

AGNIESZKA MOLENDOWSKA¹
JERZY WAWRZĘCZYK²

Kielce University of Technology

¹ e-mail: agam@tu.kielce.pl

² e-mail: zmsjw@tu.kielce.pl

FREEZE-THAW RESISTANCE OF AIR-ENTRAINED HIGH STRENGTH CONCRETE

MROZODPORNOŚĆ NAWIETRZONYCH BETONÓW WYSOKIEJ WYTRZYMAŁOŚCI

Abstract

The paper presents the programme of research aimed at finding a recipe for high strength self-compacting and freeze-thaw resistant concrete. The programme included batching five concrete mixtures with varied W/B ratios (0.28-0.36) and various contents of GGBS relative to the mass of cement (0-30% m.c.). The influence of W/B ratio and GGBS content on the strength, water absorption and freeze-thaw resistance of concrete was analysed. Since the combined action of various factors, i.e., a simultaneous use of superplasticizer, air entraining agent and slag, can impede the achievement of the air pore structure with desired parameters, an innovative method of concrete mixture air entrainment was applied. The method involves introducing into the mixture solid particles (microspheres) with specified sizes that remain unchanged and stable over time. It follows from the results that it is possible to design and produce high strength, self-compacting and freeze-thaw resistant concrete with the use of locally available materials.

Keywords: high strength concrete, self-compacting concrete, freeze-thaw resistance, air entrainment, microspheres

Streszczenie

W artykule przedstawiono program badań, którego celem było opracowanie receptury dla betonu wysokiej wytrzymałości charakteryzującego się samozagęszczalnością i mrozoodpornością. Program badań obejmował wykonanie pięciu betonów o zmiennym stosunku W/S (0.28-0.36) i z różną zawartością żużla w spoiwie w stosunku do masy cementu (0-30% m.c.). Analizowano wpływ stosunku W/S oraz zawartości żużla (GGBS) na wytrzymałość, nasiąkliwość i mrozoodporność betonów. Kombinacja różnych czynników, tj. jednoczesne stosowanie domieszki superplastyfikatora, napowietrzającej i żużla, często powoduje problemy z uzyskaniem pożądanych parametrów struktury porów powietrznych. Dlatego też zastosowano innowacyjną metodę napowietrzania mieszanki betonowej polegającą na wprowadzeniu stałych cząstek (mikrosfer) o określonych wymiarach, które nie zmieniają swoich wymiarów i są stabilne w czasie. Z przeprowadzonych badań wynika, że stosując lokalnie dostępne materiały, możliwe jest zaprojektowanie i wykonanie betonu o wysokiej wytrzymałości, charakteryzującego się samozagęszczalnością i odpornego na działanie mrozu.

Słowa kluczowe: beton wysokiej wytrzymałości, beton samozagęszczalny, mrozoodporność, napowietrzanie, mikrosfery

1. Introduction

New generation concrete, such as high strength concrete, is being more and more widely used. Its high strength depends on low W/B ratio and increased binder content. Mineral additives, e.g., ground granulated blast furnace slag, have to be used to improve the tightness of concrete and its resistance to chemical agents and to account for hydration heat and shrinkage. It is commonly known that

1. Wprowadzenie

Betony nowej generacji, w tym betony o wysokiej wytrzymałości, są coraz szerzej stosowane. Uzyskanie wysokiej wytrzymałości uzależnione jest od niskiego stosunku W/S, z czym związana jest duża zawartość spoiwa. Dlatego też ze względu na ciepło hydratacji i skurcz stosuje się dodatki mineralne, w tym mielony żużel wielkopiecowy, co poprawia szczelność i odporność na agresję chemiczną. W betonie z dodatkiem

proper freeze-thaw durability and scaling damage resistance are difficult to obtain for concrete with a GGBS addition. As in the case of other additions, the concrete has to be air entrained. However, the literature and own studies of the authors of this paper indicate air entrainment-related problems that may be encountered in concretes containing slag. Giergiczny et al. [1] found slag concrete mixtures to have worse parameters of pore structures because at a given air content, pores with larger diameters are formed – the \bar{L} factor increased by about 0.10 mm. Lower effectiveness of air entrainment in such concretes was also observed by Deja [2]. There are concerns about scaling resistance of such concretes. The resistance to scaling damage relies on the characteristics of the near surface layer of concrete being affected by W/B ratio, air entrainment, microcracks, sedimentation and carbonation.

Some standards constraint GGBS amounts in the context of freeze-thaw durability. For example, ACI requirements [3] set the addition of the slag at 50%. The national supplement, PN-EN 206-1:2003 [4], relates the amount of the slag dosage in XF4 exposure class to the class of CEM III: 50% for the 32.5R cement class, more than 50% for the 42.5R class and more than 80% for structures in service in seawater.

According to PN-EN 206, the additions, including that of the ground granulated blast furnace slag, can be substituted for Portland cement and considered in the water-to-cement ratio if its suitability is confirmed with the ECPC k factor or with the EPCC.

