

Znaczenie parametrów struktury porowatości samozagęszczalnego betonu, odpornego na mróz

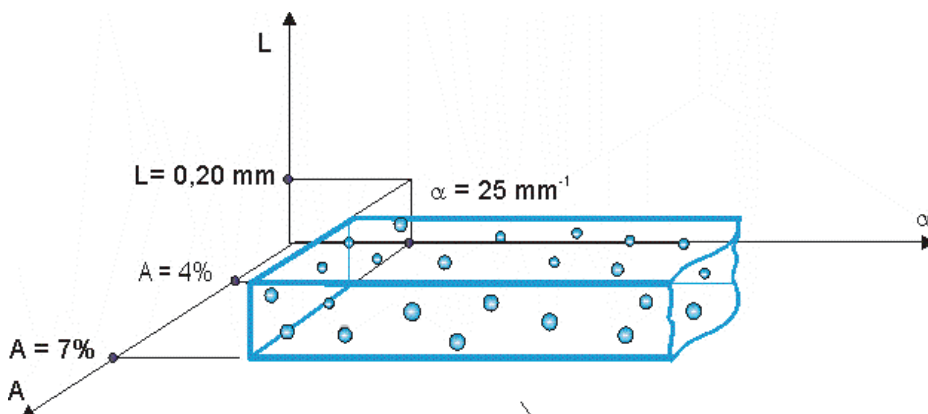
The importance of porosity structure parameters of freeze – thaw resistant self-compacting concrete

1. Wprowadzenie

Pomimo że mechanizmy niszczenia betonu przez mróz nie są w pełni wyjaśnione (7), metody zapobiegania tej destrukcji spowodowanej cyklicznym zamrażaniem i rozmrażaniem są dobrze poznane. Prosta metodą zapewnienia odporności betonu na mróz jest zapewnienie odpowiedniego układu porów powietrznych w betonie. Także norma PN-EN 206-1:2003 zaleca napowietrzenie betonu, jako podstawowej metody zapewnienia jego odporności na mróz. Co więcej, określone wartości parametrów struktury porowatości powinny charakteryzować beton odporny na mróz (por. rys. 1 i tabl. 1) (2). W praktyce jednak, struktura porowatości betonu stanowi kolejne losowe kombinacje jej parametrów (por. rys. 2).

W przypadku samozagęszczalnych betonów (SCC) napowietrzanie mieszanki – i co za tym idzie uzyskanie odpowiednich parametrów struktury porowatości, jest problematyczne, z uwagi na proces samozagęszczenia mieszanki (10), (11). W wyniku znacznej płynności takiej mieszanki znajdujące się w niej pęcherzyki powietrza nie są trwałe (rys. 5) (6). Może to wiązać się to z trzema zjawiskami, występującymi oddzielnie lub łącznie (4):

- ucieczką części dużych pęcherzyków w trakcie transportu i układania mieszanki betonowej,
- znikaniem drobnych pęcherzyków, o wymiarach $< 10 \mu\text{m}$,



Rys. 1. Przestrzeń, w której powinny mieścić się wartości parametrów struktury porowatości betonu odpornego na mróz

Fig. 1. Suggested values of porosity structure parameters of frost resistant concrete

1. Introduction

Although the mechanism of concrete deterioration by frost is not perfectly clear, the way to prevent the disruption of concrete due to freezing and thawing cycles is very well known: it is simply to ensure that the hardened concrete has an adequate system of entrained air voids. According to the actual state of knowledge, concrete will be frost-resistant if the values of porosity structure parameters are the following: $\bar{L} = 0.20 \div 0.22 \text{ mm}$, $A = 4 \div 7\%$, $A_{300} > 1.5 \div 1.8\%$, $\alpha > 15 \div 20 \text{ mm}^{-1}$ (4-6). In accordance with the PN-EN 206-1:2003, using air entrainment agent is a basic way of assuring the frost-resistance of concrete.

In case of conventional concrete [Fig. 1] and especially in case of self-compacting concrete air entrainment of the concrete mix as well as obtaining adequate values of porosity structure parameters is a problematical question due to self-compaction of concrete mix (10, 11). As a results of the considerable fluidity of self-compacting concrete mix, air bubbles, which are present in air entrained concrete mix, can be unstable (3).

Generally \bar{L} is used to determine the frost-resistance of concrete. In physical meaning, \bar{L} is an average, biggest distance from any inside cement paste point to the nearest air bubbles [Fig. 3]. \bar{L} has the direct influence on the value of internal tension σ and can decrease its.

In case of self-compacting concrete air entrainment of the concrete mix as well as obtaining adequate values of porosity structure parameters is a problem because of self-compaction of concrete mix [Fig. 5] (10,11). As a results of the considerable flowability of self-compacting concrete mix, air bubbles, which are present in air entrained concrete mix, can became unstable (3,4). This instability can be a source of the following phenomena:

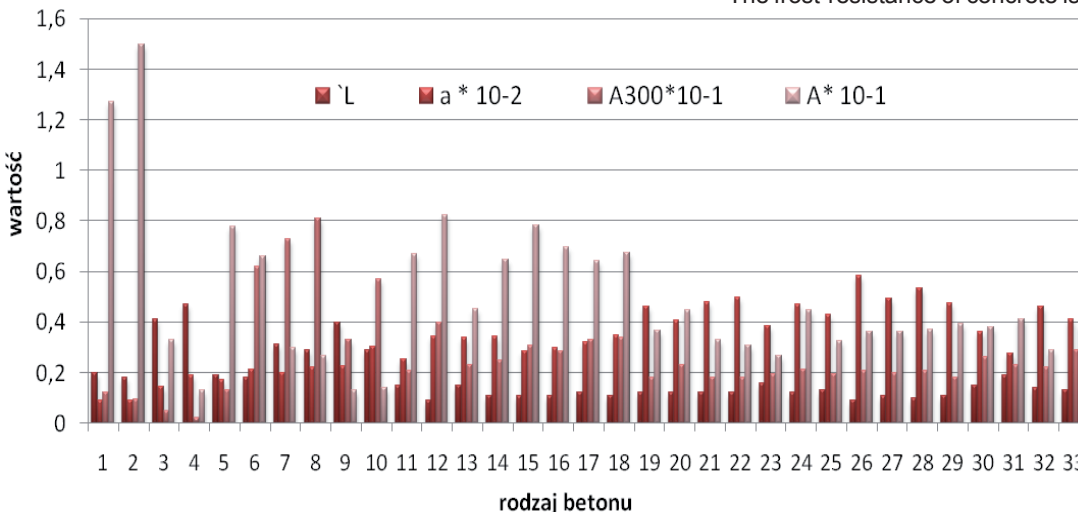
- floating of large air bubbles,
- disappearance due to dissolution of air bubbles less than 0,10 mm,
- coalescence of air bubbles.

Tablica 1 / Table 1

Zalecane wartości parametrów struktury porowatości (8)

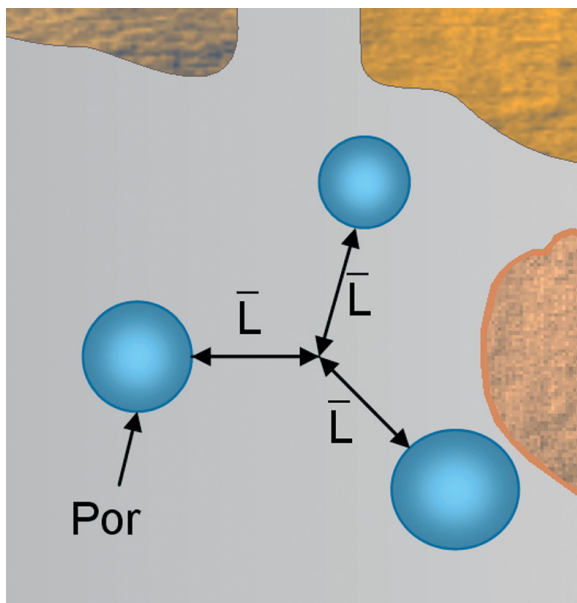
Suggested value of porosity structure parameters (8)

| Parametr Parameter | Jednostka Unit | Wartość Value |
|-----------------------|-------------------|------------------|
| \bar{L} | Mm | 0,20 ÷ 0,22 |
| A | % | 4 ÷ 7 |
| A_{300} | % | > 1,5 ÷ 1,8 |
| α | mm ⁻¹ | > 15 ÷ 20 |



Rys. 2. Zmiany parametrów struktury porowatości betonu, opracowano na podstawie (2)

Fig. 2. Changes of concrete structure porosity, based on data of Glinicki (2)



Rys. 3. Fizyczna interpretacja wskaźnika \bar{L} według (12)

Fig. 3. Physical interpretation of \bar{L} according to (12)

w wyniku rozpuszczania się powietrza w wodzie,

- łączeniem się małych pęcherzyków w większe, co powoduje zwiększenie rozstawu porów.

