

Znaczenie parametrów porów powietrznych w przypadku betonu eksploatowanego w warunkach XF

The importance of air voids parameters in the case of concrete exposed to XF condition

1. Wprowadzenie

Zgodnie z definicją zawartą w PN-EN 480, por powietrzny to „przeźreżenie otoczona zaczynem cementowym, wypełniona powietrzem lub innym gazem wprowadzonym do betonu przed związaniem zaczynu”. Definicja ta nie odnosi się jednak do porów o wymiarach submikroskopowych zwanych porami żelowymi. Norma ASTM C 457 zawiera podobną definicję, stwierdzającą, że pory powietrzne mają średnicę większą niż 2 μm . Definicje te dotyczą zarówno porów powietrznych zawartych w betonie bez stosowania jak i z dodatkiem domieszki napowietrzającej. Norma ASTM C 125 rozróżnia te dwa rodzaje porów i precyzuje, że przypadkowe pory powietrzne w betonie mają zwykle średnicę większą od 1000 μm oraz nieregularny kształt, natomiast typowa średnica porów związanych ze stosowaniem napowietrzania mieści się w przedziale 10-1000 μm , a ich kształt jest zbliżony do kulistego. Badanie krytycznej odległości pomiędzy pęcherzykami powietrza w betonach napowietrzonych jest bardzo popularną metodą pośredniej oceny mrozoodporności betonu, między innymi w USA i w Kanadzie. Badania struktury porów w betonie można prowadzić metodą zawartą w normie ASTM C 457, której odpowiednikiem w Polsce jest norma PN-EN 480-11.

W przypadku betonów narażonych na cykliczne zamrażanie i rozmrażanie wymagania dotyczące porów powietrznych w klasach ekspozycji XF1–XF4 są zestawione w tablicy 1. Wymagania te nie obejmują powierzchni właściwej porów, pomimo że jest to ważny czynnik, kształtujący odporność betonu na mróz. Według Neville'a (1) powierzchnia właściwa porów powinna wynosić 16-24 mm^{-1} .

Normowe wymagania dotyczące rozmieszczenia porów powietrznych w stwardniałym betonie stosowane są także w niektórych stanach USA i w Kanadzie (3-5). ACI (6) określa, że odległość pomiędzy porami powinna wynosić 0,20 mm. Natomiast norma kanadyjska A23.1 CSA podaje, że średnia odległość pomiędzy porami w betonach zwykłych nie powinna przekraczać 230 mm. Obecnie zwiększono tę wartość do 260 mm (7). Ponieważ podczas pompowania betonu odle-

1. Introduction

According to the definition included in PN-EN 480 Standard the air void is a “space surrounded by cement paste, filled with an air or other gas introduced to concrete mix before the cement paste set”. The definition, however, does not apply to the voids of sub-microscopic sizes called gel voids. ASTM C457 Standard gives similar definition, which states that air voids are characterized by diameters greater than 2 μm . These definitions refer to air voids in concrete with and without using the air-entraining admixture. On the other hand, ASTM C125 Standard distinguishes these two types of air voids and specifies that accidental air voids in concrete are typically characterized by diameter greater than 1000 μm and by an irregular shape, while typical diameter of air voids connected with air entrainment is in range of 10-1000 μm , and their shape is close to spherical. In USA and Canada, among others, examination of critical spacing factor between air voids in air-entrained concretes is a very popular indirect method for evaluation of concrete frost resistance. Investigation of air void structure in concrete can be performed according to ASTM C457 Standard, while PN-EN 480-11 Standard is its equivalent in Poland.

In case of concretes exposed to cyclic freezing and thawing the requirements concerning air voids in XF1–XF4 exposure classes are presented in table 1. The requirements do not include the air void surface area, despite of fact that it is important factor influencing on the frost resistance of concrete. According to Neville (1) the air void surface area should be in range of 16-24 mm^{-1} .

Standard requirements concerning spacing of air voids in hardened concrete are also used in some states of USA and in Canada (3-5). The ACI (6) specifies that the spacing factor should be equal to 0,20 mm. However, Canadian A23.1 CSA Standard states that average spacing factor in ordinary concretes should not exceed 230 μm . Currently this value has been increased to 260 μm (7), because the spacing increases while concrete is pumped (8). In case of all bridge constructions pumping of high-strength concrete was prohibited by the Ministry of Transportation of Canada. The

Tablica 1 / Table 1

WYMAGANIA DOTYCZĄCE NAPOWIETRZENIA BETONU (2)

REQUIREMENTS CONCERNING AIR ENTRAINMENT OF CONCRETE

| Norma / Standard | Wymaganie / Requirement | Klasa ekspozycji / Exposure class | | | |
|--|---|--|---|---------------|---------------|
| | | XF1 | XF2 | XF3 | XF4 |
| Norma / Standard EN 206-1 | Min. zawartość powietrza w mieszance Minimum air content in the concrete mix | - | 4,0 | 4,0 | 4,0 |
| Norma austriacka Austrian Standard ÖNORM B 4710-1 | Min. zawartość powietrza w mieszance Minimum air content in the concrete mix | - | 2,5 | 2,5 | 4,0 |
| | Min. zawartość porów A_{300} Minimum content of A_{300} micro-voids | - | 1,0 | 1,0 | 1,8 |
| | Max. wskaźnik rozmieszczenia porów \bar{L} Maximum air void spacing factor \bar{L} | - | - | - | 0,18 |
| Norma duńska Danish Standard DS. 2426 | Min. zawartość powietrza w mieszance Minimum air content in the concrete mix | - | 4,5 | 4,5 | 4,5 |
| | Min. zawartość powietrza A_{300} w betonie Minimum air content A_{300} in the concrete | - | 3,5 | 3,5 | 3,5 |
| | Max. wskaźnik rozmieszczenia porów \bar{L} Maximum air void spacing factor \bar{L} | - | 0,20 | 0,20 | 0,20 |
| | Odporność betonu na odpryski powierzchniowe Concrete resistance to surface scaling | - | dobra good | dobra good | dobra good |
| Norma niemiecka German Standard | Min. zawartość powietrza A_{300} w betonie Minimum air content A_{300} in the concrete | - | 3,5% przy / at $d_{max}=63$ mm 4,0% przy / at $d_{max}=32$ mm 4,5% przy / at $d_{max}=16$ mm 5,5% przy / at $d_{max}=8$ mm | | |
| Niemieckie Federalne Ministerstwo Komunikacji German Federal Ministry of Transportation ZTV Beton-StB 01 | Beton z domieszką napowietrzającą i uplastyczniającą lub upłynniającą Concrete with air-entraining admixture and plasticizer or superplasticizer | Beton na nawierzchnie dróg Concrete for pavements | | | |
| | Min. zawartość powietrza w mieszance (średnia dzienna) Minimum air content in the concrete mix (daily average) | 5,0 | | 4,0 | |
| | Min. zawartość porów A_{300} Minimum content of A_{300} micro-voids | 1,5 | | 1,8 | |
| | Max. wskaźnik rozmieszczenia porów \bar{L} Maximum air void spacing factor \bar{L} | 0,20 | | 0,20 | |