Air entrainment is often problematic due to the high flowability of concrete and introduction of higher amounts of air is necessary. Even though air entraining agents are used, the proper air pore structure in concrete is difficult to obtain. High range water reducers are used to increase the air pore size and distance between them [5, 6]. Pigeon et al. [7, 8] demonstrated that superplasticizers could be an important cause of lack of repeatability of air pore distribution. A substantial destabilization of the air void system (a significant increase of the air pore spacing factor) may take place without a visible change in the air content [7-9]. The pore structure in concrete is also affected by air entraining effect of superplasticizers [10]. The results from Borås tests for surface scaling performed by Petersson [11] show that concrete mixtures containing only air entraining addition are more resistant to damage than those containing superplasticizer in addition to air

żużla ze względu na karbonatyzację trudno jest uzyskać właściwą mrozoodporność i odporność na powierzchniowe łuszczenie, w tym przypadku konieczne jest napowietrzenie betonu. Jednak z analizy literatury i badań własnych wynika, że w przypadku stosowania dodatku żużla występują problemy z poprawnym napowietrzeniem. Giergiczny i inni [1] stwierdzili, że w mieszankach betonowych zawierających żużel obserwuje się pogorszenie parametrów struktury porów, gdyż przy danej zawartości powietrza powstają pory o większych średnicach – stwierdzono wzrost wskaźnika \bar{L} o około 0,10 mm. Pogorszenie efektywności napowietrzenia takich betonów zaobserwował również Deja [2]. W przypadku betonów wykonanych z dodatkiem GGBS występują problemy z uzyskaniem odporności na powierzchniowe łuszczenie. Odporność ta związana jest z charakterystyką przypowierzchniowej warstwy betonu i wpływ na nią mają: stosunek W/S, napowietrzenie, mikrorysy, sedymentacja, karbonatyzacja.

Niektóre normy ograniczają ilość dodatku żużla w kontekście mrozoodporności. Zalecenia ACI [3] z uwagi na mrozoodporność ograniczają dodatek żużla do 50%. Krajowe uzupełnienia do normy PN-EN 206-1:2003 [4] uzależniają ilość dodawanego żużla w klasie ekspozycji XF4 od klasy cementu CEM III: dla klasy 32,5R do 50%, przy 42,5R powyżej 50%, powyżej 80% dla budowli eksploatowanych w wodzie morskiej.

Zgodnie z normą PN-EN 206 dodatki, w tym mielnego granulowanego żużla wielkopieczowego, można uwzględnić w składzie betonu, w ramach zawartości cementu oraz wartości współczynnika woda/cement, jeśli ustalono jego przydatność w oparciu o koncepcję współczynnika k lub koncepcję równoważnych właściwości użytkowych EPCC.

Wiele problemów z napowietrzeniem betonu wynika z jego dużej ciekłości. Konieczne jest zazwyczaj wprowadzenie większej ilości powietrza. Mimo zastosowania środków napowietrzających często nie uzyskuje się właściwej struktury porów powietrznych w betonach. Zastosowanie domieszki upłynniającej powoduje zwiększenie wymiarów pęcherzyków powietrznych w konsekwencji większe odległości pomiędzy nimi [5, 6]. Wyniki badań Pigeona i in. [7, 8] wykazują, że superplastyfikatory mogą być przyczyną braku powtarzalności w uzyskaniu tego samego rozmieszczenia porów powietrznych. Znaczna destabilizacja systemu pustek powietrznych (istotny wzrost wskaźnika rozmieszczenia porów powietrznych) może wystąpić bez widocznej zmiany w zawartości powietrza [7-9]. Na strukturę porów w betonie wpływ ma również napowietrzające działanie superplastyfikatora [10]. Badania odporności

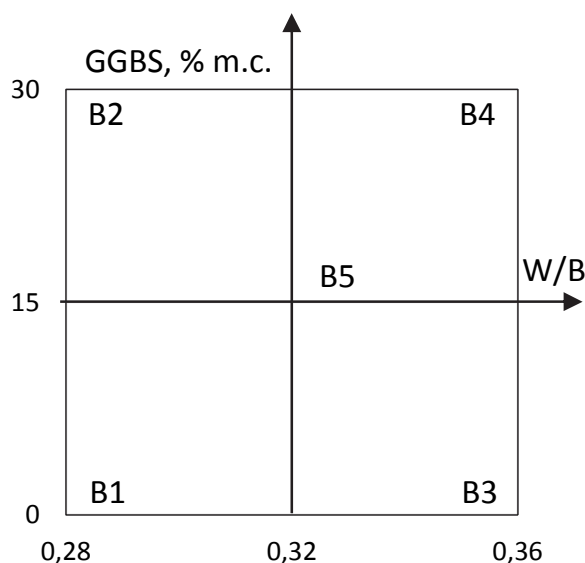
entraining agent. The selection of a proper cement-superplasticizer-air entraining agent system should be verified experimentally.

Various factors combined, i.e., the use of plasticizing admixtures, air entraining agents and slag in one mixture are often responsible for problems with obtaining desirable parameters of the air pore structure. The microsphere-based air entrainment appears to be a good solution to this problem. In this innovative method, solid particles (microspheres) of suitable size are introduced into the concrete mixture. Unlike the air resulting from the effect of chemical admixtures, microspheres do not change their sizes and remain stable over time.