W celu stwierdzenia, w jakim stopniu proces samozagęszczania wpływa na destabilizację napowietrzenia samozagęszczalnej mieszanki betonowej, przeprowadzono m.in. badania bezpośredniej (wg PN-88/B-06250) oraz pośredniej (wg PN-EN 480-11)

In order to verify if the self-compacting process can influence the stability of air bubbles present in air entrained mix, a test of direct (according to PN-88/B-06250) and indirect (according to PN-EN 480-11) frost-resistance of air entrainment SCC concrete was conducted.

2. Method and results analysis of air entrainment degree of self-compacting concrete

The frost-resistance of concrete is determined among others by its

composition (9). To verify the significance of the influence of concrete mix composition, four factors were chosen for laboratory research: kind of mineral binder (r.d), the water to binder ratio, addition of air-entraining agent (%AEA) and the coefficient of the voids filling in aggregate by cement paste φ_{kz} . The last determines the size of intergrains volume of aggregate [Fig. 6], which is defining the possibility of air-bubbles to leave the SCC mix.

In order to verify the significance of the above-mentioned factors influence of air entrainment lost and frost resistance in case of self-compacting concrete mix, - 25 concrete compositions were chosen, according to the method of experimental design.

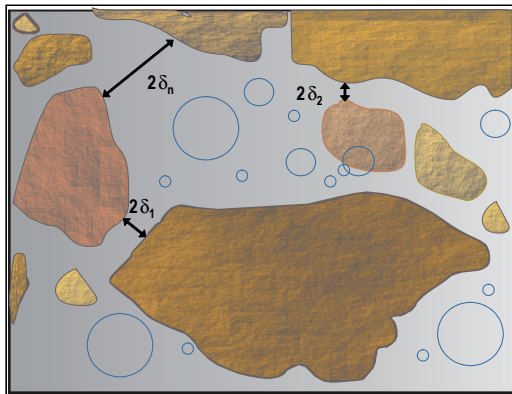
In the beginning of investigation the frost resistance of 25 different self-compacting concrete [Tab. 1] was examined according to PN-88/B-06250. After 28 days of curing concrete samples 150x150x150 mm were put to freezing and thawing cycles in water for three hours in temp. $\pm 20^{\circ}\text{C}$. Because after 150 cycles concrete samples were not damaged, the testing of the frost resistance was continued. A laboratory research was continued when the amount alternate cycles freezing and thawing of concrete amounted to 300. It was noticed that only two types of SCC (S1, S12) were not frost resistant (because the decrease of compression strength was higher than 20% after 300 cycles according to PN-88/B-06250).

Then the porosity structure parameters of concrete samples were tested according to PN-EN 480-11. Unfortunately, because of the limited investment outlays only eight concrete samples were tested [compare with Tab. 1 – dark shed]. The porosity structure research of eight concrete samples was conducted in the Institute of Polish Academy of Science [IPPT PAN] in Warsaw. Among these eight concrete samples only two were not freeze resistant and six which presented different decrease of compression strength after 300 freezing and thawing cycles [compare Table 3 and Fig. 7]. The results of porosity structure parameters examination are depicted on Figures 9 to 14.

odporności na zamrażanie napowietrzonych w różnym stopniu SCC.

2. Metody oraz analiza wyników badań stopnia napowietżenia SCC

Odporność betonu na zamrażanie i rozmrażanie zależy m.in. od jego składu (9). Na podstawie przeprowadzonej analizy istotności wpływu składników mieszanki betonowej zarówno na trwałość napowietżenia jak i na odporność na mróz różnych rodzajów betonu SCC do badań wybrano cztery ważniejsze czynniki: rodzaj dodatku mineralnego (r.d.), wskaźnik wodno-spoiwowy, dodatek domieszki napowietrzającej (%AEA) i wskaźnik wypełnienia kruszywa zaczynem cementowym φ_{kz} (11). Ten ostatni określa wymiar przestrzeni międzyziarnowych (rys. 6) określającą możliwość samoczynnego wydostawania się pęcherzyków powietrza z objętości samozagęszczalnej mieszanki betonowej.



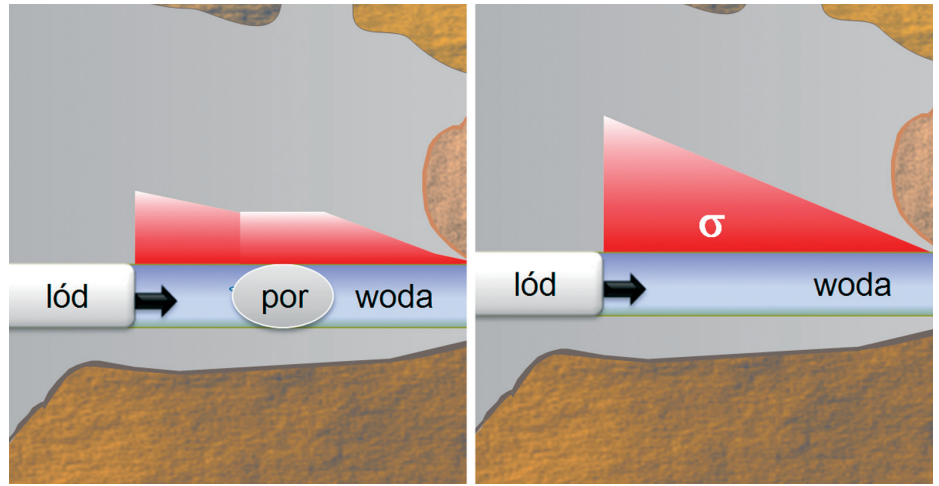
Rys. 6. Model przestrzeni międzyziarnowych

Fig. 6. Model of volume size between aggregate grains

W celu sprawdzenia istotności wpływu wymienionych czynników na przebieg procesu samoodpowietżenia mieszank, jakość napowietżenia oraz wynikową mrozoodporność SCC, skład 25 typów betonów został dobrany na podstawie metody planowania eksperymentu.

Próbki betonów o wymiarach 150x150x150 mm zamrażano i rozmrażano w wodzie, w trzygodzinnych cyklach w temperaturach $\pm 20^{\circ}\text{C}$, w automatycznej komorze klimatyzacyjnej. Ponieważ po 150 cyklach zamrażania i rozmrażania nie stwierdzono uszkodzeń próbek w postaci pęknięć i/lub odprysków oraz spadku ich masy, kontynuowano te badania. Badania zakończono, gdy liczba naprzemiennych cykli wyniosła 300. Wyniki badań odporności na mróz pokazano na rys. 7. Okazało się, że tylko betony S12 i S1 nie uzyskały stopnia mrozoodporności F300.

W oparciu o uzyskane wyniki oszacowano wartości parametrów struktury porowatości SCC, zgodnie z metodą opisaną w PN-EN 480-11 (rys. 8). Niestety, z powodu ograniczonych nakładów finan-



Rys. 4. Wpływ stopnia wypełnienia porów wodą na ciśnienie hydrauliczne w kapilarach (9)

Fig. 4. The influence of degree of filling of pores with water on hydraulic pressure in capillaries (9)



Rys. 5. Możliwe zmiany napowietżenia mieszanki samozagęszczalnej

Fig. 5. Possible changes of air entrainment degree of SCC mix

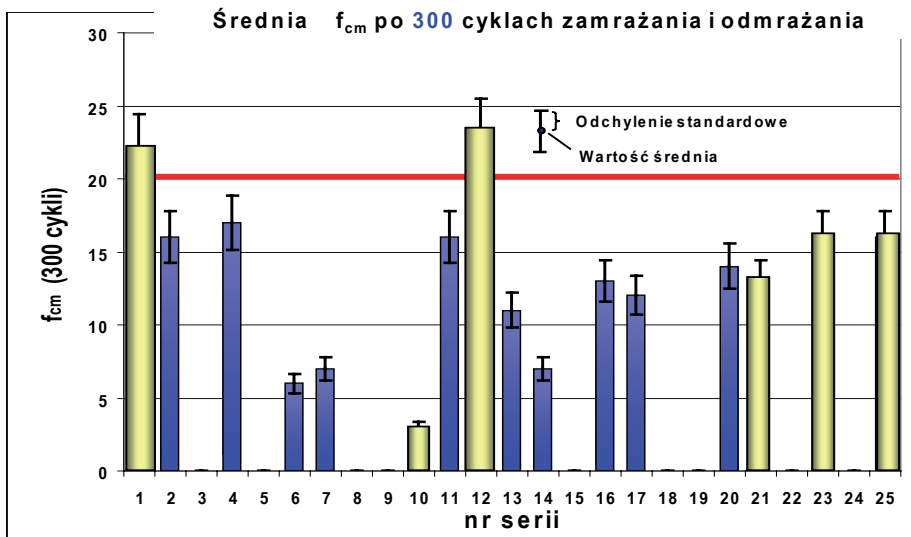
Tablica 2 / Tabela 2

SKŁAD SAMOZAGĘSZCZALNYCH BETONÓW S1-S25 (6)

