

DARIA JÓZWIAK - NIEDŹWIEDZKA<sup>1)</sup>

## **ZAPOBIEGANIE ŁUSZCZENIU POWIERZCHNI BETONOWYCH PRZY UŻYCIU NAWILŻONEGO KRUSZYWA LEKKIEGO Cz. II – Badania doświadczalne**

**STRESZCZENIE.** Praca jest kontynuacją artykułu na temat zapobiegania łuszczeniu powierzchni betonowych przy użyciu nawilżonego kruszywa lekkiego, opublikowanego w kwartalniku „DROGI i MOSTY” nr 2/2006. Przedstawiono wyniki badań doświadczalnych betonów zawierających nawilżone, drobne frakcje kruszywa lekkiego. Określono strukturę porów oraz odporność na powierzchniowe łuszczenie według normy SS 13 72 44 i mrozoodporność (badaną wg PN-88/B-06250 i przy pomocy pomiaru oporu elektrycznego, według ASTM C 666 A). Stwierdzono, że nawilżone kruszywo lekkie przyczynia się do poprawy mrozoodporności betonu.

### **1. CEL I ZAKRES BADAŃ DOŚWIADCZALNYCH**

Celem przeprowadzonych badań było porównanie odporności na oddziaływanie mrozu betonu z kruszywem lekkim frakcji 0÷2 mm i 2÷4 mm z betonem referencyjnym, wykonanym bez kruszywa lekkiego. Zasadnicze badania obejmowały określenie odporności mrozowej na łuszczenie, a ponadto mrozoodporności betonów wg PN-88/B-06250, [1] i za pomocą pomiaru oporu elektrycznego, przy założeniach normy ASTM C 666 A, [2]. Jako kruszywo lekkie zastosowano keramzyt o gęstości nasypowej 750 kg/m<sup>3</sup>, powstały przez wypalenie łatwo pęczniejących glin w piecach

<sup>1)</sup> dr inż. – Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa

obrotowych. Użyto domieszki superplastyfikującej na bazie sulfonowanej żywicy melaminowej i naftalenowej w ilości 2% oraz napowietrzającej (na bazie anionowych środków powierzchniowo czynnych) w ilości 0,03% w stosunku do łącznej masy cementu i pyłów krzemionkowych. Skład mieszanek betonowych przedstawiono w tablicy 1.

Tablica 1. Skład mieszanek betonowych w  $\text{kg/m}^3$ , seria S3  
Table 1. Composition of concrete mixes,  $\text{kg/m}^3$ , series S3

Skład	Seria							
	S3/1	S3/2	S3/3	S3/4	S3/5	S3/6	S3/7	S3/8
cement CEM I 42,5R	400	400	400	400	400	400	–	–
cement CEM I 32,5 R	–	–	–	–	–	–	340	340
piasek 0÷2 mm	700	700	350	466,7	700	700	700	700
bazalt 2÷4 mm	267	267	267	267	–	133,5	–	133,5
granit 4÷8 mm	267	267	267	267	267	267	267	267
bazalt 8÷16 mm	608	608	608	608	608	608	608	608
keramzyt 0÷2 mm	–	–	99	66	–	–	–	–
keramzyt 2÷4 mm	–	–	–	–	67,8	33,9	67,8	33,9
pył krzemionkowy	40	40	40	40	40	40	–	–
woda	140	140	96,8	111,2	110,4	125,2	123,4	138,2
superplastyfikator	8,8	8,8	8,8	8,8	8,8	8,8	6,8	6,8
dom. napowietrzająca	–	0,13	–	–	–	–	–	–
woda/spoiwo tj. w/s	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,45	0,45

Mieszanki referencyjne bez dodatku nasączonego kruszywa lekkiego oznaczono S3/1 (bez domieszki napowietrzającej) i S3/2 (z domieszką napowietrzającą). Frakcję piaskową 0÷2 mm i frakcję bazaltową 2÷4 mm zastąpiono objętościowo keramzytem o uziarnieniu według odpowiadającej im krzywej przesiewu. W seriach S3/3 i S3/4 zastąpiono odpowiednio 1/2 i 1/3 części objętości piasku keramzytem frakcji 0÷2 mm, a w seriach S3/5, S3/7 i S3/6, S3/8 - odpowiednio całą i połowę objętości bazaltu frakcji 2÷4 mm odpowiadającą mu frakcją keramzytu. Zawartość wody dodana do mieszanki była pomniejszona o ilość wody znajdującej się w nawilżonym keramzyście, aby zachować stałą wartość współczynnika  $w/c$ . Kruszywo lekkie przez 24 godz. leżało w wodzie, natomiast tuż przed dodaniem do mieszanki nadmiar wody został usunięty.

Kolejność dozowania składników w przypadku betonów wykonanych z nasączonym kruszywem lekkim była następująca:

1. mieszanie suchych składników – kruszywo grube i piasek,
2. dodanie połowy wody zarobowej,

3. dodanie cementu i pyłów krzemionkowych,
4. dodanie pozostałej wody z domieszkami i nasączonego kruszywa lekkiego.

Po zaformowaniu próbki były przechowywane przez 24 godziny w formach, po czym rozformowywano je i przechowywano w wodzie. Po siedmiu dniach próbki umieszczano na ruszcie nad powierzchnią wody w temperaturze ok. 22 °C i wilgotności ok. 95% do momentu przeprowadzenia badań.

W tabelicy 2 przedstawiono podstawowe właściwości mieszanek betonowych, tj. opad stożka, gęstość objętościową i zawartość powietrza określoną metodą ciśnieniową, a wyniki oznaczenia wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach dojrzewania podano w tabelicy 3.

Tablica 2. Wyniki oznaczenia opadu stożka, gęstości objętościowej oraz zawartości powietrza w mieszankach betonowych, seria S3  
Table 2. The results of the slump, density and air content of fresh mix, series S3

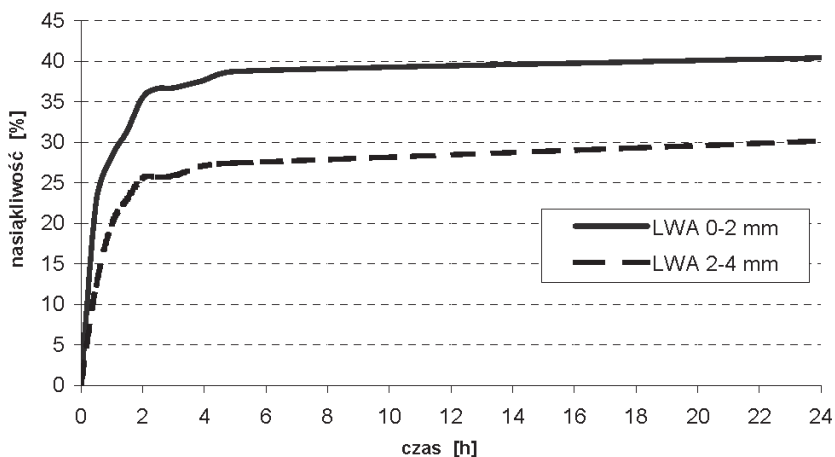
Oznaczenie składu	Opad stożka [mm]	Gęstość objętościowa [g/cm <sup>3</sup> ]	Zawartość powietrza [%]
S3/1	35	2,475	4,6
S3/2	50	2,489	5,0
S3/3	70	2,372	4,2
S3/4	80	2,391	4,8
S3/5	60	2,379	4,8
S3/6	40	2,453	4,2
S3/7	170	2,429	3,7
S3/8	150	2,477	2,8

Tablica 3. Wyniki oznaczenia wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach dojrzewania, seria S3  
Table 3. The results of the compressive strength after 28 day curing of concrete, series S3

Oznaczenie składu	$f_{c28}$ – średnia z 5 próbek [MPa]	Odchylenie standardowe [MPa]
S3/1	84,6	2,59
S3/2	91,7	4,47
S3/3	79,3	6,33
S3/4	74,1	3,00
S3/5	88,3	2,87
S3/6	76,7	8,57
S3/7	71,1	5,27
S3/8	71,5	3,45

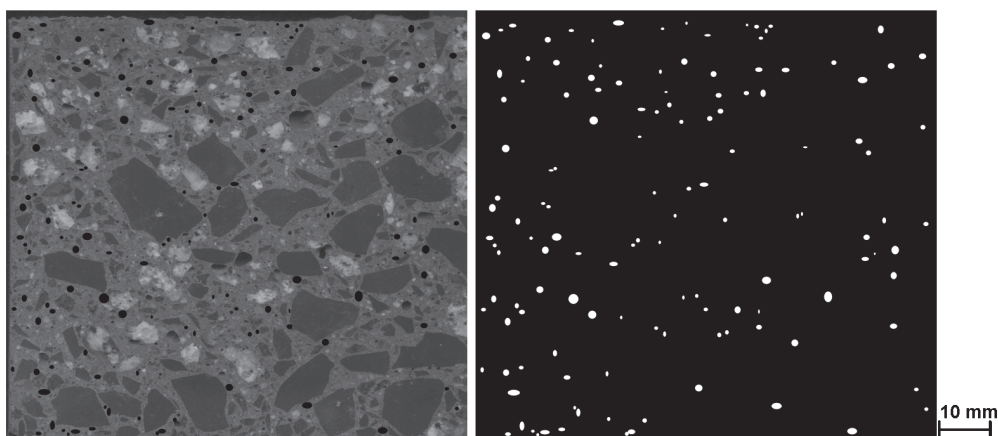
## 2. NASIĄKLIWOŚĆ I ROZMIESZCZENIE ZIAREN KRUSZYWA LEKKIEGO

Keramzyt należy do grupy lekkich kruszyw sztucznych wykonywanych z surowców mineralnych, poddanych obróbce termicznej. Ziarna keramzytu mają kształt kulisty ze spieczoną otoczką i porowate wnętrze. Całkowita porowatość takiego kruszywa może wynosić nawet do 90%, jednakże dużą część stanowią zamknięte pory, które nie są dostępne dla wnikającej wody. Na podstawie wyników badania metodą porozymetrii rтęciovwej stwierdzono, że typowy rozmiar otwartych porów wynosi ok. 400  $\mu\text{m}$ , oraz że większość objętości tych porów ma średnicę powyżej 100  $\mu\text{m}$ , [3]. Z tego powodu cała zaabsorbowana przez kruszywo woda może być łatwo dostępna jako wewnętrzne źródło wody potrzebne do hydratacji cementu. Koncepcję wewnętrznych zbiorników wody – zastosowanie nawilżonego kruszywa lekkiego, opisano szczegółowo w części I artykułu. W badanych betonach zastąpiono część kruszywa zwykłego frakcji 0÷2 mm lub 2÷4 mm nawilżonym keramzytem. Na rys. 1 przedstawiono wyniki badania nasiąkliwości wagowej kruszywa lekkiego. Na rysunkach 2 i 3 przedstawiono obrazy struktury betonów serii S3, tj. S3/3 i S3/5, uzyskane przez skanowanie po odpowiednim przygotowaniu powierzchni, a następnie zbinaryzowanie obrazu. Na obrazach elementami struktury są ziarna kruszywa i piasku, a także kruszywo lekkie (czarny kolor). Widać, że zastąpienie części kruszywa keramzytem nie powoduje trudności przy mieszaniu czy wibrowaniu mieszanki betonowej. Kruszywo lekkie jest równomiernie rozłożone w całej próbce i, co szczególnie istotne ze względu na powierzchniowe łuszczenie, znajduje się również w warstwie przypowierzchniowej. Okazało się, że kruszywo lekkie nawilżone wodą, frakcji 0÷2 mm i 2÷4 mm, można łatwo wprowadzić do mieszanki betonowej i równomiernie rozmieścić w betonowych elementach.

