

JERZY WAWRZEŃCZYK¹
AGNIESZKA MOLENDOWSKA²
ADAM KŁAK³

Kielce University of Technology
Faculty of Civil Engineering and Architecture

¹ e-mail: zmsjw@tu.kielce.pl

² e-mail: agam@tu.kielce.pl

³ e-mail: adamklak@tu.kielce.pl

RELATIONSHIP BETWEEN POROSITY CHARACTERISTICS AND CONCRETE FROST DURABILITY IN BRIDGES

Abstract

Current requirements for concrete mix design for bridges, including the acceptable absorption value of $n_w \leq 4\%$ are being widely discussed. This paper presents the results of the research conducted on concrete with granite aggregate content. The research involved the analysis of relationship between strength, absorption, permeability, porosity structure and the freeze-thaw resistance of air entrained and non-air entrained concretes with variable W/C ratios.

Keywords: concrete, freeze-thaw resistance, air entrainment, polymer microspheres.

1. Introduction

The scale of repairs performed on the existing bridges and the construction output for new bridges have increased over the last several years. Certain limiting values for materials have been introduced in relation to concretes for bridges and new requirements have been added concerning concrete absorption, permeability and frost resistance. Currently, the following requirements are in force: cement type CEM I for bridges, coarse volcanic rock aggregate, absorption that does not exceed 4%, water permeability of not less than W8, and frost resistance of F150.

The new concrete standard PN-EN 206-1:2003 categorizes exposure classes related to environmental actions. Concrete slabs, as the elements exposed to significant direct attack of water and de-icing agents, are assigned to exposure class XF4. The limiting values included in this class are the following:

- max. W/C ratio = 0.45,
- minimum concrete strength class C 30/37,
- minimum cement content 340 kg/m³,
- minimum air content 4%.

These requirements have stirred up controversy. Glinicki [1] and Biliszczuk [2] are not the only authors who point out that absorption has been given

too much importance. They proposed a change with respect to maximum absorption limit from 4% to 5%. Wawrzeńczyk [3] expressed a similar opinion. Concrete mix designers and specifiers have to be aware that concrete B30 will not have an absorption rate lower than 4%. Considering the common today use of de-icing agents, frost resistance-related requirements should be made more restrictive by adding an immersion test in salt solutions [2].

Concrete air entrainment seems to be indispensable to the freeze-thaw resistance of concrete bridges exposed to water and de-icing salts action, which has not been formulated as a strict requirement in the relevant directives. PN-EN 206-1:2003 prescribes only the minimum air content value with other porosity parameters left unspecified. Meeting the air content requirement will not suffice to ensure concrete frost durability. National complementary standards to EN 206-1 in other European countries (Austria, Denmark) provide, alongside the minimum air content value, the requirements concerning minimum A_{300} pore content and maximum spacing factor \bar{L} [4]. Some proposals as for the air content in the concrete mix and the air pore structure parameters are included in “Technical Requirements for Concrete Pavements”

now in preparation [5]. Average and minimum air content values are proposed separately for concrete with air entraining admixtures and separately for concrete mixes with air entraining admixtures and plasticisers/superplasticising admixtures. The content of pores that are less than 300 μm in diameter (A_{300}) should be greater than 1.5% and the spacing factor \bar{L} should not exceed 0.20 mm.

This paper presents the results of tests performed on concrete samples with granite aggregate. The tests helped analyse the relationship between strength, absorption, permeability, porosity structure and frost resistance in air entrained and non-air entrained concretes with variable W/C ratios.

2. Methodology

The aim of the author's own research was to determine how the W/C ratio and air entrainment affect physical properties, porosity structure and frost durability of concrete for bridges. The tests were performed on concrete mixtures with W/C = 0.36÷0.55 made with granite aggregate, traditional air entraining admixture and polymer microspheres.

For that purpose 11 concrete samples with various W/C ratios were prepared, including 4 non-air entrained samples, 3 samples air entrained in a traditional manner (AEA) and 4 samples air entrained with polymer microspheres.