COMPOSITION OF SELF-COMPACTING CONCRETE S1-S25 (6)

| Rodz. cem. | CEM II B-S 32,5 R | CEM II B-V 32,5 R | CEM II B-M 32,5 R | CEM III 32,5 N | CEM I 32,5 R+ 10% PK |
|------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| %AEA | 11 | 1 | 6 | 16 | 21 |
| 0 | $\varphi_{kz} = 1.5$ w/s = 0.29 | $\varphi_{kz} = 1.2$ w/s = 0.32 | $\varphi_{kz} = 1.4$ w/s = 0.35 | $\varphi_{kz} = 1.1$ w/s = 0.38 | $\varphi_{kz} = 1.3$ w/s = 0.41 |
| 0,005 | 12 | 2 | 7 | 17 | 22 |
| | $\varphi_{kz} = 1.1$ w/s = 0.32 | $\varphi_{kz} = 1.3$ w/s = 0.35 | $\varphi_{kz} = 1.5$ w/s = 0.38 | $\varphi_{kz} = 1.2$ w/s = 0.41 | $\varphi_{kz} = 1.4$ w/s = 0.29 |
| 0,010 | 13 | 3 | 8 | 18 | 23 |
| | $\varphi_{kz} = 1.2$ w/s = 0.35 | $\varphi_{kz} = 1.4$ w/s = 0.38 | $\varphi_{kz} = 1.1$ w/s = 0.41 | $\varphi_{kz} = 1.3$ w/s = 0.29 | $\varphi_{kz} = 1.5$ w/s = 0.32 |
| 0,015 | 14 | 4 | 9 | 19 | 24 |
| | $\varphi_{kz} = 1.3$ w/s = 0.38 | $\varphi_{kz} = 1.5$ w/s = 0.41 | $\varphi_{kz} = 1.2$ w/s = 0.29 | $\varphi_{kz} = 1.4$ w/s = 0.32 | $\varphi_{kz} = 1.1$ w/s = 0.35 |
| 0,020 | 15 | 5 | 10 | 20 | 25 |
| | $\varphi_{kz} = 1.4$ w/s = 0.41 | $\varphi_{kz} = 1.1$ w/s = 0.29 | $\varphi_{kz} = 1.3$ w/s = 0.32 | $\varphi_{kz} = 1.5$ w/s = 0.35 | $\varphi_{kz} = 1.2$ w/s = 0.38 |

The results made according to PN-EN 480-11 have shown that the samples S21 and S19 have good frost resistance [see Table 1] and of porosity structure parameters have been also good. However, concrete sample S21 had too high air content. As an example, the



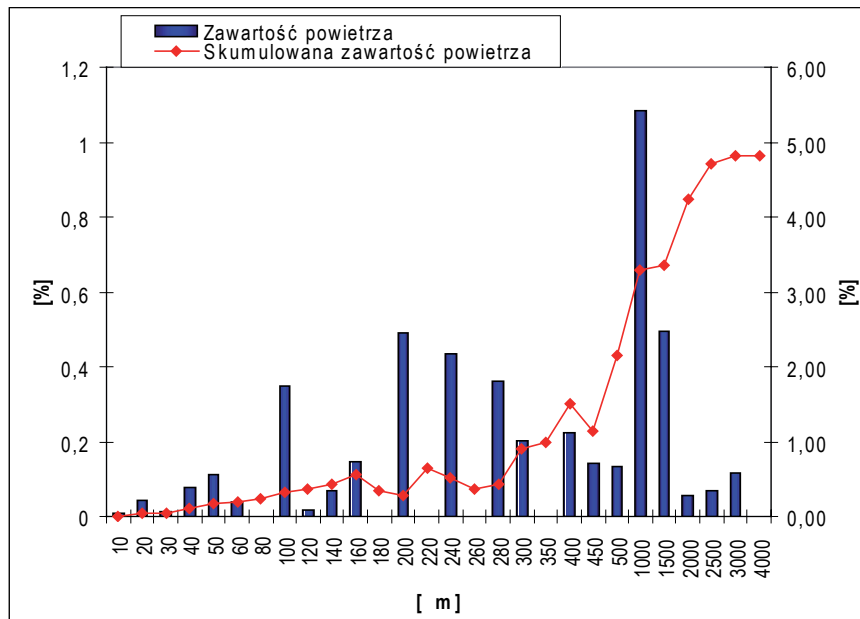
Rys. 7. Wyniki badań mrozoodporności SCC (6)

Fig. 7. Results of Frost resistance test of SCC (6)

sowych badaniu poddano tylko osiem rodzajów SCC (porównaj tablica 2 – pola zaciemnione). Pomiarów parametrów struktury porowatości próbek betonowych zostały przeprowadzone w IPPT PAN w Warszawie.

Do badań jakości napowietrzenia wybrano dwa rodzaje betonu, które nie osiągnęły stopnia mrozoodporności F300 oraz sześć, w których wystąpiła różna utrata wytrzymałości po 300 cyklach zamrażania i rozmrażania (patrz tablica 3 i rysunek 7). Wyniki badania struktury porowatości przedstawiono na rysunkach 9-15.

Badania przeprowadzone zgodnie z PN-EN 480-11 wykazały, iż w przypadku próbek S21 i S19 zostały spełnione wymagania dotyczące odporności betonu na mróz (patrz tablica 1) i struktura porowatości nie budziła żadnych zastrzeżeń. Krytycznie można się odnieść tylko do zbyt wysokiej zawartości powietrza w próbce S21. Przykładowy obraz mikrostruktury próbki betonu S19 po-

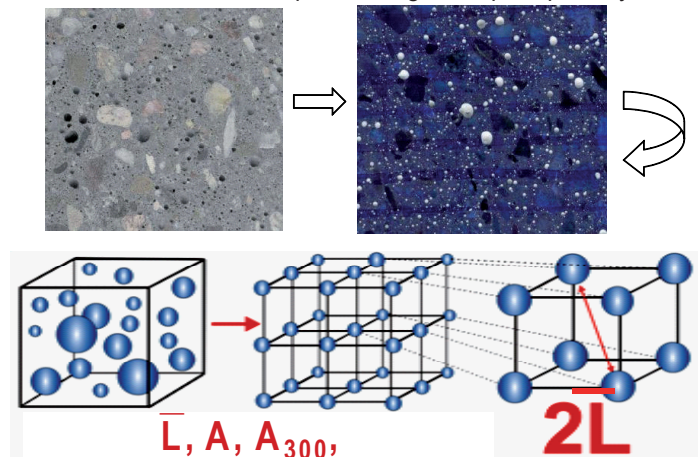


Rys. 9. Rozkład wymiarów i skumulowana zawartość porów oraz ich powierzchnia w zależności od średnicy, w próbce S1 (6)

Fig. 9. Pores sizes and cumulative pores content in function of pores diameter in S1 sample (6)

microstructure of two samples S1 and S19 are shown in Figure 15. Unfortunately in case of S23, S24 and S25 the quality of porosity structure was inadequate. The spacing factor was too high and parameters α , A_{300} had too low values [Table 3], it may give evidence that porosity structure contained too large pores. It must be underlined that content of pores with a diameter smaller than 300 μm was inadequate, particularly in case of samples S24 and S25. In case of the samples S1 and S10 the air entraining agent addition was too small, but pores [Fig. 8] were formed during placing of the mix as a result of high fluidity, which is necessary for self-compacting.

As it was shown from results analysis concrete samples, having inadequate porosity struc-



Rys. 8. Model napowietrzonego zaczynu według ASTM C457 i zasada wyliczania L

Fig. 8. Model of air entrained concrete according to ASTM C457 and principle of L calculation

ture parameters according to Table 1 have shown good frost resistance degree of the order of F300 [Table 3. figure 16].

In order to explain partial discrepancy of tests results according to PN-88/B-06250 and PN-EN 80-11 the detailed analysis of similar researches, which are available in technical literature were studied.

3. Practical importance of porosity structure parameters in aspects of concrete frost resistance

The partial discrepancy of research results according to PN-88/B-06250 and PN-EN 80-11 are caused by the fact, that the requirements for porosity structure parameters embrace all kinds of concrete. Each kind of concrete presents particular

kazano na rys. 15. W próbkach betonów S23, S24 i S25 stwierdzono dużą wartość wskaźnika rozmieszczenia porów powietrznych oraz niskie wartości wskaźników α , A_{300} (tablica 3), co przy stosunkowo dużej zawartości powietrza (szczególnie w próbkach S24 i S25) oznacza, że powstał układ porów powietrznych zbyt dużych rozmiarów (mała ilość porów średnicy do 300 μm). W próbkach S1 i S10 stwierdzono obecność pustek powietrznych (rysunek 15), które nie są wynikiem celowego zabiegu napowietrzania mieszanki, a powstały na skutek znacznej płynności mieszanki, niezbędnej do jej samozagęszczenia. Należy zauważyć, iż wymienione betony miały wskaźnik w/s $\geq 0,32$ (patrz tablica 2).