Oznaczenia / designations:

\bar{L} – odległość pomiędzy porami powietrznymi w stwardniałym betonie według PN-EN 480-11, mm / the air void spacing factor in hardened concrete according to PN-EN 480-11, mm

A – zawartość powietrza w betonie wg PN-EN 480-11, % / the air content in concrete according to PN-EN 480-11, %

A_{300} – zawartość makroporów o średnicy mniejszej niż 0,3 mm w betonie według PN-EN 480-11, % / the content of micro-voids with diameters smaller than 0,3 mm in concrete according to PN-EN 480-11, mm, %

głość ta wzrasta (8), Ministerstwo Transportu Kanady zakazało w budowywania betonu wysokiej wytrzymałości za pomocą pomp, w przypadku wszystkich konstrukcji mostowych. Przykładowe wyniki badań (9) wpływu pompowania na charakterystykę porowatości betonu wysokowartościowego przedstawiono na rysunku 1. Mieszankę betonową pompowano na wysokość 20 m. Proces pompowania spowodował zanik pęcherzyków powietrza mniejszych od 50 mm, prawdopodobnie z powodu ciśnienia wywieranego na mieszankę betonową.

Nie bez znaczenia dla charakterystyki napowietrzenia jest także temperatura i czas, jaki upłynął od wymieszania składników mieszanki betonowej. Na rysunkach 2 i 3 pokazano wyniki badań mieszanek, w których zastosowano tę samą ilość domieszki napowietrzającej, ale przygotowywano je w różnych temperaturach.

example results (9) of the influence of pumping on the porosity characteristics of high-performance concrete are presented in fig. 1. The concrete mix was pumped to the height of 20 meters. The pumping process caused disappearance of air voids smaller than 50 μ m, probably due to pressure exerted to concrete mix.

The temperature and time, which elapsed from mixing of concrete mix constituents, also affect the air entrainment characteristics. The results of mixes, in which the same quantity of air-entraining admixture was used but prepared at different temperatures, are shown in figures 2 and 3. In case of "cold" mix the air void spacing factor is similar to the spacing factor of "hot" mix, however the total air content is higher.

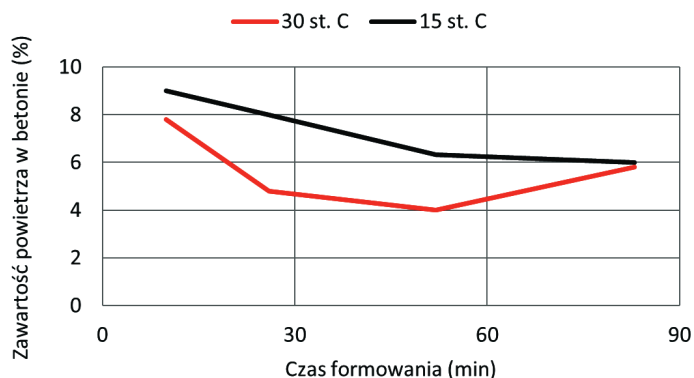
W przypadku „zimnej” mieszanki odległość pomiędzy porami jest podobna do odległości dla „gorącej” mieszanki, ale całkowita zawartość powietrza jest większa.

2. Badania struktury porowości betonu odpornego na mróz

Jak wiadomo podstawową funkcją porów powietrznych jest zmniejszenie naprężeń powstających w zamarzającym betonie w wyniku skrócenie drogi przepływu wody (11). W związku z tym Powers (12) zaproponował w swoim modelu wpływ na odległość pomiędzy porami stopnia nasycenia zaczynu wodą i szybkości zmian temperatury. Fagerlund (13, 14) wyznaczył doświadczalnie zależność krytycznej odległości pomiędzy porami od szybkości spadku temperatury (rysunek 4).

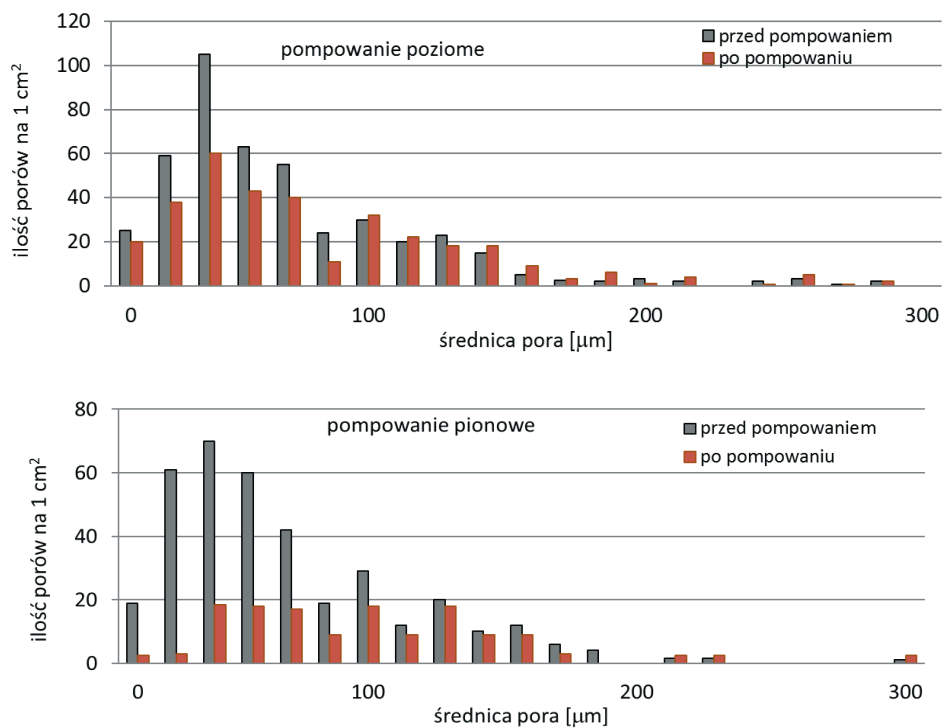
Wielkość ciśnienia wywieranego przez wodę zależy od stopnia nasycenia betonu wodą, szybkości jego chłodzenia, wymiarów porów kapilarnych (rysunek 5) oraz zawartości porów powietrznych. Teoria ciśnienia hydraulicznego Powersa (17, 18) zakłada, że zniszczenie betonu może nastąpić, jeżeli beton zawiera ciągły układ kapilar i jest w stanie nasycenia wodą przekraczający 91%. Fagerlund (13) podaje nieznacznie większy stopień nasycenia wodą wynoszący 91,7%, a Neville (1) znacznie większy, równy 85,0%. Pory żelowe są za małe, aby mógł w nich powstawać lód, w każdym razie w temperaturze wyższej od -78°C, a więc praktycznie lód w nich nie powstaje.