This paper presents the programme of research aimed at developing the recipe for high strength self-compacting and freeze-thaw resistant concrete.

2. Materials and methods

The tests were focused on determining the effect of W/B ratio and GGBS content in the binder on the strength, water absorption and freeze-thaw resistance of self-compacting high strength concrete. Five concretes were produced at variable W/B ratio (0.28-0.36) and with various slag contents in the binder by mass of cement (0-30% m.c.). All specimens were air entrained with polymer microspheres D 40 μm . The same microsphere content of 0.7% by mass of binder was used in all concretes. The compositions were based on the 5-point experiment design with two factors X1 – W/B ratio; X2 – slag dosage, % m.c. The coded values of the variables were as follows: $X1 = (W/B - 0.32)/0.04$; $X2 = (GGBS - 15)/15$.



betonów na powierzchniowe łuszczenie wykonane metodą Borås przez Peterssona [11] pokazują, że betony wykonane tylko z domieszką napowietrzającą są bardziej odporne na uszkodzenia niż w przypadku, gdy zawierają równocześnie plastyfikator. Dobór właściwego stosunku cement-superplastyfikator-domieszka napowietrzająca powinien być sprawdzony doświadczalnie.

Kombinacja różnych czynników, tj. jednoczesne stosowanie domieszek plastyfikujących, napowietrzających i żużła, często powoduje problemy z uzyskaniem pożądanych parametrów struktury porów powietrznych. Dobrym rozwiązaniem jest zastosowanie napowietrzenia za pomocą mikrosfer. Ta innowacyjna metoda pozwala wyeliminować problemy z poprawnym napowietrzeniem, ponieważ do mieszanki betonowej wprowadzane są stałe cząstki (mikrosfery) o odpowiednich wymiarach. Mikrosfery, w odróżnieniu od powietrza powstałego w wyniku działania domieszek chemicznych, nie zmieniają swoich wymiarów i są stabilne w czasie.

W artykule przedstawiono program badań, którego celem było opracowanie receptury dla betonu wysokiej wytrzymałości, charakteryzującego się samozagęszczalnością i mrozoodpornością.

2. Materiały i metody

Celem badań było określenie wpływu stosunku W/S oraz zawartości żużła (GGBS) w spoiwie na wytrzymałość, nasiąkliwość i mrozoodporność betonów samozagęszczalnych o wysokiej wytrzymałości. Program badań obejmował wykonanie pięciu betonów o zmiennym stosunku W/S (0,28-0,36) i z różną zawartością żużła w spoiwie w stosunku do masy cementu (0-30% m.c.). Wszystkie próbki napowietrzono za pomocą mikrosfer polimerowych D 40 μm . Dla wszystkich betonów zastosowano jednakową zawartość mikrosfer wynoszącą 0,7% masy spoiwa. Składy betonów przyjęto według planu pięciopunktowego, gdzie czynnikami badanymi były: X1 – stosunek wodno-spoiwowy W/S; X2 – dodatek żużła w % m.c. Wartości kodowe zmiennych: $X1 = (W/S - 0,32)/0,04$; $X2 = (GGBS - 15)/15$.

Fig. 1. Layout of experiment design
Rys. 1. Plan eksperymentu

Figure 1 shows the 5-point experiment design and Table 1 compiles the coded and true values of the factors under analysis.

Plan pięciopunktowy eksperymentu pokazano na rysunku 1, a wartości kodowe i rzeczywiste czynników badanych w tabeli 1.

Table 1. Coded and true values of the factors

Tabela 1. Wartości kodowe i rzeczywiste czynników badanych

Point	X1	X2	W/B	GGBS % m.c.
B1	-1	-1	0.28	0
B2	-1	1	0.28	30
B3	1	-1	0.36	0
B4	1	1	0.36	30
B5	0	0	0.32	15

The relationship is defined by a regression function in the form of incomplete polynomial of second degree. Using the information from the experiment, we can determine relationships between factors X1, X2 and a given characteristic of the concrete, as represented on the contour diagrams.

The following ingredients were used to make concrete mixtures:

- cement CEM II/A-LL 42.5 N (C),
- ground granulated blast furnace slag (GGBS),
- silica fume (SF),
- natural sand 0÷2 mm (S),
- coarse aggregate – diabase 4÷8, 8÷16 mm (D),
- polymer microspheres D 40 μm (MSP),
- superplasticizer (SPL).

The scope of fresh concrete testing included the slump flow test and the density test. The flow diameter ranged from 60 cm to 73 cm.

The tests on hardened concrete included determining the values of compressive strength (f'_{cm}), water absorption (n_w), freeze-thaw resistance (the resistance to internal cracking and scaling), and porosity characteristics (A , A_{300} , \bar{L}).

The specimens were cured in water for seven days, after which they were dried in air. For strength, absorption and freeze-thaw resistance tests, 10 cm cubes were used. The compressive strength of concrete was determined according to PN-EN 12390-3:2011 [12], and the water absorption of concrete was determined according to PN-88/B-06250 [13].