The following constituents were used to prepare the concrete samples:

- cement CEM I 42,5N HSR NA – WARTA,
- natural sand 0 ÷ 2 mm,
- coarse aggregate – granite in fraction 4 ÷ 8, 8 ÷ 16 mm,
- plasticiser (PL),
- air entraining admixture ($\acute{S}N$),
- polymer microspheres (MS),

The plan of this research was to measure compressive strength f'_{cm} , mass absorption n_w , chloride ions permeability Q , porosity characteristics (A , A_{300} , \bar{L}), the degree of frost durability F150 (Δm , ΔR) to PN-88/B-06250, and resistance to scaling of the specimens frozen in a 3% NaCl solution (dm_{56}). The Boras method was used.

Concrete's compressive strength, absorption and frost resistance were tested on 10x10x10 cm cubes in accordance with PN-88/B-06250. The resistance to scaling was measured on moulded specimens 15x15x5 cm, frozen in a 3% NaCl solution and prepared to [6]. Microsections were prepared and porosity characteristics were estimated from the cumulative length of

chord intercepts in compliance with PN-EN 480-11 [7]. The set composed of a Nikon SMZ 800 microscope, a CCD camera with table (Prior) was used for automatic image analysis.

Table 1. Physico-chemical analysis of portland cement CEM I 42.5N HSR NA

Parameter	Unit	Results
Water absorption	%	26.0
Setting time	min	205
Compressive strength, - 2 days - 28 days	MPa	24.4 50.7
Flexural strength, - 2 days - 28 days	MPa	4.5 7.9
Density	g/cm ³	3.17
Blaine	cm ² /g	3229
Roasting loss	%	0.8
Insoluble parts	%	0.31
SiO ₂	%	21.94
Al ₂ O ₃	%	3.79
Fe ₂ O ₃	%	4.38
CaO	%	64.64
SO ₃	%	2.53
Na ₂ O _{eq}	%	0.37

The composition and selected concrete properties are collated in Table 2.

Table 2. Composition and selected properties of concrete mixes

Seria	W/C	C kg	K kg	MS % m.c.	PL % m.c.	$\acute{S}N$ % m.c.	ρ_b kg/m ³
B1	0.54	331	1811	–	0.33	–	2322
B2	0.47	360	1815	–	0.58	–	2346
B3	0.42	392	1817	–	1.22	–	2374
B4	0.39	419	1840	–	0.79	–	2422
M1	0.55	338	1736	0.60	0.27	–	2262
M2	0.49	361	1717	0.60	0.18	–	2256
M3	0.44	386	1687	0.60	0.55	–	2242
M4	0.50	348	1812	0.40	0.51	–	2334
N1	0.47	341	1723	–	0.53	0.35	2223
N2	0.41	380	1757	–	0.54	0.18	2291
N3	0.36	423	1785	–	0.92	0.19	2360

3. Test results and discussion

Table 3 presents the test results for the hardened concretes in the range of concrete strengths from C 25/30 to C 50/60. Three of all the concrete samples observed had absorption value n_w of not more than 4%.

Weight absorption of the concretes was in the range of 3.93÷6.19%. The results show a relatively good correlation between the W/C ratio and the concrete compressive strength, absorption and permeability.

Table 3. Results of basic physical properties research.

