1 ÷ B4 (zamrażanie-rozmrażanie w wodzie).

Fig. 5. Change in mass and linear dimensions of concrete specimens B1 ÷ B4 (freezing-thawing in the water).

Adequate air entrainment, with  $\bar{L} \leq 0,20$  mm and  $A_{300} > 1,6\%$  was obtained for four concretes (B1, B2, B3, B4). Specimens of three concretes, B1, B3 and B4 showed a very good resistance to freezing and thawing at the total air content lower than 4% ( $3,06 \div 3,89\%$ ). This confirms the possibility of frost resistant concrete production, with the addition of polymer microspheres, at the air content considerably lower than in traditional air entrained concrete.

### 3. Conclusions

The test results show that the concrete which is not air entrained, with the water/binder ratio = 0,40, made from cement CEM II/A-S despite its high strength (C55/67) and low water absorption parameter ( $n_w = 2,1\%$ ), is not resistant to freezing and thawing. In order to achieve the good frost resistance, adequate air entrainment is required. On the basis of the experiments it has been proved that it is possible to ensure good frost resistance for concretes from slag cement and air entrained by polymer microspheres addition which are 40 and 80  $\mu\text{m}$  in diameter. The proposed method is suitable for water saturated concrete structures (XF3 exposure class). The frost resistance depends on ensuring



Rys. 7. Rozkład liczby cęćw zarejestrowanych w poszczególnych klasach wymiarowych porów w próbkach betonów bez domieszki przeciwpianującej.

Fig. 7. Diagram of the distribution of particular pore dimension classes in concrete specimens without anti-foaming admixture.

wu porów powietrznych  $\bar{L}$  a zawartością powietrza (A) oraz zawartością porów  $A_{300}$ . Dodatkowo na rysunkach 9 i 10 pokazano krzywe znalezione przez autorów (30) w przypadku 18 serii betonów napowietrzonych tradycyjnie.

Prawidłowe napowietrzenie, w którym  $\bar{L} \leq 0,20$  mm i  $A_{300} > 1,6\%$  uzyskano w przypadku czterech betonów (B1, B2, B3, B4). W przypadku próbek z trzech betonów B1, B3 i B4 stwierdzono bardzo dobrą mrozodporność przy całkowitej zawartości powietrza mniejszej od 4% (3,06 ÷ 3,89%). Stanowi to potwierdzenie możliwości uzyskania betonu odpornego na mróz przy znacznie mniejszej zawartości powietrza, przy zastosowaniu mikrosfer polimerowych, niż ma to miejsce w przypadku tradycyjnego napowietrzenia z zastosowaniem domieszki.

### 3. Wnioski

Uzyskane wyniki badań pokazują, że beton nienapowietrzony o stosunku w/s = 0,40, wykonany z cementem CEM II/A-S pomimo wysokiej wytrzymałości (C55/67) oraz małej na-

proper air bubbles system. The application of polymer microspheres gives much better porosity structure than specified in the technical requirements (31), where spacing factor  $\bar{L} \leq 0,20$  mm and air pores content  $A_{300} > 1,5\%$ .

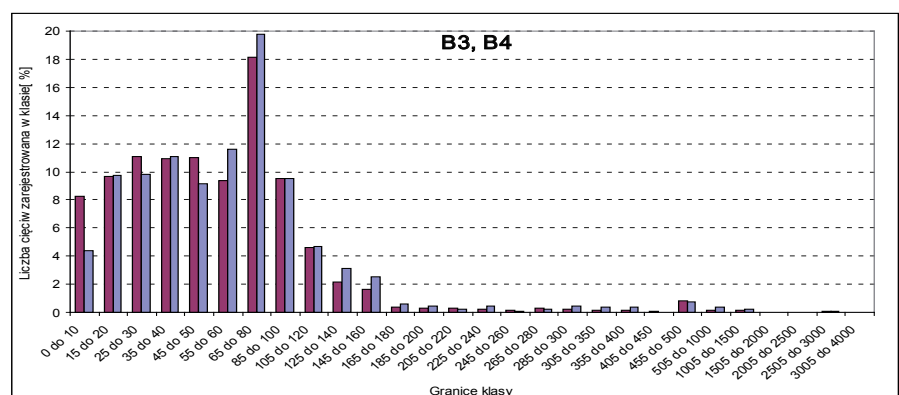
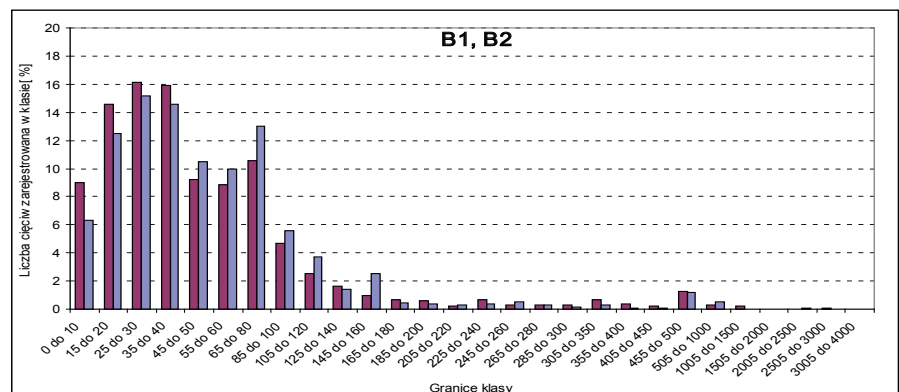
Adding the anti-foaming admixture to concretes air entrained with polymer microspheres (series B) radically reduce the size of macropores (>300  $\mu\text{m}$ ). It is possible to achieve good frost resistant concrete with the total air content less than 4%.

