MICHAŁ A. GLINICKI¹⁾ROMAN JASKULSKI²⁾MARIUSZ DĄBROWSKI³⁾

DESIGN PRINCIPLES AND TESTING OF INTERNAL FROST RESISTANCE OF CONCRETE FOR ROAD STRUCTURES – CRITICAL REVIEW

KRYTYCZNY PRZEGLĄD ZASAD PROJEKTOWANIA I SPRAWDZANIA MROZOODPORNOŚCI WEWNĘTRZNEJ BETONU PRZEZNACZONEGO NA KONSTRUKCJE DROGOWE

STRESZCZENIE. Przedstawiamy przegląd wymagań na beton mrozoodporny zgodny z normami europejskimi oraz specyfikacjami krajowymi, stosowanymi w budownictwie drogowym. Rozpatrujemy zasady doboru składników mieszanki betonowej. Omawiamy lokalne różnicowanie agresywności klimatu w zimie i zasięg oddziaływania mrozu w elementach konstrukcji drogowych. Analizujemy charakterystyczne parametry procedury bezpośredniego oznaczania wewnętrznej mrozoodporności, zwłaszcza szybkość ochładzania. Rozkład temperatury w próbkach w trakcie normowych testów mrozoodporności został wyznaczony w dwóch różnych laboratoriach akredytowanych. Przedstawiamy też dyskusję kryteriów oceny mrozoodporności oznaczanej metodą pośrednią – na podstawie charakterystyki porów w betonie napowietrzonym. Na podstawie pomiarów rozkładu temperatury w próbkach postulujemy modyfikację procedury normowej, aby jednoznacznie ustalić szybkość ochładzania. Pożądane jest wyróżnienie stref agresywności oddziaływania mrozu i soli odladzających na beton w obiektach drogowych.

SŁOWA KLUCZOWE: beton, charakterystyka porów, metody badań, mrozoodporność wewnętrzna, projektowanie mieszanki, szybkość ochładzania, trwałość, wymagania funkcjonalne.

ABSTRACT. We present a review of freeze-thaw durability requirements laid down in both European standards and in the national specifications in relation to concrete for road structures. The principles of material selection for concrete mix are presented. We discuss local variations in the severity of the winter season and the extent of frost action in the components of road structures. The characteristic parameters of the test procedure for direct assessment of the resistance of concrete to internal damage are analysed, with particular attention paid to the specimen cooling rate. The temperature distribution in specimens was determined in standard freeze-thaw resistance tests carried out at two accredited laboratories. We discuss the criteria used in indirect assessment of freeze-thaw durability of air-entrained concrete on the basis of air void characteristics. Based on the determined temperature distribution in concrete specimens we postulate an improvement of the standard test procedure to clearly specify the cooling rate. It would be beneficial to distinguish frost impact zones depending on the severity of action of frost and de-icing salts on concrete in road structures.

KEYWORDS: air void characteristics, concrete, cooling rate, durability, internal frost resistance, mix design, performance specification, test methods.

¹⁾ Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk, Warszawa; mglinic@ippt.pan.pl (✉)

²⁾ Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk, Warszawa; rjask@ippt.pan.pl

³⁾ Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk, Warszawa; mdabrow@ippt.pan.pl

1. WPROWADZENIE

Zima w strefie klimatycznej umiarkowanej, o cechach klimatu lądowego, charakteryzuje się występowaniem mrozu i dosyć dużymi amplitudami dobowymi temperatury powietrza. W takiej strefie klimatycznej leży Polska i inne kraje Środkowej Europy. Elementy konstrukcji betonowych, jeśli nie są zagłębione w gruncie poniżej głębokości jego przemarzania lub nie są zadaszzone i termicznie izolowane, są poddane okresowemu niszczącemu działaniu mrozu. Od lat znane jest rozwiązanie technologiczne polegające na napowietrzeniu mieszanki betonowej w celu uzyskania wysokiej mrozoodporności betonu stwardniałego [1], ale nadal zdarzają się niepowodzenia i spory na tym tle, opisywane np. w [2-4]. W związku z tym warto szczególnie przedyskutować podstawowe zasady projektowania betonu mrozoodpornego i to właśnie jest celem niniejszego artykułu.

Zgodnie z PN-EN 206:2014 mrozoodporność betonu traktuje się jako odporność na agresję środowiska XF. Wyróżnia się 4 klasy ekspozycji od XF1 do XF4, w zależności od nasycenia betonu wodą oraz obecności środków odładzających. Odpowiadające klasom ekspozycji XF recepturowe ograniczenia składu mieszanki betonowej dotyczą maksymalnego współczynnika woda-cement (w/c), minimalnej zawartości cementu oraz napowietrzenia mieszanki betonowej. Chociaż z PN-EN 206 nie wynika konieczność bezpośredniego sprawdzenia mrozoodporności zaprojektowanego betonu, trzeba pamiętać, że zarówno ta, jak i inne Normy Europejskie zostały zredagowane w sposób ogólny. Odpowiednią przestrzeń na sformułowanie wymagań szczegółowych, w tym możliwość projektowania betonu na trwałość metodami związanymi z właściwościami użytkowymi (p. 5.3.3), pozostawiono w „przepisach w miejscu stosowania”, czyli krajowych arkuszach aplikacyjnych. W ogólnych specyfikacjach dotyczących betonu w drogowych obiektach inżynierskich w Polsce [5] pojawia się wymaganie odpowiedniego „stopnia mrozoodporności” betonu oznaczanego zgodnie z normą PN-B-06250:1988. Metodyka określania stopnia mrozoodporności budzi jednak pewne zastrzeżenia, wcześniej dyskutowane np. w pracach [1, 3, 6]. W związku z tym w pracy zamieszczono dyskusję kluczowych parametrów procedury badawczej.

Termin „mrozoodporność betonu” na ogół dotyczy tzw. mrozoodporności wewnętrznej, definiowanej na postawie odporności na uszkodzenie w postaci mikro i makrospękań matrycy cementowej. Odrębnym rodzajem zniszczenia mrozowego są złuszczenia powierzchniowe powstające

1. INTRODUCTION

Winter in the temperate climate zone, with certain features of a continental climate, is characterized by freezing weather and rather large diurnal change of air temperature. Poland and other countries of Central Europe lie in such a climate zone. Unless buried below the frost line, roofed or insulated, concrete structures are periodically exposed to the deteriorating effect of frost. Although it has been known for years that entraining of air into the concrete mix can be used to produce high freeze-thaw durability of concrete [1], the result of such treatment is not always satisfactory and the debate is on-going, as described for example in [2-4]. This situation calls for a deeper analysis of the key aspects of frost-resistant concrete design which is the subject of this paper.

According to PN-EN 206:2014 the frost attack on concrete is rated as exposure class XF. This exposure class is subdivided into subclasses XF1 to XF4, depending on water saturation and presence of de-icing agents. The XF exposure classes translate into prescriptive mix design requirements, including the maximum water-cement ratio, the minimum cement content and the amount of entrained air. While PN-EN 206 does not require assessment of the freeze-thaw durability of concrete by a direct method, it should be borne in mind that the European standards are of a general nature. The proper place to define specific requirements, including the durability design of concrete with the performance-based design methods (5.3.3), was left “in the regulations at the place of use”, that is in national application documents. The Polish national specifications defining the requirements for concrete used in road structures [5] include the requirement of appropriate level of freeze-thaw durability as per PN-B-06250:1988. However, the specified method of its determination raises some doubts, as discussed in [1, 3, 6]. Hence this paper discusses also the key parameters of the testing procedure.

The term “frost resistance of concrete” is generally related to so-called internal frost resistance, defined on the basis of the resistance to damage manifested by micro- and macro-cracking. Another type of frost damage is surface scaling (flaking of thin pieces of mortar) which occurs in concrete exposed to the combined effect of frost and de-icing salts. Surface scaling has been excluded from the scope of this paper due to significant differences in the deterioration mechanisms responsible for these two types of frost damage.

przy jednoczesnym oddziaływaniu soli odladzających, ujawniające się poprzez odpajanie fragmentów powierzchniowej warstwy w postaci cienkich płatków zaprawy. Zagadnienia złuszczeń powierzchniowych nie są objęte zakresem niniejszej pracy z uwagi na znaczące różnice mechanizmów zniszczenia.

2. OGRANICZENIA RECEPTUROWE I DOBÓR SKŁADNIKÓW BETONU

Zawartość wody w betonie jest pierwszorzędny czynnik wpływającym na mrozoodporność. Współczynnik w/c decyduje o zawartości porów kapilarnych i stopniu ich nasycenia wodą, a także o wytrzymałości stwardniałego zaczynu cementowego. Do uzyskania niezbędnej mrozoodporności konieczne jest ograniczenie w/c do wartości 0,50, a lepiej do wartości 0,45, co nie jest trudne z uwagi na dostępność domieszek redukujących zawartość wody [1, 7]. Przy bardzo niskim współczynniku w/c (około 0,30), można oczekiwać wysokiej mrozoodporności betonu bez stosowania domieszek napowietrzających. Świadczą o tym m.in. rezultaty badań przeprowadzonych przez Portland Cement Association [8] (Rys. 1). Jednakże jest to ścieżka mniej ekonomiczna i niepozbawiona dodatkowych trudności, zwłaszcza związanych z dużym skurczem samoosuszenia, charakterystycznym dla mieszanek betonowych o $w/c < 0,40$ i pojawiającym się zagrożeniem powstania wczesnych rys skurczowych [4]. Znane są niepowodzenia przy wyborze tej ścieżki technologicznej.

Do betonu mrozoodpornego stosuje się kruszywa mineralne wysokiej jakości, głównie grysy z jednorodnego surowca skalnego. Odpowiednio wysoką mrozoodporność kruszywa specyfikuje się poprzez odniesienie do PN-EN 12620. Podane w krajowych specyfikacjach technicznych [5] wymagania bezpośrednio związane z mrozoodpornością betonu dotyczą mrozoodporności kruszywa oznaczanej w 1% roztworze NaCl wg PN-EN 1367-6 oraz odporności kruszywa na rozdrabnianie LA wg PN-EN 1097-2. Wymaga się:

- mrozoodporności kruszywa $\leq 2\%$ przy LA_{40} , lub
- mrozoodporności kruszywa $\leq 6\%$ przy LA_{25} .

Pozostałe wymagania dotyczące jakości kruszyw, jak określone uziarnienie zapewniające szczelność stosu okruszowego i ograniczona zawartość pyłów, niezbędna w celu minimalizowania wodożądności kruszywa, mają przede wszystkim związek z wytrzymałością betonu, ale pośrednio zapewniają także poprawę mrozoodporności.

Wybór domieszek do betonu, zazwyczaj domieszki napowietrzającej i redukującej zawartość wody, podporządko-

2. MIX DESIGN REQUIREMENTS AND SELECTION OF CONSTITUENTS

The key parameter influencing the freeze-thaw durability of concrete is the content of water in concrete. The w/c ratio influences the capillary porosity, as well as the degree of saturation of capillary pores with water and, besides, it is decisive of the strength of hardened cement paste. The required freeze-thaw resistance is obtained by reducing the water-cement ratio to 0.50, and even better to 0.45, which can be achieved quite easily with the available water reducing admixtures [1, 7]. With a very low value of the water-cement ratio (about 0.30) good freeze-thaw durability can be expected even without air-entraining of concrete mix. This conclusion is supported, for example, by the research report published by the Portland Cement Association [8] (Fig. 1). However, this approach is less economic and involves additional problems, especially related to high autogenous shrinkage of concrete as typically exhibited by concrete mixes with $w/c < 0.4$, and early-age shrinkage cracking tendency [4]. Moreover, it does not always produce satisfactory results.

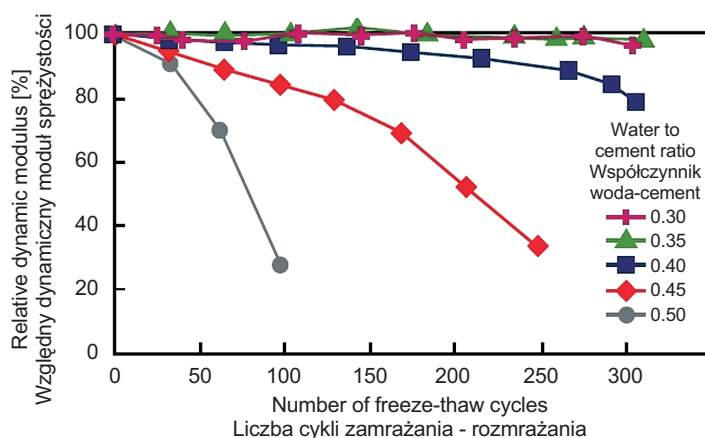


Fig. 1. The influence of water-cement ratio on the relative dynamic elastic modulus of concrete as defined in ASTM C 666 [8]
Rys. 1. Wpływ współczynnika woda-cement w/c na względny współczynnik sprężystości betonu, określony zgodnie z ASTM C 666 [8]

wany jest celowi uzyskania konsystencji mieszanki odpowiedniej do zastosowania oraz uzyskaniu projektowanego napowietrzenia mieszanki [9]. Zgodnie z zaleceniem PN-EN 206 należy sprawdzić kompatybilność obu domieszek. Zalecenie to realizuje się przede wszystkim poprzez sprawdzenie charakterystyki porów powietrznych w betonie stwardniałym, odwołując się do procedury PN-EN 480-11 zastosowanej do konkretnej receptury betonu. Chodzi o stwierdzenie, czy łączne użycie domieszki napowietrzającej i domieszki redukującej zawartość wody nie wpłynie negatywnie [10] na zawartość i rozkład wielkości porów powietrznych.