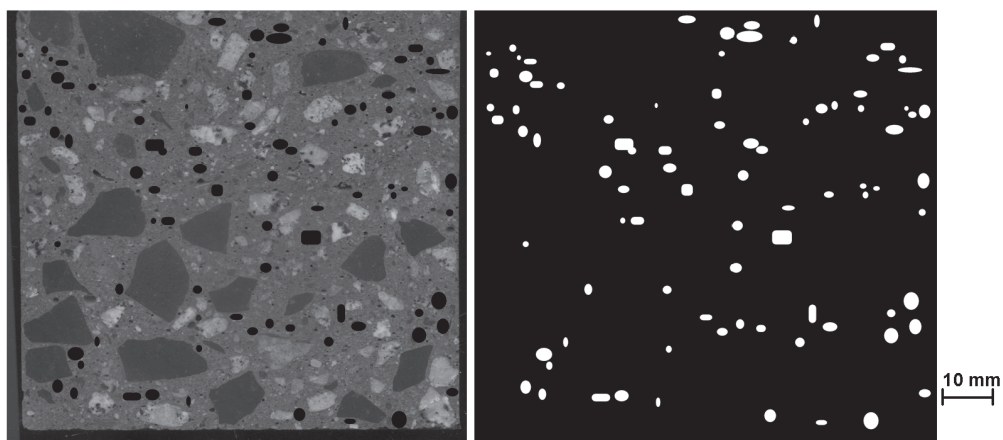


Rys.1. Wyniki badania nasiąkliwości wagowej kruszywa lekkiego - keramzytu, frakcja 0÷2 mm i 2÷4 mm

Fig. 1. The results of the water absorption of the lightweight aggregate - keramzite, 0÷2 mm i 2÷4 mm



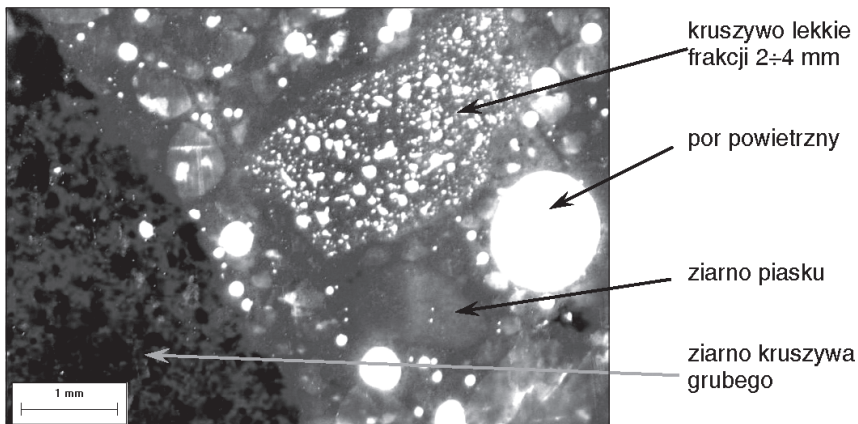
Rys.2. Obrazy betonu S3/3 w ośmiobitowej skali szarości i zbinaryzowany ( $w/s = 0,32$ ;  
keramzyt zastąpiony w połowie frakcji  $0\div 2$  mm)  
Fig.2. Concrete S3/3, bitmap (left) and binary image (right);  $w/b=0.32$ ;  
a half of  $0\div 2$  mm LWA was replaced



Rys.3. Obrazy betonu S3/5 w ośmiobitowej skali szarości i zbinaryzowany ( $w/s = 0,32$ ;  
keramzyt zastąpiony w całości frakcji  $2\div 4$  mm)  
Fig.3. Concrete S3/5, bitmap (left) and binary image (right);  $w/b=0.32$ ;  
all of  $2\div 4$  mm LWA was replaced

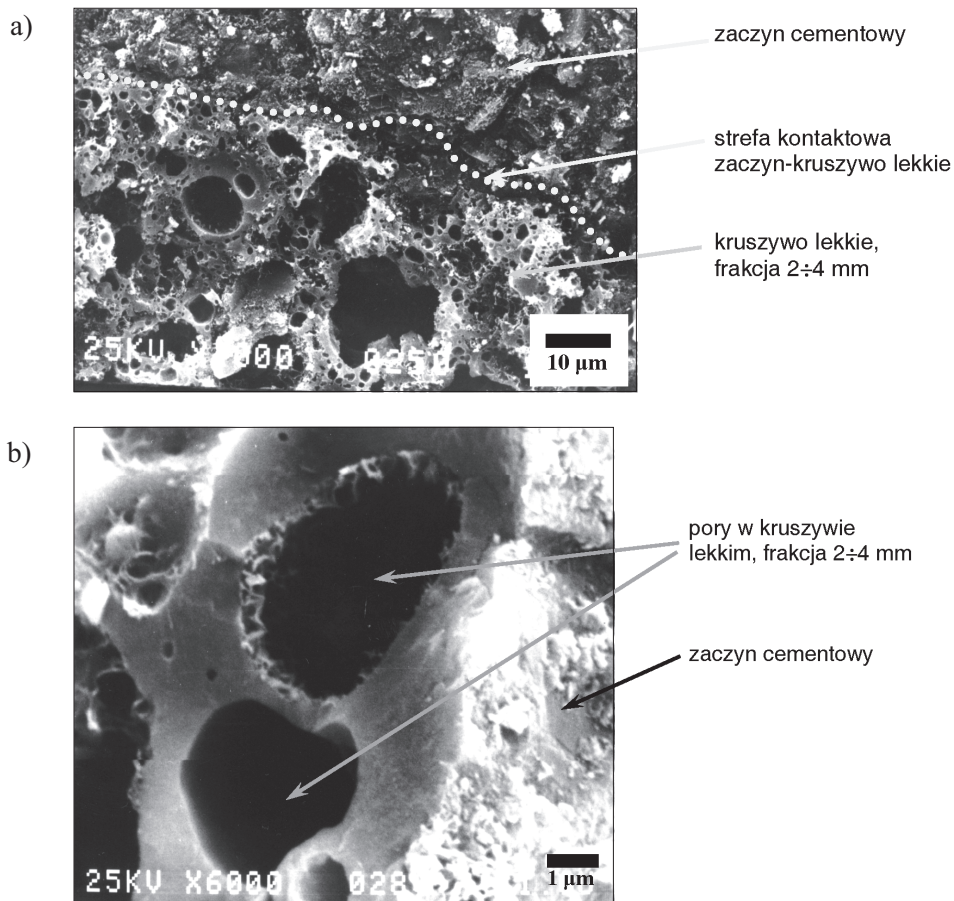
Na rysunku 4 widać przykładowy obraz makrostruktury betonu S3/6, wykonanego z dodatkiem nawilżonego kruszywa lekkiego przy zastąpieniu  $\frac{1}{2}$  frakcji 2÷4 mm. Elementami struktury na obrazie są ziarna kruszywa i piasku, porowate ziarno kruszywa lekkiego oraz pustka powietrzna. Przestrzeń między tymi elementami jest wypełniona stwardniałym zaczynem cementowym. Widać różnicę w wielkości i ilości porów znajdujących się zarówno w kruszywie lekkim, jak i w całym zaczynie.

Jeszcze dokładniej strukturę badanych betonów przedstawiają zdjęcia z mikroskopu skaningowego (rys. 5). Na rysunku 5a widoczna jest strefa kontaktowa między zaczynem a kruszywem lekkim. Granica pomiędzy zaczynem i keramzytem jest ciągła, tzn. nie ma przerw czy nieciągłości struktury lub mikropęknięć. Przestrzeń między nimi jest gęsto wypełniona, a w porach kruszywa lekkiego pojawiły się produkty hydratacji cementu (rys. 5b). Warstwa przejściowa w betonach wykonanych z zastąpieniem części kruszywa przez nawilżony keramzyt nie odróżnia się od pozostałej matrycy większą objętością porów, ani nie ma mniejszej zawartości niezhydratyzowanych ziaren cementu, odmiennie niż w strefie kontaktowej w zwykłych betonach.



Rys. 4. Przykład struktury betonu (beton S3/6) wykonanego z dodatkiem nawilżonego kruszywa lekkiego, (zastąpienie 1/2 frakcji 2÷4 mm)

Fig. 4. An example of the concrete structure made with the LWA, S3/6, (replacement of the half of the 2÷4 mm fraction)



Rys.5. Przykład struktury kruszywa lekkiego w betonie S3/6, (zastąpienie 1/2 frakcji 2÷4 mm), zdjęcie z mikroskopu skaningowego, a) powiększenie 1000×, b) powiększenie 6000×  
 Fig.5. An example of the LWA in the concrete structure, S3/6, (replacement of the half of the 2÷4 mm fraction), the picture from the SEM, a) magnification 1000×, b) magnification 6000×

### 3. BADANIE ODPORNOŚCI BETONU NA POWIERZCHNIOWE ŁUSZCZENIE

#### 3.1. OPIS METODY BADAWCZEJ

Metoda Borås (SS 13 72 44, [4]), powstała w Szwecji jako modyfikacja amerykańskiej normy ASTM C 672, [5] z zamiarem uzyskania lepszej imitacji naturalnych wahań temperatury, odzwierciedlanych poprzez prędkość zamrażania i odmrażania. Metoda polega na określeniu masy złuszczonego materiału z górnej powierzchni próbki po 7, 14, 28 ( $m_{28}$ ) i 56 ( $m_{56}$ ) cyklach zamrażania i odmrażania w obecności 3% roztworu NaCl.