Seria	f'_{cm} MPa	n_w %	Q Coulomb
B1	51.8	5.90	6059
B2	65.0	5.16	4399
B3	81.1	4.00	3227
B4	79.7	3.99	2751
M1	43.0	6.19	5432
M2	42.7	6.13	6252
M3	57.8	5.11	4390
M4	55.6	5.27	3971
N1	47.4	5.36	6134
N2	61.4	4.38	4476
N3	76.9	3.93	3178

Table 4. Results of freeze thaw resistance and air void structure research

Seria	PN-88/B-06250		Boras dm_{56} g/m ²	A %	A_{300} %	L mm
	Δm 150 g	ΔR 150 %				
B1	8.4	21.9	3663*	–	–	–
B2	12.6	30.5	6432**	–	–	–
B3	9.6	19.6	4647**	–	–	–
B4	9.4	15.7	1556	–	–	–
M1	2.8	0.8	69	5.23	1.98	0.162
M2	2.5	2.8	32	5.79	2.51	0.147
M3	-1.5	0	37	4.9	1.48	0.176
M4	0.8	5.6	90	3.22	0.96	0.221
N1	0.3	4.7	32	6.62	3.38	0.11
N2	0	-0.7	97	5.84	3.32	0.122
N3	0.5	-0.3	35	5.98	1.93	0.225

*the tests ended after 14 cycles. **the tests ended after 28 cycles

The class C50/60 concrete has the absorption not greater than 4% (Fig. 1) but this has no relation to the concrete recommended for bridges B30, B37. Absorption capacity depends on porosity and the cement paste volume, that is, the W/C ratio and cement content. Air entrainment may only reduce the absorption value to some extent.

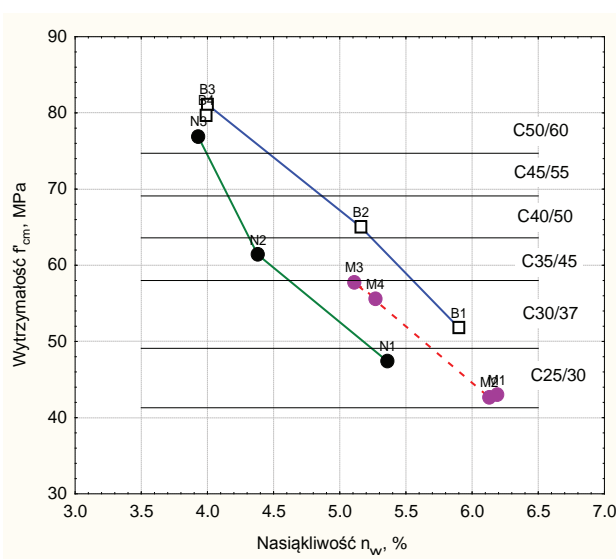


Fig. 1. Correlation between absorption and compressive strength of the tested concrete

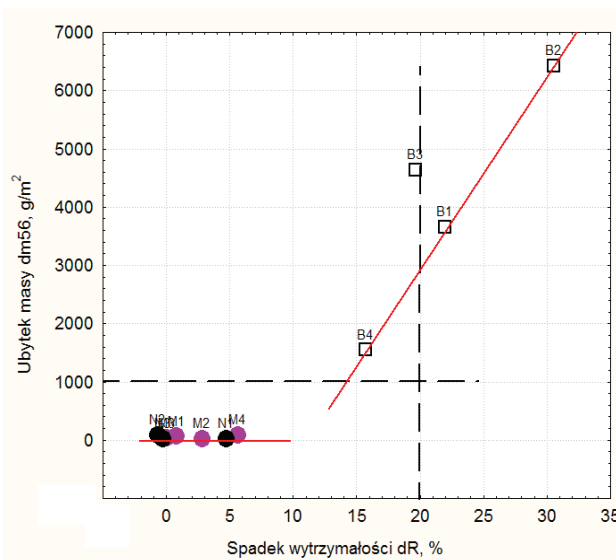


Fig. 2. The influence of air entrainment on F150 freeze thaw resistance and the scaling degree

The non-air entrained concrete had low resistance to scaling and to internal cracking measured by the loss in strength in the range of 15.7÷30.5% (Figs. 2, 3). The air-entrained concrete displayed very good frost durability and resistance to both internal cracking (ΔR) and scaling (dm_{56}). The loss in mass after 56 freeze-thaw cycles of the air-entrained concrete being immersed in a 3% NaCl solution was from 32 to 97g/m². The concrete was properly air entrained, with a high content of A_{300} pores and the low spacing factor \bar{L} .