Dalsza część analizy wykazała, że betony charakteryzujące się parametrami struktury porowatości nie spełniającymi kryteriów wymienionych w tablicy 1 osiągnęły jednak mrozoodporność F300 (tablica 3 i rysunek 16).

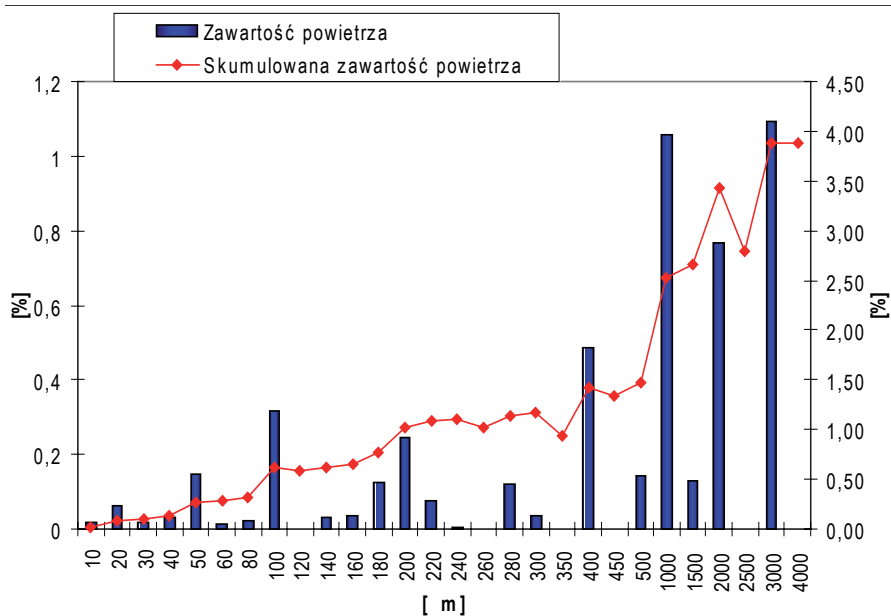
W celu wyjaśnienia częściowych niezgodności (zaznaczonych czcionką wytłuszczoną w tablicy 3) wyników badań przeprowadzono przegląd podobnych wyników dostępnych w literaturze.

3. Praktyczne znaczenie parametrów struktury porowatości w aspekcie odporności betonu na mróz

Przyczyny przedstawionych niezgodności wyników badań mrozoodporności zgodnie z normą PN-88/B-06250 i PN-EN 480-11 są spowodowane dostosowaniem parametrów struktury porowatości do klasycznego betonu średniej klasy. Różne rodzaje betonów posiadają odmienne charakterystyki porowatości, jak to pokazano na rysunku 17. Promienie kapilar w każdym z nich posiadają inną średnicę, z której wymiarem powiązana jest temperatura zamarzania wody (rysunek 18), jak i wynikowa wartość wywieranego przez nią naprężenia na ścianki kapilar (rysunek 19).

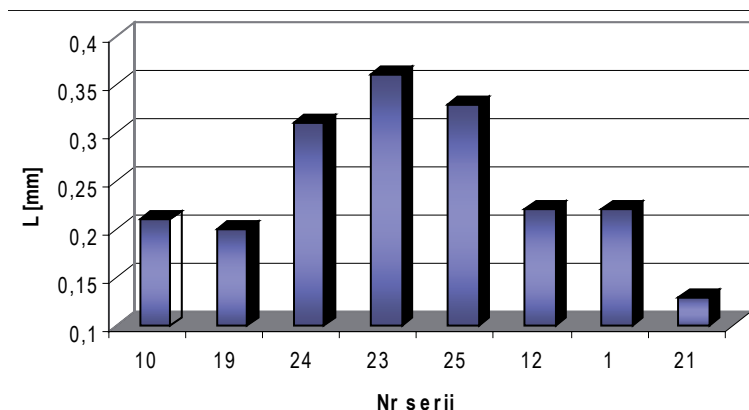
Ponadto wskaźnik przestrzennego rozmieszczenia porów powinien być dostosowany do prędkości zamarzania wody (rysunek 20), ponieważ uważa się, że kryterium $\bar{L} = 0,20$ mm, opracowane na podstawie obserwacji zachowania się próbek betonowych poddanych wielokrotnemu zamrażaniu i rozmrażaniu z szybkością chłodzenia większą od $8^\circ\text{C}/\text{godz.}$, jest w większości przypadków zbyt ostra, gdyż w rzeczywistości szybkości chłodzenia są dużo niższe i rzadko przekraczają $2^\circ\text{C}/\text{godz.}$ (9).

Pigeon i inni (7) badali zależność \bar{L} od szybkości zamrażania. Wyniki badań przedstawiono na rysunku 21. Fagerlund (1) stwierdza, że obliczona teoretycznie przez Powersa wartość \bar{L} , warunkująca mrozoodporność betonu, w rzeczywistości zależy od jego w/c (rysunek 22) oraz od rodzaju jego składników (Tablica 4).



Rys. 10. Rozkład wymiarów i skumulowana zawartość porów oraz ich powierzchnia w zależności od średnicy, w próbce S19 (6)

Fig. 10 Pores sizes and cumulative pores content in the function of pores diameter in S19 sample (6)



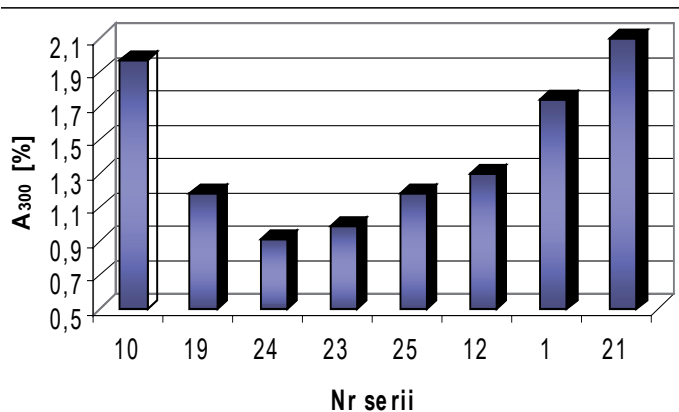
Rys. 11. Wyniki pomiarów współczynnika przestrzennego rozmieszczenia porów w ośmiu próbkach betonu samozagęszczalnego (6)

Fig. 11. Results of L examination in eight SCC samples (6)

porosity structure, what it is shown in Fig. 17, with different size of pores. With the size of capillary pores the freezing temperature of water is changing [Fig. 18] as well as the stress on these capillaries walls [Fig. 19].

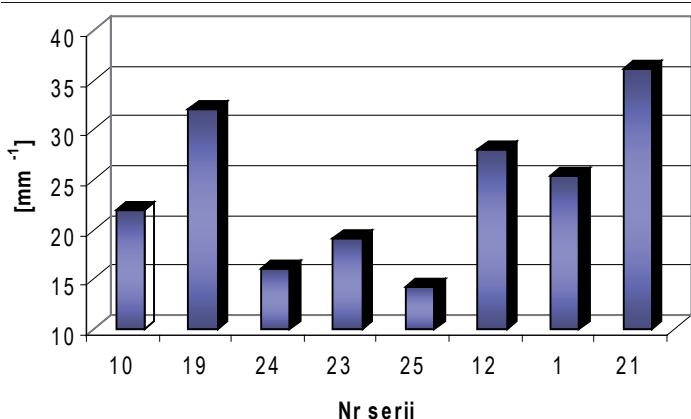
Moreover, the chosen value of L must be adjusted to the rate of temperature decrease [Fig. 20], because it is considered that $\bar{L} = 0.20$ mm was determined as a result of frost resistance test with temperature decrease rate over $8^\circ\text{C}/\text{h}$. This value is too high because in practice the temperature decrease not exceed $2^\circ\text{C}/\text{h}$. (9). Pigeon et al. investigated the relationship between \bar{L} and freezing rate and the results are shown on Fig. 21.

Fagerlund (1) considers that critical value \bar{L} , which can protect concrete from the destruction caused by freezing and thawing, in reality depends on cement-water ratio [Fig. 22] and on kinds of concrete components [Figures 23, 24 and Table 4].