Niezbędną, minimalną zawartość powietrza w mieszance betonowej (4% wg PN-EN 206) różnicuje się w zależności od uziarnienia kruszywa, tj. przyjmuje się wartości graniczne, np. 5,5%, 4,5% i 4% odpowiednio przy $D_{\max} = 8$ mm, 16 mm, 22 i 32 mm wg zaleceń niemieckich. Zalecenia amerykańskie wskazują raczej dopuszczalny zakres zawartości powietrza w mieszance, np. od 4,5% do 7,5% przy uziarnieniu do $\frac{3}{4}$ cala lub 1 cala, zważając na negatywny wpływ nadmiernej zawartości powietrza na wytrzymałość betonu. Brak napowietrzenia lub niewłaściwe napowietrzenie bywają zasadniczymi powodami niedostatecznej mrozoodporności betonu, o czym informują m.in. prace [2, 3]. Poprzez sprawdzenie napowietrzenia mieszanki, a zwłaszcza zawartości powietrza i charakterystyki porów w betonie stwardniałym, należy dążyć do wyeliminowania niekorzystnych składników mieszanki betonowej. Oprócz kwestii kompatybilności domieszek, należy zwrócić uwagę na zawartość drobnych frakcji w kruszywie oraz na uziarnienie i skład cementu. Mieszanki betonowe z cementem zawierającym nieklinkierowe składniki główne, na ogół zmielonym do większej powierzchni właściwej, często są trudniejsze do napowietrzenia niż mieszanki zawierające cement portlandzki. Oznacza to, że może wystąpić zjawisko niestabilności zawartości powietrza [10], a także niekorzystne zmiany rozkładu wielkości porów w kierunku zmniejszenia zawartości mikroporów.

Przy wyborze rodzaju cementu do betonu mrozoodpornego często decydujący wpływ mają dodatkowe uwarunkowania, np. pożądana wysoka odporność na agresję chemiczną czy też ograniczenie samoociepiania twardniejącego betonu w elementach masowych. Jeśli nie ma wymagań specjalnych, odpowiedniego wyboru cementu do odpowiedniej klasy ekspozycji można dokonać na podstawie zasad przedstawionych w [11]. Zgodnie z uproszczonym modelem Powersa mrozoodporność wewnętrzna betonu napowietrzonego będzie proporcjonalna do wytrzymałości stwardniałego zaczynu cementowego i jego przepuszczalności [7, 12].

The aggregate used for production of durable concrete must be high-quality mineral aggregate comprising mainly of uniform, crushed rock material. The required frost resistance of aggregate is specified by reference to PN-EN 12620. The requirements of the national specifications [5] directly related to the freeze-thaw resistance of concrete include frost resistance of aggregate determined in 1% solution of NaCl according to PN-EN 1367-6, and the resistance to fragmentation (LA value) as per PN-EN 1097-2. The specified values are:

- aggregate frost resistance $\leq 2\%$ for LA_{40} , or
- aggregate frost resistance $\leq 6\%$ for LA_{25} .

The remaining aggregate quality requirements, such as continuous grading and limited amount of fines to minimise the water requirement are related primarily to the strength of concrete, yet can indirectly improve its freeze-thaw resistance.

Usually, air-entraining and water-reducing admixtures are specified in order to obtain the desired mix consistency and the desired air content in the mix [9]. PN-EN 206 recommends that the two admixtures should be checked for compatibility. This is done mainly by checking the air void characteristics in hardened concrete using the procedure given in PN-EN 480-11 and applied to a specific mix design. It is to make sure that the combined effect of the air-entrainer and the water-reducer has not disrupted the air void content and size distribution [10].

The necessary minimum air content in concrete mix (4% according to PN-EN 206) is variable depending on the aggregate size distribution, i.e. the limit values are assumed, e.g. 5.5%, 4.5% and 4% for $D_{\max} = 8$ mm, 16 mm, 22 mm and 32 mm respectively, according to the German specifications. American recommendations indicate rather the permissible range of air content in concrete mix, e.g. from 4.5% to 7.5% for maximum particle size of $\frac{3}{4}$ inch or 1 inch, taking into account the negative impact of excessive air content on the concrete strength. In many cases, insufficient freeze-thaw durability of concrete can be attributed to absent or insufficient air-entrainment, as reported for example in [2, 3]. The purpose of checking the mix air-entrainment, especially the air content and air void characteristics in hardened concrete is to identify and exclude specific constituents from the mix design. Other parameters to be checked include the amount of fines, the particle size distribution and composition of cement. Cement including non-clinker main constituents, usually ground to a higher specific surface area, has often an adverse effect on the air-entrainment process, as compared

Najkorzystniejsze rezultaty mrozoodporności betonu uzyskuje się przy zastosowaniu cementów portlandzkich. Szybkość twardnienia spoiwa (w tym klasa wytrzymałościowa cementu) ma znaczenie w odniesieniu do przewidywanego wieku betonu w chwili ekspozycji na działanie mrozu: pożądany jest wysoki stopień przereagowania spoiwa i skorelowana z nim niska zawartość wody niezwiązanej w porach betonu.

Oprócz składników betonu i ich proporcji na mrozoodporność betonu w konstrukcji będą wpływały czynniki związane z wykonaniem mieszanki, jej transportem, sposobem zagęszczania i pielęgnacji. Dotyczy to zwłaszcza betonów napowietrzonych – znany jest wpływ intensywności mieszania podczas transportu mieszanki, pompowania i intensywności zagęszczania betonu na zawartość lub rozkład wielkości porów w betonie [13, 14]. Od skuteczności pielęgnacji zależą natomiast właściwości fizyczne warstwy powierzchniowej betonu, ewentualna przepuszczalność wpływająca na stopień nasycenia betonu wodą lub wodnymi roztworami soli odladzającej. Wysoki stopień nasycenia betonu wodą znacząco obniża odporność na cykliczne zamrażanie-rozmrażanie [7, 15]. Znajduje to odzwierciedlenie w procedurach laboratoryjnego sprawdzania mrozoodporności betonu w próbkach.

3. SZCZEGÓŁOWE OKREŚLENIE KLASY EKSPOZYCJI

Właściwe ustalenie klasy ekspozycji XF w przypadku konkretnego elementu obiektu inżynierskiego nie jest proste, ponieważ opis środowiska wg PN-EN 206 jest enigmatyczny. Ogranicza się do rozróżnienia elementów mniej lub bardziej nasyconych wodą poprzez wskazanie pionowych i poziomych powierzchni elementów (grawitacyjne odprowadzenie wody zmniejsza oczywiście nasycenie betonu) lub elementów usytuowanych nad brzegiem morza. Stosowanie soli odladzających uwzględnia się w sposób zero-jedynkowy. Podstawowa kwestia, tj. rozróżnienie stref silnego i słabego mrozu, nie jest w ogóle określona. Podobnego rozróżnienia należy oczekiwać w odniesieniu do stref sporadycznego (słabego), przeciętnego lub bardzo silnego oddziaływania soli odladzających.

We francuskich dokumentach normalizacyjnych uzupełniających EN-206 przedstawiono sposób charakteryzowania agresywności oddziaływania mrozu na konstrukcje z betonu. Zdefiniowano trzy strefy agresywności mrozu [16] (Rys. 2):

- mróz słaby: ≤ 2 dni rocznie o temperaturze $< -5^{\circ}\text{C}$,

to Portland cement. It may result in unstable content of air [10] and unfavourable shift of the air void size distribution towards a decreased content of micropores.

In specification of cement for frost-resistant concrete mixes it is often supplementary factors that play the dominant role, such as the desired high resistance to chemical attack or reduction of heat generated by the exothermic process of cement setting in mass concrete elements. Unless there are any specific requirements the type of cement can be chosen for a given exposure class by applying the rules discussed in [11]. According to the simple model proposed by Powers the resistance of air-entrained concrete to internal damage would be proportional to the strength and permeability of hardened cement paste [7, 12]. The most beneficial freeze-thaw performance is obtained with Portland cement. The setting time of binder (including the strength class of cement) becomes important in relation to the assumed age of concrete at the time of its first exposure to frost action. At that time the degree of hydration of cement should be high and the associated content of unbound water in capillary pores should be low.

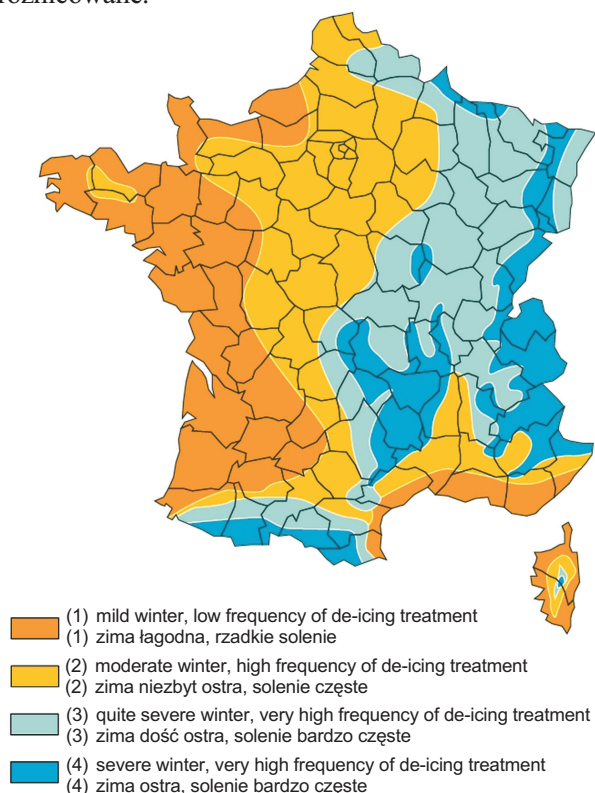
Besides the mix constituents and proportions, the freeze-thaw durability of concrete depends also on production-related factors, including mixing, transport, compaction and curing techniques used. This concerns in particular air-entrained concrete in the case of which the effect of mixing energy during transport, pumping and compaction effort on the air void content or size distribution is known, as reported in [13, 14]. Another relevant factor is curing efficiency which influences the physical properties of the top layer of concrete and permeability which influences the degree of saturation of hardened concrete with water with or without de-icing salt. A high level of saturation with water considerably reduces the freeze-thaw durability of concrete [7, 15]. This is reflected in the procedures for direct determination of freeze-thaw resistance on concrete specimens under laboratory conditions.

3. EXPOSURE CLASS DETERMINATION

Determining the exposure class XF for a specific road structure is not easy due to vague description of the environment given in PN-EN 206. It is limited to classifying elements depending on their saturation with water by differentiating vertical and horizontal surfaces (draining of water by gravity reduces the degree of saturation), and elements which are under seawater attack. For de-icing

- mróz ostry: > 10 dni rocznie o temperaturze $< -10^{\circ}\text{C}$,
- mróz umiarkowany: między słabym a ostrym.

Jednocześnie rozróżniono intensywność stosowania soli odladzających na podstawie liczby dni w roku l_{ds} , w których stosowane były środki odladzające: rzadko: $l_{ds} < 10$; często: $10 \leq l_{ds} < 30$; bardzo często: $l_{ds} \geq 30$. Odpowiednim kombinacjom agresywności mrozu i częstości stosowania soli odladzającej przypisano klasy ekspozycji XF (Tabl. 1). W konsekwencji wymagania na charakterystykę porów powietrznych oraz wskaźniki mrozoodporności betonu są zróżnicowane.



Zróżnicowanie sezonu zimowego na terenie Polski jest ewidentne. Izotermy najzimniejszego miesiąca, czyli stycznia, mają przebieg zbliżony do południkowego, co oznacza, że zimy są najłagodniejsze na terenach wzdłuż doliny Odry, także na wybrzeżu (Rys. 3) [18]. Sezon zimowy, definiowany jako okres ze średnią dobową temperaturą poniżej 0°C , trwa średnio od 32 do 127 dni. Obszary kraju zróżnicowane pod względem daty rozpoczęcia sezonu zimowego pokazano na Rys. 4. Lokalne zróżnicowanie warunków pogodowych ujawnia się też zróżnicowaniem liczby dni w roku, w których następuje przejście temperatury przez 0°C : maksymalna liczba takich dni mieści się w granicach od 75 do ponad 120 wg Limanówki [19]; najwięcej takich dni występuje w marcu (około 24).

salts exposure a simple “yes or no” approach is used. The fundamental issue, namely differentiating between zones of severe and mild frost is, however, completely left out of consideration. A similar differentiation should be expected in relation to the areas of occasional (weak), moderate and very strong attack of de-icing salts.

A system for rating the severity of frost attack on concrete structures is proposed in the French supplementary documents to EN-206. Three frost severity zones are defined [16] (Fig. 2):

- slight frost: ≤ 2 days per year with temperature below -5°C ,
- severe frost: > 10 days per year with temperature below -10°C ,
- moderate frost: conditions falling between slight and severe frost.

The de-icing salt application rate is also considered by introducing the l_{ds} value being the number of days of de-icing treatment per year and based on this value three frequencies of de-icing treatment are defined: low $l_{ds} < 10$, high: $10 \leq l_{ds} < 30$, very high: $l_{ds} \geq 30$. The respective combinations of frost severity and frequency of de-icing treatment are related to the XF exposure classes (Table 1) with the resulting requirements including diversified requirements concerning the air void characteristics and freeze-thaw durability factors.

Fig. 2. Frost and de-icing treatment severity zones applicable to road constructions in France [16]

Rys. 2. Strefy agresywności oddziaływania mrozu oraz intensywności stosowania soli odladzających do zimowego utrzymania konstrukcji drogowych we Francji [16]

In Poland a variation of severity of winter conditions is evident. The isotherms of the coldest month, i.e. January, on the map on Poland run approximately from north to south, and this means the mildest winters on the terrains along Odra River and on Baltic Sea coast (Fig. 3) [18]. The winter season, defined as the period with average daily temperature below 0°C , lasts on average between 32 and 127 days. The variation in the date of onset of winter across Poland is presented in Fig. 4. The local differences in weather conditions are also manifested by the variation in the number of days in year during which the temperature passes through the freezing point, ranging from 75 to 120 according to Limanówka [19] and with the greatest number of such days in March (ca. 24).