Wielkość ciśnienia hydraulicznego powstającego w betonie będzie zależna od oporów przepływu, a więc od długości drogi przepływu wody, związanej z rozmieszczeniem porów powietrznych oraz z przepuszczalnością zaczynu, otaczającego te pory. W związku



Rys. 2. Wpływ temperatury na zawartość powietrza w napowietrzonej mieszance (10)

Fig. 2. The influence of temperature on air content in the air-entrained concrete mix (10)



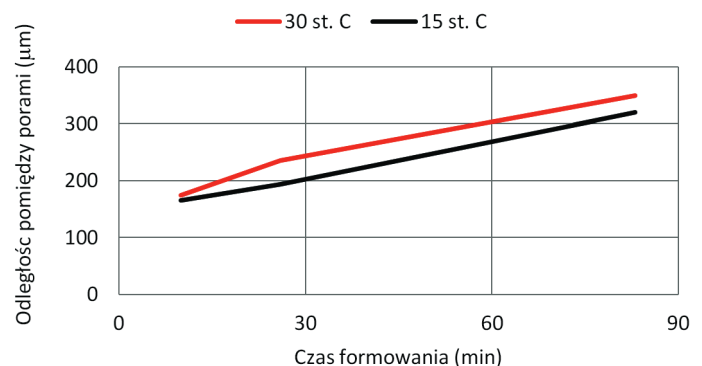
Rys. 1. Wpływ pompowania na rozkład wielkości pęcherzyków powietrza w mieszance betonu wysokowartościowego (9)

Fig. 1. The influence of pumping on the size distribution of air voids in high-performance concrete mix (9)

2. Examinations of porosity structure of frost resistant concrete

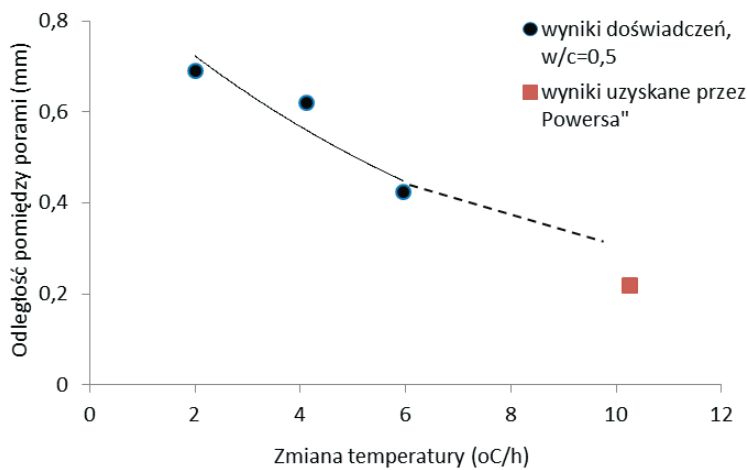
It is known that the main function of air voids is to decrease the tension created in the freezing concrete due to decrease of flow distance of water (11). Thus, Powers (12) proposed in his model the influence of cement paste saturation with water and the rate of temperature changes on the air void spacing factor. Fagerlund (13,14) determined experimentally the relationship between critical air void spacing factor and the rate of temperature decrease (Fig. 4).

The value of pressure exerted by water depends on the degree of concrete saturation with water, rate of concrete cooling, size of



Rys. 3. Wpływ temperatury na odległość między porami napowietrzonej mieszanki (10)

Fig. 3. The influence of temperature on the air void spacing factor in the air-entrained concrete mix (10)

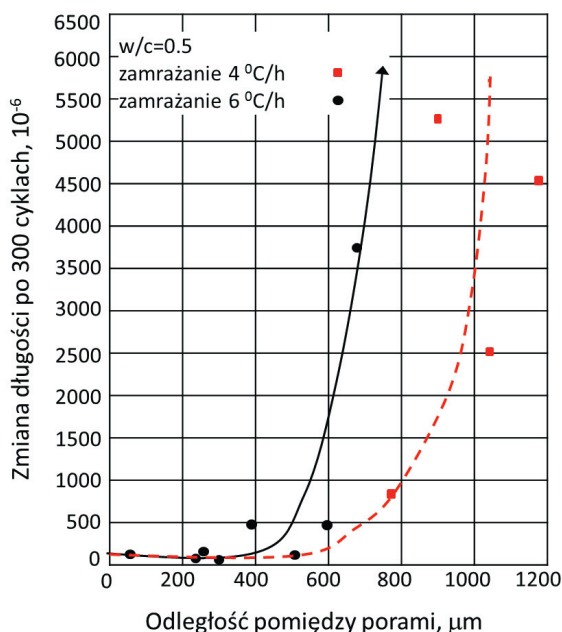


Rys. 4. Wpływ szybkości chłodzenia próbek na wartość krytyczną \bar{L} (14,15)

Fig. 4. The influence of cooling rate of samples on the critical value of \bar{L} (14,15)

z tym duże znaczenie przy ocenie odporności betonu na destrukcyjne działanie mrozu będzie miała także mikrostruktura zaczynu.