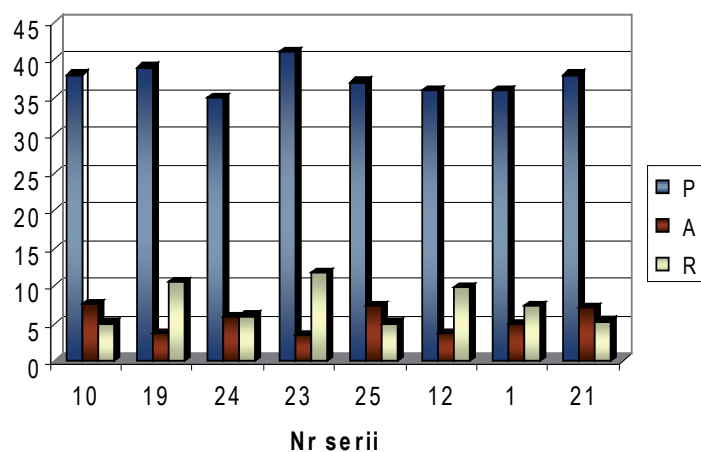
Rys. 12. Wyniki pomiarów całkowitej zawartości powietrza w ośmiu seriach próbek betonu samozagęszczalnego (6)

Fig. 12. Results of measurement of total air content in eight SCC samples (6)



Rys. 13. Wyniki pomiarów powierzchni porów powietrznych (α) w ośmiu seriach próbek samozagęszczalnego betonu (6)

Fig. 13. Results of measurement of pores surfach in eight SCC samples (6)

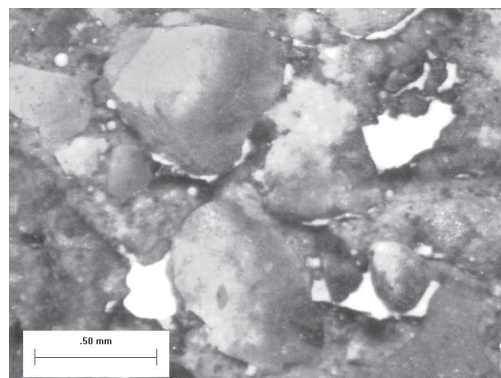


Rys. 14. Wyniki pomiarów zawartości zaczynu cementowego P, całkowitej zawartości powietrza A, stosunku zaczynu/powietrze R w ośmiu seriach próbek betonu samozagęszczalnego (6)

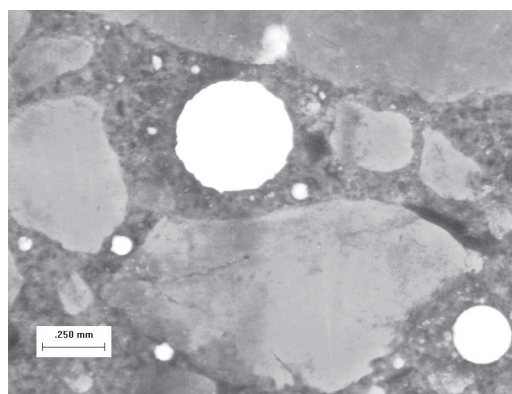
Fig. 14. Comparison of measurements results for eight series of SCC samples: cement paste content P, total air volume A, cement paste/air ratio R (6)

Wyniki badań Grodzickiej (3), pozwoliły na oszacowanie teoretycznej i praktycznej wartości krytycznej \bar{L} (Tablica 5). Stwierdzono, że w klasycznym betonie o w/c od 0,40 do 0,45 wartość \bar{L} , wynosząca

a) S1



b) S19



Rys. 15. Porównanie między nieodpowiednią (a) i odpowiednią (b) strukturą porowatości SCC (6)

Fig. 15. Comparison of inadequate (a) and adequate (b) porosity structure of SCC (6)

The influence of w/c on critical value \bar{L} the author (2) determined experimentally is depicted in Table 5. Moreover, it was established, that classical average concrete with w/c in the range 0.40÷0.45 and \bar{L} of the order of 0.40 mm can withstand a test of 300 cycles freezing and thawing. Whereas in case of high performance concrete with w/s < 0,36 the \bar{L} < 0.25 mm ensures, as it was given in (3), adequate frost resistance of this concrete. The remaining criteria, concerning critical value of \bar{L} in dependence on w/c of high performance concrete, are presented in Table 5. On the basis of the research results Grodzicka (3) has concluded, that in case of high performance concrete with silica fume and w/c = 0.30, practical value \bar{L} amount to 0.40 ÷ 0.50 mm, and for w/c = 0.25, without silica fume \bar{L} = 0.75 mm. Further research (3) leads to a conclusion that concrete with compression strength about 100 MPa and w/c= 0.33, with silica fume addition equal 7,5% m.c., with \bar{L} in the range of 0.80 to 0.85 mm, withstand a test of 112 cycles of freezing and thawing, in the presence of deicing salts. Whereas concrete with w/c = 0.35, with silica fume addition of 6%, without air entrainment admixture, presented a remarkable scaling resistance, and \bar{L} was high in the order of 0.90 mm.

However, in case of scaling resistance of concrete, determination of \bar{L} value, is still an open question (compare Tables 5 and 6 and Fig. 26). Rickne i Nyqvist [after (7)] determined the critical value of L = 0.20 mm for concrete with different addition of air-entraining

około 0,40 mm, zapewnia odporność na 300 cykli zamrażania i rozmrażania. Natomiast w betonach wysokowartościowych o w/s < 0,36 wartość $\bar{L} < 0,25$ mm gwarantuje, jak podano w (3), „dobrą odporność” betonu na mróz. Pozostałe wymagania dotyczące \bar{L} w zależności od w/c betonów wysokowartościowych podano w tablicy 5. Na podstawie przeprowadzonych badań Grodzicka (3) stwierdza także, że w przypadku betonów o wysokiej wytrzymałości, z pyłem krzemionkowym i w/c = 0,30, praktyczna wartość $\bar{L} = 0,40 \div 0,50$ mm, a w przypadku w/c = 0,25, bez pyłu krzemionkowego $\bar{L} = 0,75$ mm.

Inne badania przeprowadzone przez Grodzicką (3) wykazały, że beton o wytrzymałości około 100 MPa, w/c = 0,33, z pyłem krzemionkowym w ilości 7,5% m.c., mający \bar{L} w przedziale od 0,80 do 0,85 mm, nie uległ zniszczeniu po 112 cyklach zmrężania i rozmrażania oraz w obecności roztworu soli. Natomiast beton o w/c = 0,35, zawierający 6% pyłu krzemionkowego, bez środków napowietrzających, miał bardzo dobrą odporność na złączenia powierzchniowe, przy czym \bar{L} wynosiło aż 0,90 mm.

Trzeba podkreślić, że w przypadku betonów narażonych na cykliczne zamrażanie i rozmrażanie w obecności soli odladzających, wyznaczenie krytycznej wartości wskaźnika przestrzennego rozmieszczenia porów pozostaje nadal otwartą kwestią, chociaż podejmowano już próby określenia tej wartości (patrz Tablica 5 i 6 oraz rysunek 25). Rickne i Nyqvist, [według (7)], ustalili krytyczną wartość przestrzennego rozmieszczenia porów wynoszącą w przybliżeniu 0,20 mm dla betonów wykonanych z różnym rodzajem i ilością domieszki napowietrzającej. Wymagana jest jednak wartość wskaźnika przestrzennego rozmieszczenia porów wynosząca 0,25 do 0,30 mm w celu uzyskania zadowalającej odporności na mróz betonu narażonego na oddziaływanie środków odladzających (7).

Pomimo przedstawionych danych uzyskanych w omawianych pracach i obserwacjach zachowania się konstrukcji betonowych (3), w których wyrażony jest pogląd, że \bar{L} wystarczające do ochrony

Tablica 3 / Table 3

WYNIKI BADAŃ PRÓBEK SCC WEDŁUG PN-EN 480-11 I PN-88/B-06250 (6)

RESULTS OF SCC SAMPLES TESTING ACCORDING TO PN-EN 480-11 AND PN-88/B-06250 (6)

| Nr serii Series | w/s AEA | \bar{L} [mm] | α [mm ⁻¹] | A [%] | A ₃₀₀ [%] | Δf_{gm} [%] |
|-----------------------------|-------------------------|----------------|---------------------------------|----------|-------------------------|------------------------|
| 1 | w/s = 0.32; 0% AEA | 0,22 | 25,47 | 4,86 | 1,74 | 21 |
| 12 | w/s = 0.32; 0,005 % AEA | 0,22 | 27,98 | 3,69 | 1,30 | 23 |
| 10 | w/s = 0.32; 0,020% AEA | 0,21 | 21,93 | 7,54 | 1,97 | 0 |
| 19 | w/s = 0.32; 0,015% AEA | 0,20 | 32,02 | 3,72 | 1,18 | 0 |
| 21 | w/s = 0.41; 0% AEA | 0,13 | 36,14 | 7,19 | 2,10 | 14 |
| 23 | w/s = 0.32; 0,010% AEA | 0,36 | 19,04 | 3,49 | 0,99 | 0 |
| 24 | w/s = 0.35; 0,015% AEA | 0,31 | 16,07 | 5,82 | 0,91 | 16 |
| 25 | w/s = 0.38; 0,020% AEA | 0,33 | 14,24 | 7,30 | 1,18 | 0 |
| Zalecane Recommended [(8)]: | | 0,2–0,22 | > 15-20 | 4-7 | > 1,5-1,8 | < 20 |

Oznaczenia: - sprzeczność, - zgodność wyników badań mrozoodporności z zalecanymi wartościami parametrów porowatości

- contradiction, - conformity

Tablica 4 / Table 4

KRYTYCZNE WARTOŚCI WSKAŹNIKA ROZSTAWU PORÓW RÓŻNYCH TYPÓW BETONÓW (7)

SUGGESTED \bar{L} CRITERIA FOR DIFFERENT KINDS OF CONCRETE (7)

| Rodzaj betonu Kind of concrete | Krytyczna wartość \bar{L} [mm] Critical L value |
|---|--|
| normalny (w/c = 0,5) Average | 0,50 |
| z pyłem krzemionkowym With silica fume | 0,25 |
| wysokiej wytrzymałości High strength | 0,60 |

agent. As these data have shown, \bar{L} between 0.25 to 0.30 mm is required to obtain an adequate resistance of concrete exposed to deicing salts influence (7).