Table 1. Exposure classes and required properties of frost resistant concrete, adjusted to the frost severity zone and frequency of de-icing salt application [17]

Tablica 1. Klasy ekspozycji i wymagane właściwości betonu mrozoodpornego, dostosowane do strefy agresywności mrozu i częstości stosowania soli odladzającej [17]

Frequency of de-icing salt application Częstość stosowania soli odladzającej	Moderate frost zone Strefa mrozu umiarkowanego	Sever frost zone Strefa mrozu ostrego
Rarely / Rzadko	XF1 without special requirements / bez specjalnych wymagań (XC4)	XF3 (G) $\bar{L} \leq 0.25 \text{ mm}^{1)}$ $\Delta\epsilon \leq 400 \mu\text{m/m}^{2)}$ $f^2/f_0^2 \geq 75\%^{3)}$ $f_{c28} \geq 30 \text{ MPa}^{4)}$
Often / Często	XD3 + XF2 in most exposed construction elements w najbardziej narażonych miejscach konstrukcji; air content / zawartość powietrza $\geq 4\%$	XF4 (G+S) $\bar{L} \leq 0.20 \text{ mm}^{1)}$ $\Delta\epsilon \leq 400 \mu\text{m/m}^{2)}$ $f^2/f_0^2 \geq 75\%^{3)}$ $f_{c28} \geq 35 \text{ MPa}^{4)}$ $E_c \leq 0.6 \text{ kg/m}^2^{5)}$
Very often / Bardzo często	XF4 (G+S) $\bar{L} \leq 0.20 \text{ mm}^{1)}$ $\Delta\epsilon \leq 400 \mu\text{m/m}^{2)}$ $f^2/f_0^2 \geq 75\%^{3)}$ $f_{c28} \geq 35 \text{ MPa}^{4)}$ $E_c \leq 0.6 \text{ kg/m}^2^{5)}$	XF4 (G+S) $\bar{L} \leq 0.20 \text{ mm}^{1)}$ $\Delta\epsilon \leq 400 \mu\text{m/m}^{2)}$ $f^2/f_0^2 \geq 75\%^{3)}$ $f_{c28} \geq 35 \text{ MPa}^{4)}$ $E_c \leq 0.6 \text{ kg/m}^2^{5)}$

¹⁾ air void spacing factor in the hardened concrete (see chapter 5) / wskaźnik rozmieszczenia porów powietrznych w betonie (por. rozdz. 5)
²⁾ unit elongation of specimens subjected to internal frost resistance tests according to NF 18-424 or NF 18-425 standards after 300 cycles
wydłużenie względne próbek poddanych testom mrozoodporności wewnętrznej według norm NF 18-424 lub NF 18-425 po 300 cyklach
³⁾ quotient of the square of the resonant vibration frequency of specimens, before and after cyclic freezing and thawing, according to P18-414 standard / iloraz kwadratu częstości drgań rezonansowych próbek (po i przed cyklicznym zamrażaniem-rozmrażaniem) wg normy P18-414
⁴⁾ using the cylindrical specimens / na próbkach cylindrycznych
⁵⁾ loss of scaling mass from the specimen surface according to XP P18-420 standard / ubytek masy złuszczonej z powierzchni próbki zgodnie z normą XP P18-420

Opady atmosferyczne na terenie Polski w miesiącach zimowych są umiarkowane – w roku 2013, dość typowym, jeśli chodzi o temperaturę powietrza, suma opadu w miesiącach zimowych wynosiła od 20 do 120 mm miesięcznie. Rozkład miesięcznych opadów wskazuje na występowanie zwiększonych opadów w obszarze południowo-wschodniej Polski, zwłaszcza w obszarach podgórskich. Pokrywa śnieżna rośnie południkowo z zachodu na wschód.

Na podstawie zarządzenia [20] w Polsce stosuje się cztery standardy zimowego utrzymania dróg krajowych i autostrad, odzwierciedlające znaczenie odcinków dróg w sieci transportowej. Do usuwania śliskości zimowej stosuje się środki chemiczne, zwłaszcza solanki-roztwory NaCl lub CaCl₂ o stężeniu 20-25%, rozpryskiwane na nawierzchnie w ilościach 15-160 ml/m² [13]. Zgodnie z zasadami Eurokodu, należy rozpoznać i odpowiednio zaprojektować części konstrukcji inżynierskich znajdujących się w strefie rozbryzgów solanki i rozpylania mgły solnej [21]. Właśnie

The winter precipitation in Poland is moderate. In 2013 – a year with quite typical air temperatures – monthly precipitation ranged from 20-120 mm. The distribution of monthly precipitation shows increased levels in the south-eastern Poland, especially in sub-montane areas. Snow cover grows meridionally, from West to East.

Polish regulations [20] specify four levels of winter maintenance for national roads and motorways depending on their importance for the road network. Road slipperiness is reduced by de-icing chemicals, the most popular being 20-25% water solution of NaCl or CaCl₂ spray applied on the surface at the application rate of 15-160 ml/m² [13]. The Eurocode provisions require identification and implementing appropriate design measures for the parts of road structures which are located in the brine mist and spray splash influence zones [21]. It is the de-icing salts that significantly aggravate the deteriorating action of frost on concrete, as evidenced by the serious distress

oddziaływanie soli odladzających jest czynnikiem znacząco zwiększającym destrukcyjne działanie mrozu na beton, o czym świadczą poważne uszkodzenia estakad zarówno Mostu Łazienkowskiego, jak też Mostu Grota Roweckiego w Warszawie. W obu przypadkach, po około 30 latach eksploatacji, estakady poddano całkowitej wymianie, a przecież projektowany czas eksploatacji takich obiektów był znacznie dłuższy.

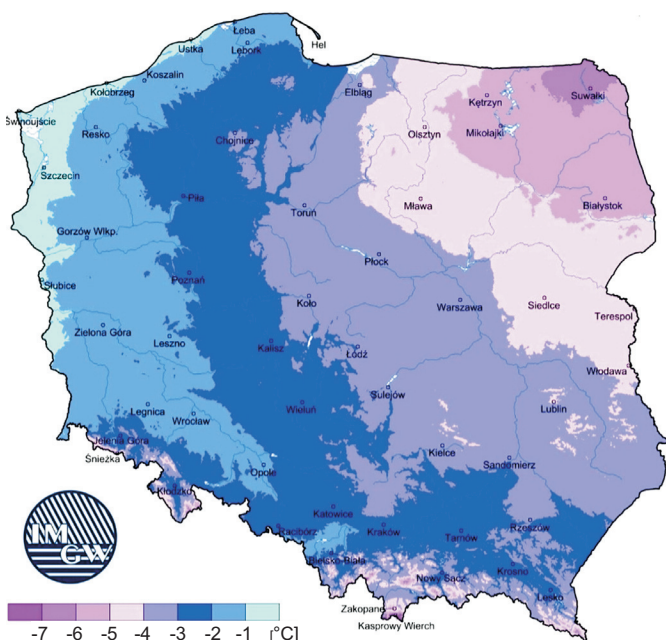


Fig. 3. Average temperature distribution in January 2013 in Poland according to [18]

Rys. 3. Rozkład średniej temperatury w miesiącu styczniu 2013 na terenie Polski wg [18]

Od agresywności oddziaływania mrozu (zimowej strefy klimatycznej) oraz intensywności stosowania środków odladzających zależy liczba cykli zamrażania-rozmarzania, jakim poddany będzie beton w konstrukcji. Jednakże rozkład temperatury w betonie, w tym liczba przejść temperatury przez 0°C , zmienia się w funkcji odległości od powierzchni zewnętrznej, narażonej na zmiany temperatury powietrza atmosferycznego. Jest to związane określonymi właściwościami termofizycznymi betonu (przewodność cieplna, ciepło właściwe [22]), jak też warunkami wymiany ciepła z otoczeniem. Rys. 5 ilustruje zmniejszenie liczby przejść przez 0°C ze wzrostem odległości od lica betonowej nawierzchni drogowej [23], ułożonej na podbudowie. W Tabl. 2 podano wyniki pomiarów liczby cyklicznych przejść przez 0°C w elementach konstrukcji i otaczającym powietrzu. Cykl przejścia temperatury przez 0°C w jakimś

of two bridges located in Warsaw: Łazienkowski and Grota Roweckiego. After about 30 years from opening the two bridges needed complete replacement, this being much earlier the designed lifetime.

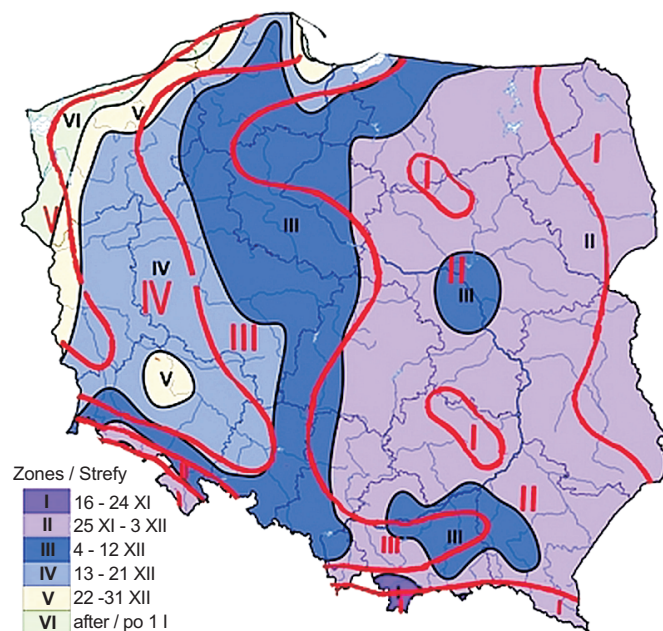


Fig. 4. Winter onset map of Poland [19]

Rys. 4. Mapa stref rozpoczęcia sezonu zimowego w Polsce [19]

The severity of frost action (winter severity zone) and the frequency of de-icing treatments define the number of freeze-thaw cycles to which concrete will be exposed during exploitation. However, the depth-wise distribution of temperature including the number of passes through the freezing point depends on the distance from the outside surface exposed to changes of ambient temperature. Other relevant factors include the specific thermo-physical properties of concrete (thermal conductivity, specific heat [22]), as well as heat exchange conditions. In Fig. 5 it can be seen how the number of passes through the freezing point decreases with increasing depth measured from the top of the road surface [23] laid on road base. Table 2 gives the measured number of cyclic passes through the freezing point in the parts of a structure and in the ambient air. Passing through the freezing point at a given point inside a concrete element does not mean that it must have been one of the destructive cycles. Water-ice phase change occurs in the air voids of concrete at temperature lower than the freezing point, and the smaller the air void size the lower is the temperature of freezing [7]. As a rough indication it

miejsu w konstrukcji betonowej nie oznacza, że to był jeden z cykli destrukcyjnych. Przejście fazowe wody w lód w porach betonu następuje w temperaturze niższej niż 0°C ; im mniejsze pory, tym niższa temperatura zamarzania wody [7]. Orientacyjnie można przyjąć, że w betonie o $w/c = 0,40 \div 0,50$, w warstwie zewnętrznej o grubości 50 mm, woda w porach kapilarnych zamarza w temperaturze od -2°C do -5°C . Jeśli więc przyjąć średnią temperaturę przejścia fazowego wody w tej warstwie betonu jako -3°C , można wyznaczyć hipotetyczną liczbę destrukcyjnych cykli zamarzania/rozmarzania betonu. Jak podano w Tabl. 2, liczba ta okazuje się około dwu lub czterokrotnie mniejsza niż liczba przejść temperatury powietrza przez 0°C (42 lub 25 w porównaniu do 96).

can be assumed that in the concrete with w/c ratio in the range of $0.40 \div 0.50$, in the 50 mm thick top layer, water freezes at the temperatures of -2°C to -5°C . Taking -3°C as the mean phase change temperature in that 50 mm thick top layer of concrete the theoretical number of destructive freeze-thaw cycles can be estimated. According to the data in Table 2 that number is about two or four times smaller than the number of passes through the freezing point of the ambient air (42 or 25 versus 96).

Fig. 5. The number of passes through the freezing point with increasing depth measured from the top surface of concrete pavement [23]

Rys. 5. Rozkład liczby przejść temperatury przez 0°C w funkcji odległości od powierzchni jezdni w betonowej nawierzchni drogowej na podstawie [23]

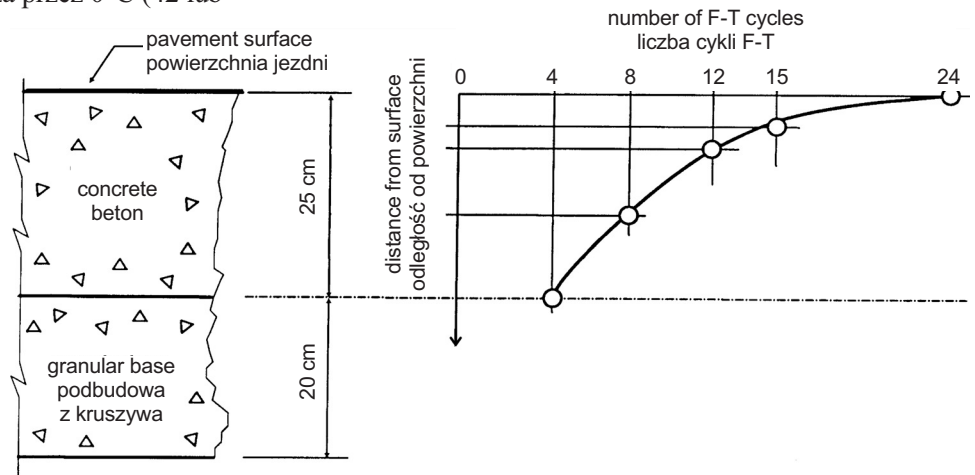


Table 2. The number of passes through the temperature of 0°C and -3°C in ambient air and inside a concrete structure in a year (calculated as the average of five years) on the basis of [23]

Tablica 2. Roczna liczba cykli przejść temperatury otoczenia oraz temperatury w elementach betonowych przez 0°C i przez -3°C (średnia z 5 lat) na podstawie [23]

Temperature measurement point / Miejsce pomiaru temperatury	Threshold / Temperatura przejścia	
	0°C	$-3^{\circ}\text{C}^{*)}$
Ambient air / Powietrze atmosferyczne	96	—
Concrete in beam at 50 mm depth / Beton w belce na głębokości 50 mm	65	42
Concrete in road pavement at 50 mm depth / Beton w nawierzchni na głębokości 50 mm	47	25

^{*)} estimated, average water freezing point in capillary pores of concrete /hipotetyczna, uśredniona temperatura powstawania lodu w porach kapilarnych betonu

Powyższa analiza wskazuje, że w danych warunkach klimatycznych określenie liczby cykli zamrażania-rozmarzania w czasie eksploatacji obiektu z betonu nie jest jednoznaczne. W tej samej lokalizacji w jednakowym okresie eksploatacji nawierzchnia drogowa lub pomost wiaduktu będą narażone na znacząco różną liczbę destrukcyjnych cykli F-T.