W świetle powyższych rozważań odległość pomiędzy porami powinna być dostosowana do szybkości zamarzania wody ponieważ uważa się, że kryterium $\bar{L} = 0,20$ mm, jest w większości wypadków zbyt ostre. Dotyczy ono bowiem szybkości chłodzenia przekraczającej 8°C/h , natomiast w rzeczywistych warunkach szybkość ta tylko wyjątkowo przekracza 2°C/h . (17). Naturalne warunki ekspozycji są zwykle mniej surowe niż warunki laboratoryjne i betony, które nie wykazują dobrej odporności na mróz w warunkach laboratoryjnych, są przeważnie trwałe w warunkach eksploatacyjnych.

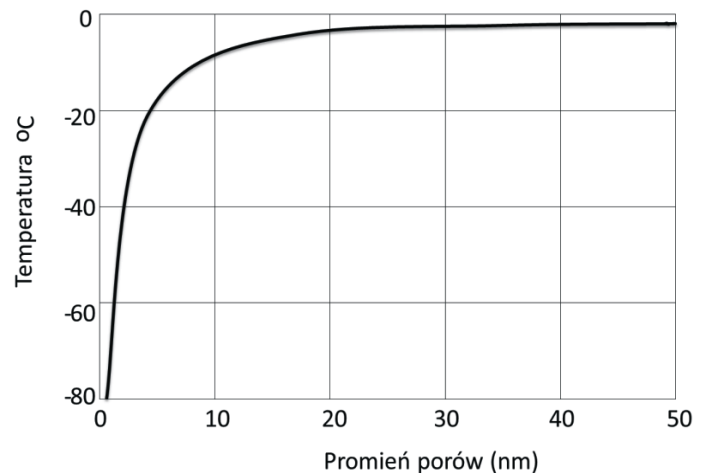


Rys. 6. Wpływ \bar{L} na zmianę długości próbek betonu o $w/c = 0.5$ po 300 cyklach zamrażania i rozmrażania; szybkość chłodzenia 4°C/h i 6°C/h (18)

Fig. 6. The influence of \bar{L} on the length change of concrete samples with $w/c = 0.5$ after 300 cycles of freezing and thawing; cooling rate 4°C/h and 6°C/h (18)

capillary pores (Fig. 5) as well as on the air voids content. The Powers hydraulic pressure theory (17, 18) assumes that destruction of concrete may occur, when concrete is characterized by continuous capillary system and when the degree of its saturation with water exceeds 91%. Fagerlund (13) proposes slightly higher degree of saturation with water equal to 91,7%, while Neville (1) significantly lower, equal to 85.0%. The gel pores are too small for the ice crystallization, unless at temperatures lower than -78°C , so practically ice does not form in the gel pores.

The value of hydraulic pressure created in concrete will be dependent on flow resistance, so on the distance of water flow connected with spacing of air voids and the permeability of cement paste surrounding these pores. Because of that the microstructure of cement paste will also significantly influence on the evaluation of concrete resistance to destructive frost action.



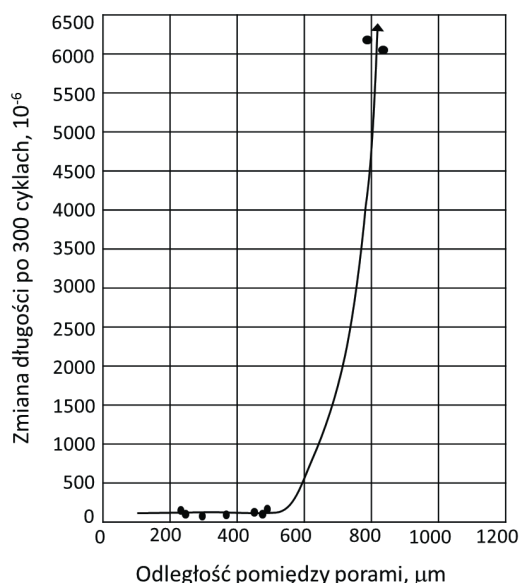
Rys. 5. Wpływ średnicy porów na temperaturę zamarzania wody (16)

Fig. 5. The influence of pores diameter on the freezing temperature of water (16)

According to above considerations the air void spacing factor should be adjusted to the rate of water freezing, because it is thought that $\bar{L} = 0,20$ mm criterion is too sharp in most cases. The criterion concerns the cooling rate exceeding 8°C/h , however in real conditions the rate only exceptionally exceeds 2°C/h (17). Natural exposure conditions are usually less severe than laboratory ones and concretes, which do not indicate good frost resistance in laboratory, mostly are durable in operation conditions.

Pigeon *et al.* (18) obtained the following critical spacing factors: $\bar{L} = 630 \mu\text{m}$ in case of concrete with $w/c = 0.5$ and rate of temperature decrease equal to 4°C/h ; $\bar{L} = 550 \mu\text{m}$ in case of concrete with $w/c = 0,6$ and the same rate of temperature decrease (Figs. 6 and 7).

The examinations performed according to ASTM C666 (19) indicated however, that in frost resistant concrete the air void spacing factor should be $\bar{L} = 500-600 \mu\text{m}$. Then, the concrete does not show the decrease of dynamic elastic modulus higher than 60% after 300 freezing and thawing cycles. However, the measurement



Rys. 7. Wpływ \bar{L} na zmianę długości próbek betonowych o w/c = 0,6 po 300 cyklach zamrażania i rozmrażania z szybkością 4 °C/h (18)

Fig. 7. The influence of \bar{L} on the length change of concrete samples with w/c = 0,6 after 300 cycles of freezing and thawing with cooling speed equal to 4°C/h (18)

Pigeon i in. (18) uzyskali następujące wartości krytycznej odległości pomiędzy porami: $\bar{L} = 630$ mm w przypadku betonu o w/c = 0,5 i szybkości spadku temperatury wynoszącej 4°C/h $\bar{L} = 550$ mm, w przypadku betonu o w/c = 0,6 i takiej samej szybkości spadku temperatury $\bar{L} = 450$ mm (Rys. 6 i 7).

Natomiast badania przeprowadzone metodą podaną w normie ASTM C 666 (19) wykazały, że w betonie mrozoodpornym odległość pomiędzy porami powinna wynosić $\bar{L} = 500-600$ mm. Wówczas beton nie wykazuje spadku dynamicznego modułu sprężystości większego od 60% po 300 cyklach zamrażania i rozmrażania. Warunki prowadzenia pomiarów są jednak takie, że osiągnięcie 300 cykli wymaga prawie 6 lat (23).