Apart from the discussed research results and examination of field constructions (3) the opinion is expressed that for good frost resistance \bar{L} can be of the order of 0.40 or higher, but it is still recognized that the porosity structure parameters given in Table 6 must be respected.

The other method of quality of porosity structure examination is proposed by Philleo [after paper (12)]. Philleo proposes the „flow length” coefficient which determines the protected volume of cement paste by one air pore (Fig. 23). The „flow length” index is based on the maximum distance between any point in the cement paste and the nearest air void wall.

The set of typical data from a series of freezing and thawing tests has shown, that even if some of tested samples had somewhat different spacing factors. They exhibit the same resistance after 300 cycles (7). The obtained data (7) nevertheless indicate that the critical spacing factor is approximately 0.25 mm.

Moreover, Attiogbe [after (12)], compared the values of \bar{L} i \bar{S} , which characterize porosity structure, with concrete frost resistance according to ASTM C 666. The data of research have shown, that only 40% of concrete which was frost resistant (DF > 60%) had $\bar{L} \leq 0.20$ mm, but criterion $\bar{S} \leq 0.20$ mm was fulfilled by 90% of concrete. It is considered, that average value of \bar{S} gives more correct evaluation of frost resistance of concrete, but still require further laboratory investigates.

ny może mieć czasem wartość 0,40 lub wyższą, dominuje jednak opinia o konieczności spełnienia warunków w stosunku do parametrów struktury porowatości przedstawionych w Tablicach 4 i 5.

Jest także inna metoda analizowania rozkładu porów powietrznych, zaproponowana przez Philleo, [według (12)]. Jego koncepcja polega na określeniu pewnej odległości \bar{S} (tzw. wskaźnik Philleo, nazywanej też jako wskaźnikiem „długości przepływu” („flow length”), określający objętość zaczynu cementowego otaczającego pory powietrzne, które zapobiegają destrukcyjnemu działaniu mrozu (rys. 23).. Wskaźnik „flow length” opiera się na maksymalnej odległości pomiędzy dowolnym punktem w zaczynie cementowym i ścianką zewnętrzną najbliższego poru powietrznego.

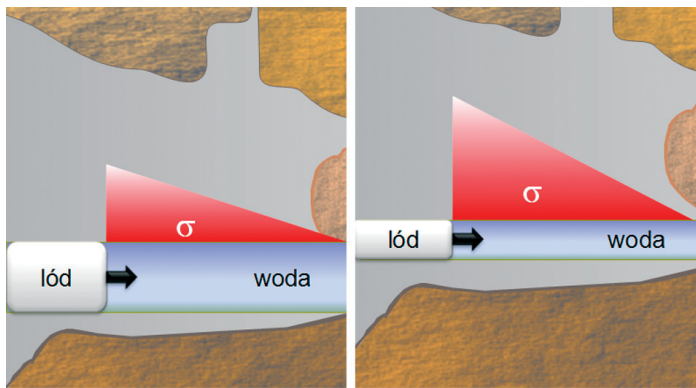
Zbiór typowych wyników serii badań zamrażania i rozmrażania licznych próbek betonu wykazał, że nawet jeżeli niektóre z próbek miały różną wartość wskaźnika przestrzennego rozmieszczenia

Tablica 5 / Table 5

TEORETYCZNA I PRAKTYCZNA WARTOŚĆ \bar{L} (3)

THEORETICAL AND PRACTICAL VALUE OF \bar{L} (3)

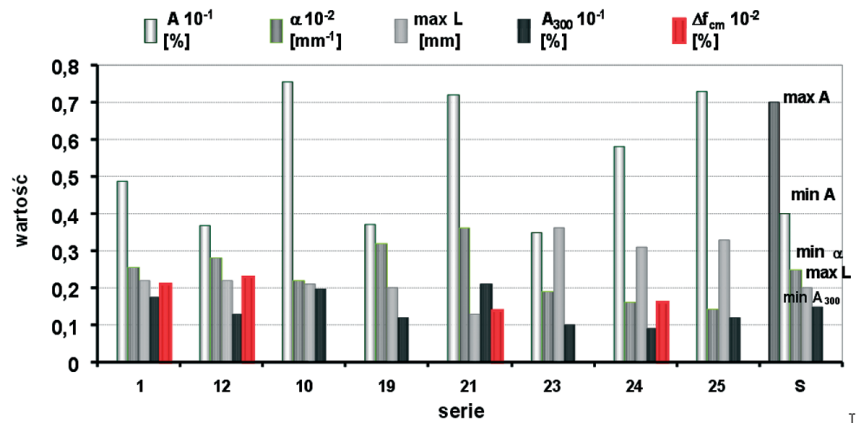
| Zamrażanie Freezing | Wartość krytyczna \bar{L} [mm] Critical value of \bar{L} | |
|---|---|-----------------------------------|
| | teoretyczna \bar{L} theoretical | praktyczna \bar{L} practical |
| w czystej wodzie In pure water | 0,22 ÷ 0,25 | 0,35 ÷ 0,40 |
| w wodnym roztworze soli In salt solution | 0,16 ÷ 0,20 | 0,22 ÷ 0,25 |



Rys. 19. Wpływ wymiaru porów na wartość naprężenia wywieranego na ścianki kapilary

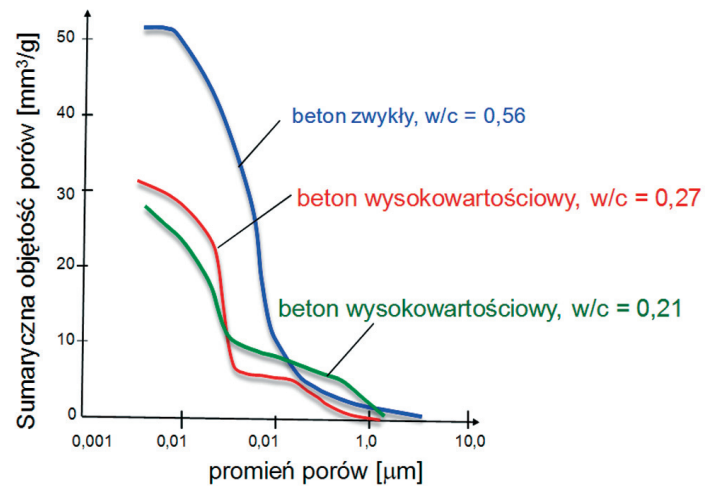
Fig. 19. Influence of pores size on stress put on capillary walls (9)

porów to uległy jednak w tym samym stopniu zniszczeniu po 300 cyklach. Jednakże wyniki badań (7), wykazują, że krytyczna wartość wskaźnika przestrzennego rozmieszczenia porów zgodnie z ASTM Standard C 666) wynosi w przybliżeniu 0,25 mm.



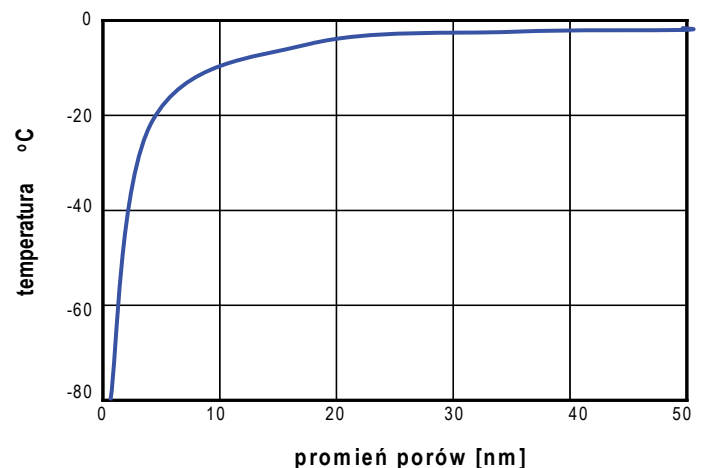
Rys. 16 Wyniki badań ośmiu serii SCC według PN-EN 480-11 i PN-88/B-06250 (6)

Fig. 16. Results of frost resistance examination of SCC series according to PN-EN 480-11 and PN-88/B-06250 (6)



Rys. 17. Rodzaj betonu a jego porowatość (8)

Fig. 17 Kind of concrete and its porosity (8)