The above analysis shows that the number of freeze-thaw cycles cannot be determined as a universal value applicable to all situations in given climatic conditions. Thus, for example, the number of destructive F-T cycles will be considerably different between the road surface and the bridge deck concrete at the same location and during the same time.

4. BEZPOŚREDNIA OCENA MROZODPORNOŚCI WEWNĘTRZNEJ BETONU

4.1. MIARY MROZODPORNOŚCI WEWNĘTRZNEJ BETONU

Mrozoodporność betonu rozumie się jako stabilność właściwości mechanicznych i fizycznych pod działaniem cyklicznych zmian temperatury otoczenia, wywołujących zamarzanie wody w betonie. Uszkodzenie od mrozu to skumulowany efekt wielokrotnych zmian temperatury betonu i związanych odkształceń termicznych, a przede wszystkim zmian temperatury wody w porach betonu i związanych zjawisk obejmujących transport wody w porach, przemianę fazową wody w lód i ciśnienie krystalizacji. Jeśli współczynniki rozszerzalności stwardniałego zaczynu cementowego i ziaren kruszywa są dość bliskie, odkształcenie termiczne betonu nie powoduje znacznych koncentracji naprężeń na granicach ziaren. Dopiero w przypadku wysokiego nasycenia betonu wodą lub stałego dostępu do wody z zewnątrz cykliczne zamrażanie-rozmrażanie może wywołać uszkodzenia [24]. Dzieje się tak z powodu zwiększenia objętości wody przy przejściu fazowym w lód, co w konsekwencji prowadzi do powstania ciśnienia wewnętrznego (tzw. hydraulicznego) w porach kapilarnych betonu, częściowo nasyconych wodą. Istotne znaczenie ma szybkość ochładzania betonu.

Uproszczony model ciśnienia hydraulicznego wg T.C. Powersa opisuje zasięg strefy chronionej przez pęcherzyki powietrza w betonie napowietrzonem, a w konsekwencji określa wskaźnik rozmieszczenia porów [1, 15, 24]. Ze wzoru Powersa, przytoczonego w [13] jako wzór (5.2), wynika m.in., że zasięg strefy chronionej przez pęcherzyki powietrza w betonie przed uszkodzeniami mrozowymi wzrasta ze wzrostem wytrzymałości stwardniałego zaczynu cementowego na rozciąganie i jego przepuszczalności dla wody, a zmniejsza się ze wzrostem szybkości ochładzania. Obliczenia [25] wskazują, że ciśnienie krystalizacji lodu może przekroczyć wytrzymałość na rozciąganie matrycy cementowej, a powtarzalne cykliczne zmiany temperatury prowadzą do kumulacji mikrospeków.

Miarę mrozoodporności wewnętrznej betonu definiuje się na postawie ewentualnych mikro- i makrospeków betonu, spowodowanych powstaniem naprężeń wskutek ciśnienia hydraulicznego lub ciśnienia osmotycznego, lokalnie przekraczającego wytrzymałość na rozciąganie. Mrozowe uszkodzenie betonu określa się poprzez szybkość zmian

4. DIRECT DETERMINATION OF INTERNAL FROST RESISTANCE OF CONCRETE

4.1. MEASURES OF THE INTERNAL FROST RESISTANCE OF CONCRETE

The frost resistance of concrete is understood as stability of mechanical and physical properties under cyclic variation of ambient temperature resulting in freezing of the water present inside the concrete. Frost damage is a cumulative type of damage caused by repeated changes of the concrete temperature and the resulting thermal strains. In particular it involves the changes of the temperature of water filling the pores in concrete resulting in transport of water through pore system, phase transition and crystallisation pressure. With sufficiently close values of the coefficient of thermal expansion of cement paste and of aggregates the thermal deformation will not bring excessive stress concentrations at the interfacial transition zone. Cyclic freezing and thawing may result in damage to concrete only when it is highly saturated or under permanent effect of water [24]. Then the phase transition of water which partly fills the capillary pores will create internal (hydraulic) pressure due to the volume increase by ice formation. The cooling rate of concrete plays a major role.

A simple hydraulic pressure model proposed by T.C. Powers defines the beneficial zone of influence of air voids in air-entrained concrete and, as a consequence, also the value of the air void spacing factor [1, 15, 24]. It follows from Powers' equation, quoted in [13] as equation (5.2), that the beneficial zone of influence expands with the increase of the cement paste tensile strength and its water permeability. It decreases however with the increase of the cooling rate. The calculations [25] indicate that the ice crystallization pressure may exceed the tensile strength of cement matrix, and repeatable cyclic temperature changes lead to accumulation of micro-cracking.

Internal frost resistance can be measured on the basis of the degree of micro- and macro-cracking, caused by stresses due to hydraulic or osmotic pressure, which may locally exceed the tensile strength of the material. The frost damage to concrete is defined by the rate of change of a given mechanical property of concrete as a function of the number of freeze-thaw cycles N_{F-T} . The evaluation criteria are based on the relative dynamic elastic modulus or decrease of strength after pre-determined

wybranej właściwości mechanicznej betonu w funkcji liczby cykli zamrażania-rozmrażania N_{F-T} . W praktyce stosuje się kryterium granicznej wartości względnego współczynnika sprężystości lub spadku wytrzymałości po zadanej (adekwatnej do agresywności ekspozycji mrozowej) liczbie cykli N_{F-T} :

$$DF = E_{res}(N_{F-T}) / E_{res}(N_{F-T}=0) \quad (1)$$

$$RDM = E_{ult}(N_{F-T}) / E_{ult}(N_{F-T}=0) \quad (2)$$

$$\Delta f = [f_c(N_{F-T}) - f_c(N_{F-T}=0)] / f_c(N_{F-T}=0) \quad (3)$$

$$\Delta f_{PN} = [f_c(ref) - f_c(N_{F-T})] / f_c(ref) \quad (4)$$

gdzie:

DF – wskaźnik mrozoodporności wg ASTM C 666 (przyjmuje się $N_{F-T}=300$),

E_{res} – rezonansowy współczynnik sprężystości betonu,

RDM – względny dynamiczny współczynnik sprężystości wg CEN/TR 15177,

E_{ult} – współczynnik sprężystości oznaczony metodą ultradźwiękową,

Δf – względny spadek wytrzymałości na ściskanie f_c , na ogół w odniesieniu do f_{c28} ,

Δf_{PN} – względny spadek wytrzymałości na ściskanie w odniesieniu do wytrzymałości próbek świadków $f_c(ref)$ wg PN-B-06250 (najczęściej przyjmuje się $N_{F-T}=150$ lub 200).

Współczynnik sprężystości betonu jest bardzo podatny na zmiany wskutek powstawania mikro i makrospekkań, spodziewanych w rezultacie niszczącego cyklicznego ciśnienia wewnętrznego w porach betonu. Z tego powodu stosowany jest w ujęciu norm amerykańskich i CEN – wzory (1) i (2). W sformułowaniu PN-B-06250, jak również według norm stosowanych w krajach Europy Wschodniej i Chinach, ocena mrozoodporności opiera się na sprawdzeniu zmiany wytrzymałości na ściskanie (wzory (3) i (4)). Zupełnie konwencjonalnie przyjmuje się, że 20% redukcja współczynnika sprężystości lub wytrzymałości na ściskanie wyznacza granicę oddzielającą beton mrozoodporny od niemrozoodpornego. Znane są także inne kryteria mrozoodporności wewnętrznej: redukcja wytrzymałości $\leq 15\%$ wg norm czeskich, $\leq 5\%$ wg normy litewskiej lub redukcja współczynnika sprężystości $\leq 25\%$ wg norm francuskich. Względność określenia „mrozoodporności” jest związana z rodzajem testu kwalifikacyjnego i kryterium oceny; beton mrozoodporny według normy polskiej może być niemrozoodporny zgodnie z innymi normami lub odwrotnie.

number of freeze-thaw cycles N_{F-T} (appropriate to the severity of frost exposure):

where:

DF – frost durability factor according to ASTM C 666 (generally for $N_{F-T}=300$),

E_{res} – elastic modulus of concrete determined from resonance frequency,

RDM – relative dynamic modulus of elasticity determined according to CEN/TR 15177,

E_{ult} – modulus of elasticity determined with ultrasonic method,

Δf – relative decrease of compressive strength f_c , generally in relation to f_{c28} ,

Δf_{PN} – relative decrease of compressive strength in relation to control specimens $f_c(ref)$, according to PN-B-06250 (generally for $N_{F-T}=150$ or 200).

The modulus of elasticity of concrete is very sensitive to the development of micro- and macro-cracks expected under the deteriorating effect of cyclic increase of internal pore pressure. For this reason it is used in the American and CEN standards – equations (1) and (2) above. In Poland (Polish Standard PN-B-06250), Eastern Europe and China the frost resistance assessment is based on measuring the change in the compressive strength (equations (3) and (4)). Reduction of the elastic modulus or the compressive strength by 20% is an arbitrary threshold for rating concrete as durable or non-durable in terms of its internal resistance to frost damage. Other thresholds are specified in the national standards used in different countries: $\leq 15\%$ decrease of strength in the Czech Republic, $\leq 5\%$ in Lithuania or $\leq 25\%$ reduction of the modulus of elasticity in France. Thus, the freeze-thaw durability rating depends on the type of test and on the rating criterion used and, as such, the concrete rated durable according to the Polish standard may fail to meet the durability criteria of other standards, as well as the other way round.

Szczegółowe porównanie różnych procedur laboratoryjnego wyznaczania mrozoodporności wewnętrznej betonu przedstawiono w pracach [26, 27]. Metodyce oznaczania mrozoodporności betonu poświęcono całe seminarium, ukierunkowane na udoskonalenie normowych metod CEN, np. [28]. Znamioną cechą współczesnych procedur badawczych mrozoodporności jest ściśle określenie przebiegu zmian temperatury, na które narażone są elementy próbne. Natomiast oznaczanie „stopnia mrozoodporności” zgodnie z PN-B-06250 odbywa się przy nieokreślonej szybkości cyklicznych zmian temperatury. W celu rozpoznania znaczenia tego mankamentu, w IPPT PAN podjęto badania doświadczalne rozkładu temperatury w cyklicznie zamrażanych i rozmrażanych próbkach betonowych, a wyniki badań przedstawione są poniżej.

4.2. ROZKŁAD TEMPERATURY W ELEMENTACH BETONOWYCH PRZY OZNACZANIU MROZODPORNOŚCI

4.2.1. Opis badań

Badania rozkładu temperatury w próbkach betonowych, poddanych cyklicznemu zamrażaniu i rozmrażaniu, przeprowadzono za pomocą elektronicznych czujników Termochron (prod. Maxim Integrated). Czujnik wykorzystany był w trybie zadaniowym: po zaprogramowaniu rozpoczęcia pomiarów oraz interwału między kolejnymi pomiarami, wyniki pomiarów były zapamiętywane w wewnętrznej pamięci urządzenia. Odczytu wyników po zakończeniu zadania dokonano po wyjęciu czujników z betonu i podłączeniu ich do komputera za pomocą odpowiedniego interfejsu. Czujniki temperatury zostały zabetonowane w określonych miejscach wewnątrz próbek sześciennych o boku 150 mm i 100 mm (Rys. 6). Wcześniej zaprogramowano rejestrację temperatury co 360 sekund z dokładnością 0,5°C, co pozwoliło na pomiar i zapis temperatury przez 34 doby.

A detailed comparison of the different laboratory procedures used for determination of the internal frost resistance of concrete can be found in [26, 27]. The methodology of concrete durability determination was the topic of a whole seminar focusing on improvement of the existing standard CEN methods, e.g. [28]. A common key feature of the contemporary test methods used for determining the freeze-thaw durability of concrete is a precise determination of the pattern of temperature variation during freezing and thawing. However, the determination of the “frost resistance degree” according to the PN-B-06250 is performed with an uncontrolled rate of temperature changes. In order to check how important this could be an experimental research was carried out at IPPT PAN. It consisted in determining the temperature distribution in concrete specimens subjected to freeze-thaw cycles, the results of which are presented below.

4.2. TEMPERATURE DISTRIBUTION IN CONCRETE ELEMENTS IN FROST RESISTANCE TEST

4.2.1. Description of the experiments

The test set-up for determining temperature distribution in concrete specimens subjected to freeze-thaw cycles was based on Termochron electronic sensors from Maxim Integrated. The sensor was used in the task mode, that is after presetting the start time and time interval between subsequent readings the results were stored in the internal memory of the unit. The results were available for viewing only on completion of testing when the sensors were pulled out from the concrete specimens and connected to the computer via a special interface. The temperature sensors were embedded at pre-determined places inside 150 mm and 100 mm concrete cubes (Fig. 6). The test settings included 360 sec. temperature recording interval with measurement accuracy of 0.5°C, enabling to measure and record the temperatures for the test period of 34 days.