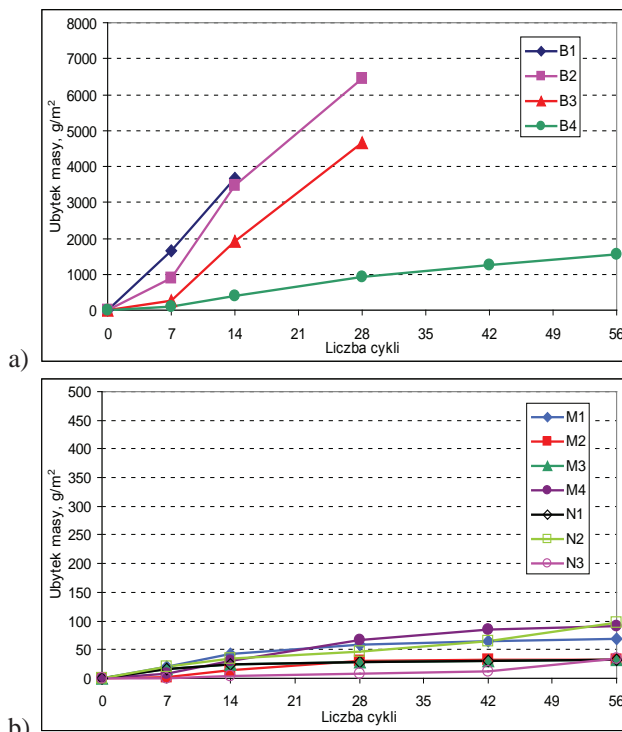


Fig. 3. Decrease in concrete mass (freeze-thaw in 3% NaCl solution) – average values;

a) air-entrained concrete, b) non-air entrained concrete

4. Conclusions

The test results indicate that the air entrainment is the factor that determines frost durability of concrete in the XF4 exposure class. Neither the W/C ratio nor the absorption defines the concrete freeze-thaw resistance. Non-air entrained concrete with the frost durability degree of F150 has a low absorption of $\leq 4\%$. When the absorption value exceeds 4%, the concrete does not meet the criterion of ΔR F150. There is a low likelihood that the non-air entrained concrete can be

resistant to scaling. Disputes over the absorption levels in XF4 concrete should be replaced by the practice of air entraining in the first place. It is also necessary to specify the testing procedure for absorption with the size of the specimens taken into account. PN-EN 13369:2005 [8] for precast concrete recommends the period of minimum 3 days in which specimens should be immersed, which in the case of the tight concrete and/or large specimens is not enough.

The test results also show that adding polymer microspheres is a good alternative for the traditional air entrainment method. Polymer microspheres ensure good parameters of porosity structure and very good resistance to freeze-thaw cycles eliminating at the same time the problems with the stability of the pore structure.

The research has been financed from the project No. POIG 01.01.02-10-106/09

References

- [1] Glinicki M.A.: *Widmo nasiąkliwości*. Budownictwo Technologie Architektura nr 3 (2007) p. 50-53.
- [2] Biliszczuk J., Rajski O.: *Zastosowanie betonów wysokich klas w mostownictwie*. Dni betonu 2002.
- [3] Wawrzeńczyk J.: *Diagnostyka mrozoodporności betonu cementowego*. Politechnika Świętokrzyska. Kielce 2002.
- [4] Glinicki M.A.: *Europejskie wymagania na beton napowietrzony w klasie środowiska XF*. Drogownictwo 3 (2005) p. 86-88.
- [5] Wymagania techniczne dla betonowych nawierzchni drogowych Etap III. IBDiM. Warszawa 2010.
- [6] PKN CEN/TS 12390-9:2007 Testing hardened concrete – Part 9: Freeze-thaw resistance – Scaling.
- [7] PN-EN 480-11:1998 Oznaczanie charakterystyki porów powietrznych w stwardniałym betonie.
- [8] PN-EN 13369:2005 Wspólne wymagania dla prefabrykatów z betonu.