Badania Okady i in. (21) oraz Philleo (22) wykazały ścisły związek między stosunkiem w/c a odległością pomiędzy porami powietrznymi mrozoodpornego betonu (według ASTM C 666, metoda A), co pokazano na rysunkach 8a i 8b, a w przypadku dodatku superplastyfikatora na rysunku 9.

Tablica 3 / Table 3

KRYTYCZNA ODLEGŁOŚĆ POMIĘDZY PORAMI W PRZYPADKU BETONU ZWYKŁEGO I DWÓCH BETONÓW WYSOKIEJ WYTRZYMAŁOŚCI (20)

CRITICAL AIR VOID SPACING FACTOR IN CASE OF ORDINARY CONCRETE AND TWO HIGH-STRENGTH CONCRETES (20)

| Rodzaj betonu / Type of concrete | Krytyczna wartość Critical value \bar{L} , mm |
|--|--|
| normalny / regular | 0,50 |
| z pyłem krzemionkowym / with silica fume | 0,25 |
| wysokiej wytrzymałości / high strength | 0,60 |

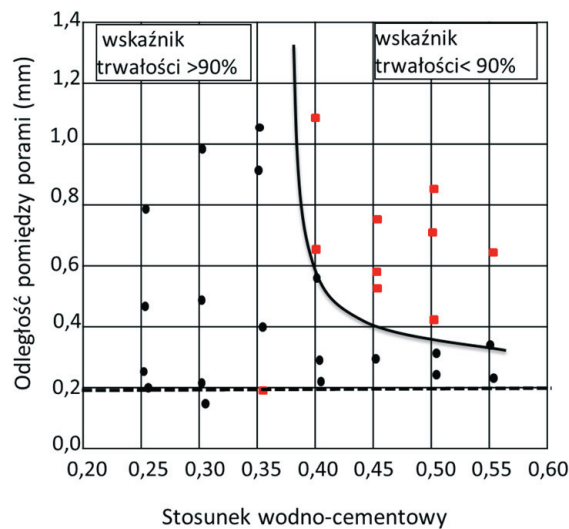
Tablica 2 / Table 2

KRYTYCZNA ODLEGŁOŚĆ MIĘDZY PORAMI (18)

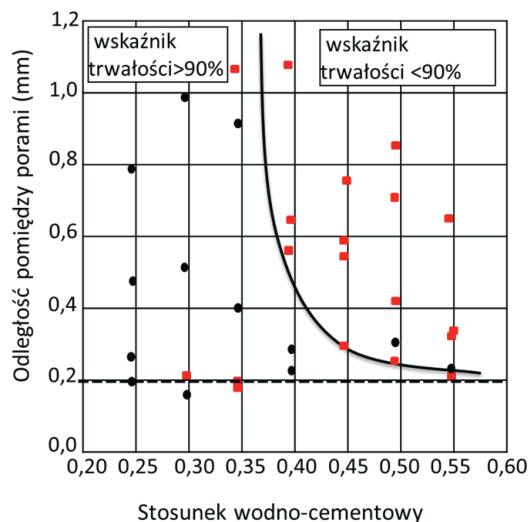
CRITICAL AIR VOID SPACING FACTOR (18)

| Zmiany temperatury temperature changes °C/h | Stosunek / Ratio w/c | |
|--|--------------------------|--------------------------|
| | 0,5 | 0,6 |
| | $\bar{L}_{kryt.}, \mu m$ | $\bar{L}_{kryt.}, \mu m$ |
| 2 | 680* | 570* |
| 4 | 630 | 550 |
| 6 | 450 | - |

* Według Pigeona i Lachance'a / According to Pigeon and Lachance (20)



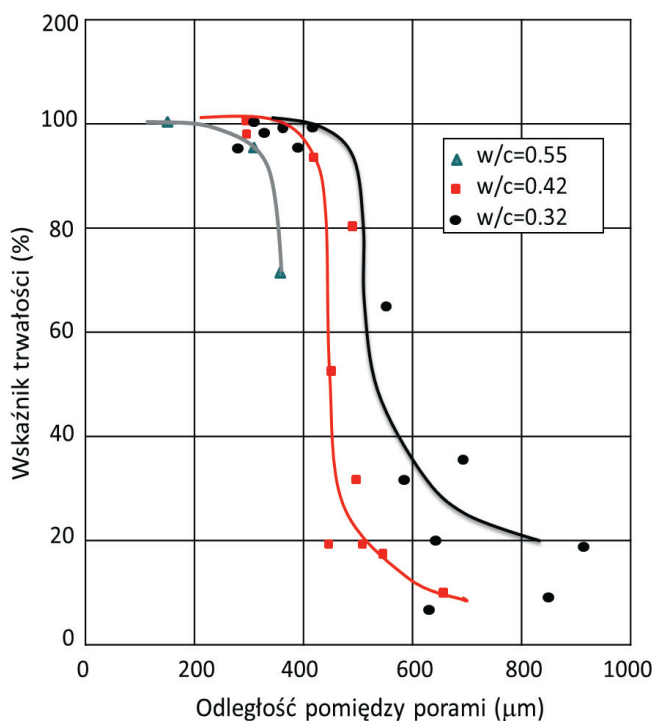
a)



b)

Rys. 8. Zależność mrozoodporności od w/c i odległości pomiędzy porami \bar{L} ; a) po 100 cyklach, b) po 300 cyklach zamrażania i rozmrażania, prowadzonych w wodzie (ASTM C 666 metoda A) (21)

Fig. 8. The relationship between frost resistance and w/c ratio and the air void spacing factor \bar{L} ; a) after 100 cycles, b) after 300 cycles of freezing and thawing performed in water (ASTM C666 method A) (21)



Rys. 9. Zależność wskaźnika trwałości betonu od odległości \bar{L} (23)

Fig. 9. The relationship between concrete durability index and the air void spacing factor \bar{L} (23)

Odporność BWW na działanie mrozu jest wciąż zagadnieniem nierozstrzygniętym. Są autorzy, którzy uważają, że BWW o wytrzymałości 80 MPa są odporne na działanie mrozu i środków odładzających, bez stosowania domieszek napowietrzających, głównie ze względu na mały stosunek $w/c=0,25-0,30$ (24, 25).