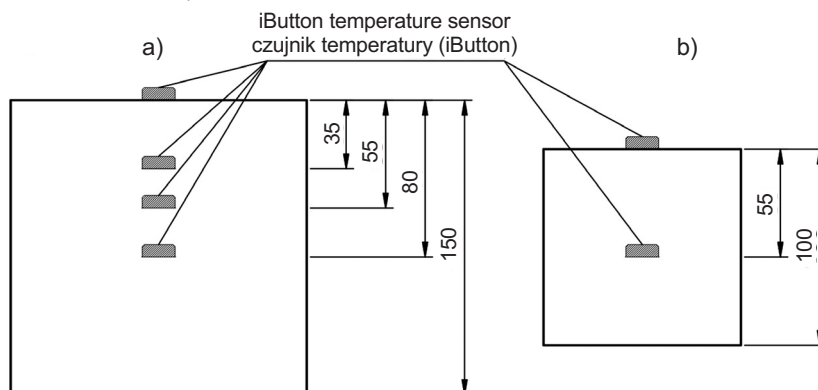


Fig. 6. Placement of temperature sensors in cube specimens: a) 150 mm side, b) 100 mm side
Rys. 6. Schemat rozmieszczenia czujników temperatury w próbkach sześciennych: a) o boku 150 mm, b) o boku 100 mm

Próbki wykonano z betonu napowietrzonego klasy C35/45, według receptury stosowanej do wykonania elementów obiektów inżynierskich. Zastosowano cement CEM I 42,5R w ilości 375 kg/m^3 , zawartość wody odpowiadała $w/c = 0,48$, a jako kruszywo grube wykorzystano grys amfibolitowy 2-8 i 8-16 mm oraz piasek kopalniany jako kruszywo drobne. Próbki po zabetonowaniu rozformowano po dwóch dniach, a następnie umieszczono w wodzie na okres 28 dni. Po tym czasie próbki zostały umieszczone w komorze termostatycznej i poddane cyklowi zamrażania-odmrażania zgodnie z PN-B-06250 (Rys. 7). Na wierzchu każdej z próbek umieszczono dodatkowy czujnik temperatury, mocując go do powierzchni. Pomiary temperatury trwały tydzień w jednym z laboratoriów, następnie próbki przewieziono do drugiego laboratorium i przez kolejny tydzień przeprowadzono pomiary temperatury betonu w próbkach umieszczonych w komorze termostatycznej. Po zakończeniu badań czujniki zostały wymontowane z kostek, a zawarte w nich wyniki odczytane i poddane analizom.

concrete specimens with embedded temperature sensors and one temperature sensor attached to the surface

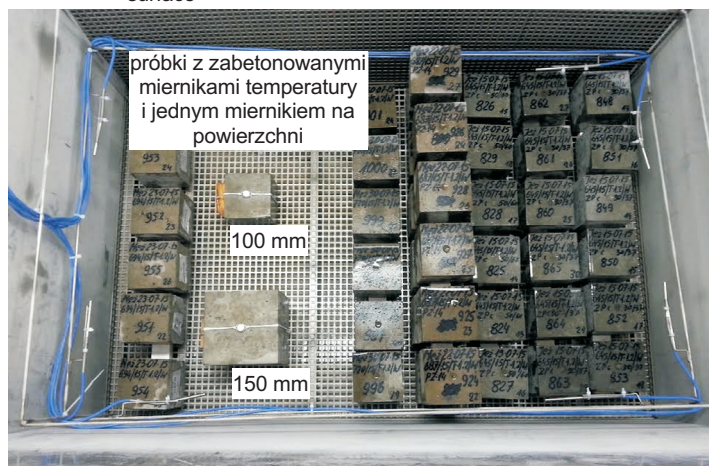


Fig. 7. View of concrete specimens placed in the temperature chamber during standard freeze-thaw durability tests according to PN-B-06250

Rys. 7. Widok próbek betonu w komorze termostatycznej podczas normowych testów mrozoodporności wg PN-B-06250

4.2.2. Wyniki badań

Przykładowe przebiegi zmian temperatury w określonym miejscach próbek w jednej z komór przedstawiono na Rys. 8. Niezależnie od wielkości próbek, temperatura betonu w ich środku osiągnęła wartość zgodną z temperaturą powietrza w komorze (różnica odczytów nie

The specimens were moulded from C35/45 air-entrained concrete, having the composition of concrete used for road structures. Main mix constituents consisted of Portland cement CEM I 42.5R (the content of 375 kg/m^3), amphibolite crushed aggregate of 2-8 and 8-16 mm, quarried sand, and water corresponding to $w/c = 0.48$. The specimens were demoulded after two days of curing and then they were conditioned for another 28 days in water. After that time they were placed in the thermostatic chamber and subjected to freeze-thaw cycles according to the procedure of PN-B-06250 (Fig. 7). An additional temperature sensor was attached to the top surface of each specimen. The temperature was measured for the period of one week in one laboratory and then the specimens were transferred to the second laboratory for continuing the test in a different thermostatic chamber. On completion of the test procedure the sensors were removed from the cubes to read and analyse the recorded results.

4.2.2. Test results

Fig. 8 presents an example of temperature curves at the specific points on the specimens obtained in one of the two thermostatic chambers. Irrespective of the size of specimens their internal temperature reached the level of the ambient temperature inside the chamber (the difference between the results did not exceed 0.5°C). Also the rate of change of temperature as measured inside the specimen did not depend on the size of specimen. The point at which temperature below freezing was recorded by each sensor was the same in both specimens, irrespective of the point of measurement.

With the specimen temperature readouts it was possible to compare the temperature change parameters during standard tests carried out inside the thermostatic chambers at the two laboratories. The observed differences include cycle duration which was 7 hr and 30 min in one case and 8 hr and 20 min in the other. The average time of exposure to the temperature below 0°C was 250 min in one case and 320 min in the other. However, the most important observation was a considerable difference in the cooling rate. Thus for the 150 mm cubes, the cooling rate of specimens to the temperature below freezing was 13.5°C/hr in one chamber and it was ca. 6°C/hr in case of the second chamber, that is over two times lower than in the first one.

przekraczała $0,5^{\circ}\text{C}$). Zróżnicowanie wielkości próbek nie wpływało też na szybkość zmian temperatury rejestrowanej w środku próbki. Czas, w jakim każdy z czujników rejestrował ujemną temperaturę, w obu próbkach był taki sam niezależnie od miejsca pomiaru.

Pomiar temperatury w próbkach umożliwił porównanie charakterystycznych parametrów przebiegu temperatury podczas normowych testów w komorach termostatycznych dwóch laboratoriów. Zarejestrowano m.in. różnice w czasie trwania cyklu: 7 h 30 min w pierwszym przypadku, wobec 8 h 20 min w drugim. Długość przebywania próbek w temperaturze poniżej 0°C w pierwszym przypadku wynosiła średnio 250 min, a w drugim 320 min. Najistotniejszą obserwacją była znacząca różnica w szybkości ochładzania próbek. W środku próbek o boku 150 mm obniżenie temperatury poniżej zera występowało z szybkością $13,5^{\circ}\text{C/h}$ w przypadku pierwszej komory, natomiast w przypadku drugiej komory szybkość ochładzania betonu wynosiła około 6°C/h , tj. była ponad dwukrotnie niższa.

4.3. ZNACZENIE STOPNIA WYPEŁNIENIA KOMORY

W przedmiotowej normie PN-B-06250 nie wspomniano o znaczeniu stopnia wypełnienia próbkami komory zamrażalniczej. Manualna wersja metody, praktykowana od czterech dekad, polegała na wkładaniu próbek do zamrażarki „spożywczej”, nastawionej na określoną temperaturę ujemną. W zależności od liczby wkładanych próbek, temperatura w komorze osiągała szybciej lub wolniej zadaną wartość, podobnie jak beton w próbkach. Zatem definiowanie szybkości chłodzenia betonu w ogóle nie było możliwe. Natomiast kalibrację aktualnie stosowanych, dedykowanych komór termostatycznych przeprowadza się przy niewielkim wsadzie komory, od 10% do 60%, a kalibracja dotyczy temperatury maksymalnej i minimalnej, a nie szybkości zmiany temperatury.

Współczesne dokumenty normalizacyjne, np. CEN/TR 15177, PN-EN 13581, jak też PN-EN 1338 (dotyczące również wyrobów z betonu) zalecają całkowite wypełnienie komory zamrażalniczej podczas badań, sugerując – w miarę potrzeby – dopełnienie atrapami próbek. W przypadku sterowania przebiegiem temperatury na podstawie pomiarów w cieczy chłodzącej (jak w PN-EN 1338) ma to raczej mniejsze znaczenie. Jeśli sterowanie odbywa się na podstawie pomiaru temperatury w środku próbki (PN-EN 13581, ASTM C666), to również ma niewielkie znaczenie. Jeśli natomiast sensor temperatury jest umieszczony po prostu w przestrzeni komory (PN-B-06250), pojemność cieplna i przewodność ochładzanej masy betonu będzie miała wpływ na szybkość

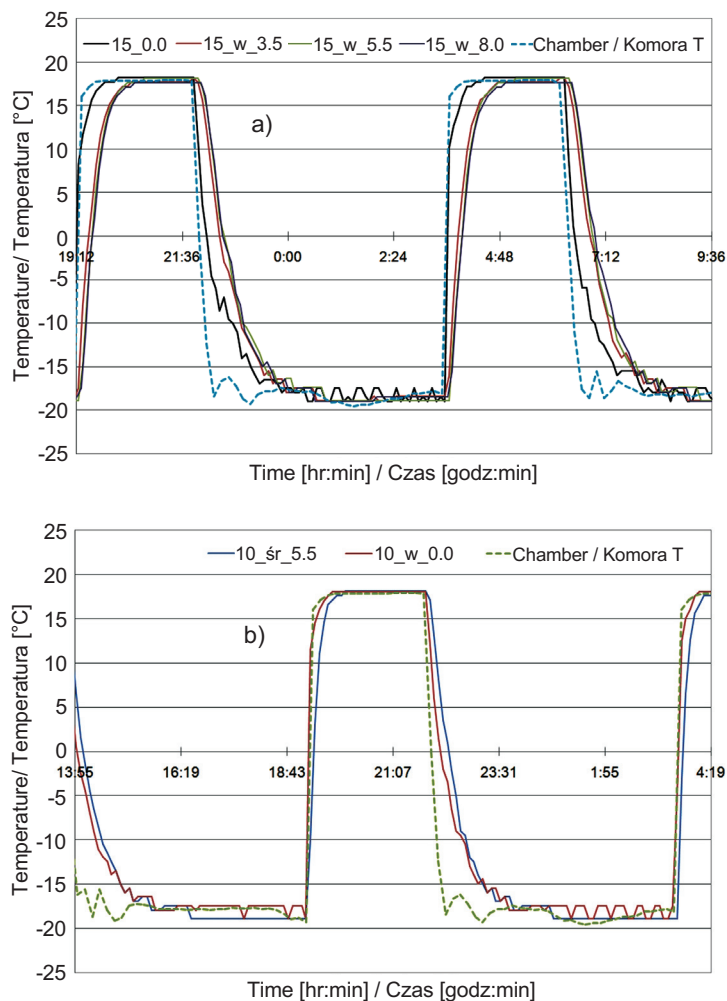


Fig. 8. Change of ambient temperature and temperature inside the specimens of 100 mm side (a) and 150 mm side (b) placed in the temperature chamber during standard freeze-thaw durability tests according to PN-B-06250

Rys. 8. Przebieg temperatury w powietrzu w komorze termostatycznej i w próbkach betonu o boku 100 mm (a) i 150 mm (b) podczas normowych testów mrozodporności wg PN-B-06250

4.3. THE IMPORTANCE OF CHAMBER FILLING DEGREE

In the PN-B-06250 standard the importance of the filling degree of the freezing chamber with specimens is not mentioned. The manual version of the method, practiced for four decades, consisted in inserting specimens into the “food” freezer, set to a specific temperature below zero. Depending on the number of inserted specimens, the temperature in the chamber reached the given value at a faster or slower rate, and concrete in the specimens likewise. Therefore, defining the concrete cooling rate was not possible at all. Currently the calibration of dedicated,

zmiany temperatury, zwłaszcza gdy sprawność chłodnicza komory jest nieduża. Warto to potwierdzić doświadczalnie z uwagi na zróżnicowanie rodzajów zamrażarek w laboratoriach krajowych.

4.4. ZNACZENIE OKREŚLONEGO PRZEBIEGU ZMIAN TEMPERATURY

Podczas zamrażania próbek betonu zwiększająca objętość woda w porach kapilarnych po przejściu w lód powoduje wypychanie niezamrożonej jeszcze wody do dalszych obszarów porowatych, zwłaszcza do systemu wprowadzonych pustek powietrznych [24]. Transport wody w systemie porów wymaga czasu, a więc ochładzanie z dużą szybkością, związane z dużą szybkością tworzenia lodu, powoduje większe ciśnienie wody na ścianki porów i w konsekwencji większe uszkodzenia. Według Fagerlunda [15] dwukrotne zwiększenie szybkości ochładzania betonu powoduje, że zasięg strefy chronionej wg definicji Powersa zmniejsza się co najmniej o 20%. Pigeon i in. [29] wyznaczyli zależność granicznego wskaźnika rozmieszczenia porów (por. rozdz. 5) od szybkości ochładzania próbek, wykazując, że dwukrotny wzrost szybkości ochładzania wymaga zmniejszenia wskaźnika rozmieszczenia porów o około 50% przy $w/c = 0,50$. Wpływ szybkości ochładzania próbek z zapraw cementowych na ich mrozoodporność był przedmiotem badań Li i Zheng [30]. Stwierdzono ok. 40% wzrost ciśnienia w porach na skutek zwiększenia szybkości ochładzania od 2,5 do 12°C/h. Potwierdzono także znaną wcześniej zależność uszkodzeń mrozowych od długotrwałości zamrażania.