Jerzy Wawrzeńczyk
Agnieszka Molendowska
Adam Klak

Związek charakterystyk porowatości z mrozoodpornością betonu mostowego

1. Wprowadzenie

Realizowana w ostatnich latach budowa wielu nowych obiektów mostowych jak i modernizacja istniejących spowodowała potrzebę analizy wprowadzonych ograniczeń materiałowych w zakresie nasiąkliwości, przepuszczalności i mrozoodporności.

Zgodnie z normą PN-EN 206-1:2003 w klasach ekspozycji XF4 zaleca się stosowanie cementu CEM I mostowego, kruszywa grubego ze skał wylewnych oraz wyników badań: nasiąkliwości nie większej niż 4%, stopnia wodoprzepuszczalności nie mniejszego niż W8, mrozoodporności F150. Ponadto wymaganiami granicznymi dla tej klasy ekspozycji są:

- maksymalne W/C = 0,45,
- minimalna klasa wytrzymałości C 30/37,
- minimalna zawartość cementu 340 kg/m³,
- minimalna zawartość powietrza 4%.

Należy zwrócić uwagę na fakt, iż warunek nasiąkliwości $n_w \leq 4\%$ jest niemożliwy do spełnienia dla betonów klas C30/37. Powszechnie wiadomo, że nasiąkliwość zaczynu cementowego jest zależna od ilości spoiwa, stosunku w/c oraz czasu i warunków dojrzewania betonu a więc stopnia hydratacji cementu. Brak wyników zgodnych z narzuconymi przez normy może prowadzić do zakwestionowania poprawności wykonania i odbioru robót oraz roszczeń finansowych. W wielu artykułach na ten problem uwagę zwracali m.in. Glinicki [1] oraz Biliszczuk [2]. Zaproponowano, aby kryterium maksymalnej nasiąkliwości zmienić z 4% na 5%. Zbliżone propozycje sugerował również Wawrzeńczyk w pracy [3].

Badanie nasiąkliwości nie jest skomplikowane, jednak sprawia problemy biorąc pod uwagę poprawność uzyskanych wyników. Nasiąkliwość wagowa n_w definiowana jest jako stosunek masy wody m_w wnikażącej do nasączonego materiału do jego masy suchej m_s , co jest równoważne stosunkowi nasiąkliwości objętościowej n_o do gęstości pozornej g_s . Opis sposobu oznaczania nasiąkliwości zawiera norma PN-88/B-06250.

Dopuszcza ona stosowanie próbek różnej wielkości i kształtów: próbki regularnych kształtów o objętości min. 1 dm³ lub nieregularne o objętości min. 2 dm³. W praktyce stosuje się najczęściej próbki-kostki formowane o boku 10 cm lub 15 cm. Próbki te nasącza się w wodzie do „stałej masy”, a następnie suszy w temperaturze 105°C do „stałej masy”. Uzyskanie stałej masy występuje w momencie, gdy kolejne ważenia wykazują różnicę poniżej 0,2% masy próbek. W normie PN-EN 13369:2004 dotyczącej badań prefabrykatów betonowych przyjmuje się, że zarówno okres nasączania próbek wodą, jak i suszenia wynosi min. 3 dni. Przyjmuje się, że próbka osiągnęła stałą masę jeżeli dwa kolejne wyniki ważenia wykonanego po 24 h nie różnią się więcej niż o 0,1%. Dyskusyjną kwestią jest więc czy taki opis można uznać za jednoznaczny i czy badania nasiąkliwości przeprowadzane w ten sposób są zawsze wiarygodne oraz gwarantują powtarzalność wyników w różnych laboratoriach.

Ze względu na powszechne dziś stosowanie środków rozmrażających, zwraca się również uwagę na konieczność zaostrożenia wymagań mrozoodporności poprzez wprowadzenie badania próbek betonowych w roztworze soli [2].