Stosuje się próbki pobrane z konstrukcji lub kostki formowane w laboratorium oraz w zależności od badanej powierzchni (cięta bądź wylewana) stosuje się jedną z czterech procedur.

- Procedura I – przewidziana do badań wstępnych oraz badań ciągłych betonu na kostkach wyprodukowanych w laboratorium, powierzchnia badana znajduje się w środku kostki tj. bada się powierzchnię ciętą;
- Procedura II – znajduje zastosowanie, jeśli przedmiotem szczególnego zainteresowania jest mrozoodporność powierzchni wylewanej kostek wytworzonych w laboratorium. Powierzchnię wylewaną może stanowić pozioma górna powierzchnia kostki lub powierzchnia wylewana na którejś ze stron formy;
- Procedura III – jest przewidziana dla gotowych wyrobów z betonu, walców wyciętych z konstrukcji, tam gdzie mrozoodporność powierzchni nie jest przedmiotem szczególnego zainteresowania;
- Procedura IV – jest przewidziana dla gotowych wyrobów z betonu, walców wyciętych z konstrukcji, tam gdzie przedmiotem szczególnego zainteresowania jest mrozoodporność powierzchni.

Po 21 dniach dojrzewania próbki przygotowuje się do badania – izoluje się boki próbek (izolacja termiczna i wilgotnościowa), a krawędzie powierzchni przeznaczonej do badania dodatkowo uszczelnia się silikonem. Następnie przez 3 dni na badanej powierzchni próbki znajduje się woda, potem wodę usuwa się i na jej miejsce wlewa się 3% roztwór NaCl. Tak przygotowane próbki, przykryte folią plastikową, poddaje się cykлом zamrażania i rozmrażania. Jeden cykl trwa 1 dobę.

Cykle temperaturowe przedstawiają się następująco:

- zamrażanie od  $+20^{\circ}\text{C}$  do  $-4^{\circ}\text{C}$  w czasie 4,5 godziny z prędkością  $5,3^{\circ}\text{C}/\text{h}$ ,
- zamrażanie od  $-4^{\circ}\text{C}$  do  $-18^{\circ}\text{C}$  w czasie 7,5 godziny z prędkością  $1,9^{\circ}\text{C}/\text{h}$ ,
- stała temperatura  $-18^{\circ}\text{C}$  przez 4 godziny,
- rozmrażanie od  $-18^{\circ}\text{C}$  do  $+20^{\circ}\text{C}$  w czasie 8 godzin z prędkością  $4,8^{\circ}\text{C}/\text{h}$ .

Na podstawie określonej masy złuszczonego materiału rozróżnia się cztery kategorie betonów:

- beton bardzo dobrej jakości:  $m_{56} < 0,10 \text{ kg/m}^2$ ,
- beton dobrej jakości:  $m_{56} < 0,20 \text{ kg/m}^2$   
lub  $m_{56} < 0,50 \text{ kg/m}^2$  i  $m_{56}/m_{28} < 2$   
lub  $m_{112} < 0,50 \text{ kg/m}^2$  (wg [6])
- beton dopuszczalnej jakości:  $m_{56} < 1,00 \text{ kg/m}^2$  i  $m_{56}/m_{28} < 2$   
lub  $m_{112} < 1,00 \text{ kg/m}^2$  (wg [6])
- beton niedopuszczalnej jakości:  $m_{56} > 1,00 \text{ kg/m}^2$  i  $m_{56}/m_{28} > 2$   
lub  $m_{112} > 1,00 \text{ kg/m}^2$  (wg [6]).



Badania zostały przeprowadzone wg procedury II, przy czym wprowadzono istotne modyfikacje sposobu izolacji próbek. W normie SS 13 72 44 zaleca się przeprowadzenie badania na próbkach  $150 \times 150 \times 50$  mm, a w przeprowadzonych badaniach wykorzystano próbki sześciennie o boku 100 mm, przy zachowaniu warunku, aby łączna badana powierzchnia była większa lub równa  $500 \text{ cm}^2$ . Próbki były umieszczane w formach na podkładce styropianowej po uprzednim zaizolowaniu ekranem cieplnym, w wolną przestrzeń była wtlaczana pianka poliuretanowa, [7]. Celem tak zmodyfikowanego sposobu przygotowywania próbek do badań było uzyskanie:

- niższych kosztów materiałów,
- lepszej izolacji termicznej i wilgotnościowej,
- łatwości i powtarzalności przygotowania.

### 3.2. PRZYGOTOWANIE PRÓBEK DO BADAŃ

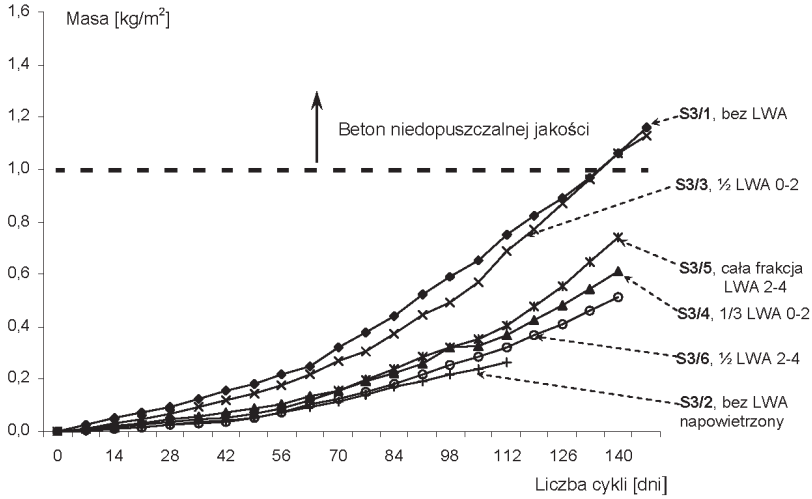
Próbki do badań przez 7 dni dojrzewały w wodzie, następnie przez 14 dni były przechowywane w temperaturze  $20^\circ\text{C}$  i wilgotności względnej 95%. Po 21 dniach boki i spód próbki, oprócz powierzchni przeznaczonej do badania, zostały osłonięte ekranem cieplnym (styropian + folia aluminiowa) i zaizolowane pianką poliuretanową o grubości ok. 20 mm. Krawędzie powierzchni przeznaczonej do badania zostały dodatkowo uszczelnione silikonem. Przez kolejne 3 dni badana powierzchnia była przykryta 3 mm warstwą wody i folią, która zapobiegała parowaniu cieczy. Następnie, wodę zastąpiono 3% roztworem NaCl i próbki umieszczono w komorze zamrażarki automatycznej. Temperaturę roztworu na powierzchni próbek kontrolowano, aby uzyskać ściśle przebieg cykli według SS 13 72 44.

### 3.3. WYNIKI BADAŃ

Zależność masy złuszczonego materiału od liczby przeprowadzonych cykli zamrażania i rozmrażania betonów wykonanych z nawilżonym kruszywem lekkim pokazano na rys. 6 i 7. Na osi rzędnych podano liczbę cykli zamrażania i odmrażania liczoną w dniach tj. jeden cykl trwał 24 godziny, natomiast na osi odciętych – skumulowaną masę złuszczonego materiału po kolejnych cyklach. Graniczną masę złuszczonego materiału według normy SS 13 72 44 stanowi  $1 \text{ kg/m}^2$ ; powyżej tej wartości beton uznaje się za nieodporny na powierzchniowe łuszczenie (beton niedopuszczalnej jakości).

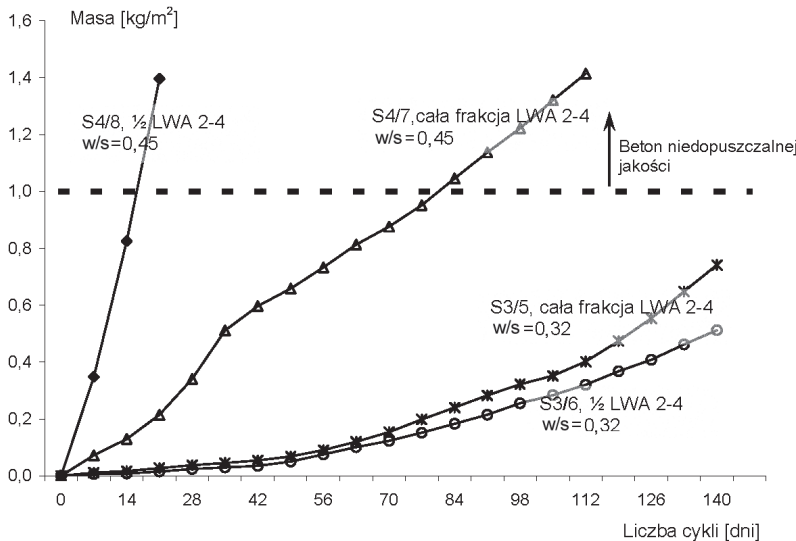
Już po 21 cyklach beton zwykły z keramzytem  $2\div 4$  mm – S3/8 – okazał się nieodporny na powierzchniowe łuszczenie i wykazał znaczny ubytek masy tj.  $1,4 \text{ kg/m}^2$ , przy dopuszczalnym  $1 \text{ kg/m}^2$  po 56 cyklach zamrażania i odmrażania. Nie wszystkie betony o  $w/s = 0,32$  po 112 cyklach okazały się mrozo odporne w rozumieniu normy: rozróżnić można betony znajdujące się w klasie „bardzo dobrej” – S3/4, S3/5, S3/6 i S3/2 (tj.  $m_{56} < 0,10 \text{ kg/m}^2$ ) oraz w klasie „niedopuszczalnej” – S3/1 i S3/3

(niespełniony warunek  $m_{56}/m_{28} < 2$ ). Najlepsze wyniki uzyskano dla betonów wysokowartościowych S3/6 i S3/2, tj. odpowiednio beton z keramzytem 2÷4 mm i napowietrzony bez kruszywa lekkiego.