Evaluation of the air pore structure was an important element of the testing programme. The polished surfaces were prepared and the porosity characteristics were determined by chord-length counting according to the procedures set forth in PN-EN 480-11:1998 [14]. Photograph 1 shows a specimen prepared for testing, with a number of

Zależność jest opisana funkcją regresji w postaci wielomianu niepełnego drugiego stopnia. Na podstawie eksperymentu możliwe jest wyznaczenie zależności pomiędzy badanymi czynnikami X1, X2 a daną cechą betonu w postaci wykresów warstwicznych.

Do wykonania betonów zastosowano następujące składniki:

- cement CEM II/A-LL 42.5 N (C),
- żużel wielkopiecowy (GGBS),
- pył krzemionkowy (SF),
- piasek naturalny 0÷2 mm (S),
- kruszywo grube – diabaz 4÷8, 8÷16 mm (D),
- mikrosfery polimerowe D 40 μm (MSP),
- superplastyfikator (SPL).

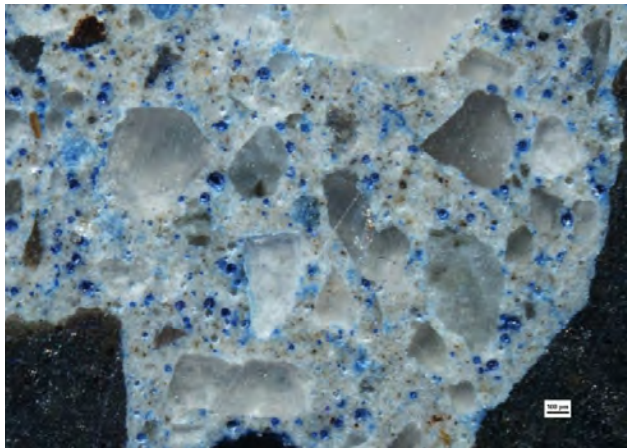
Zakres badań dla mieszanki betonowej obejmował wyznaczenie konsystencji metodą rozplywu oraz gęstości objętościowej. Średnica rozplywu badanych mieszanek wynosiła od 60 cm do 73 cm.

Zakres badań stwardniałego betonu obejmował określenie: wytrzymałości na ściskanie (f'_{cm}), nasiąkliwości (n_w), mrozoodporności – odporność na wewnętrzne pękanie oraz powierzchniowe łuszczenie, charakterystyk porowatości (A , A_{300} , \bar{L}).

Próbki przesiadki siedem dni dojrzewały w wodzie, poczym przez 21 dni znajdowały się w warunkach powietrzno-suchych. Do badań wytrzymałości, nasiąkliwości i mrozoodporności stosowano kostki 10 x 10 x 10 cm. Oznaczenie wytrzymałości betonu na ściskanie wykonano zgodnie z PN-EN 12390-3:2011 [12], a nasiąkliwości według normy PN-88/B-06250 [13].

Istotnym elementem programu badań była ocena struktury porów powietrznych betonu. Przygotowanie zglądów oraz oznaczenie charakterystyk porowatości metodą zliczania cięciw wykonano według PN-EN 480-11:1998 [14]. Na fotografii 1 przedstawiono wygląd próbki przygotowanej do badań. Widoczna

pores (microspheres) coloured in blue. The automatic image analysis was performed with the use of a setup (Phot. 2) consisting of a stereo microscope, a CCD camera and a measuring table.



Phot. 1. Specimen prepared for air pore structure testing
 Fot. 1. Próbką przygotowana do badania struktury porów powietrznych

The freeze-thaw resistance of concrete was studied in two stages: first stage involved subjecting the specimens-cubes to 50 freeze-thaw cycles in air (normal standard method) to PN-88/B-06250 [13] after which the specimens were moved to the CDF chamber and subjected to 56 freeze-thaw cycles (cube test) to PKN-CEN/TS 12390-9:2007 [15]. The specimens, placed in steel containers (two containers with two specimens each) on spacers, are completely immersed in water. The upper surface of the specimen should be perpendicular to the bottom of the container. The test temperature range is from $+20^{\circ}\text{C}$ ($\pm 2^{\circ}\text{C}$) to -15°C ($\pm 2^{\circ}\text{C}$). Fifty six cycles of freezing and thawing are performed. The freezing phase lasts 16 hours and the thawing phase lasts 8 hours. After 7, 14, 28 and 42 cycles, a visual evaluation during freezing is performed and the scaled material is collected to be dried at 110 ($\pm 10^{\circ}\text{C}$) and then weighed with accuracy up to 0.1g . The final result is the percentage mass loss after 56 freeze-thaw cycles. The temperature-recording gauge was fixed inside the specimen. The containers with the specimens were placed in the chamber bath filled with glycol. Temperature variations in the specimens are controlled by cooling and heating the glycol.

Frost damage degree was evaluated based on the visual inspection of the specimens, changes in their mass (dm), the amount of scaled material (dm_{56})

jest duża ilość porów (mikrosfer), które zostały zabarwione na niebiesko. Automatyczną analizę obrazu przeprowadzono z wykorzystaniem zestawu (fot. 2), w skład którego wchodził mikroskop stereoskopowy, kamera CCD oraz stół pomiarowy.