Większą szybkość powstawania spękań wewnętrznych wskutek cyklicznego zamrażania i rozmrażania przy wyższej szybkości ochładzania stwierdzono też w badaniach betonów napowietrzonych [31]. Zaobserwowano przeciwny efekt szybkości ochładzania w odniesieniu do złuszczeń powierzchniowych, co potwierdza istotne zróżnicowanie mechanizmów mrozowego zniszczenia wewnętrznego i zniszczenia powierzchniowego w obecności soli odladzającej.

Powyższe uwagi wskazują, że do wiarygodnej laboratoryjnej oceny odporności betonu na cykliczne zamrażanie-rozmrażanie niezbędne jest jednoznaczne określenie newralgicznego parametru, jakim jest szybkość ochładzania betonu w próbkach. Szybkość naturalnego ochładzania betonu w warstwie kilku cm od powierzchni rzadko przekracza 2-3°C/h [23, 32]. Z definicji jednak, szybkość zmian temperatury wywołanych cyklicznym zamrażaniem-rozmrażaniem próbek w komorze termostatycznej podczas testów laboratoryjnych nie powinna odpowiadać szybkości zmian w realnych elementach konstrukcji betonowych. Na tym

thermostatic chambers is conducted with a small chamber batch, from 10% to 60%, and the calibration concerns the maximum and minimum temperature only, not the rate of the temperature change.

Modern standard documents, e.g. CEN/TR 15177, PN-EN 13581 and PN-EN 1338 (also concerning concrete products), recommend the complete filling of the freezing chamber during the test, suggesting to fill it up with dummy specimens as needed. When the control of temperature development is performed using the cooling liquid temperature (as in PN-EN 1338) the issue is of rather of a minor importance. If the temperature control is based on the temperature measurement inside concrete specimen (PN-EN 13581, ASTM C666), it is of a minor importance as well. However, if the temperature sensor is located in the chamber space (PN-B-06250), heat capacity and conductivity of cooled concrete mass will have an impact on the rate of temperature change, especially when the cooling efficiency of the chamber is small. These statements need to be confirmed experimentally, given the diversity of freezer types of in domestic laboratories.

4.4. THE IMPORTANCE OF TEMPERATURE CHANGE CURVE

From the point when the concrete specimens become cooled below the freezing point, the increasing volume of water freezing in the capillary pores pushes residual liquid water to other porous areas, in particular those created by air-entrainment [24]. The transport of water through the system of pores requires time. For this reason faster cooling rate results in faster ice formation which intensifies the water pressure exerted on the pore walls and, as a consequences, increases the severity of damage. According to Fagerlund [15] increasing the cooling rate by two times reduces the beneficial zone of influence as defined by Powers by at least 20%. Pigeon et al. [29] determined a relationship between the limiting spacing factor (see chapter 5) and the cooling rate demonstrating that for concrete with $w/c = 0.50$ increasing the cooling rate two times entails about 50% reduction of the required spacing factor. The influence of cooling rate on the freeze-thaw durability of mortars was studied by Li and Zheng [30]. They observed ca. 40% increase of the pore pressure following increase of the cooling rate from 2.5°C/hr to 12°C/hr. They also confirmed the already known influence of the frost exposure time on the severity of frost damage.

Tests carried out on air-entrained concrete confirmed that a faster cooling rate increases internal cracking caused by

Table 3. Specimen cooling rate during determination of resistance to internal frost resistance of concrete
 Tablica 3. Szybkość ochładzania próbek podczas bezpośredniego sprawdzenia mrozoodporności wewnętrznej betonu

Reference standard Norma	Test method Metoda	Specimen type and size [mm] Rodzaj i wymiary próbek	Cooling rate [°C/h] Szybkość ochładzania	Basic evaluation criterion Podstawowe kryterium oceny
ASTM C666	A, B	beams / belki, 400 × 75 × 100	10-22	E_{res}
CEN/TR 15177	CIF	half cubes / połówki kostek 150 × 150 × 70	10	E_{ult}
CEN/TR 15177	beam test / „belkowa”	beams / belki, 400 × 100 × 100	4.5	E_{res}
NF P18-425	—	beams / belki, 400 × 100 × 100	6	E_{res}
PN-B-06250	normal / zwykła	150 mm or 100 mm cubes kostki o boku 150 lub 100 mm	not controlled / nieustalona	f_c

właśnie polega przyspieszenie uszkodzeń mrozowych, aby bezpośrednią ocenę mrozoodporności materiału w próbkach przeprowadzić w ciągu najwyżej 2-3 miesięcy, zamiast czekać wiele lat. Do określenia szybkości ochładzania należy wykorzystać ustalenia norm zagranicznych (Tabl. 3), a także techniczne możliwości sterowania urządzeniami dostępnymi w laboratoriach krajowych.

Kierując się intencją opracowania mniej agresywnej metody oznaczania mrozoodporności wewnętrznej betonu niż ASTM C666, Setzer i in. [33] zaproponowali metodę badawczą zwaną CIF, opublikowaną też w raporcie technicznym CEN/TR 15177:2006. Ocena wewnętrznych uszkodzeń betonu polega na pomiarze czasu przejścia fali ultradźwiękowej przez próbkę, poddaną cyklicznemu zamrażaniu i rozmrażaniu przy jednostronnym oddziaływaniu wody na jej powierzchni (Rys. 9). Cykliczne zmiany temperatury od +20°C do -20°C następują z ustaloną prędkością 10°C/h, zarówno przy ochładzaniu, jak też przy ogrzewaniu próbek, a cykl trwa 12 godzin. Zasadniczą zaletą metody jest kontrola warunków nasycania betonu wodą poprzez jednokierunkowe podciąganie kapilarne w warunkach izotermicznych, następujące po częściowym wysuszeniu próbek w kontrolowanych warunkach wilgotności otoczenia (20°C/65% RH). Późniejsze zwiększanie nasycenia próbek następuje wskutek cyklicznego oddziaływania mrozu. Mrozoodporność wewnętrzną ocenia się zgodnie ze wzorem (2), ale jednocześnie oznacza się zmiany masy próbki. Zupełnie arbitralnie przyjęte kryteria oceny RDM po 28 cyklach F-T dotyczą jedynie budowli hydrotechnicznych [32], a nie konstrukcji drogowych.

Metoda CIF, z nielicznymi wyjątkami [32], nie zyskała uznania w krajach europejskich; zarówno Francja, jak też kraje skandynawskie, kraje nadbałtyckie i południowi sąsiedzi Polski wykorzystują własne procedury badawcze i własne kryteria oceny. Po części jest to uzasadnione miejscowymi doświadczeniami w zakresie oznaczania mrozo-

freezing and thawing [31]. However, the effect was opposite in the case of surface scaling, this confirming difference between the mechanism behind the internal damage and surface scaling in the presence of de-icing salt.

Based on these observations it can be concluded that having a clearly specified cooling rate is critical for obtaining a reliable assessment of the freeze-thaw resistance of concrete at laboratory conditions. In natural conditions the cooling rate of concrete in the top layer of a few centimetres from external surface generally does not exceed 2-3°C/hr [23, 32]. However, by the very definition the cooling rate during freezing and thawing in thermostatic chamber is not the same as the cooling rate to which the structure will be actually exposed in real life. Otherwise a direct determination of the freeze-thaw durability would require years rather than 2-3 months of accelerated freeze-thaw cycling in laboratory. The cooling rate can be determined according to the requirements of standards used in different countries (Table 3) and it can also result from the existing control limitations of available test devices.

With the intent to develop a test method which would provide a less aggressive alternative to ASTM C666 Setzer et al. [33] proposed a new method named CIF, which was subsequently published in the technical report CEN/TR 15177:2006. The severity of internal damage is determined through measuring the time it takes an ultrasonic wave to penetrate through a specimen subjected to freeze-thaw cycles and exposed to water on one side (Fig. 9). The temperature is changed between +20°C and -20°C at a constant rate of 10°C/hr, both during the cooling and heating phases of 12 hr cycles. The main advantage of this method is that it enables controlled saturation of concrete by capillary rise in one direction under constant temperature after partial drying in controlled humidity conditions (20°C/65% RH). The subsequent

odporności w kontekście miejscowych warunków klimatycznych, jak też zastrzeżeniami wobec metody CIF. Według Hasholt [34] wewnętrzne uszkodzenia betonu (spękania) nie powstają równomiernie w objętości próbki – występują odrębne obszary spękanie i niespękanie; ze wzrostem liczby cykli F-T zaobserwowano przemieszczanie frontu strefy spękaniej. W takim przypadku na podstawie pomiaru prędkości fali ultradźwiękowej, przechodzącej przez obszary o mocno zróżnicowanej gęstości występowania spękań, nie można jednoznacznie oceniać stopnia uszkodzenia wskutek działania mrozu. Również w [32] zakwestionowano przydatność metody CIF do oceny betonu w klasie ekspozycji XF3, ponieważ stopień nasycenia wodą przekracza zaobserwowany poziom nasycenia betonu nawet na krawędziach elementów konstrukcyjnych. Zgodność procedury przyspieszonej z rzeczywistymi warunkami oddziaływania mrozu i wody na konstrukcje wydaje się nieosiągalna.

Ewentualna implementacja metod badawczych według CEN/TR 15177 (metoda CIF) lub ASTM C 666 w Polsce byłaby kosztowna, zwłaszcza, że kryteria oceny według CIF nie zostały opracowane. Liczne laboratoria krajowe posiadają odpowiednią aparaturę i umiejętności wykonania testów mrozoodporności według PN-B-06250, dlatego warto poprawić mankamenty procedury normowej. Dotyczy to zwłaszcza jednoznacznego ustalenia szybkości ochładzania betonu w próbkach, dzięki czemu powinny zmniejszyć się różnice określania stopnia mrozoodporności betonu w różnych laboratoriach krajowych.

increase in the saturation of specimens can be attributed to the effect of freeze-thaw cycles. Equation (2) is used to assess the internal frost resistance and specimen mass changes are evaluated simultaneously. The *RDM* rating criteria after 28 F-T cycles are purely arbitrary and, besides, their application is limited to hydraulic rather than road structures [32].

With a few exceptions [32] the CIF method has not gained recognition nor have phased out the test procedures and evaluation criteria used in different European countries – from Scandinavia, through the Baltic states, the Czech Republic, Slovakia to France. This is in part justified by the local experience specific to the local climatic conditions, as well as some doubts as to the reliability of that method. According to Hasholt [34] the internal damage (cracking) of concrete is not distributed uniformly throughout the specimen with identifiable cracked and non-cracked zones and advancement of the cracking zone was noted with the increase in the number of F-T cycles. This being so, the measured speed of ultrasonic wave propagating through areas with varying severity of cracking cannot be used as a reliable indicator of the existing frost damage. The CIF method has been also considered unsuitable for assessing concrete of exposure class XF3 since the level of saturation exceeds the maximum saturation levels observed at edges of concrete elements, as reported in [32]. It seems impossible to match the accelerated freeze-thaw cycling to the real life exposure to the action of frost and water.

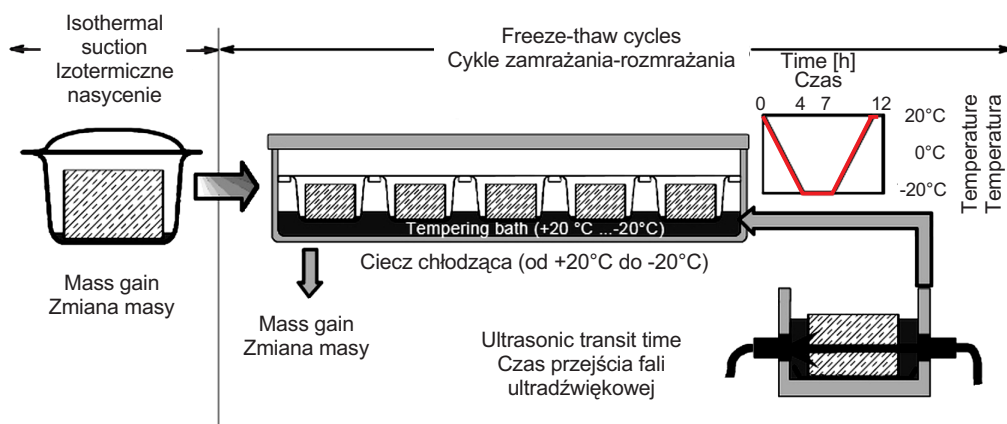


Fig. 9. Schematic of the CIF test used for determining the resistance of concrete to internal damage by measuring the ultrasonic transit time according to [33]
Rys. 9. Schemat testu mrozoodporności wewnętrznej betonu metodą CIF według [33] wraz z pomiarem czasu przejścia fali ultradźwiękowej

5. OCENA MROZOODPORNOŚCI METODĄ POŚREDNIĄ

Do pośrednich metod określania mrozoodporności betonu należy oznaczenie charakterystyki porów powietrznych w betonie napowietrzonym [35], zwłaszcza wskaźnika roz-

Implementation of the test methods according to CEN/TR 15177 (CIF) or ASTM C 666 in Poland would be costly, especially that there are no rating criteria developed for use with the CIF method. On the other hand, there are numerous well equipped and competent laboratories across Poland in which freeze-thaw durability can be reliably determined with the standard method of PN-B-06250 and

mieszczenia porów zgodnie z koncepcją Powersa. Znana jest też koncepcja określania krytycznego stopnia nasycenia wodą, zaproponowana przez Fagerlunda [15]. Ilościowy opis charakterystyki porów w napowietrzonym betonie uzyskuje się na podstawie mikroskopowej analizy przekrojów próbek zgodnie z PN-EN 480-11. Z uwagi na konieczność finezyjnego przygotowania złądów oraz usuwania artefaktów z obrazów mikroskopowych stosowanie tej metody wymaga dużego doświadczenia operatora.