Aby zapewnić mrozoodporność obiektów mostowych, które narażone są na oddziaływanie wody i środków odładzających praktycznie niezbędne jest napowietrzenie betonu, co w wytycznych mostowych nie jest formułowane jako bezwzględny wymóg. Norma PN-EN 206-1:2003 podaje jedynie minimalną zawartość powietrza, nie precyzując innych parametrów struktury porowatości. Uzyskanie zalecanej objętości powietrza nie jest niestety warunkiem wystarczającym dla uzyskania mrozoodporności. Krajowe uzupełnienia do normy EN 206-1 w innych krajach europejskich (normy austriackie, duńskie) podają, oprócz wymagań dotyczących minimalnej zawartości powietrza, również wymagania dotyczące minimalnej zawartości porów A_{300} oraz wartości maksymalnej

malnego wskaźnika rozmieszczenia porów powietrznych \bar{L} [4]. Pewne propozycje dotyczące zawartości powietrza w mieszance betonowej oraz parametrów struktury porów powietrznych zostały zawarte w przygotowywanych „Wymaganiach technicznych dla betonowych nawierzchni drogowych” [5]. Podano w nich informacje dotyczące średniej oraz minimalnej zawartości powietrza w mieszance betonowej, oddzielnie dla betonów tylko z domieszką napowietrzającą oraz oddzielnie dla betonów z domieszką napowietrzającą i upłynniającą/uplastyczniającą. Określono, że zawartość porów o średnicy poniżej 300 μm (A_{300}) powinna być większa niż 1,5% oraz wskaźnik rozmieszczenia porów w betonie \bar{L} powinien być nie większy niż 0,20 mm.

W referacie przedstawiono wyniki badań betonów z kruszywem granitowym, gdzie analizowano zależności występujące pomiędzy wytrzymałością, nasiąkliwością, przepuszczalnością, strukturą porowatości oraz mrozoodpornością betonów napowietrzonych oraz nienapowietrzonych o różnym stosunku W/C.

2. Metodyka badań

Celem badań było określenie wpływu stosunku W/C oraz napowietrzenia na właściwości fizyczne, strukturę porowatości oraz mrozoodporność betonu mostowego. Badania przeprowadzono na betonach o W/C = 0,36÷0,55 wykonanych z kruszywem granitowym. Jako środek napowietrzający zastosowano tradycyjną domieszkę napowietrzającą oraz dodatek mikrosfer polimerowych.

Program badań obejmował wykonanie 11 betonów o różnych poziomach W/C, przy czym 4 betony były nienapowietrzane, 3 betony napowietrzono tradycyjnie (AEA) i 4 betony zostały napowietrzane poprzez zastosowanie mikrosfer polimerowych.

Do wykonania betonów zastosowano następujące składniki:

- cement CEM I 42,5N HSR NA – WARTA,
- piasek naturalny 0 ÷ 2 mm,
- kruszywo grube – granit frakcji 4 ÷ 8; 8 ÷ 16 mm,
- plastyfikator (PL),
- domieszka napowietrzająca (ŚN),
- mikrosfery polimerowe (MS).

Zakres badań obejmował określenie: wytrzymałości na ściskanie f'_{cm} , nasiąkliwości masowej n_w , przepuszczalności chlorków Q, charakterystyk porowatości (A , A_{300} , \bar{L}), stopnia mrozoodporności F150 (Δm , ΔR) wg PN-88/B-06250 oraz odporności na powierzchniowe łuszczenie próbek zamrażanych w 3% roztworze NaCl (dm_{56}) metodą Boras.