Phot. 2. The setup for air pore structure testing
 Fot. 2. Zestaw do badania struktury porów powietrznych

Program badania mrozoodporności betonu składał się z dwóch etapów: najpierw wykonano 50 cykli zamrażania-rozmrażania próbek-kostek w powietrzu metodą zwykłą wg normy PN-88/B-06250 [13], a następnie próbki przeniesiono do komory CDF i wykonano 56 cykli zamrażania-rozmrażania metodą kostkową (cube test) wg PKN-CEN/TS 12390-9:2007 [15]. Próbki umieszczono w metalowych pojemnikach na podstawkach (dwa pojemniki po dwie próbki), a następnie zalano wodą, tak aby próbki były całkowicie zanurzone. Próbki umieszcza się w pojemniku, tak aby wierzchnia powierzchnia próbki była prostopadła do podstawy pojemnika. Zakres temperatur podczas cykli zamrażania-rozmrażania wynosi od $+20^{\circ}\text{C}$ ($\pm 2^{\circ}\text{C}$) do -15°C ($\pm 2^{\circ}\text{C}$). Przeprowadza się 56 cykli zamrażania-rozmrażania. Zamrażanie trwa 16 godzin a odmrażanie 8 godzin. Po 7, 14, 28 i 42 cyklach w czasie rozmrażania przeprowadza się ocenę wizualną, oraz zbiera się złuszczonego materiału. Złuszczonego materiału suszy się w temperaturze 110°C ($\pm 10^{\circ}\text{C}$), a następnie waży z dokładnością do $0,1\text{g}$. Za wynik końcowy przyjmuje się procentowy ubytek masy po 56 cyklach zamrażania-rozmrażania. W próbce umieszczono sondę, aby rejestrować zmiany temperatury wewnątrz betonu. Pojemniki z próbkami umieszczono w wannie komory wypełnionej glikolem. Zmianę temperatury w próbkach kontroluje się poprzez schładzanie i podgrzewanie glikolu.

Ocenę stopnia zniszczenia mrozowego przeprowadzono na podstawie oceny wizualnej próbek, zmia-

and the reduction in compressive strength (ΔR) of the specimens subjected to freezing relative to the reference specimens.

The compositions and selected properties of the concrete are summarised in Table 2.

Table 2. Composition and selected properties of concrete mixtures

Tabela 2. Skład i wybrane właściwości mieszanek betonowych

Series	W/B	C kg/m ³	SF kg/m ³	GGBS kg/m ³	S kg/m ³	D 4/8 kg/m ³	D 8/16 kg/m ³	MSP kg/m ³	SPL kg/m ³	gb kg/m ³	Slump flow cm
B1	0.28	567	28	0	697	404	494	4.2	19.5	2381	63.5
B2	0.28	435	22	131	689	399	488	4.1	17.6	2351	73.0
B3	0.36	471	24	0	679	433	529	3.5	8.5	2327	63.5
B4	0.37	366	18	110	677	432	528	3.5	6.7	2322	73.0
B5	0.33	447	22	67	660	396	594	3.8	12.3	2382	60.0

3. Results and discussion

The results from hardened concrete tests are shown in Tables 3 and 4 and in Fig. 2. Compressive strength tests were performed after 2, 28 and 90 days of curing. The 28-day compressive strength ranges from 76.4 to 90.9 MPa, which corresponds to strength class C55/67 – C60/75. The 2-day compressive strength indicates that the addition of the slag reduces the strength at an early stage of curing, and that the influence of the slag on the strength of concrete is more pronounced at higher W/B ratios (Fig. 2c). The results at 28 and 90 days show a positive effect of the slag on the strength of concrete (Fig. 2d and Fig. 2e).

The water absorption values are within the range 3.69-5.02%. A significant influence of W/B ratio on absorption values was observed (Fig. 2b). The absorption of concrete increased with increasing W/B ratio. The addition of slag does not affect water absorption levels noticeably.

Table 3. Results for hardened concrete

Tabela 3. Wyniki badań stwardniałych betonów

Series	fc 2 MPa	fc 28 MPa	fc 90 MPa	nw %	ΔR %	dm g	dm 56 g	dm 56 %
B1	50.3	85.9	96.5	3.69	4.5	1.75	3.02	0.06
B2	49.1	90.9	100.0	3.87	10.8	2.75	2.06	0.04
B3	48.0	76.4	83.4	4.86	2.6	3.00	2.93	0.06
B4	35.0	78.7	88.0	5.02	7.1	3.75	2.96	0.06
B5	49.3	88.3	97.0	4.15	4.5	3.25	2.81	0.06

ny masy próbek (dm), ilości złuszczonego materiału (dm₅₆) oraz spadku wytrzymałości na ściskanie (ΔR) próbek zamrażanych względem próbek świadków.

Skład i wybrane właściwości betonów przedstawiono w tabeli 2.