Wymagania normowe dotyczące charakterystyki porów powietrznych w stwardniałym betonie, odpornym na agresję mrozu w klasach środowiska XF2 do XF4, omówiono szczegółowo w [36]. Wymagania obejmują:

- wskaźnik rozmieszczenia porów $\bar{L}$,
- zawartość mikroporów A_{300} (mniejszych od 300 μm),
- całkowitą zawartość porów powietrznych A .

W przepisach krajowych, dotyczących nawierzchni dróg betonowych [37], sformułowano kryteria podane w Tabl. 4.

Table 4. The requirement concerning the air void characteristics in air-entrained concrete according to [37]
Tablica 4. Wymaganie dotyczące charakterystyki porów powietrznych w betonie napowietrzonym zgodnie z [37]

Air void characteristics Charakterystyka porów	Exposure class Klasa ekspozycji	
	XF3	XF4
Maximum spacing factor [mm] Maksymalny wskaźnik rozmieszczenia porów	0.25	0.20
Minimum micropores content A_{300} [%] Minimalna zawartość mikroporów	1.5	1.5

Warto zwrócić uwagę, że pośrednia ocena mrozoodporności wewnętrznej wymaga spełnienia warunków dodatkowych, wskazanych na Rys. 10. Odpowiednią jakość kruszywa określają właściwości mechaniczne i fizyczne wskazane w rozdz. 2. Odpowiednio niski współczynnik w/c odpowiada niskiej porowatości kapilarnej stwardniałego zaczynu cementowego i jego odpowiednio wysokiej wytrzymałości na rozciąganie. W związku z tym ocenie charakterystyki porów powinno towarzyszyć sprawdzenie w/c (zawartości wody w mieszance w miejscu rozładunku).

Wymagania dotyczące charakterystyki porów w betonie w konstrukcjach inżynierskich stosowane są restrykcyjnie w Kanadzie [38]. Sprawdzenie odbywa się na próbkach-odwiertach pobranych z konstrukcji; szczegółowo opisano procedury wykonania odwiertów, przygotowania próbek do badań mikroskopowych oraz wykonania oznaczeń. Wymaga się, aby w każdej badanej próbce zawartość

hence it would be advisable to eliminate its shortcomings. This concerns in particular specification of the specimen cooling rate what would reduce variation of assessments done by different laboratories in Poland.

5. METHOD OF INDIRECT ASSESSMENT OF FROST RESISTANCE

The freeze-thaw durability of concrete can be assessed indirectly, for example by determining the characteristics of air void structure in air-entrained concrete [35], including in particular the Powers air void spacing factor. There is also an idea proposed by Fagerlund [15] to use for this purpose the critical level of saturation with water. The air void characteristics in air-entrained concrete can be quantified by microscopic analysis of specimen sections according to PN-EN 480-11. Application of this method requires vast experience of the operator due to the necessity of sophisticated preparation of polished sections and removal of artefacts from the microscopic images.

The standard requirements concerning the air void characteristics in hardened concrete resistant to frost damage in exposure classes XF2 to XF4 are discussed in detail in [36]. These requirements concern generally:

- air void spacing factor $\bar{L}$,
- micropores content A_{300} (smaller than 0.3 mm),
- total air void content A .

The evaluation criteria defined by domestic regulations relating to concrete road pavements [37] are presented in Table 4.

It is worth noting that indirect assessment of internal frost resistance needs the fulfilment of additional conditions, indicated in Fig. 10. The required quality of aggregate is defined by the mechanical and physical properties described in chapter 2. The appropriately low w/c ratio corresponds to the low capillary porosity of hardened cement paste and its suitably high tensile strength. Therefore, the evaluation of the characteristics of air voids should be accompanied by w/c testing of concrete (water content in a concrete mix in a place of discharge).

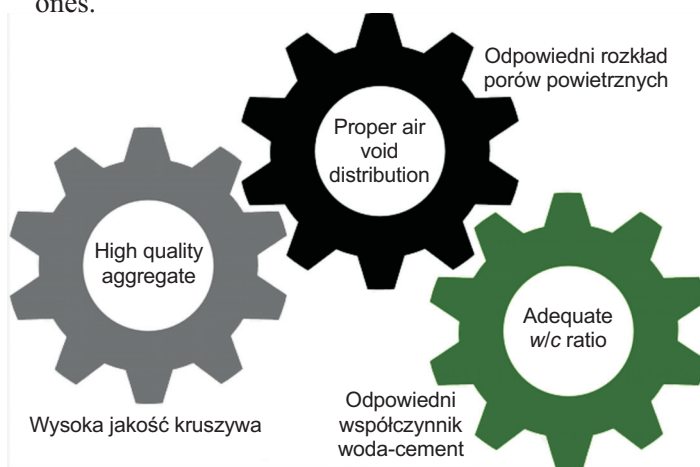
The requirements regarding air void characteristics in concrete used in road structures are applied restrictively in Canada [38]. Compliance with requirements is checked on in-situ cores according to the detailed procedures of taking specimens, their preparation for microscopic evaluation and determination of parameters. The concrete passes the test if the total air void content is $\geq 3.0\%$ and $\bar{L} \leq 0.230$ mm in each specimen of the test series. The

porów powietrznych była $\geq 3,0\%$ i $\bar{L} \leq 0,230$ mm. Jedynie w przypadku betonu wysokowartościowego z dodatkiem pyłu krzemionkowego dopuszcza się $\bar{L} \leq 0,250$ mm w każdej badanej próbce, ale dodatkowo wymaga się niskiej przepuszczalności jonów chlorkowych, poniżej 1000 kulombów. Przewidziane są kary finansowe za brak zgodności charakterystyki porów powietrznych z wymaganiami, ale są też przewidziane premie za uzyskanie bardzo korzystnego rozkładu wielkości porów.

Podobnie jak w przypadku wytrzymałości betonu, na etapie zatwierdzania i kontroli receptury należałoby postawić odpowiednio ostrzejsze wymagania dotyczące charakterystyki porów niż na etapie badań odbiorczych betonu wbudowanego. Odwołując się do przykładów zaczerpniętych z dokumentów normalizacyjnych niemieckich i austriackich, dotyczących nawierzchni z betonu [36], w Tabl. 5 podano propozycję uszczegółowienia zapisu zawartego w Tabl. 4 w odniesieniu do klasy ekspozycji XF4. Dotychczasowe, wieloletnie badania próbek betonów napowietrzonych wykonywanych w kraju pozwalają uznać te kryteria za całkiem realne.

Fig. 10. Complementary parameters characterizing the concrete constituents and its microstructure, necessary for indirect evaluation of internal frost resistance

Rys. 10. Komplementarne cechy składników betonu i jego mikrostruktury, niezbędne do pośredniej oceny mrozoodporności wewnętrznej



Parametry rozkładu porów $\bar{L}$ i A_{300} są ze sobą powiązane, chociaż w sposób niejawni. Kiedy graniczną wartość modyfikuje się przy zmniejszeniu agresywności środowiska z XF4 do XF3, należałoby zmniejszyć graniczną wartość A_{300} . Jednak $A_{300} < 1,5\%$ nie stosuje się w specyfikacjach technicznych, niepewność oznaczenia jest zbyt duża. W związku z tym alternatywnym rozwinięciem zapisów dotyczących XF3 w Tabl. 4 jest sformułowanie podane w Tabl. 5, odwołujące się do wymagań sformułowanych w normie duńskiej DS. 2426:2011, por. [36].

Oznaczenie charakterystyki porów można rozpocząć po 4-5 dniach dojrzewania betonu [17] i uzyskać wyniki w czasie znacznie krótszym, niż potrzebny do oznaczenia mrozoodporności metodą bezpośrednią. Dzięki temu możliwe jest wprowadzenie ewentualnej korekty składu produkowanego betonu. Zaletą jest niezależnienie rezultatów

only exception to that is high-performance concrete containing silica fume, where $\bar{L} \leq 0,250$ mm should be obtained in all specimens and, as an additional requirement, the chloride permeability value should be below 1000 Coulomb. Financial penalties are imposed for the lack of compatibility of air void characteristics with the requirements. However, there are also premiums awarded when very favourable air void spacing is obtained.

As in case of the concrete strength, more strict requirements for the air void characteristics should be demanded at the stage of mix approval and control of the composition rather than at the stage of acceptance testing of built-in concrete. Referring to the examples taken from the German and Austrian standard documents concerning concrete pavements [36], a proposal for further development of requirements from Table 4 in relation to the exposure class XF4 is given in Table 5. So far, after several years of testing of air-entered concrete manufactured in the country these criteria can be recognized as quite real ones.

Parameters of the air void distribution $\bar{L}$ and A_{300} are interlinked, although implicitly. When the limit value is modified for a reduced environment aggressiveness from XF3 to XF4, the limit value of the A_{300} should be reduced. However, $A_{300} < 1,5\%$ is usually not applied in the technical specifications, due to rather high uncertainty of measurements. Therefore, a proposed alternative development of the regulations concerning XF3 in Table 4 is given in Table 5, referring to the requirements formulated in Danish standard DS. 2426:2011, see [36].

Air void distribution testing can be performed after 4-5 days of concrete curing [17]. The results can be obtained in a much shorter time than a direct determination of degree of frost resistance. In this way it is possible to introduce possible adjustments to the composition of produced

badania charakterystyki porów od stopnia nasycenia betonu wodą. Niejednorodność nasycenia wodą próbek, zwłaszcza próbek–odwiertów z obiektów, jest źródłem niejednoznaczności oceny „stopnia mrozoodporności”. Nasycanie betonu wodą zgodnie z przepisem normowym pochodzącym sprzed 30 lat mogło zapewnić pełne nasycenie ówczesnych betonów o wytrzymałości około 25 MPa, ale – według [39] – okazuje się mało skuteczne w odniesieniu do betonów wyższych klas wytrzymałości.

concrete. The advantage of air void testing consists of independence of results from the degree of concrete saturation with water. Heterogeneity of water saturation, especially in case of core-specimens from a structure, constitutes the source of ambiguity of the degree of frost resistance evaluation. The saturation of concrete with water in accordance with 30 years old standard regulation could have ensured the full saturation of concrete of the time with the strength of about 25 MPa. However, according to [39], this method is not very effective in relation to concrete of higher strength classes.

Table 5. The proposed more detailed requirements concerning the characteristics of air voids in hardened concrete, presented in Table 4 in a context of German and Austrian technical specifications
Tablica 5. Proponowane uszczegółowienie wymagań dotyczących charakterystyki porów w betonie stwardniałym, podanych w Tabl. 4 w kontekście niemieckich i austriackich specyfikacji technicznych

Source Źródło	Air void characteristics Charakterystyka porów	Checking stage / Etap sprawdzenia	
		Mix approval & control Zatwierdzanie, kontrola	Acceptance Odbiór
Exposure class / Klasa ekspozycji XF4			
ZTV Concrete/Beton-StB 07, TL Concrete/Beton-StB 07	Maximum spacing factor Maksymalny wskaźnik rozmieszczenia [mm]	0.20	0.24
	Minimum content of micropores A_{300} Minimalna zawartość mikroporów A_{300} [%]	1.8	1.5
RVS 08.17.02	Maximum spacing factor Maksymalny wskaźnik rozmieszczenia [mm]	0.18	0.21
	Minimum content of micropores A_{300} Minimalna zawartość mikroporów A_{300} [%]	1.8	1.8
Authors' proposal Propozycja autorów	Maximum spacing factor Maksymalny wskaźnik rozmieszczenia [mm]	0.18 ¹⁾	0.20 ^{2), 3)}
	Minimum content of micropores A_{300} Minimalna zawartość mikroporów A_{300} [%]	1.8 ¹⁾	1.5 ^{2), 4)}
Exposure class / Klasa ekspozycji XF3			
Authors' proposal Propozycja autorów	Maximum spacing factor Maksymalny wskaźnik rozmieszczenia [mm]	0.20 ¹⁾	0.25 ^{2), 3)}
	Minimum air void content A Minimalna zawartość porów powietrznych A [%]	3.5 ¹⁾	3.5 ^{2), 4)}
¹⁾ the test result on two specimens from the trial batch or from the concrete mix supplied to the construction site, tested in accordance with PN-EN 480-11, i.e. at the minimum length of traverse line of 2400 mm / wynik oznaczenia na dwóch próbkach formowanych z zarobu próbnego lub z mieszanki dostarczonej na miejsce budowy, testowanych zgodnie z PN-EN 480-11, tj. przy min. długości linii trawersowej 2400 mm ²⁾ the test result on at least two core specimens with a diameter ≥ 100 mm (for a structural element or a pavement section specified in the contract), at the minimum length of traverse line of 2400 mm / wynik oznaczenia na minimum dwóch próbkach-odwiertach średnicy ≥ 100 mm (na określony w kontrakcie element konstrukcji lub odcinek nawierzchni), tj. przy min. długości linii trawersowej 2400 mm ^{3), 4)} the tolerance of $+0.03$ mm³⁾ and -0.3%⁴⁾ is assumed in accordance with the Austrian recommendations / zgodnie z zaleceniami austriackimi przyjmuje się tolerancje $+0,03$ mm³⁾ i $-0,3\%$⁴⁾			

6. UWAGI KOŃCOWE

Zasady projektowania składu betonów mrozoodpornych można podsumować w formie następujących spostrzeżeń:

6. CONCLUDING REMARKS

The design of frost resistance concrete should follow principles transpiring from the following observations:

1. Kluczowe znaczenie ma współczynnik woda-cement, charakterystyka porów w betonie i wysoka jakość kruszywa. Ograniczenia recepturowe według PN-EN 206 trzeba traktować jako warunki konieczne, ale niewystarczające do uzyskania wysokiej odporności betonu na działanie mrozu, zwłaszcza w regionach mroźnych i wilgotnych oraz obszarach intensywnego stosowania środków odładzających.
2. Selekcja kruszyw wysokiej jakości do betonów mrozoodpornych przebiegać powinna przede wszystkim na podstawie odpowiedniej mrozoodporności kruszywa w roztworze soli i w wodzie, wysokiej odporności na rozdrabnianie oraz uziarnienia zapewniającego szczelność stosu okruszowego i minimalizację wodożądności.
3. Przy wyborze domieszek do betonu, zwłaszcza domieszki napowietrzającej i redukującej zawartość wody, zasadnicze znaczenie ma sprawdzenie ich kompatybilności poprzez ocenę charakterystyki porów powietrznych w betonie stwardniałym. Właściwe napowietrzenie betonu jest ekonomicznym rozwiązaniem problemu mrozoodporności.