The research, to study the relationship between the amount of microspheres, the porosity structure and the frost resistance, shall be continued.

*The study has been financed in part from the POIG 01.01.02-10-106/09 funds.*

### Literatura

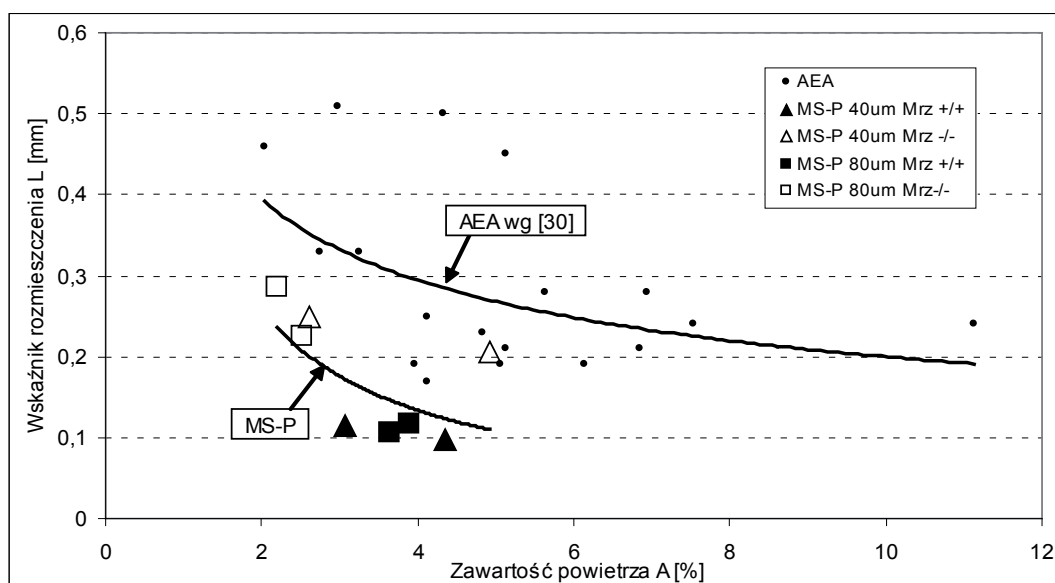
1. Copuroglu O., Schlangen E. Modeling of frost salt scaling. CCR 38 (2008) 27-39.
2. DS 2426:2004 „Beton - Materialer - Regler for anvendelse af EN 206-1”, Danmark.
3. Du L., Folliard K.J. Mechanisms of air entrainment in concrete. Cement and Concrete Research 35 (2005) 1463-1471.



Rys. 8. Rozkład liczby cęćw zarejestrowanych w poszczególnych klasach wymiarowych porów w próbkach betonów z domieszką przeciwpianującą.