3. Wyniki badań i ich analiza

Wyniki badań stwardniałych betonów przedstawiono w tabelach 3 i 4 oraz na rysunku 2. Badanie wytrzymałości na ściskanie przeprowadzono po 2, 28 i 90 dniach dojrzewania. Wytrzymałość na ściskanie betonów po 28 dniach dojrzewania wynosi od 76,4 MPa do 90,9 MPa, co odpowiada klasie wytrzymałości C55/67-C60/75. Z badania wytrzymałości na ściskanie po dwóch dniach dojrzewania wynika, że dodatek żużla powoduje obniżenie wytrzymałości w początkowym okresie dojrzewania, przy czym wpływ żużla na wytrzymałość jest wyraźniej widoczny przy wyższym stosunku W/S (rys. 2c). Badanie wytrzymałości na ściskanie po 28 i 90 dniach pokazuje korzystny wpływ żużla na wytrzymałość betonu (rys. 2d i 2e).

Uzyskane nasiąkliwości mieszczą się w zakresie 3.69-5.02%. Zaobserwowano znaczący wpływ stosunku W/S na nasiąkliwość badanych betonów (rys. 2b). Wraz ze wzrostem stosunku W/S nasiąkliwość wzrasta, natomiast dodatek żużla nie wpływa znacząco na nasiąkliwość.

Table 4. Results from air pore structure tests

Tabela 4. Wyniki badań struktury porów powietrznych

Series	A %	A ₃₀₀ %	α mm ⁻¹	\bar{L} mm
B1	2.83	1.40	92.41	0.078
B2	5.37	1.68	49.28	0.110
B3	4.40	1.36	59.66	0.096
B4	5.97	3.62	82.88	0.060
B5	3.30	1.39	55.92	0.119

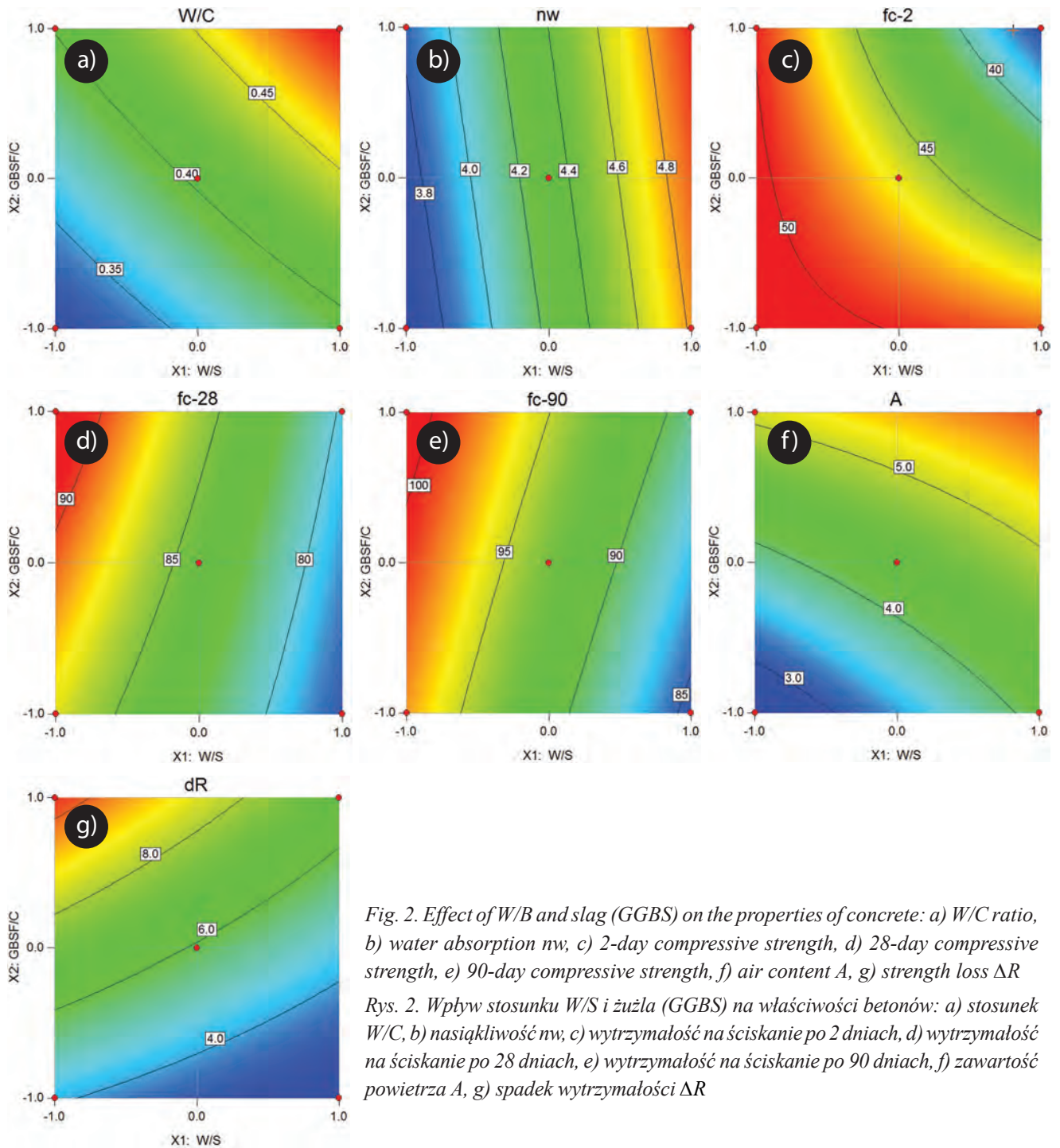


Fig. 2. Effect of W/B and slag (GGBS) on the properties of concrete: a) W/C ratio, b) water absorption nw, c) 2-day compressive strength, d) 28-day compressive strength, e) 90-day compressive strength, f) air content A, g) strength loss ΔR