Rys.6. Wyniki badania odporności na powierzchniowe łuszczenie wg metody Borås, jednakowy współczynnik  $w/s=0,32$

Fig.6. Results of the frost resistance tested according to the Borås method, the same  $w/b=0.32$



Rys.7. Wyniki badania odporności na powierzchniowe łuszczenie wg metody Borås, różny współczynnik  $w/s$ , takie samo zastąpienie LWA

Fig.7. Results of the frost resistance tested according to the Borås method, the same LWA replacement, and different  $w/b$  ratio

Przy współczynniku  $w/c = 0,45$  (betony S3/7 i S3/8) nawilżone kruszywo lekkie nie pełniło tak ważnej roli z uwagi na powierzchniowe łuszczenie, jak w przypadku betonów wysokowartościowych z niższym  $w/c$ .

W betonach BWW z nawilżonym kruszywem lekkim mimo tego, że wskaźnik rozmieszczenia porów  $\bar{L} > 0,20$  mm odporność na powierzchniowe łuszczenie okazała się dostateczna. Otrzymano małe zróżnicowanie wyników w przypadku wskaźnika rozmieszczenia porów  $\bar{L}$  od 0,21 mm do 0,33 mm (zakres zmienności 0,12 mm) oraz w przypadku powierzchni właściwej  $\alpha$  od 17,24 mm<sup>-1</sup> do 27,07 mm<sup>-1</sup> (zakres zmienności 9,83 mm<sup>-1</sup>).

## 4. BADANIE STRUKTURY PORÓW POWIETRZNYCH W BETONACH

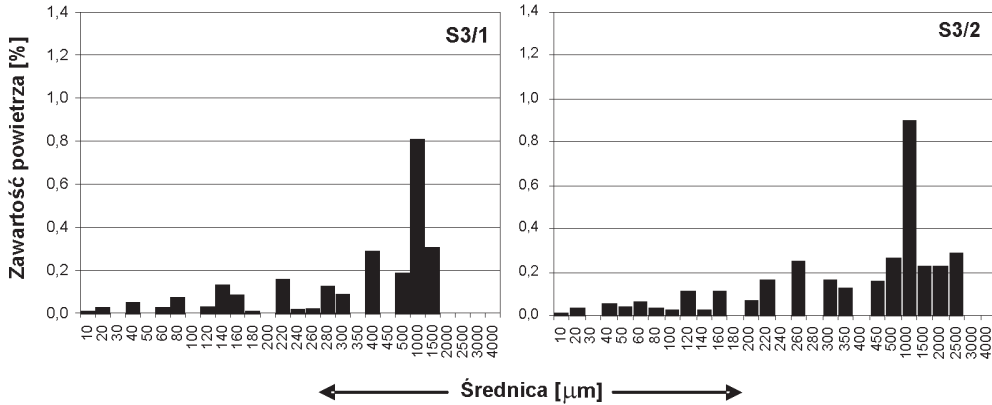
### 4.1. PRZYGOTOWANIE PRÓBEK I OPIS BADAŃ

Stosowano próbki o wymiarach 100×100×25 mm, wycięte z kostek o boku 100 mm. Po usunięciu niepożądanych cząstek, pochodzących od cięcia i po wysuszeniu próbka poddawana była wielokrotnemu szlifowaniu coraz drobniejszymi proszkami szlifierskimi (SiC), o gradacjach P320, P600 i P1200. Po zakończeniu etapu szlifowania próbka podlegała kontroli jakości wykonania. Stosując mikroskop stereoskopowy poszukuje się wad powierzchni zglądu, np. nierówne, połamane krawędzie porów, wyrwane kruszywo z matrycy cementowej czy obecność proszku szlifierskiego w porach. Następnie stosowano zanurzenie próbek w wannie ultradźwiękowej w celu usunięcia resztek proszku szlifierskiego z wnętrza porów. Kolejnym etapem obróbki było kontrastowanie powierzchni zglądu w celu wyodrębnienia porów z badanej powierzchni tak, aby mogły być łatwo rozpoznane przez system analizy obrazu. Stosowano malowanie powierzchni niebieskim wodoodpornym markerem oraz wypełniano na ciepło pory pastą cynkową, z późniejszym usunięciem jej nadmiaru. Powierzchnia była czyszczona dodatkowo za pomocą oleju parafinowego. Po tej operacji zgląd betonowy z porami wypełnionymi kontrastującym z pozostałą częścią próbki białym pigmentem był badany przy pomocy systemu automatycznej analizy obrazu.

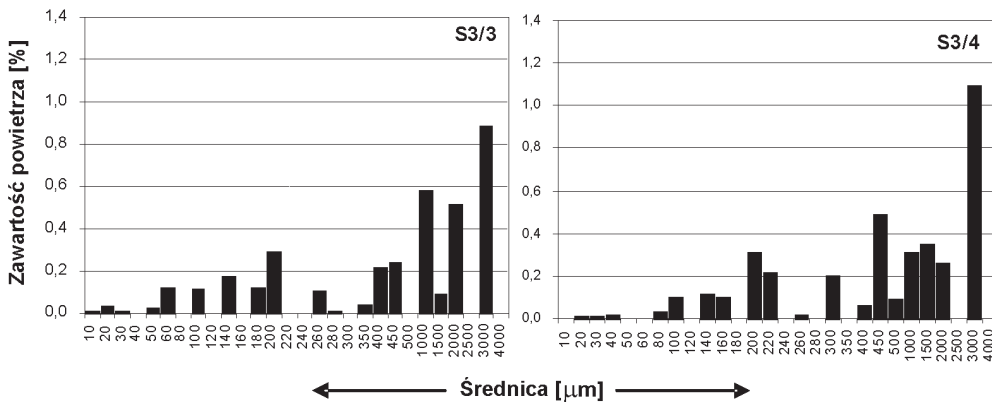
### 4.2. WYNIKI BADAŃ

Na rysunkach 8 – 10 przedstawiono rozkład procentowych zawartości powietrza w poszczególnych klasach średnic porów w betonach serii S3. W betonach z kruszywem nasączonym, w porównaniu do betonów bez tego kruszywa maksymalne zawartości powietrza przesunęły się z porów o średnicach ok. 1 mm tj. S3/1 i S3/2 do średnic o wielkości ok. 3 mm – S3/3 i S3/4, (rys. 8 i 9). W betonie S3/6, przy zastąpieniu połowy kruszywa frakcji 2÷4 mm, otrzymano zbliżone wielkości rozkładu porów powietrznych, jak to miało miejsce w betonie bez tego kruszywa, ale za to z domieszką napowietrzającą – S3/2, rys. 8 i 10. Można stwierdzić, że przy zastąpieniu połowy frakcji

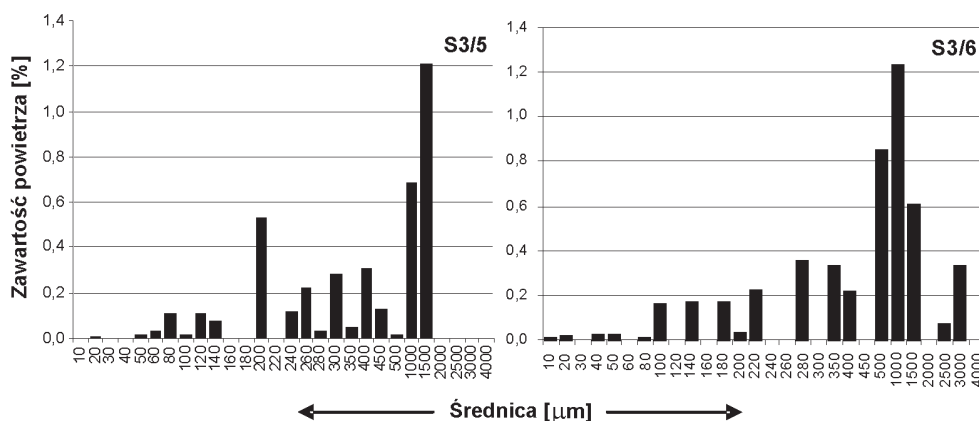
2÷4 mm zwykłego kruszywa przez nawilżone kruszywo lekkie tej samej frakcji możliwe jest otrzymanie rozkładu porów zbliżonego do napowietrzonego betonu. Dodatkowo, uzyskuje się równomiernie rozmieszczone „zbiorniczki” z wodą, która podczas dojrzewania betonu jest w sposób „inteligentny” dozowana do procesu hydratacji cementu.



Rys.8. Rozkład powietrza w klasach średnic porów betonów o  $w/s = 0,32$  bez nasączonego kruszywa lekkiego; S3/1 - beton bez napowietrzenia, S3/2 - beton napowietrzony  
 Fig.8. Distribution of the air content in the classes of the concrete air-voids diameters,  $w/b = 0.32$ , concrete without pre-wetted LWA; S3/1 - non air-entrained concrete, S3/2 - air-entrained concrete



Rys.9. Rozkład powietrza w klasach średnic porów betonów o  $w/s = 0,32$  z nasączonym kruszywem lekkim frakcji 0÷2 mm, S3/3 - zastąpienie 1 frakcji, S3/4 - zastąpienie 1/3 frakcji  
 Fig.9. Distribution of the air content in the classes of the concrete air-voids diameters,  $w/b = 0.32$ , concrete with pre-wetted LWA 0÷2 mm fraction; S3/3 - replacement of the half of the 0÷2 mm fraction, S3/4 - replacement of the 1/3 of the 0÷2 mm fraction



Rys.10. Rozkład powietrza w klasach średnic porów betonów o  $w/s = 0,32$  z nasączonym kruszywem lekkim frakcji 2÷4 mm, S3/5 - zastąpienie całej frakcji, S3/6 - zastąpienie 1/2 frakcji

Fig.10. Distribution of the air content in the classes of the concrete air-voids diameters,  $w/b = 0.32$ , concrete with pre-wetted LWA 2÷4 mm fraction; S3/5 - replacement of all of the 2÷4 mm fraction, S3/4 - replacement of the 1/2 of the 2÷4 mm fraction

Parametry charakteryzujące układ porów w stwardniałym betonie, tj. wskaźnik rozstawu porów  $\bar{L}$ , powierzchnię właściwą  $\alpha$  oraz zawartość mikroporów  $A_{300}$ , wyznaczono wg zaleceń normy PN-EN 480-11:2000, [8]. Wyniki przeprowadzonych badań są przedstawione w tabl. 4 (wartości średnie z trzech próbek).