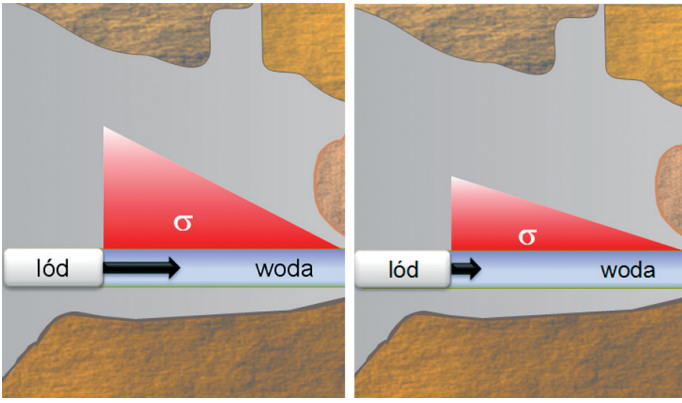


Rys. 18. Wpływ wymiaru porów na temperaturę zamrażania wody (9)

Fig. 18. Influence of pores size on water freezing temperature (9)

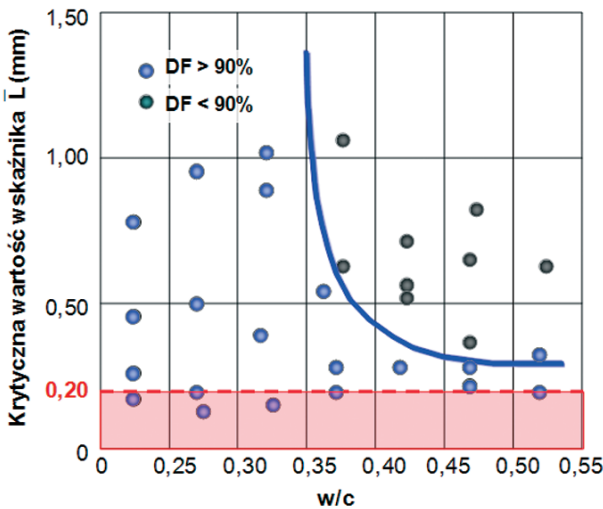
3. Discussion and summary of research results

The results of frost resistance research of air entrained self-compacting concrete according to PN-88/B-06250 and PN-EN 480-11



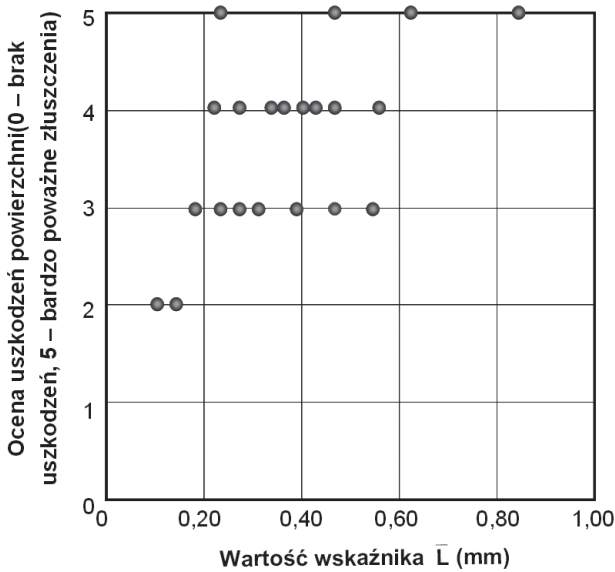
Rys. 20. Wpływ prędkości zamarzania wody na wartość naprężenia wywieranego na ścianki kapilar (9)

Fig. 20. Influence of freezing rate of water on stress put on capillary walls (9)



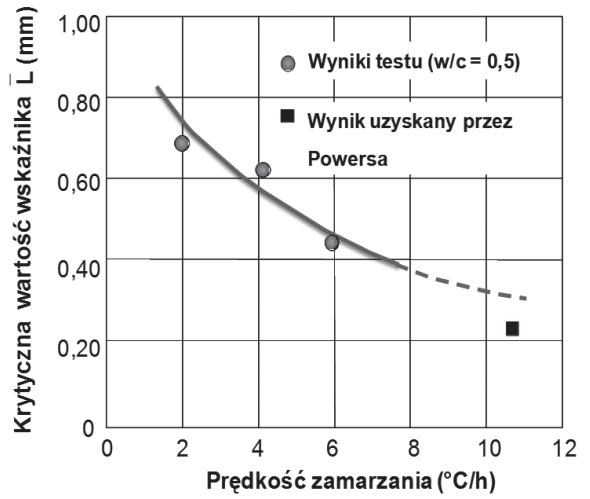
Rys. 22. Zmiany krytycznej wartości \bar{L} w zależności od w/c (9)

Fig. 22 Changes of \bar{L} in the function of w/c (9)



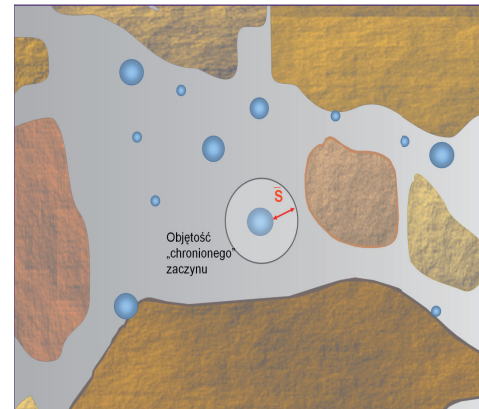
Rys. 24. Przykład zależności zakresu powierzchniowych uszkodzeń betonu od wartości \bar{L} zamrażanego-rozmrażanego z użyciem soli odładzających (9)

Fig. 24. Effect of scaling factor on the salting resistance (9)



Rys. 21. Zmiany krytycznej wartości L w zależności od szybkości spadku temperatury (9)

Fig. 21. Changes of L and temperature decrease rate



Rys. 23. Fizyczna interpretacja wskaźnika Philleo (12)

Fig. 23. Physical interpretation of Philleo's index (12)

were discussed in this paper. On the basis of the shown analysis it may be noticed, that there are some cases in which concrete having not adequate porosity structure can be frost resistant of the order of F300. Therefore it can be said that prevalent values of concrete porosity structure are too severe. Moreover, the requirements related to porosity structure parameters are establish for all kinds of concrete. However, different group of concrete (group of concrete is understood according to PN-EN 206-1: one kind of cement, aggregate, mineral addition type II and admixture) are greatly differentiated from each other as their porosity structure is concerned. Moreover, frost resistance of concrete is estimated on the basis of laboratory research results and it is evident that the degree of frost resistance must be adjusted to the exposure conditions of concrete. Therefore what is the procedure to determine critical value \bar{L} to adequate degree of frost resistance of particular concrete?

The adequate air entrainment of concrete understood as formation in concrete the pores lattice of adequate dimensions and spacing factor is a problematic issue, at least of to reasons. Firstly, the obtained spacing factor is not reversly proportional to the quantity of air entrainment agent added, as it can be seen from the data

Attiogbe, [według(12)], porównała wartości wskaźników \bar{L} i \bar{S} , charakteryzujących strukturę porów powietrznych, z wynikami badań mrozoodporności betonów, określanej według ASTM C 666. Stwierdził, że tylko 40% betonów uznanych za mrozoodporne ($DF > 60\%$) charakteryzowało się wskaźnikami $\bar{L} \leq 0,20$ mm, podczas gdy warunek $\bar{S} \leq 0,20$ mm spełniło około 90% betonów. Sądzi się więc, że średni wskaźnik \bar{S} daje bardziej wiarygodne oszacowanie potencjalnej mrozoodporności betonu, jednak jego wprowadzenie wymaga opracowania odpowiedniego kryterium.

4. Dyskusja wyników badań i podsumowanie

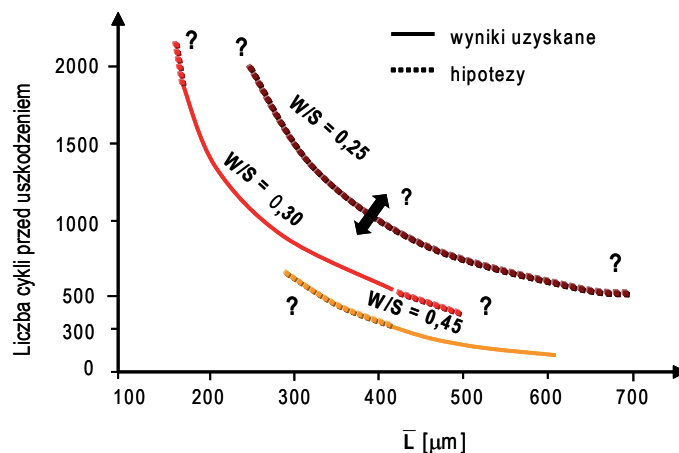
W pracy omówiono wyniki badań mrozoodporności według PN 88/B-06250 i PN-EN 480-11, napowietrzonych betonów samozagęszczalnych. Z przedstawionych analiz wynika, iż występują przypadki, w których beton charakteryzuje się innymi niż zalecane parametrami struktury porowatości, a uzyskuje jednak stopień mrozoodporności F300. Na podstawie analizy tych i podobnych badań, o których donosi literatura, wnioskować można, że przyjęte ustalenia parametrów struktury porowatości mrozoodpornego betonu są nazbyt surowe. Należy ponadto zauważyć, że wymagania dotyczące struktury porowatości odnoszą się do betonów w ogólnym znaczeniu tego słowa. Poszczególne rodziny betonów (rodzina betonu rozumiana zgodnie z zasadami sformułowanymi w PN-EN 206-1: jeden rodzaj cementu, podobnie kruszywa i dodatki mineralne typu II oraz domieszki) zasadniczo różnią się strukturą porowatości. Czy więc wymagania odnoszące się do struktury porowatości obejmują wszystkie rodzaje i klasy betonów? Co więcej, mrozoodporność betonu nie jest rozkładem zerowyjedyńkowym. Jak wiadomo, beton powinien być odporny na mróz w stopniu, który jest wymagany zależnie od warunków jego ekspozycji. Tak więc jak określić wymaganą wartość \bar{L} odpowiednio do pożądanego stopnia odporności mrozowej danego rodzaju betonu, jak to przedstawiono na rysunku 27?