Rys. 2. Wpływ stosunku W/S i żużla (GGBS) na właściwości betonów: a) stosunek W/C, b) nasiąkliwość nw, c) wytrzymałość na ściskanie po 2 dniach, d) wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach, e) wytrzymałość na ściskanie po 90 dniach, f) zawartość powietrza A, g) spadek wytrzymałości ΔR

Table 3 summarizes the results from the air pore structure test. The use of microspheres reduced the pore spacing factor \bar{L} to the level of less than 0.20 mm. The \bar{L} values were from 0.060 mm to 0.119 mm. When air bubbles are very small, the micropore content $A_{300} > 1.5\%$ is not required. The micropore content A_{300} in the concrete under analysis was from 1.36 to 3.62%. The air content A was from 2.83 to 5.97%.

Wyniki badania struktury porów powietrznych przedstawiono w tabeli 3. Zastosowanie mikrosfer pozwoliło uzyskać wskaźnik rozmieszczenia porów \bar{L} znacznie niższy od 0,20 mm. Wartości wskaźnika \bar{L} wyniosły od 0,060 mm do 0,119 mm. W przypadku bardzo drobnych pęcherzyków powietrznych nie jest konieczne uzyskanie zawartości mikroporów $A_{300} > 1,5\%$. Zawartość mikroporów A_{300} w badanych betonach wyniosła od 1,36% do 3,62%. Zawartość powietrza A wynosi od 2,83% do 5,97%.

The mass changes during the 106 freeze-thaw cycles are illustrated in Figure 3. After 50 cycles in air the specimens did not show any significant mass variations or surface damage. Freezing the specimens in water did not affect the mass of the specimens. No significant scaling was observed. After freezing, the specimens were examined for mass reduction relative to the reference specimens. The reduction ranged from 2.6% to 10.8%. Neither the W/B ratio nor the slag addition had significant effect on the reduction in the strength of concrete.

Przebieg zmian masy podczas 106 cykli zamrażania-rozmrażania przedstawiono na rysunku 3. Próbkę po 50 cyklach zamrażania-rozmrażania w powietrzu nie wykazały istotnych zmian masy ani powierzchniowych uszkodzeń. Zamrażanie próbek w wodzie również nie spowodowało istotnych zmian masy. Próbkę nie wykazały także istotnego łuszczenia powierzchni. Po zakończeniu zamrażania oceniono spadek wytrzymałości próbek zamrażanych w stosunku do próbek świadków. Spadek wytrzymałości wyniósł od 2,6% do 10,8%. Stosunek W/S i dodatek żużla nie wpłynęły znacząco na spadek wytrzymałości.

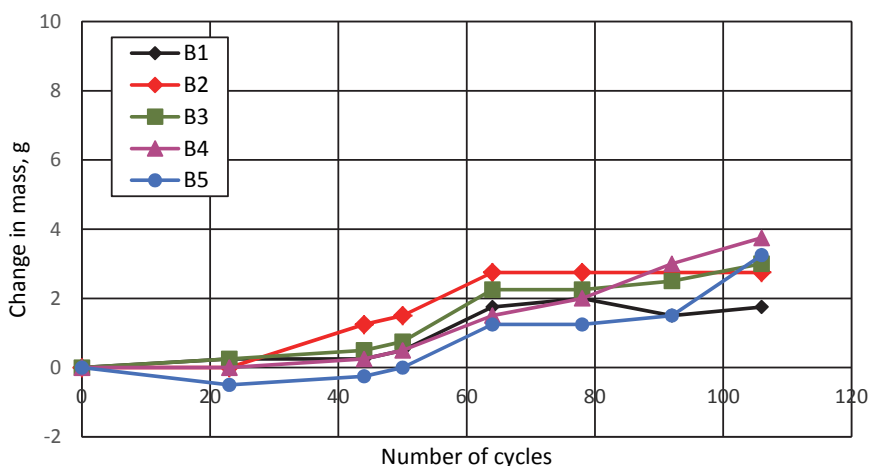


Fig. 3. Changes in specimens subjected to freezing – 50 cycles in air followed by 56 cycles by cube method

Rys. 3. Zmiana masy próbek zamrażanych – 50 cykli w powietrzu, a następnie 56 cykli metodą kostkową

4. Conclusions

Analysis of the results obtained from the tests performed on self-compacting high strength concrete made with the binder containing GGBS at 0÷30% m.c. and polymer microspheres-based air-entrainment has demonstrated that:

1. With the use of locally available materials, it is possible to design and make self-compacting concrete of high strength (class C55/67-C60/75), resistant to cyclic freezing and thawing.
2. Despite differences between the results obtained for compressive strength and water absorption, all concretes showed freeze-thaw durability. The deciding factor was microspheres-based air entrainment.
3. The addition of slag contributes to the reduction in compressive strength at the early period of curing and to the increase in 28- and 90-day strength. It has no significant effect on the water absorption