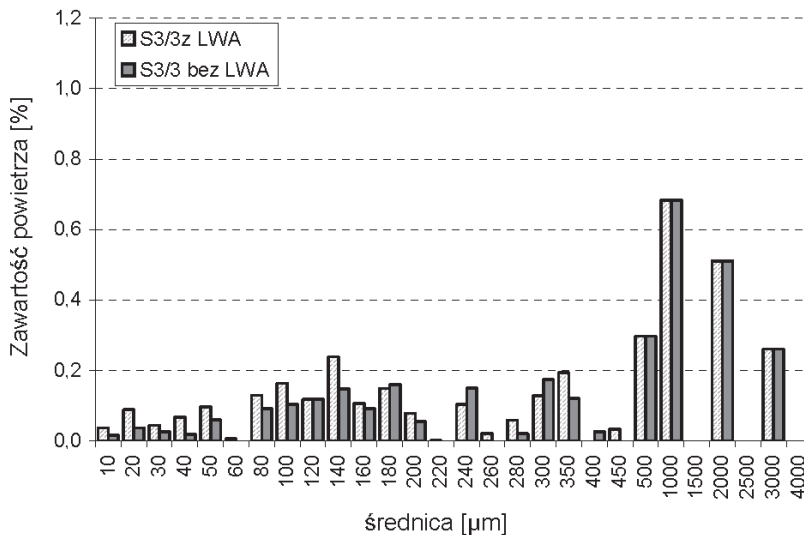
Tablica 4. Wyniki badania struktury porów w BWW z nawilżonym kruszywem lekkim bez LWA - wyniki dotyczą tylko porów w matrycy cementowej z LWA - wyniki dotyczą porów w matrycy cementowej i w kruszywie lekkim

Table 4. Results of the air-voids structure testing in the HPC with pre-wetted LWA without LWA - the results concern only air-voids in the cement matrix with LWA - the results concern air-voids in the cement matrix and in the lightweight aggregate

Beton	Zawartość powietrza			Wskaźnik rozstawu porów $\bar{L}$			Powierzchnia właściwa $\alpha$			$A_{300}$		
	[%]			[mm]			[mm <sup>-1</sup> ]			[%]		
	z LWA	bez LWA	różnica	z LWA	bez LWA	różnica	z LWA	bez LWA	różnica	z LWA	bez LWA	różnica
S3/3	3,94	3,37	0,57	0,12	0,18	-0,06	43,24	29,08	14,16	1,63	1,17	0,46
S3/4	3,11	2,92	0,19	0,23	0,28	-0,05	24,03	20,23	3,80	0,81	0,65	0,16
S3/5	3,89	2,98	0,91	0,17	0,25	-0,08	29,98	22,94	7,04	1,47	0,93	0,54
S3/6	4,76	4,58	0,18	0,24	0,27	-0,03	18,83	17,08	1,75	0,97	0,88	0,09

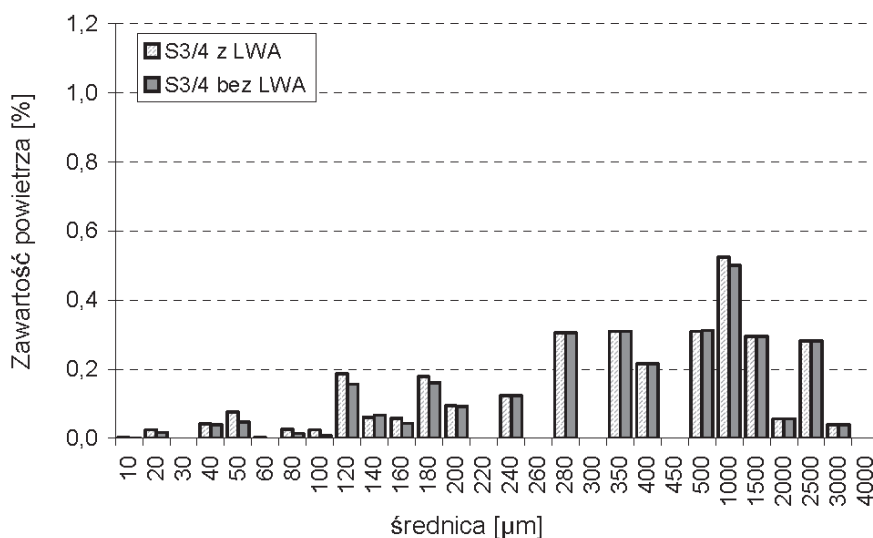
Przeprowadzone badania wykazały, że pory w kruszywie lekkim frakcji 0÷2 mm i 2÷4 mm wpływają na wyniki badania porowatości betonu. Zwiększyły się zawartości powietrza, powierzchnie właściwe oraz wskaźniki  $A_{300}$ , natomiast zmniejszeniu uległ wskaźnik rozmieszczenia porów powietrznych. Najmniejsze różnice w wartościach parametrów charakteryzujących układ porów w betonie (z i bez uwzględnienia porów w kruszywie lekkim) uzyskano dla betonu S3/6. Podobny wzrost zawartości powietrza, ok. 0,20%, zanotowano w betonach S3/4 i S3/6, w których zastąpiono odpowiednio 1/3 frakcji 0÷2 mm i 1/2 frakcji 2÷4 mm nawilżonym kruszywem lekkim. Odpowiednio mniejsze wartości  $\bar{L}$  otrzymano dla betonów, w których zastąpiono większą część kruszywa zwykłego przez nawilżone kruszywo lekkie. W betonie S3/5, w którym zastąpiono całą frakcję 2÷4 mm, w porównaniu z betonem S3/6 (połowa frakcji 2÷4 mm), uzyskano obniżenie  $\bar{L}$  o 0,05 mm.

Na rysunkach 11 - 14 przedstawiono rozkład procentowych zawartości powietrza w poszczególnych klasach średnic porów w betonach wysokowartościowych z LWA serii S3. Z powyższych wykresów wynika, że zastąpienie części kruszywa zwykłego przez nawilżone kruszywo lekkie powoduje zwiększenie porowatości w mniejszych zakresach średnic porów (rys. 11 i 13). Również z rys. 12 i 14 widać, lecz już w mniejszym stopniu, że LWA powoduje wzrost mikroporowatości badanych betonów.

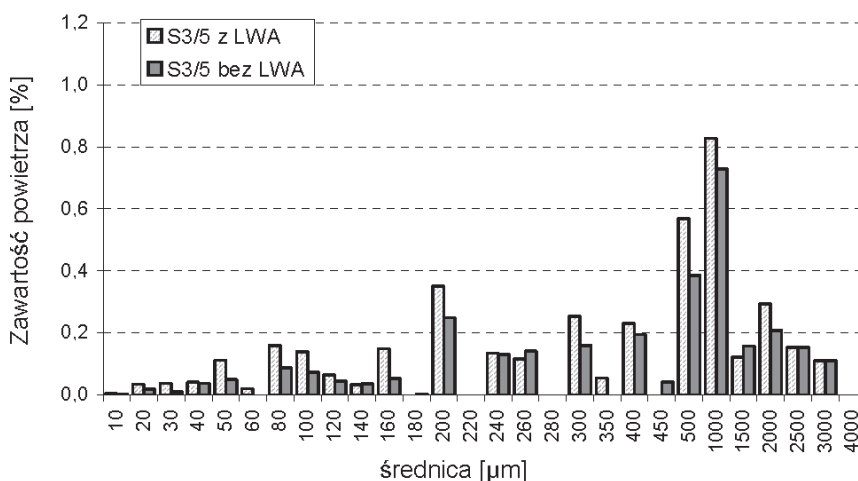


Rys.11. Rozkład powietrza w klasach średnic porów betonów o  $w/s = 0,32$  z nawilżonym kruszywem lekkim frakcji 0÷2 mm, S3/3 - zastąpienie 1/2 frakcji

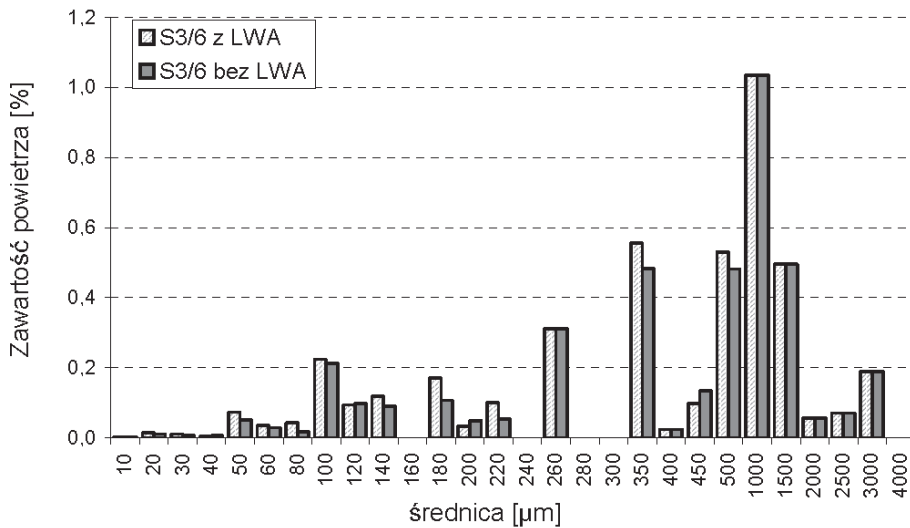
Fig.11. Distribution of the air content in the classes of the concrete air-voids diameters,  $w/b = 0.32$ , concrete with pre-wetted LWA; S3/3 - replacement of the half of the 0÷2 mm fraction



Rys.12. Rozkład powietrza w klasach średnic porów betonów o  $w/s = 0,32$  z nawilżonym kruszywem lekkim frakcji 0+2 mm, S3/4 - zastąpienie 1/3 frakcji  
 Fig.12. Distribution of the air content in the classes of the concrete air-voids diameters,  $w/b = 0.32$ , concrete with pre-wetted LWA 0+2 mm fraction; S3/4 - replacement of the 1/3 of the 0+2 mm fraction



Rys. 13. Rozkład powietrza w klasach średnic porów betonów o  $w/s = 0,32$  z nawilżonym kruszywem lekkim frakcji 2+4 mm, S3/5 - zastąpienie całej frakcji  
 Fig.13. Distribution of the air content in the classes of the concrete air-voids diameters,  $w/b = 0.32$ , concrete with pre-wetted LWA 2+4 mm fraction; S3/5 - replacement of all of the 2+4 mm fraction



Rys. 14. Rozkład powietrza w klasach średnic porów betonów o  $w/s = 0,32$  z nawilżonym kruszywem lekkim frakcji 2÷4 mm, S3/6a - zastąpienie 1/2 frakcji

Fig. 14. Distribution of the air content in the classes of the concrete air-voids diameters,  $w/b = 0.32$ , concrete with pre-wetted LWA 2÷4 mm fraction; S3/6 - replacement of the half of the 2÷4 mm fraction

Przeprowadzone badania wykazały więc, że kruszywo lekkie nawilżone wodą, frakcji 0÷2 mm i 2÷4 mm pozytywnie wpływa na kształtowanie struktury porowatości betonów wysokowartościowych. W każdym przypadku badanych parametrów, tj. zawartości powietrza, wskaźniku rozmieszczenia porów, powierzchni właściwej oraz zawartości porów mniejszych od 300 μm, nastąpiło przesunięcie wartości tych parametrów w korzystną stronę z uwagi na odporność na powierzchniowe łuszczenie.