Do badań wytrzymałości, nasiąkliwości oraz mrozoodporności wg PN-88/B-06250 stosowano kostki 10x10x10 cm. Badania odporności na powierzchniowe łuszczenie próbek zamrażanych w 3% roztworze NaCl prowadzono na próbkach formowanych o wymiarach 15x15x5 cm przygotowanych do badania zgodnie z normą [6]. Przygotowanie zglądów oraz oznaczenie charakterystyk porowatości metodą zliczania cięciw wykonano według PN-EN 480-11 [7]. Automatyczną analizę obrazu przeprowadzono z wykorzystaniem zestawu, w skład którego wchodził mikroskop Nikon SMZ 800, kamera CCD oraz stolik pomiarowy Prior.

3. Wyniki badań

Wyniki badań stwardniałych betonów zostały przedstawione w tabeli 2. Klasa wytrzymałości badanych betonów mieści się w zakresie od C 25/30 do C 50/60. Spośród badanych betonów tylko trzy charakteryzują się nasiąkliwością n_w nie większą niż 4%. Nasiąkliwość wagowa betonów zawiera się w granicach 3,93÷6,19%. Wyniki badań pokazują dość dobrą korelację pomiędzy stosunkiem W/C a wytrzymałością na ściskanie, nasiąkliwością oraz przepuszczalnością.

Nasiąkliwość nie większą niż 4% wykazują betony klasy C50/60 (rys. 1), zalecana klasa dla betonów mostowych to C30/37. O nasiąkliwości decyduje porowatość i objętość zaczynu cementowego a więc stosunek W/C i zawartość cementu. Napowietrzanie betonu może powodować tylko pewną redukcję nasiąkliwości. Betony nienapowietrzane charakteryzują się niską odpornością na wewnętrzne pękanie, mierzoną spadkiem wytrzymałości w granicach 15,7÷30,5% oraz bardzo niską odpornością na powierzchniowe łuszczenie (rys. 2, 3). Wszystkie betony napowietrzane wykazują bardzo dobrą mrozoodporność zarówno na wewnętrzne pękanie (ΔR), jak i powierzchniowe łuszczenie (dm_{56}). Ubytek masy tych betonów po 56 cyklach zamrażania-rozmrażania w 3% roztworze NaCl wynosi od 32 do 97 g/m². Należy podkreślić bardzo dobre napowietrzenie betonów charakteryzujące się wysoką zawartością porów A_{300} oraz niskimi wartościami wskaźnika rozmieszczenia \bar{L} .

4. Wnioski

Biorąc pod uwagę przedstawione wyniki badań czynnikiem decydującym o mrozoodporności betonu w klasie XF4 jest napowietrzenie betonu. Stosunek W/C, podobnie jak nasiąkliwość nie jest parametrem, który definiuje mrozoodporność betonu. Z przedstawionych badań wynika, że betony nienapowietrzane

o stopniu mrozoodporności F150 charakteryzują się niską nasiąkliwością $\leq 4\%$. Betony nienapowietrzone o nasiąkliwości powyżej 4% nie spełniają kryterium ΔR F150. W przypadku betonów nienapowietrzonych istnieje małe prawdopodobieństwo, że beton będzie odporny na powierzchniowe łuszczenie. Zamiast dyskutować na temat kryterium nasiąkliwości betonu w klasie XF4 konieczne jest przede wszystkim napowietrzanie betonu. Ponadto niezbędne jest ściśle sprecyzowanie metodyki badania nasiąkliwości biorąc pod uwagę wymiary próbek, czas nasączenia i czas suszenia próbek. Norma PN-EN 13369:2005 [8] dotycząca prefabrykatów zaleca minimum 3-dniowe nasączenie próbek, co w przypadku szczelnego betonu i/lub dużych próbek jest zbyt krótkim okresem.

Przedstawione wyniki badań pokazują, że zastosowanie mikrosfer polimerowych stanowi bardzo dobrą alternatywę dla tradycyjnego napowietrzenia betonu. Poprzez dodatek mikrosfer polimerowych można uzyskać bardzo korzystne parametry struktury porowatości oraz bardzo dobrą odporność na cykle zamrażania-rozmrażania przy jednoczesnym wyeliminowaniu problemów ze stabilnością struktury porów powietrznych.

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