4. Wnioski

Na podstawie analizy uzyskanych wyników badań betonów samozagęszczalnych o wysokiej wytrzymałości, wykonanych ze spoiwem zawierającym żużel w ilości 0÷30% m.c., napowietrzonych za pomocą mikrosfer polimerowych, sformułowano następujące wnioski:

1. Stosując lokalnie dostępne materiały, możliwe jest zaprojektowanie i wykonanie betonu samozagęszczalnego o wysokiej wytrzymałości (klasa wytrzymałości C55/67-C60/75) odpornego na działanie mrozu.
2. Mimo różnic w uzyskanych wynikach wytrzymałości na ściskanie i nasiąkliwości wszystkie betony były odporne na działanie mrozu. Czynnikiem decydującym było odpowiednie napowietrzenie betonu za pomocą mikrosfer.
3. Zastosowanie dodatku żużla wpływa na obniżenie wytrzymałości na ściskanie w początkowym okresie dojrzewania i wzrost wytrzymałości 28- i 90-dniowej. Nie wpływa natomiast znacząco na

- and the freeze-thaw durability of concrete air entrained by the addition of microspheres.
4. The strength of concrete decreases and the water absorption increases with increasing W/B ratio. No significant effect of W/B ratio on freeze-thaw resistance was observed in microspheres-based air entrained concrete. The W/B ratio of the concrete was from 0.28 to 0.36.
 5. The addition of microspheres resulted in obtaining the pore spacing factor \bar{L} of much less than 0.20 mm, that is, from 0.060 mm to 0.119 mm.
 6. In the case of minute air bubbles (microspheres), it is not necessary to obtain micropore content of $A_{300} > 1.5\%$. The micropore A_{300} content in the concrete under analysis ranged from 1.36% to 3.62%.
- nasiąkliwość oraz mrozoodporność betonu napowietrzonego za pomocą mikrosfer.
4. Wraz ze wzrostem stosunku W/S wytrzymałość betonu maleje a nasiąkliwość wzrasta. Nie zaobserwowano znaczącego wpływu stosunku W/S na mrozoodporność betonów napowietrzonych za pomocą mikrosfer. Stosunek W/S badanych betonów wynosił od 0,28 do 0,36.
 5. Zastosowanie mikrosfer pozwoliło na uzyskanie wskaźnika rozmieszczenia porów \bar{L} znacznie niższego od 0,20 mm. Wartości wskaźnika \bar{L} wyniosły od 0,060 mm do 0,119 mm.
 6. W przypadku bardzo drobnych pęcherzyków powietrznych (mikrosfer) nie jest konieczne uzyskanie zawartości mikroporów $A_{300} > 1,5\%$. Zawartość mikroporów A_{300} w badanych betonach wyniosła od 1,36% do 3,62%.

References

- [1] Giergiczny Z., Glinicki M.A., Sokołowski M., Zieliński M.: *Air void system and frost-salt scaling of concrete containing slag-blended cement*. Construction and Building Materials 23, 2009, pp. 2451–2456.
- [2] Deja J.: *Freezing and de-icing salt resistance of blast furnace slag concretes*, Cement and Concrete Composites 25, 2003, pp. 357-361.
- [3] ACI Committee 226: *Ground granulated blast-furnace slag as a cementitious constituent in concrete*. ACI Materials Journal, Vol. 84, No. 4, 1987, pp. 327-342.
- [4] PN-B-06265:2004. Polish National Supplement: PN-EN 206-1:2003 Concrete – Specification, performance, production and conformity.
- [5] Neville A.M.: *Właściwości betonu*. Wydanie czwarte, Polski Cement, Kraków 2000.
- [6] Rusin Z.: *Technologia betonów mrozoodpornych*. Polski Cement, Kraków 2002.
- [7] 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, September-October 1989, pp. 482-490.
- [8] 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, pp. 581-589.
- [9] Saucier F., Pigeon M., Plante P.: *Air-Void Stability, Part III: Fields Tests of Superplasticized Concretes*. ACI Materials Journal, V. 87, No. 1, Jan.-Feb. 1990, pp. 3-11.
- [10] Szwabowski J.Z., Łązniewska-Piekarczyk B.: *The increase of air content in scc mixes under the influence of carboxylate superplasticizer*. Cement Wapno Beton Nr 4/2008, pp. 205-215.
- [11] Petersson P.E.: *Freeze-Thaw Durability of Concrete*. E&FN SPON, 1997, pp. 211-221.
- [12] PN-EN 12390-3:2011 *Badania betonu – Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań/Testing hardened concrete – Part 3: Compressive strength of test specimens*.
- [13] PN-88/B-06250 *Concrete Zwykły/Normal Concrete (in Polish)*.
- [14] PN-EN 480-11:1998 *Domieszki do betonu, zaprawy i zaczynu. Metody badań. Oznaczanie charakterystyki porów powietrznych w stwardniałym betonie/Admixtures for concrete, mortar and grout – Test methods – Part 11: Determination of air void characteristics in hardened concrete*.
- [15] PKN-CEN/TS 12390-9:2007 *Testing hardened concrete – Part 9: Freeze-thaw resistance – Scaling*.