Z drugiej strony ci sami autorzy sugerują stosowanie domieszek napowietrzających „na wszelki wypadek”. Wyniki badań autorki (28) także wykazały, że beton jest lub nie jest mrozoodporny, w zależności od w/c , w/s oraz rodzaju spoiwa. Jak wiadomo także dodatek pucolany do betonu ma wpływ na korzystną odległość pomiędzy porami (tablica 3, rysunek 10).

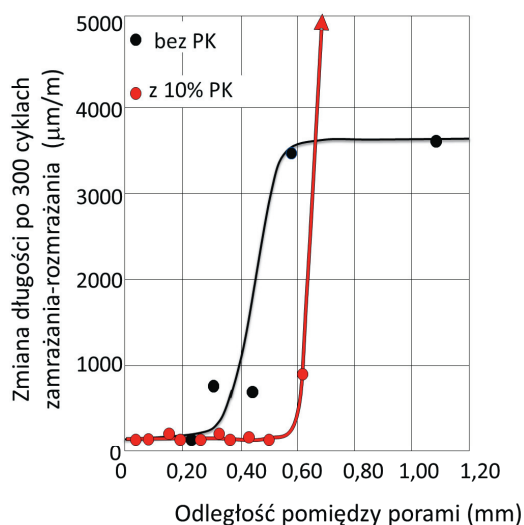
Carles-Gibergues i Pigeon (27) uważają, że betony o $w/c \leq 0,25$ i wytrzymałości ≥ 100 MPa nie wymagają napowietrzania. W wielu pracach wykazano, że BWW może wykazywać dobrą odporność na cykliczne zamrażanie i rozmrażanie również bez napowietrzania, lub przy bardzo niewielkim napowietrzeniu. W betonach wysokowartościowych o $w/s < 0,36$ wartość $\bar{L} < 0,25$ mm

Tablica 4 / Table 4

PROPONOWANE KRYTERIA \bar{L} WEDŁUG w/c BETONÓW WYSOKOWARTOŚCIOWYCH (28)

CRITERION PROPOSALS OF \bar{L} ACCORDING TO w/c OF HIGH-PERFORMANCE CONCRETES (28)

| w/c | Proponowane / Proposed \bar{L} | Krytyczne / Critical \bar{L} | Mrozoodporność / Frost resistance |
|-----------|--|---|---|
| > 0,40 | 230 μm | 260 μm (w obecności środków odładzających / in presence of deicing agents) | 300 cykli / cycles ASTM C666 50 cykli / cycles ASTM C672 |
| 0,40-0,35 | 350 μm | 400 μm (w obecności środków odładzających / in presence of deicing agents) | 300 cykli / cycles ASTM C666 50 cykli / cycles ASTM C672 |
| 0,35-0,30 | 450 μm | 500 μm | 500 cykli / cycles ASTM C666 |
| < 0,30 | Brak danych, akceptowane są powyższe kryteria / No data, above criteria are accepted | | |



Rys. 10. Zmiany długości próbek i \bar{L} po 300 cyklach zamrażania i rozmrażania betonu z CEM I, $w/c = 0,5$ bez i z dodatkiem 10% pyłu krzemionkowego (20)

Fig. 10. The length changes of samples and \bar{L} after 300 freezing and thawing cycles of concrete made of CEM I, $w/c = 0,5$, without and with 10% addition of silica fume (20)

conditions are such that to obtain 300 cycles almost 6 years are required (23).

Okada *et al.* (21) and Philleo (22) found relationship between w/c ratio and the air void spacing factor of frost resistant concrete (according to ASTM C666, method A), which is presented in figures 8a and 8b, while in case of superplasticizer addition in figure 9.

The frost resistance of high-performance concrete is still unresolved issue. There are authors, who state that high-performance concretes with strength of 80 MPa are resistant to frost action and deicing agents without using air-entraining admixtures, mainly due to low $w/c = 0,25-0,30$ ratio (24, 25). On the other hand, the same authors suggest to use air-entraining admixtures “just in case”. The results (28) are also showing that concrete is or is not frost resistant depending on w/c , w/s and on the type of binder. It is also known that addition of pozzolana to concrete influences on advantageous air void spacing factor (table 3, Fig. 10).

Carles-Gibergues and Pigeon (27) state that concretes with $w/c \leq 0,25$ and strength ≥ 100 MPa do not require air entrainment. It has been confirmed by many researches that high-performance

Tablica 5 / Table 5

KRYTYCZNA ODLEGŁOŚĆ MIĘDZY PORAMI \bar{L} (28)

CRITICAL AIR VOID SPACING FACTOR \bar{L} (28)

| W/(C+PK) | Zawartość pyłu krzemionkowego Content of silica fume, PK, % m. c | Krytyczna odległość pomiędzy porami Critical air void spacing factor, \bar{L} , μm | Rodzaj kruszywa Type of aggregate |
|----------|---|--|--------------------------------------|
| 0,33 | 7,5 | 800 | granit / granite |
| | 7,7 | 800+850 | granit / granite |
| | 6,0 | 900 | amfibolit / amphibolite |

gwarantuje dobrą mrozoodporność betonu, jak podaje Grodzicka (28). Im mniejszy stosunek w/c, tym większa może być krytyczna odległość pomiędzy porami (13). Zalecane przez Grodzicką (28) wartości \bar{L} w funkcji w/c betonów wysokowartościowych podano w tablicach 4 i 5. Badania przeprowadzone przez Grodzicką (28) wykazały, że beton o wytrzymałości około 100 MPa i w/c = 0,33, z dodatkiem pyłu krzemionkowego wynoszącym 7,5% masy cementu oraz odległości pomiędzy porami wynoszącym od 0,80 do 0,85 mm, nie uległ zniszczeniu po 112 cyklach zamarzania i rozmrażania oraz nie uległ złuszczeniu w obecności roztworu NaCl.

Według Fagerlunda (29), podstawowymi właściwościami decydującymi o odporności betonu na mróz, są zawartość wody zdolnej do zamarzania oraz przepuszczalność betonu.

W przeciwieństwie do wewnętrznego pęknięcia betonu podczas cyklicznego zamarzania-rozmrażania, nie można zastosować koncepcji krytycznej odległości pomiędzy porami do przypadku powstawania odprysków powierzchniowych w obecności roztworu NaCl (30). Pomimo tego, Rickne i Nyqvist, jak podano w publikacji (20), ustalili krytyczną odległość pomiędzy porami wynoszącą od 0,25 do 0,30 mm, co zapewnia zadowalającą mrozoodporność betonu w przypadku stosowania środków odładzających. Inne zalecenia dotyczące wartości \bar{L} podano w tablicy 7.