## 5. BADANIA MROZODPORNOŚCI WEWNĘTRZNEJ BETONÓW

### 5.1. ZAKRES BADAŃ

Celem sprawdzenia mrozoodporności wewnętrznej betonów wykonanych z zastąpieniem części kruszywa nawilżonym kruszywem lekkim, wzorując się na serii S3, wykonano betony oznaczone jako S4 – tabl. 5. Z uwagi na niezadowalające wyniki odporności na powierzchniowe łuszczenie, nie powtórzono betonu S3/3. Wykonano mieszanki bez dodatku nawilżonego kruszywa lekkiego S4/1 – bez domieszki napowietrzającej i S4/2 z domieszką napowietrzającą. Frakcję piaskową 0÷2 mm i frakcję bazaltową 2÷4 mm zastąpiono objętościowo keramzytem o uziarnieniu według odpowiadającej im krzywej przesiewu. W serii S4/4 zastąpiono 1/3 części objętości piasku keramzytem 0÷2 mm, a w seriach S4/5 i S4/6 – całą i połowę objętości bazaltu 2÷4 mm odpowiadającą mu frakcją kruszywa lekkiego.



Tablica 5. Skład mieszanek betonowych w  $\text{kg/m}^3$ , seria S4  
 Table 5. Composition of concrete mixes,  $\text{kg/m}^3$ , series S4

Skład	Seria						
	S4/1	S4/2	S4/4	S4/5	S4/6	S4/7	S4/8
cement CEM I 42,5R	400	400	400	400	400	–	–
cement CEM I 32,5 R	–	–	–	–	–	340	340
piasek 0÷2 mm	700	700		700	700	700	700
bazalt 2÷4 mm	267	267	267	–	133,5	–	133,5
granit 4÷8 mm	267	267	267	267	267	267	267
bazalt 8÷16 mm	608	608	608	608	608	608	608
keramzyt 0÷2 mm	–	–	66	–	–	–	–
keramzyt 2÷4 mm	–	–	–	67,8	33,9	67,8	33,9
pył krzemionkowy	40	40	40	40	40	–	–
woda	140	140	111,2	110,4	125,2	123,4	138,2
superplastyfikator	8,8	8,8	8,8	8,8	8,8	6,8	6,8
dom. napowietrzająca	–	0,13	–	–	–	–	–
woda/spoiwo tj. w/s	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,45	0,45

Podobnie jak w serii S3 oznaczono podstawowe parametry mieszanek betonowych serii 4, tj. opad stożka, gęstość objętościową i zawartość powietrza – tabl. 6, oraz wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach dojrzewania – tabl. 7.

Tablica 6. Wyniki oznaczenia opadu stożka, gęstości objętościowej oraz zawartość powietrza w mieszankach betonowych, seria S4  
 Table 6. The results of the slump, density and air content of fresh mix, series S4

Oznaczenie składu	Opad stożka [mm]	Gęstość objętościowa [ $\text{g/cm}^3$ ]	Zawartość powietrza [%]
S4/1	160	2,454	4,4
S4/2	130	2,466	4,8
S4/4	150	2,437	4,4
S4/5	40	2,395	4,1
S4/6	85	2,406	4,8
S4/7	200	2,451	3,5
S4/8	200	2,479	3,1

Tablica 7. Wyniki oznaczenia wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach dojrzewania, seria S4

Table 7. The results of the compressive strength after 28 day curing of concrete, series S4

Oznaczenie składu	$f_{c28}$ – średnia z 5 próbek [MPa]	Odchylenie standardowe [MPa]
S4/1	83,9	2,87
S4/2	71,7	4,09
S4/4	86,7	9,50
S4/5	84,0	2,41
S4/6	75,9	8,23
S4/7	67,1	3,53
S4/8	66,1	4,32

## 5.2. OPIS BADAŃ

Badania metodą zwykłą wg PN-88/B-06250, [1] zostały przeprowadzone na 12 próbkach sześciennych z każdej serii. Sześć próbek porównawczych przeznaczonych do badania wytrzymałości na ściskanie przechowywano w wodzie o temperaturze  $18 \pm 2$  °C przez cały czas badania odporności na działanie mrozu, a pozostałe sześć próbek umieszczono w automatycznej komorze klimatycznej Elbanton. Cykl zamrażania próbek w powietrzu trwał cztery godziny, a cykl odmrażania w wodzie o temperaturze  $+18 \pm 2$  °C trwał dwie godziny. Badania zakończono po 160 cyklach zamrażania - odmrażania, zgodnie z wymaganiami zawartymi w ogólnych specyfikacjach technicznych, [9].

Badanie metodą ASTM C 666, [2] polega na poddawaniu cyklicznemu zamrażaniu próbek według jednego z dwóch możliwych sposobów: w wodzie według tzw. metody A lub w powietrzu według metody B, z następującym rozmrażaniem w wodzie. Po 300 cyklach zamrażania i odmrażania określana jest względna wartość dynamicznego modułu sprężystości  $P_{DF}$  próbki, chyba, że wcześniej – po  $N_{DF}$  cyklach – obniży się ona do 60% wartości początkowej. Współczynnik  $DF$  wyznacza się ze wzoru (1):

$$DF = \frac{P_{DF} \cdot N_{DF}}{300} . \quad (1)$$

Zwyczajowo uznaje się, że mrozoodporny jest taki beton, dla którego stwierdzono  $DF > 80$  oraz, że beton jest niemrozoodporny, gdy  $DF < 60$ .

Badanie przeprowadzono w Instytucie Budownictwa Politechniki Wrocławskiej według normy ASTM C 666 [2] zgodnie z procedurą A: zamrażanie i odmrażanie w wodzie, cykl 4h, temperatura zamrażania  $-18$  °C, rozmrażania  $+4,4$  °C. Zastosowano taki sam reżim temperaturowy, lecz zamiast określenia modułu sprężystości, kontrolę

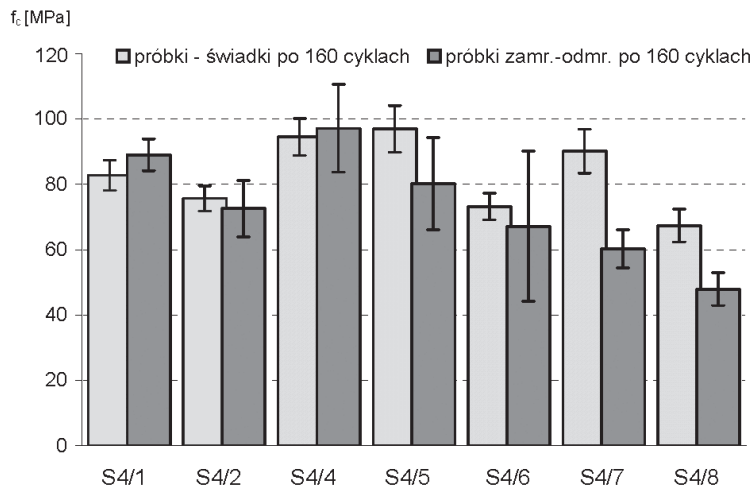
postępu zmian struktury w objętości próbek w funkcji cykli zamrażania i odmrażania oparto na pomiarze rezystancji.

Rezystywność (rezystancja właściwa) to miara oporu, z jakim materiał przeciwstawia się przepływowi prądu elektrycznego. Można ją wyznaczyć znając wymiary geometryczne i rezystancję danego materiału. Jest to cecha niezależna od wymiarów geometrycznych elementów próbnych, w przypadku betonu, może osiągać wartość od  $10^1$  do  $10^5 \Omega \text{ m}$ , zależnie od wilgotności i składu. Rezystywność nasyconego wodą betonu zależy głównie od  $w/s$ , ułamka objętościowego zaczynu, przepuszczalności i składu porowego elektrolitu. Domieszki chemiczne mają wpływ na wyniki głównie przez wpływ na hydratację, dodatki mineralne – strukturę porów i odpowiednio przepuszczalność. Kierując się tymi przesłankami założono, że zarówno różnice w strukturze wyjściowych próbek i ich reakcja na cykliczne zamrażanie i odmrażanie ujawni się w wartościach mierzonego oporu i dlatego przyjęto rezystywność za wskaźnik stanu próbek cyklicznie zamrażanych. Informację o zwiększeniu się wody zamrażalnej uzyskano na podstawie przyrostu wytrzymałości  $f_c$  i rezystywności mierzonych przed i po zamrożeniu próbek (wody w porach) w temperaturze  $+20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ , [10].