Odpowiednie napowietrzenie betonu, rozumiane jako utworzenie w betonie siatki przestrzennej porów o odpowiednich rozmiarach i dopuszczalnym rozstawie jest zagadnieniem problematycznym, z co najmniej dwóch powodów. Po pierwsze uzyskany wskaźnik rozstawu porów nie jest odwrotnie proporcjonalny do zastosowanej ilości domieszki napowietrzającej, jak świadczą o tym wyniki badań zawarte w niniejszej pracy. Trudno więc przewidzieć jej wynik w postaci przestrzennego rozkładu porów w objętości betonu stosując określoną ilość i rodzaj domieszki napowietrzającej. Po drugie, jak pokazują wyniki badań, w różnych betonach dopuszczalna wartość rozstawu porów jest różna. Podane wartości krytyczne parametrów struktury porowatości betonów zwykłych nie są miarodajne

Tablica 6 / Table 6

PROPONOWANE KRYTERIA \bar{L} W ZALEŻNOŚCI OD W/C BETONÓW WYSOKOWARTOŚCIOWYCH (6)
SUGGESTED CRITICAL \bar{L} IN FUNCTION OF W/C FOR HPC (6)

| w/c | Sugerowane \bar{L} Suggested | Krytyczne \bar{L} Critical | Mrozoodporność Frost resistance |
|-----------|--|--|---|
| > 0,40 | 230 μm | 260 μm (w obecności soli odładzających) (in the presence of deiceing salts) | 300 cykli ASTM C666 50 cykli ASTM C672 |
| 0,40-0,35 | 350 μm | 400 μm (obecności środków odładzających) (in the presence of deiceing salts) | 300 cykli ASTM C666 50 cykli ASTM C672 |
| 0,35-0,30 | 450 μm | 500 μm | 500 cykli ASTM C666 |
| < 0,30 | Brak danych, akceptowane są powyższe kryteria Lack of data | | |



Rys. 25. Zależność pomiędzy mrozoodpornością betonu a \bar{L} (3)

Fig. 25. Relationship between concrete frost resistance and \bar{L} (3)

presented in this paper. Thus it is difficult to foresee the effect of some defined quantity and kind of air entraining agent addition on air bubbles distribution. Secondly, as the results of investigation show, in different concretes the spacing factor should be different. Presented critical value of porosity structure of average concrete are not valid for other kinds of concrete. As a result we have several critical values for different kinds of concrete. However, it is not clear what are the practical values of these parameters for different kinds of concrete, which porosity structure is not the same.

Probably, on the basis of well designed experiments it will be possible to estimate the practical values of needed parameters. These experiments should take into account the composition of the mix, the kind and quantity of air entrainment admixture, as well as the technological treatment of concrete mix. Very important is also the mix temperature, because it has great influence on air entrainment of concrete. Adjustment of pore structure parameters to expected exposure conditions of concrete structure has also big importance, especially in case of deicing salts effects.

Additionally, because of large and continuously increasing number of types of concrete it seems to be a very complicated task to define the universal porosity structure parameters, valid for all of them. However, the possibility of such extensive studies is limited, thus the only till now method is to conduct the frost resistance examination of concrete, of designed composition, before its practical

w przypadku innych rodzajów betonu. Mamy więc do czynienia z różnymi wartościami uważanymi za poprawne w przypadku poszczególnych rodzajów betonów. Nie wiadomo jednak, jakie są praktyczne wartości dla poszczególnych rodzajów betonu, których struktura porowatości różni się znacznie.

Prawdopodobnie na podstawie wyników odpowiednich badań doświadczalnych można oszacować praktyczne wartości poszukiwanych parametrów. Podczas tych badań należy wziąć pod uwagę skład mieszanki, w tym rodzaj i dodatek domieszki napowietrzającej oraz możliwe zabiegi technologiczne, jakim poddawana jest mieszanka betonowa. Nie bez znaczenia dla otrzymanych zależności jest także temperatura mieszanki, gdyż ma ona duży wpływ na napowietrzenie betonu. Ważne jest także dostosowanie wymagań dotyczących parametrów struktury porowatości do przewidywanego rodzaju ekspozycji betonu, szczególnie narażonych na działanie soli odładzających.

Ponadto, wobec stosunkowo dużej i wciąż rosnącej liczby rodzajów betonu, przeprowadzenie tak szeroko zakrojonych badań jakim jest określenie uniwersalnych wartości parametrów struktury porowatości stanowi skomplikowane i trudne zadanie. Ponieważ możliwość przeprowadzenia takich badań jest ograniczona, w pierwszej kolejności powinny być stosowane badania mrozoodporności, tym bardziej, że jak w wspomnianym w pracy, znane są przypadki, gdy beton jest odporny na mróz, natomiast jego struktura porowatości nie spełnia wymagań, dostosowanych głównie do klasycznego betonu. Nasuwa się także pytanie, która z metod badania mrozoodporności jest najlepsza? Wybór metody powinien być dostosowany do przewidywanych warunków ekspozycji betonu (to jest do przewidywanej średniej liczby cykli zamrażania, zakresu temperatur, szybkości zmian temperatury, obecności soli odładzających, i innych).

Podsumowując, problematyka teoretycznych i praktycznych wartości parametrów struktury porowatości betonu nie została w tej pracy wyczerpana i jest potrzeba dalszych badań w tym zakresie. Ponadto, aby poprawnie określić wartość tych parametrów, należy najpierw skorelować wyniki badań mrozoodporności, dostosowując je do nieustannie powstających różnych rodzajów betonu.

application. There is a question which method of frost resistance examination is the best? These last should be adapted to expected exposure conditions of concrete structure.

Reasuming it is evident that the problem of theoretical and practical values of porosity structure parameters was not exhausted in this paper and needs further studies. Additionally the value of these parameters should take into account the type of concrete.

Literatura / References

1. Fagerlund G.: Trwałość konstrukcji betonowych. Arkady, Warszawa 1999
2. Glinicki M. A., Zieliński M.: Diagnostyka mikrostruktury porów w betonie wbudowanym w konstrukcje i nawierzchnie. Konferencja Dni Betonu, Wisła 2006
3. Grodzicka A.: Odporność betonu wysokowartościowego na działanie mrozu. Wydawnictwa Instytutu Techniki Budowlanej, Warszawa 2005
4. Kamal H., Khayat and Joseph Assaad: Air-Void Stability in Self-Consolidating Concrete, *ACI Materials Journal*, V. 99, No. 4., July-August 2002, pp. 408-416.
5. Khayat K. H.: Optimization and performance of the air-entrained, self-consolidating concrete. *ACI Materials Journal*, Vol. 97, No. 5, 2000
6. Łązniewska B.: Modelowanie mrozoodporności betonów samozagęszczalnych. rozprawa doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice 2006
7. PIGEON M., Marchand J., Pleau R.: Frost resistant concrete, *Construction and Building Materials*, Vol. 10, No. 5, str. 339-348, 1996
8. Praca zbiorowa: Metody diagnozowania betonów wysokowartościowych na podstawie badań strukturalnych. IPPT PAN, Warszawa 2003
9. Rusin Z.: Technologia betonów mrozoodpornych. Polski Cement Sp. z o.o., Kraków 2001
10. Szwabowski J.: Reologia a urabialność betonu samozagęszczalnego. *Cement Wapno Beton* 1/2004, str. 14-19
11. Szwabowski J.: Reologia samozagęszczalnych mieszanek betonowych. IV Sympozjum Naukowo-Techniczne „Reologia w technologii betonu”, Gliwice czerwiec 2002, wyd. Górażdże Cement, str. 61-76
12. Wawrzeńczyk J.: Diagnostyka mrozoodporności betonu cementowego. Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach, Kielce 2002