Alternatywa metoda analizowania rozkładu porów powietrznych, zaproponowana przez Philleo polega na określeniu pewnej odległości \bar{S} [wskaźnik Philleo (8,22)], określającej obszar zaczynu cementowego otaczającego por powietrzny, który ochrania zaczyn przed destrukcyjnym działaniem mrozu. Wielkość ta uwzględnia maksymalną odległość pomiędzy dowolnym punktem w zaczynie cementowym i ścianką zewnętrzną najbliższego poru powietrznego. Attiogbe (31) porównał wartości wskaźników \bar{L} i \bar{S} z wynikami badań mrozoodporności betonów badanej według ASTM C 666. Stwierdził, że tylko 40% betonów uznanych za mrozoodporne (wskaźnik trwałości > 60%) miało $\bar{L} \leq 0,20$ mm, podczas gdy warunek $\bar{S} \leq 0,20$ mm spełniło około 90% betonów.

Tablica 7 / Table 7

KRYTYCZNA ODLEGŁOŚĆ POMIĘDZY PORAMI POWIETRZNYMI \bar{L} (13)

CRITICAL AIR VOID SPACING FACTOR \bar{L} (13)

| Zamarzanie / Freezing | Krytyczna odległość / Critical spacing \bar{L} | |
|--|--|----------------------------|
| | Teoretyczna / Theoretical, mm | Praktyczna / Practical, mm |
| w czystej wodzie / in clean water | 0,22+0,25 | 0,35+0,40 |
| w obecności NaCl / in presence of NaCl | 0,16+0,20 | 0,50 |

concrete can show good resistance to cyclic freezing and thawing also without air entrainment or with very low air entrainment. In high-performance concretes with w/s < 0.36, as Grodzicka states (28), the value of $\bar{L} < 0.25$ mm guarantees good frost resistance of concrete. The lower w/c ratio, the higher critical air void spacing factor can be achieved (13). Values of \bar{L} in function of w/c of high-performance concretes, recommended by Grodzicka, are given in tables 4 and 5. The experiments performed by Grodzicka (28) are showing that concrete with strength of about 100 MPa, with w/c = 0.33, with addition of silica fume equal 7.5 % of cement mass and with the air void spacing factor in range of 0.80 to 0.85 mm was not damaged after 112 cycles of freezing and thawing as well as in this concrete scaling in presence of NaCl solution was avoided.

According to Fagerlund (29), the content of water capable to freeze and concrete permeability are the main properties having decisive effect on concrete frost resistance.

On the contrary to internal cracking of concrete due to cyclic freezing and thawing, the air void spacing factor cannot be used in case of scaling in presence of NaCl solution (30). Despite that Rickne and Nyqvist (20), found critical air void spacing factor in range of 0.25 to 0.30 mm, what ensures satisfactory frost resistance of concrete in case of using deicing agents usage. Other recommendations concerning \bar{L} value are presented in table 7.

Alternative method for analyzing the distribution of air voids, proposed by Philleo, is based on the determination of certain spacing \bar{S} [Philleo factor (8,22)], which specifies cement paste area surrounding air void, which protects the paste against destructive frost action. This value includes maximum distance between any point in the cement paste and the external wall of the closest air void. Attiogbe (31) compared values of \bar{L} and \bar{S} factors with the results of concrete frost resistance, examined according to ASTM C666 Standard. The author stated that only 40% of concretes classified as frost resistant (durability index > 60%) were characterized by \bar{L}

3. Uwagi końcowe

Można przypuszczać, że rozwój metod diagnostycznych będzie zmierzał w kierunku stosowania wielokryterialnej oceny mrozoodporności betonu, obejmującej w jednej próbie kilka właściwości oznaczonych metodami pośrednimi (32). Biorąc pod uwagę różnorodność czynników materiałowych, trudno oczekiwać, że w oparciu o jeden wskaźnik (na przykład \bar{L}) będzie można ocenić mrozoodporność betonu. Należy podkreślić, iż wszystkie omawiane zależności są orientacyjne, a ponadto, jak wspomina Rusin (32), wskaźnik \bar{L} jest pewną idealizacją skomplikowanego zagadnienia.

W rzeczywistości, celem wielu metod bezpośrednich jest oznaczenie „względnej” („potencjalnej”) mrozoodporności, tj. określenie stopnia odporności danego materiału na działanie ustalonych warunków oddziaływania środowiska, przyjętych w wybranej metodzie badawczej. Zadanie to jest jednak bardzo skomplikowane, ponieważ wynik końcowy zależy od interakcji pomiędzy właściwościami betonu, a szczególnie jego rodzajem, a warunkami środowiska, w których jest on eksploatowany (33).

W artykule przytoczono liczne wyniki badań, które wskazywały na brak uniwersalnego znaczenia odległości pomiędzy porami powietrznymi. Wraz ze wzrostem wytrzymałości betonu rośnie krytyczna wartość tej odległości. Czy wobec tego stosować wymagania normowe w stosunku do parametrów porów powietrznych w przypadku betonów wysokowartościowych? Odpowiedź na to pytanie nie jest prosta gdyż mrozoodporność betonu zależy od wielu czynników, których nie można z góry zdefiniować w warunkach eksploatacji konstrukcji betonowych. W praktyce dużego znaczenia nabiera także odpowiednia pielęgnacja betonu, która nie została w pracy uwzględniona. Z tych między innymi powodów, w celu zabezpieczenia konstrukcji z BWW przed zniszczeniem pod działaniem mrozu, zaleca się jego napowietrzanie.