Badaniu poddane było sześć kostek 100 mm z każdego składu (trzy próbki świadki i trzy próbki poddane cyklom zamrażania i odmrażania). Pomiar wykonywano co około 50 cykli, a zakończono po 384 cyklach. Okres od chwili wyjęcia próbki z komory zamrażarki o temperaturze odpowiadającej cyklowi odmrażania do zakończenia pomiaru nie przekraczał pięciu minut. Podstawą zakończenia pomiarów było pojawienie się wyraźnych oznak zniszczenia próbek z niektórych serii: spadki oporu, wykruszanie się krawędzi lub naroży. Temperatura pomiaru próbek wyjściowych po 14 dniach twardnienia w nasyconym roztworze  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  wynosiła  $+20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ , natomiast pozostałych próbek od  $+4,4 \text{ }^\circ\text{C}$  do  $+7 \text{ }^\circ\text{C}$  po określonej liczbie cykli (pomiar pod koniec cyklu rozmrażania). Pomiar rezystancji po ostatnim cyklu mrożenia wykonano na próbkach w temperaturze rozmrażania około  $+5 \text{ }^\circ\text{C}$  i po podniesieniu ich temperatury do  $+20 \text{ }^\circ\text{C}$  (12h). Po ostatnim cyklu i pomiarze oporu oznaczono % ubytki masy oraz wytrzymałość na ściskanie.

### 5.3. WYNIKI BADAŃ

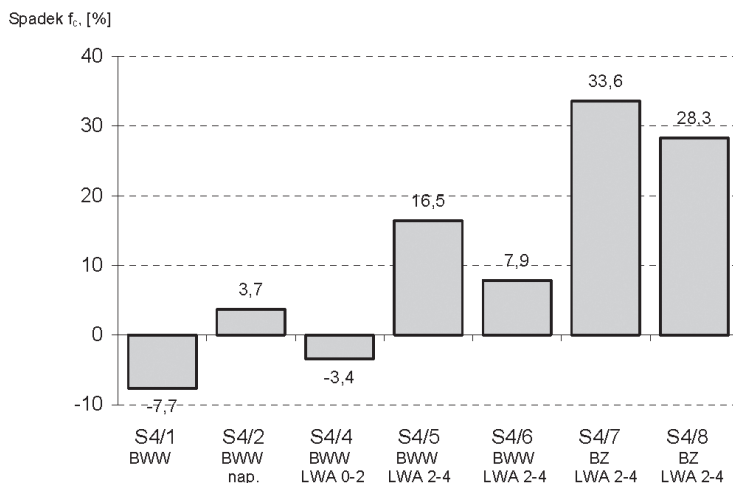
Na rys. 15 podano wytrzymałość na ściskanie próbek betonu po 160 cyklach zamrażania i rozmrażania wg PN-88/B-06250 oraz próbek świadków. Najniższe wartości wytrzymałości na ściskanie po 160 cyklach zanotowano w przypadku betonów zwykłych z dodatkiem kruszywa lekkiego, S4/7 i S4/8, najwyższe wartości natomiast uzyskał beton wysokowartościowy bez domieszki napowietrzającej i bez nawilżonego kruszywa lekkiego – S4/1 oraz BWW z kruszywem lekkim – S4/4. W przypadku próbek świadków wartości odchylenia standardowego w przypadku wytrzymałości na ściskanie były zbliżone, ok. 5 MPa, natomiast w przypadku próbek zamrażanych i odmrażanych wahały się od 5 MPa do 23 MPa.



Rys.15. Wytrzymałość na ściskanie próbek świadków i próbek po 160 cyklach zamrażania i odmrażania

Fig.15. The compressive strength of the „witness” sample and the samples after 160 freezing/thawing cycles

Kryterium mrozoodporności wg PN-88/B-06250 jest zmiana wytrzymałości na ściskanie betonów poddanych cyklicznemu zamrażaniu i odmrażaniu w porównaniu do próbek świadków. Jeśli spadek wytrzymałości przekroczy 20 %, beton uznaje się za niemrozoodporny. Na rys. 16 pokazano procentowy spadek wytrzymałości próbek zamrażanych i odmrażanych w odniesieniu do próbek świadków.



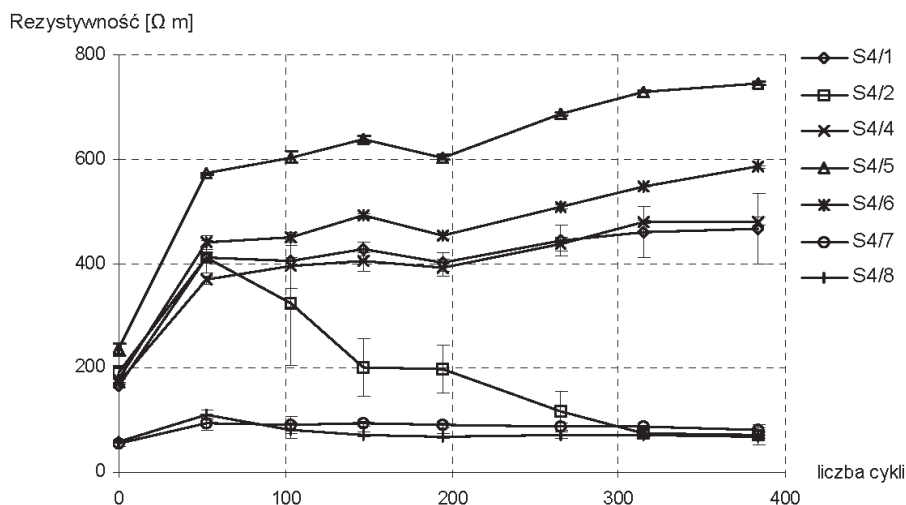
Rys.16. Wyniki badania mrozoodporności betonów wg PN-88/B-06250, procentowy spadek wytrzymałości próbek zamrażanych i odmrażanych w odniesieniu do próbek świadków

Fig.16. The results of the frost resistance test according to PN-88/B-06250, the percentage drop in the compressive strength of the freezing/thawing samples to the „witness” sample

Największy spadek wytrzymałości na ściskanie, znacznie powyżej dopuszczalnej granicy 20%, po 160 cyklach zamrażania i odmrażania wykazały betony zwykłe z kruszywem lekkim, tj. S4/7 i S4/8 – odpowiednio 33,6 % oraz 28,3 %.

Betony wysokowartościowe, zarówno z nawilżonym kruszywem lekkim jak też bez kruszywa lekkiego, spełniły wymagania normowe. Największy spadek wytrzymałości 16,5% zanotowano w przypadku betonu S4/5, w którym zastąpiono objętościowo nawilżonym kruszywem lekkim całą frakcję 2÷4 mm. Dwa betony bez domieszki napowietrzającej, S4/1 bez kruszywa lekkiego i S4/4 z kruszywem lekkim – zastąpienie 1/3 objętości kruszywa frakcji 0÷2 mm, wykazały nawet zwiększenie wytrzymałości na ściskanie po 160 cyklach zamrażania i odmrażania w stosunku do próbek świadków. Betony zwykłe z nawilżonym kruszywem lekkim nie spełniły wymagań normy, tzn., że okazały się niemrozoodporne.

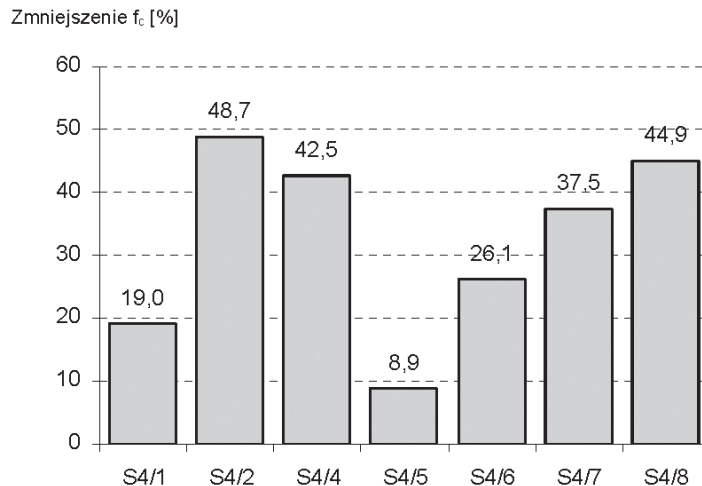
Badaniu mrozoodporności ocenianej pomiarem oporu elektrycznego (zmodyfikowane badanie ASTM C 666 A, [2]) poddano 42 próbki. Na rys. 17 przedstawiono wyniki pomiarów oporu elektrycznego przeliczone na rezystywność.



Rys.17. Wpływ cykli zamrażania i odmrażania na rezystywność betonu  
Fig.17. The influence of the freezing/thawing cycles on the resistivity of concrete

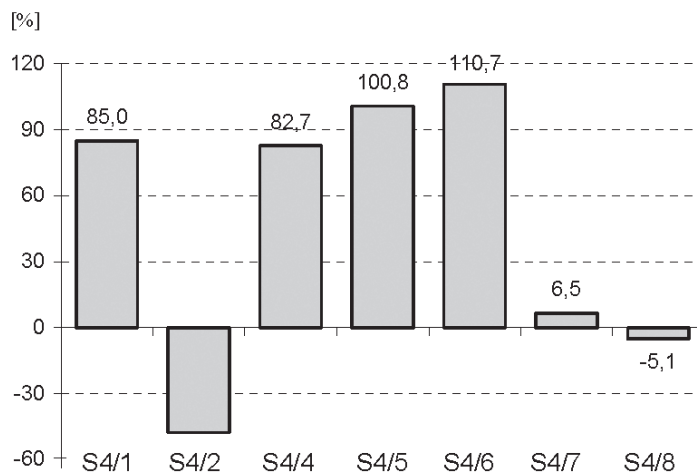
Napowietrzony beton wysokowartościowy S4/2 po 50 cyklach zamrażania i odmrażania wykazał gwałtowny spadek rezystywności, natomiast w przypadku pozostałych betonów BWW w miarę zwiększania liczby cykli rezystywność rosła. Najwyższe wartości rezystywności wykazały betony z kruszywem lekkim, S4/5 i S4/6. Betony zwykłe z kruszywem lekkim wykazały stosunkowo zbliżone zachowanie podczas badania, tj. rezystywność wynosiła ok. 80 om.

Z krzywych obrazujących zmiany rezystancji ze wzrostem liczby cykli zamrażania-odmrażania (rys. 17) wynika, że betony o mniejszej odporności (S4/2, S4/7 i S4/8) charakteryzuje zmniejszanie się rezystancji wraz ze wzrostem liczby cykli. W seriach bardziej odpornych, opór stopniowo rośnie i wzrost ten jest tym większy, im mniejszy jest spadek wytrzymałości (rys. 18, 19).