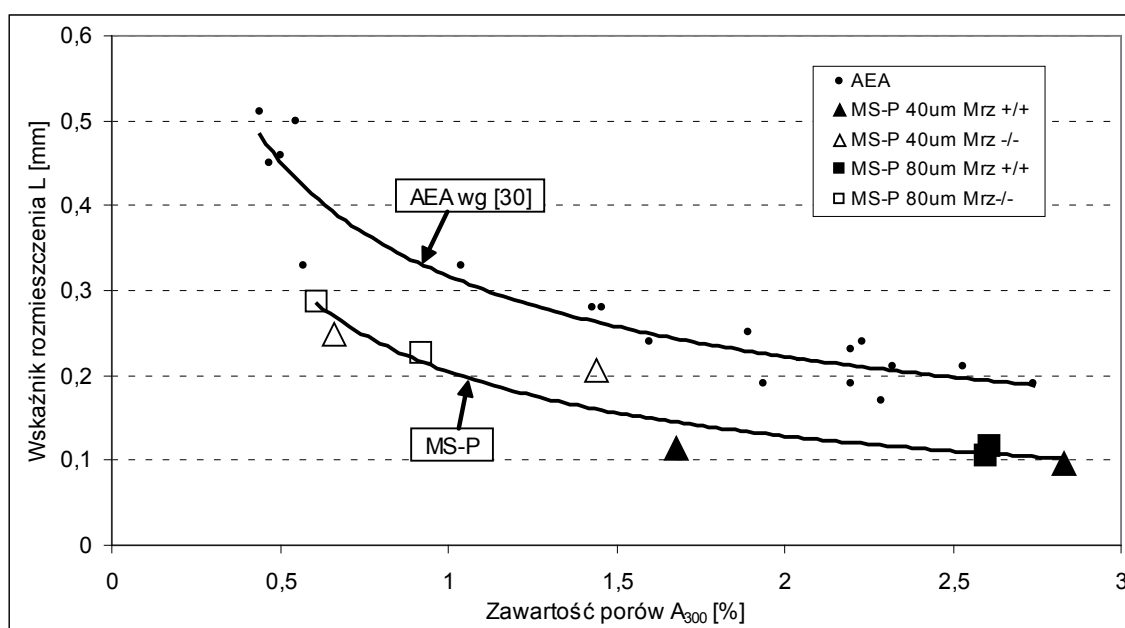
Fig. 8. Diagram of the distribution of particular pore dimension classes in concrete specimens with anti-foaming admixture.





Rys. 9. Związek pomiędzy średnią odległością porów powietrznych ( $\bar{L}$ ) a zawartością powietrza (A).

Fig. 9. Relation between the average distance of air bubbles ( $\bar{L}$ ) and air content (A).



Rys. 10. Związek pomiędzy średnią odległością porów powietrznych ( $\bar{L}$ ) a zawartością porów mniejszych od 300  $\mu\text{m}$  ( $A_{300}$ ).

Fig. 10. Relation between the average distance of air bubbles ( $\bar{L}$ ) and the amount of pores content under 300  $\mu\text{m}$  ( $A_{300}$ ).

siąkliwości ( $n_w = 2,1\%$ ) wykazuje brak odporności na mróz. Warunkiem uzyskania dobrej odporności jest właściwe napowietrze-  
nie betonu. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że możliwe jest zapewnienie dobrej odporności na mróz betonów z cementu hutniczego napowietrzonych poprzez dodatek mikro-  
sfer polimerowych o średnicach 40 i 80  $\mu\text{m}$ . Zastosowana metoda badań odpowiada konstrukcjom betonowym nasyconym wodą (klasa ekspozycji XF3). Warunkiem mrozoodporności jest za-  
pewnienie właściwej struktury porów powietrznych. Zastosowanie mikro-  
sfer polimerowych pozwoliło uzyskać znacznie korzystniejszą strukturę porowatości niż podany w wymaganiach technicznych (31) wskaźnik rozstawu porów  $\bar{L} \leq 0,20$  mm i za-  
wartość porów  $A_{300} > 1,5\%$ .

4. Flaga K, Bogacka M., Maliszewicz P. Cechy trwałościowe betonów mostowych na przykładzie obiektów mostowych autostrady A2 na odcinku Konin - Koło-Dąbie. MATBUD 2007.
5. Giergiczny Z., Glinicki M.A., Sokołowski M., Zieliński M. Charakterystyka porów powietrznych a mrozoodporność betonów na cementach żużlowych. KILiW PAN. Wydawnictwo Politechniki Białostockiej 2008, str. 301-308.
6. Glinicki A.M., Glinicki M.A., Mikulicki I. Ocena napowietżenia betonów w nawierzchniach jezdni i parkingów. Drogi i mosty 1/2004, str. 5-23.
7. Glinicki M.A. Europejskie wymagania na beton napowietrzony w klasie środowiska XF. Drogownictwo 3/2005, str. 86-88.
8. Glinicki M.A. Metody ilościowej i jakościowej oceny napowietżenia betonu. II Sympozjum Naukowo-Techniczne Trwałość betonu, Góraźdże cement. Kraków 2008, str. 141-159.