Literatura / References

1. A.M. Neville, Właściwości betonu. Polski Cement Polski, Kraków 2000.
2. M.A. Glinicki, Europejskie wymagania na beton napowietrzony w klasie środowiska XF. Drogownictwo, **3**, 86-88 (2005).
3. H. Schell, J. Konecny, Development of an End-Results Specification for Air Void parameters of Hardened Concrete in Ontario's Highway Structures, 82nd Annual Meeting, Transportation Research Board, Washington, p. 18, 2003.
4. F. Meyer, Air void distribution in concrete for the Great Belt Link, West Bridge. Nordic Concrete Research, Publication No. 21, p. 17.
5. M.A. Glinicki, J. Cieśla, K. Fordoński, Zagadnienia trwałości mostów betonowych w normach europejskich, Międzynarodowa Konferencja EKO-MOST 2006, Kielce, 16-17 maja 2006, 115-124.
6. Guide to durable concrete. Reported by ACI Committee 201, ACI Journal, **74**, 12, 573-582 (1979).
7. H. Newlon, T.M. Mitchell, Freezing and Thawing. Significance of Test and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials. P. Klieger, J. F. Lamond, ASTM Publication, USA 1994.
8. R.E. Philleo, Freezing and Thawing Resistance of High Strength Concrete. National Cooperative Highway Research Programme Synthesis of Highway practice 129, Transportation Research Board, National Research Council, Washington 1986.

$\leq 0,20$ mm, while $\bar{S} \leq 0,20$ mm requirement was met by around 90% of concretes.

3. Final remarks

It can be presumed that development of diagnostic methods will tend towards using multi-criterion evaluation of concrete frost resistance, covering several properties, determined by indirect methods, in one experiment (32). Taking into consideration diversity of material factors, it is difficult to expect that the frost resistance of concrete could be evaluated on the basis of one factor (\bar{L} for instance). It should be emphasized that all of discussed relationships are approximate, moreover, as Rusin mentions (32), \bar{L} factor is a kind of idealization of complicated issue.

In reality, the aim of many direct methods is to determine “relative” (“potential”) frost resistance, i.e. determination of the resistance degree of particular material in established exposure conditions adopted by chosen research method. However, this task is very complicated, because the result depends on interaction between properties of concrete, especially its type, and the exposure conditions, in which the concrete is applied (33).

In the paper many experimental results have been discussed, which are indicating the lack of universal significance of the air void spacing factor. Critical value of the air void spacing factor is increasing with rise of concrete strength. Therefore, the question is if the standard requirements with respect to the parameters of air voids in case of high-performance concretes should be applied? The answer is no easy, because frost resistance of concrete depends on many factors, which cannot be defined in advance in field condition of concrete constructions. Aspect of proper curing of concrete, which was not discussed in the paper, also plays significant role in the practice. Because of these reasons, among others, the air entrainment of high-performance concrete is recommended to protect constructions made of such concrete against frost action.

9. Pleau R., Pigeon M., Lamontagne A, Lessard M.: Influence of pumping on the characteristics of the air-void system of high-performance concrete. Transportation Research Board, Washington, USA, January 22-28 1995.
10. F. Saucier, M. Pigeon, Cameron G.: Air void stability – part V: Temperature, general analysis, and performance index. *ACI Mater. J.*, **88**, 1, 25-36 (1991).
11. U.S. Bureau of Reclamation, The air-void systems of Highway Research Board cooperative concretes, Concrete Laboratory Report No. C-824. Denver, 1956.
12. T.C. Powers, The mechanism of frost action in concrete. Stanton Walker Lecture No 3, National Sand and Gravel Association, National Ready-Mix Concrete Association, Silver Spring MD, 1965.
13. G. Fagerlund, Frost resistance of high performance concrete – some theoretical considerations. Proceedings of the RILEM International Workshop “Durability of High Performance Concrete”, 14-15 February, Vienna 1994.
14. M. Pigeon, J. Prevost, M.J. Simard, Freeze-thaw durability versus freezing rate. *ACI Journal*, **82**, 5, 684-692 (1985).
15. M. Pigeon, R. Pleau, Durability of Concrete in Cold Climates. Modern Concrete Technology Series, E&FN SPON, 1995.
16. Y. Koh, E. Kamanda, The Influence of Pore structure of Concrete made with Absorptive Aggregates on the frost Durability of Concrete, RILEM Symposium, 45-65, Prague 1973.
17. Z. Rusin, Technologia betonów mrozoodpornych. Polski Cement Sp. z o. o., Kraków 2002.
18. M. Pigeon, J. Prévos and J.-M. Simard, Freeze-Thaw Durability Versus Freezing Rate, *ACI Journal Proceedings*, **82**, 5, 684–692, Sept–Oct 1985.
19. ASTM C 666, Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing, Annual Book of ASTM Standards, 1991.
20. M. Pigeon, M. Lachance, *J. Am., Concr. Inst.*, **77**, 282 (1981).
21. E.M. Okada, Y. Hisaka., Kazama, K. Hattori, Freeze-thaw resistance of superplasticized concretes. *ACI SP-68*, 215-231 1981.
22. R. Philleo, Frost susceptibility of high-strength concrete. Katharine and Bryant Mather International Conference Durability, American Concrete Institute, SP-100-46, 821-842, Atlanta 1987.
23. M. Kobayashi, E. Nakakuro, K. Kodama, S. Negami, Frost resistance of superplasticized concrete, *SP-68:269-282*, ACI 1981.
24. R. Gagne, M. Pigeon, P.C. Aïtcin, *Matér. Constr. RILEM*, **23**, 103, 1990.
25. E.M. Okada, Y. Hisaka, Kazama, K. Hattori, Developments in the use of superplasticizers. *ACI SP-68*, 215, 1981.
26. B. Łażniewska – Piekarczyk, Badania niepublikowane.
27. A. Carles-Gibergues, M. Pigeon, La durabilité des bétons en ambiance hivernale rigoureuse. Rozdz. 7 w “La Durabilité Des Bétons”(red. J. Baron, J-P Ollivier), Presses PontsetChaussées, Paris 1992.
28. A. Grodzicka, Odporność betonu wysokowartościowego na działanie mrozu. Wydawnictwo Instytutu Techniki Budowlanej, Warszawa 2005.
29. G. Fagerlund, Trwałość konstrukcji betonowych, Arkady, Warszawa, 1999.
30. M. Pigeon, D. Perraton, R. Pleau, Scaling tests of silica concrete and the critical spacing factor concept. Katharine and Bryant Mather International Conference–Concrete Durability, American Concrete Institute, SP-100-62, Atlanta, 1155-1181, 1987.
31. E. Attiogbe, Mean spacing of air voids in hardened concrete. *ACI Materials Journal*, **90**, 2, 174-181 (1993).
32. J. Wawrzeńczyk, Diagnostyka mrozoodporności betonu cementowego. Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach, Kielce 2002.
33. Z. Rusin, Mrozoodporność betonowych nawierzchni drogowych, Polski Cement, kwiecień – czerwiec 2002.