Rys.18. Zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie próbek po cyklicznym zamrażaniu (384 cykle) w stosunku do wytrzymałości 14-dniowej

Fig.18. The decrease of the compressive strength of the specimens after 384 freezing/thawing cycles to the compressive strength at 14 days



Rys.19. Względne zmiany rezystywności próbek cyklicznie zamrażanych - 384 cykle, w stosunku do próbek wyjściowych w wieku 14 dni

Fig. 19. The relative change of the resistivity of the freezing/thawing specimens - 384 cycles to the reference specimens at 14 days

Na podstawie wytrzymałości na ściskanie w wieku 14 dni  $f_{c14}$  (0 cykli zamrażania) badane serie betonów można uszeregować w następującej kolejności malejącej wytrzymałości:

$$S4/4 > S4/5 > S4/6 > S4/1 \approx S4/2 > S4/7 \approx S4/8 ,$$

natomiast ze względu na rezystywność  $r_{14d}$  (0 cykli zamrażania) kolejność jest następująca:

$$S4/5 > S4/2 > S4/6 \approx S4/4 \approx S4/1 > S4/7 \approx S4/8 .$$

Po 384 cyklach zamrażania i odmrażania serie betonów można malejąco uszeregować według wytrzymałości na ściskanie  $f_{c384}$ :

$$S4/5 > S4/1 \approx S4/6 > S4/4 > S4/7 \approx S4/2 \approx S4/8 ,$$

oraz według rezystywności  $r_{384c}$ :

$$S4/5 > S4/6 > S4/4 \approx S4/1 > S4/2 > S4/7 \approx S4/8 .$$

Z uszeregowania serii betonów według malejących wartości  $f_{c14}$  i  $r_{14d}$  wynika, że o wielkości oporu decyduje przede wszystkim obecność lub brak pyłu krzemionkowego, natomiast o wytrzymałości – głównie stosunek wodno-spoiwowy. Z analizy podobnych szeregów utworzonych z serii po 384 cyklach zamrażania i odmrażania wynika, że:

- mrozoodporność betonu o niskim  $w/s = 0,32$  (beton napowietrzony S4/2) bez nawilżonego lekkiego kruszywa jest niedostateczna i jest porównywalna z mrozoodpornością próbek o  $w/s = 0,45$  (S4/7 i S4/8) z dodatkiem takiego kruszywa,
- dużym spadkiem wytrzymałości na ściskanie (S4/2 i S4/8) odpowiadają spadki rezystywności.

Spośród badanych betonów największą mrozoodpornością charakteryzuje się seria S4/5 zawierająca kruszywo lekkie. Taką samą ilość kruszywa lekkiego, ale o większym  $w/s$ , zawiera seria S4/7 – jedna z trzech najgorszych. Chociaż obecność lekkiego kruszywa nie może skompensować braku pyłu krzemionkowego, większego  $w/s$  czy mniejszej zawartości cementu, porównanie serii S4/7 z S4/8 wskazuje, że tam gdzie jest tego kruszywa więcej, stopień zniszczenia jest nieco mniejszy (rys. 18). Przy ograniczeniu liczby cykli zamrażania i odmrażania do zalecanej normą (maksymalnie 300), z pięciu serii badanych betonów o  $w/s = 0,32$  tylko jeden – napowietrzony S4/2 – można by było uznać za niemrozoodporny.

## 6. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań można sformułować następujące wnioski.

Betony z nawilżonym kruszywem lekkim wykazały małą zmienność wskaźnika rozmieszczenia porów  $\bar{L}$  oraz powierzchni właściwej porów powietrznych  $\alpha$ . Świadczy to o poprawności rozmieszczenia ziaren kruszywa z wodą w betonie, a także potwierdza możliwość otrzymania założonych parametrów struktury porów powietrznych.

Zarówno wyniki badania wg Polskiej Normy PN-88/B-06250, jak i ASTM C 666 A, wskazują, że nawilżone kruszywo lekkie w betonach wysokowartościowych przyczynia się do otrzymania mrozoodpornych betonów o lepszych parametrach niż betony napowietrzane. Otrzymane wyniki badania mrozoodporności wskazały że:

- betony zwykłe S4/7 i S4/8 okazały się niemrozoodporne chociaż część zwykłego kruszywa została zastąpiona przez nawilżone kruszywo lekkie,
- betony S4/1 (bez LWA i bez napowietrzenia) wykazały bardzo dobre wyniki wg Polskiej Normy i dobre wg ASTM C 666 A,
- betony wysokowartościowe napowietrzane S4/2 bez LWA wykazały dobrą mrozoodporność jedynie według Polskiej Normy,
- wszystkie betony wysokowartościowe wykonane z zastąpieniem części kruszywa zwykłego przez nawilżone kruszywo lekkie wykazały dobrą mrozoodporność wg obu metod badawczych.

## 7. UWAGI PODSUMOWUJĄCE

Połączenie zmodyfikowanej metody Borås (badanie odporności na powierzchniowe łuszczenie przy zastosowaniu soli) z automatyczną analizą rozmieszczenia porów powietrznych w betonach zawierających drobne frakcje nawilżonego kruszywa lekkiego jest rozszerzeniem dotychczas stosowanych technik badawczych.

Betony nie zawierające domieszki napowietrzającej i w związku z tym nie mające zwyczajowo przyjętych za poprawne parametrów struktury porów powietrznych, wykazały odporność na powierzchniowe łuszczenie, jeżeli zawierały nawilżony keramzyt. Przeprowadzone badania wykazały, że wprowadzenie nawilżonego wodą kruszywa lekkiego frakcji 0÷2 mm i 2÷4 mm podczas mieszania składników nie jest trudne do wykonania w przeciwieństwie do poprawnego wprowadzenia domieszki napowietrzającej. Dotyczy to zarówno betonu towarowego przygotowywanego w wytwórni, jak i wykonanego na budowie. Chociaż przy współczynniku  $w/c=0,45$  nawilżone kruszywo lekkie nie pełni tak ważnej roli z uwagi na powierzchniowe łuszczenie, jak w przypadku betonów wysokowartościowych o niższym  $w/c$ , to jednak betony wysokowartościowe wykonane z zastąpieniem części kruszywa nawilżonym keramzytem wykazały zbliżone wyniki do betonów zwykłych i wysokowartościowych, z tradycyjnym napowietrzeniem. Najlepszą odporność na powierzchniowe łuszczenie w obecności soli odladzających wykazały betony S3/6 i S3/2. W betonie S3/6 zastąpiono połowę frakcji 2÷4 mm nasączonym kruszywem lekkim o takim samym uziarnieniu, natomiast beton S3/2 był betonem napowietrzonym.

Dzięki zastosowaniu nawilżonego kruszywa lekkiego jako materiału, który wpływa pozytywnie na odporność betonów na powierzchniowe łuszczenie, można otrzymać też inne korzyści, wynikające z zastosowania tego „inteligentnego” składnika betonu. Powszechnie znane czynniki, które przyczyniają się do pogarszania odporności na powierzchniowe łuszczenie, dzięki stosowaniu dodatku nasączonego LWA nie będą już tak groźne. Brak domieszki napowietrzającej, niedostateczna pielęgnacja, kontakt



z solami, brak odwodnienia czy niekorzystne warunki pogodowe nie mają już tak dużego, negatywnego wpływu na trwałość betonu.

Biorąc pod uwagę ceny domieszek napowietrzających i trudności technologiczne przy ich stosowaniu do betonów oraz niski koszt i skuteczność stosowania nawilżonego lekkiego kruszywa, może okazać się to praktyczną metodą zabezpieczania powierzchni konstrukcji betonowych narażonych na cykle zamrażania i odmrażania i na działanie roztworu soli.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] PN-88/B-06250: Beton zwykły
- [2] ASTM C 666: Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing. Annual Book of ASTM Standards, 1991
- [3] RILEM: Draft of Chapter 3: Materials and Methods for Internal Curing. RILEM, TC-196 ICC, marzec 2004
- [4] SS 13 72 44: Concrete testing; Hardened concrete; Scaling at freezing, Swedish Standard, 1995
- [5] ASTM C 672: Standard Test Method for Scaling Resistance of Concretes Surfaces Exposed to Deicing Chemicals. Annual Book of ASTM Standards, 1991
- [6] *Petersson P.E.*: The influence of silica fume on the salt frost resistance of concrete, Statens Provningsanstalt. Building Technology, Technical report SP-Rapp 1986:32, Borås, 1986
- [7] *Jóźwiak-Niedźwiedzka D.*: Scaling resistance of different concretes tested with Borås method. International Symposium on Non-Traditional Cement&Concrete, Brno, June 2002, 463-471
- [8] PN-EN 480-11:2000: Domieszki do betonu, zaprawy i zaczynu. Metody badań. Oznaczanie charakterystyki porów powietrznych w stwardniałym betonie, PKN, Warszawa 2000
- [9] Ogólne specyfikacje techniczne. D-05.03.04, Nawierzchnia betonowa. Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad, Warszawa 2003
- [10] *Kucharska L., Moczko M., Mierzejewska O.*: Ocena skuteczności cyklicznego zamrażania i odmrażania betonu typu BWW pomiarem oporu elektrycznego. Politechnika Wrocławska, Raport SPR, 2002

## THE COUNTERACTING OF THE CONCRETE SCALING PROBLEM BY MEANS OF PRE-WETTED LIGHTWEIGHT AGGREGATE Part II – Laboratory tests

### Abstract

The first part of the paper was published in 2/2006 issue. The salt scaling tests were performed according to the Swedish Standard SS 13 72 44 (so-called Borås method). Freeze/thaw exposure was carried out on the upper horizontal surface of the specimens - cast surface, while the remaining surfaces were isolated against humidity and heat transfer. The scaled material was collected and weighed after a given number of freeze/thaw cycles, and the results expressed as mass per unit area were recorded. The internal frost resistance of the same concretes was tested according to ASTM C 666 A method and according to the Polish Standard PN-B/06250. Additionally, air-content  $A$ , specific surface  $\alpha$ , spacing factor  $\bar{L}$  and the content of micropores below 0.3 mm  $A_{300}$  in the hardened concrete specimens were measured with the PN-EN 480-11 method on plane sections. It has been found out that the replacement of the fine fraction of the natural aggregate by the adequate fraction of the pre-wetted lightweight aggregate improved the scaling resistance and the internal frost resistance of concrete.