Zastosowanie domieszki przeciwpieniącej w betonach napowietrzonych za pomocą mikrosfer polimerowych (seria B) pozwoliło na radykalne zmniejszenie makroporów (>300 µm). Możliwe jest uzyskanie dobrej mrozoodporności betonów przy całkowitej zawartości powietrza mniejszej niż 4%.

Badania mające na celu znalezienie zależności pomiędzy ilością dodawanych mikrosfer a strukturą porowatości i odpornością na mróz będą kontynuowane.

*Badania zostały częściowo sfinansowane z projektu POIG 01.01.02-10-106/09.*

9. Glinicki M.A., Zieliński M. Diagnostyka mikrostruktury porów w betonie wbudowanym w konstrukcje i nawierzchnie. Konferencja Dni Betonu, Tradycja i nowoczesność, Wisła 2006, str. 331-338.
10. Hale W. M., Freyne S. F., Russel B. W. Examining the frost resistance of high performance concrete. *Construction and Building Materials* 23 (2009) 878-888.
11. Józwiak-Niedźwiedzka D., Kowalska D. Ocena parametrów struktury napowietrzenia betonów w nawierzchniach lotniskowych. Konferencja Dni Betonu. Wisła 2008, str. 719-727.
12. Łaźniewska B. Teoretyczna praktyczna wartość parametrów struktury porowatości mrozoodpornego SCC. Krynica 2007, str. 111-118.
13. Neville A. M.: Właściwości betonu. Wydanie czwarte, Polski Cement, Kraków 2000.
14. Nowak-Michta A. Identyfikacja porowatości napowietrzonych betonów z dodatkiem popiołu lotnego. Konferencja Dni Betonu. Wisła 2008, str. 441-450.
15. Nowak-Michta A. Kompatybilność popiołów lotnych z domieszkami. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej Seria: Budownictwo* z. 112. Gliwice, 2007, str. 177-184.
16. ÖNORM B 4710-1:2002 „Beton - Teil 1: Festlegung, Herstellung, Verwendung und Konformitätsnachweis (Regeln zur Umsetzung der ÖNORM EN 206-1)“.
17. Ozyildirim C. and Sprinkel M. M.: Durability of concrete containing hollow plastic microspheres. *ACI Journal*, 79, Nr 4 July-August 1982, s. 307-311.
18. Petersson P. E. Freez-Thaw Durability of Concrete. E&FN SPON, 1997. 211-221.
19. Pigeon M., Pleau R. Durability of concrete in cold climates. E&FN SPON, 1995.
20. Pigeon M., Plante P., Plante M.: Air-Void Stability, Part I: Influence of Silica Fume and Other Parameters, *ACI Materials Journal*, V. 86, No. 5, Sept. -Oct. 1989, pp.482-490.
21. Plante P., Pigeon M., Saucier F. Air-Void Stability, Part II: Influence of Superplasticizers and cement. *ACI Materials Journal*, V. 86, No. 6, November December 1989, str. 581-589.
22. PN-B-06265:2004. Krajowe uzupełnienia PN-EN 206-1 Beton - Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.
23. PN-EN 206 - 1:2003. Beton. Część 1. Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.
24. PN-EN 480-11:1998. Domieszki do betonu, zaprawy i zaczynu. Metody badań. Oznaczanie charakterystyki porów powietrznych w stwardniałym betonie.
25. Rusin Z. Technologia betonów mrozoodpornych Polski Cement, Kraków 2002.
26. Sommer H. Ein neues Verfahren zur Erzielung der Frost-Tausalz-Bestandigkeit des Betons. *Zement und Beton*, 22, Nr 4, s. 124-129 (1977).
27. Szwabowski J.Z., Łaźniewska-Piekarczyk B. Znaczenie parametrów struktury porowatości samozagęszczalnego betonu odpornego na mróz. *Cement Wapno Beton* Nr 3/2008, str. 155-165.
28. Szwabowski J.Z., Łaźniewska-Piekarczyk B. Zwiększenie napowietrzenia mieszanki SCC pod wpływem działania superplastyfikatorów polikarboksyłanowych. *Cement Wapno Beton* Nr 4/2008, str. 205-215.
29. Wawrzeńczyk J. Diagnostyka mrozoodporności betonu cementowego. Politechnika Świętokrzyska, Kielce 2002.
30. Wawrzeńczyk J., Molendowska A., Juszcak T.: Wpływ charakterystyk porowatości na trwałość mrozową oraz wytrzymałość betonów napowietrzonych. *Ochrona przed korozją* Nr 5s/A/2008, s. 281-286.
31. Wymaganiach techniczne dla betonowych nawierzchni drogowych Etap III. IBDiM. Warszawa 2010.