Obserwacje uszkodzeń betonu w estakadach drogowych, niedawno wymienianych w Warszawie, wskazują na niedocenianie agresywności oddziaływania soli odładzającej i synergii innych mechanizmów zniszczenia. Pożądane jest systematyczne rozróżnienie stref agresywności oddziaływań klimatycznych i intensywności stosowania soli odładzających w Polsce, podobnie we Francji.

Do bezpośredniej oceny mrozoodporności wewnętrznej betonu w próbkach najczęściej wykorzystuje się współczynnik sprężystości betonu oznaczany w sposób nieniszczący, na podstawie drgań rezonansowych lub czasu przejścia fali ultradźwiękowej. Charakterystyczną cechą testów mrozoodporności jest jednoznaczne określenie przebiegu cyklicznych zmian temperatury, czego brakuje w normowej procedurze wg PN-B-06250. Na podstawie przeprowadzonych pomiarów rozkładu temperatury w zamrażanych i rozmrażanych próbkach betonu podczas oznaczania „stopnia mrozoodporności” stwierdzono, że:

- minimalna i maksymalna temperatura w środku próbki jest zgodna z temperaturą w komorze termostaticznej, w obu przypadkach próbek sześciennych różnej wielkości,
- w dwóch testowanych komorach termostaticznej szybkość ochładzania betonu różniła się ponad dwukrotnie, tj. wynosiła 13,5°C/h i 6°C/h.

1. The key factors relevant to freeze-thaw durability are *w/c* ratio, air void characteristics in concrete and high quality of aggregate. Mix design limitations according to PN-EN 206 are to be considered necessary, yet not sufficient conditions for achieving high frost resistance of concrete, especially when exposed to severe frost, wet conditions and high levels of de-icing agents.
2. High quality aggregate should be used featuring appropriate frost resistance tested in NaCl solution and water, high resistance to fragmentation, continuous grading and minimal water requirement.
3. When specifying admixtures to concrete it is necessary to check their compatibility by evaluating the air void characteristics in hardened concrete and this concerns in particular air-entraining and water reducing admixtures. Appropriate air-entrainment is an economical way of improving the freeze-thaw durability of concrete.

Examination of concrete of recently replaced viaducts in Warsaw showed that the damaging effect of de-icing salt and synergy of different deterioration mechanisms has been underestimated. It is recommended to introduce climate and de-icing salt exposure zones in a systematic manner, similarly as it has been done in France.

The internal frost resistance of concrete is assessed directly most often on the basis of the elastic modulus determined with non-destructive methods based on measuring ultrasonic velocity or mechanical resonance frequency. Current methods used for determining the freeze-thaw durability of concrete clearly specify the temperature changes during freeze-thaw cycles, an element which is missing in the method defined in PN-B-06250 for use in Poland. The results of temperature distribution determinations in specimens subjected to freezing and thawing during the determination of “frost resistance degree” allow for the conclusion that:

- the minimum and the maximum temperature in the centre of specimen corresponds to the ambient temperature inside the thermostatic chamber in the case of both test cube sizes,
- the cooling rate in the first chamber (13.5°C/hr) was over two times faster than in the second one (6°C/hr).

The observed difference in the cooling rate is too large to consider the exposure conditions consistent in both thermostatic chambers. Therefore, in order to improve assessment consistency of internal frost resistance of concrete in different laboratories it would be required to amend the

Zaobserwowana różnica szybkości ochładzania jest zbyt duża, aby uznać równorzędność warunków ekspozycji mrozowej betonu w obu komorach termostatycznych. Niezbędne jest uzupełnienie procedury normowej poprzez jednoznaczne ustalenie szybkości ochładzania betonu w próbkach, aby zwiększyć zgodność oceny mrozoodporności wewnętrznej betonu w różnych laboratoriach.

Pośrednia metoda oceny mrozoodporności betonu napowietrzonego na podstawie mikroskopowej analizy porów powietrznych jest dość często stosowana w odniesieniu do betonu w nawierzchniach i konstrukcjach. Jej zaletą jest szybkość i niezależnienie od zróżnicowania wilgotności w próbkach betonu; łatwo można archiwizować obrazy mikrostruktury porów. Wykorzystanie metody wymaga znaczącego doświadczenia operatora. Niemniej prowadzenie analizy obrazu wzdłuż linii trawersowych jest raczej archaiczne; w celu zmniejszenia niepewności pomiarów warto rozwijać analizę planimetryczną.

INFORMACJE DODATKOWE

Badania przeprowadzono w ramach Projektu ASR-RID.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] Rusin Z.: *Technologia betonów mrozoodpornych*. Polski Cement, Kraków, 2002
- [2] Flaga K.: O mrozoodporności betonów mostowych, w: *Trwałość obiektów mostowych*. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław, 2012, 499-511
- [3] Glinicki A., Radomski W.: Diagnostyka mrozoodporności betonu w drogowych obiektach mostowych. *Drogownictwo*, **LXVIII**, 9, 2013, 268-276
- [4] Czarnecki L., Deja J., Jasiczak J., Flaga K., Kurdowski W., Małolepszy J., Radomski W., Śliwiński J.: Mrozoodporność betonu w konstrukcjach mostowych. *Budownictwo, Technologie, Architektura*, **69**, 1, 2015, 66-69
- [5] https://www.gddkia.gov.pl/userfiles/articles/s/specyfikacja_13123/III_obiekty_inzynierskie/Beton_konstrukcyjny_w_drogowym_obiekcie_inzynierskim.pdf, 28.01.2016
- [6] Rusin Z., Wawrzeńczyk J.: Metodyka badania mrozoodporności betonów nawierzchniowych. Konferencja Naukowo-Techniczna „Nawierzchnie z betonu cementowego na drogach obciążonych małym ruchem”, SITK, Poznań, 1986, 105-111
- [7] Gagné R., Linger L.: La durabilité des bétons en ambiance hivernale rigoureuse, w: *La durabilité des bétons. Bases scientifiques pour la formulation de bétons durables dans leur environnement*. Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 2008, 387-486
- [8] Pinto R.C.A., Hover K.C.: Freeze-thaw durability of high-strength concrete. *Research & Development Bulletin RD122*, PCA, Skokie, IL, USA, 2001
- [9] Łukowski P.: *Modyfikacja materiałowa betonu*. Stowarzyszenie Producentów Cementu - Polski Cement, Kraków, 2016
- [10] Glinicki A., Glinicki M.A., Mikulicki I.: Ocena napowietrzenia betonów w nawierzchniach jezdni i parkingów. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **3**, 1, 2004, 5-23
- [11] Giergiczny Z.: Dobór cementów do klas ekspozycji wg PN-EN 206-1. *Materiały Budowlane*, 11, 2013, 93-95
- [12] Rusin Z., Świercz P.: Wpływ szczelności matrycy cementowej na mrozoodporność. *Budownictwo-Technologie-Architektura*, **61**, 1, 2013, 60
- [13] Glinicki M.A.: Trwałość betonu w nawierzchniach drogowych: wpływ mikrostruktury, projektowanie materiałowe, diagnostyka. Seria „S” *Studia i Materiały*, zeszyt 66, IBDiM, Warszawa, 2011
- [14] Kosmatka S.H., Kerkhoff B., Panarese W.C.: Air entrained concrete, in: *Design and Control of Concrete Mixtures*, 14th edition, PCA, Skokie, IL, USA, 2003, 129-148
- [15] Fagerlund G.: Internal frost attack-state of the art, in: *Frost Resistance of Concrete*, RILEM Proceedings, E&FN Spon, London, UK, 34, 1997, 321-338
- [16] *Recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel-dégel-Guide Technique*. LCPC, Paris, 2003
- [17] *Maîtrise de la durabilité des ouvrages d'art en béton. Application de l'approche performantielle. Recommandations provisoires*, IFSTTAR, Paris, 2010
- [18] Biuletyn monitoringu klimatu Polski styczeń 2013, IMGW, Warszawa, http://www.imgw.pl/extcont/biuletyn_monitoringu, dostęp 28.01.2016

standard procedure with clearly specified specimen cooling rate.

The indirect method of frost resistance assessment of air-entrained concrete basing on the microscopic air void analysis is quite often applied in evaluation of concrete used for pavements and road structures. Its advantage is speed and independence from the moisture content variation in concrete specimens; air void images can be easily archived. Its use requires a significant experience of the operator. However, conducting the image analysis along the traverse lines is rather archaic. Therefore, in order to reduce the uncertainty of the results, it is worth to develop the planimetric analysis.

ACKNOWLEDGEMENT

The investigation was performed as a part of ASR-RID Project.

- [19] *Limanówka D.*: Zmiany klimatu – rozkład czasowo-przestrzenny sezonów w Polsce wyznaczonych na podstawie wskaźników klimatycznych. Konferencja „Utrzymanie dróg”, Kołobrzeg, 2015
- [20] Zarządzenie nr 50 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 9 września 2015 r. w sprawie standardów zimowego utrzymania dróg krajowych, dla których zarządcą jest Generalny Dyrektor Dróg Krajowych i Autostrad
- [21] *Glinicki M.A., Cieśla J., Fordoński K.*: Zagadnienia trwałości mostów betonowych w normach europejskich. Międzynarodowa Konferencja EKO-MOST, Kielce, 2006, 16-17
- [22] *Panchmatia P., Glinicki M.A., Olek J.*: Influence of mix design on the thermal properties of concrete and the performance of rigid pavements. Roads and Bridges - Drogi i Mosty, **13**, 3, 2014, 235-260
- [23] *Nokken M.R., Hooton R.D., Rogers C.A.*: Measured internal temperatures in concrete exposed to outdoor cyclic freezing. Cement, Concrete, and Aggregates, **26**, 1, 2004, 26-32
- [24] *Pigeon M., Pleau R.*: Durability of Concrete in Cold Climates. Taylor&Francis, Oxon, 1995
- [25] *Sun Z., Scherer G.W.*: Effect of air voids on salt scaling and internal freezing. Cement and Concrete Research, **40**, 2, 260-270, 2010
- [26] *Jóźwiak-Niedźwiedzka D.*: Metody badania mrozoodporności betonu. II Sympozjum Naukowo-Techniczne Trwałość betonu, Politechnika Krakowska, 2008, 161-181
- [27] *Boss P., Giergiczny Z.*: Testing the frost resistance of concrete with different cement types - experience from laboratory and practice. Architecture-Civil Engineering-Environment, **3**, 2, 2010, 41-52
- [28] *Utgenannt P., Petersson P.E.*: Frost resistance of concrete containing secondary cementitious materials - experience from three field exposure sites. Nordic Miniseminar “Freeze-thaw testing of concrete - input to revision of CEN test methods”, Vedbæk, 2010, 75-90
- [29] *Pigeon M., Prevost J., Simart J.D.*: Freeze-thaw durability versus freezing rate. ACI Journal, **82**, 5, 1985, 684-692
- [30] *Li K., Zeng Q.*: Influence of freezing rate on cryo-damage of cementitious material. Journal of Zhejiang University SCIENCE A, **10**, 1, 2009, 17-21
- [31] *Jacobsen S., Saether D.H., Sellevold E.J.*: Frost testing of high strength concrete: frost/salt scaling at different cooling rates. Materials and Structures, **30**, 1997, 33-42
- [32] *Müller Ch.*: Results of the laboratory freeze-thaw tests and their transferability to practical conditions. Nordic Miniseminar “Freeze-thaw testing of concrete - input to revision of CEN test methods”, Vedbæk, 2010, 91-107
- [33] *Setzer M.J., Heine P., Kasperek S., Palecki S., Auberg R., Feldrappe V., Siebel E.*: Test methods of frost resistance of concrete: CIF-test: Capillary suction, internal damage and freeze thaw test - Reference method and alternative methods A and B. Materials and Structures, **37**, 2004, 743-753
- [34] *Hasholt M.T.*: The interplay between inner and outer frost damage and its implication for accelerated freeze-thaw testing. Nordic Concrete Research, **50**, 2, 2014, 21-24
- [35] *Zalocha D., Kasperkiewicz J.*: Zastosowanie ilościowej analizy obrazu do oceny struktury porów w betonie napowietrzonym. Roads and Bridges - Drogi i Mosty, **1**, 2, 2002, 107-117
- [36] *Glinicki M.A.*: Methods of qualitative and quantitative assessment of concrete air entrainment. Cement Wapno Beton, **19**, 6, 2014, 359-369
- [37] *Szydło A., Mackiewicz P., Wardega R., Krawczyk B.*: Katalog typowych konstrukcji nawierzchni sztywnych. GDDKiA, Warszawa, 2014
- [38] Ontario Provincial Standard Specification: Material Specification for Concrete - Materials and Production, Metric, OPSS.PROV 1350, 2014, <http://www.raqsa.mto.gov.on.ca/techpubs/ops.nsf/OPSHomepage>, dostęp 18.12.2015
- [39] *Tracz T., Śliwiński J.*: Effect of cement paste content and w/c ratio on concrete water absorption. Cement Wapno Beton, **17**, 2, 2012, 131-137

STANDARDS / NORMY

ASTM C 666: 2008 Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing

CEN/TR 15177:2006 Testing the Freeze-Thaw Resistance of Concrete. Internal Structural Damage

NF P18-425:2008 Bétons - Essai de gel sur béton durci - Gel dans l'air - Dégel dans l'eau

PN-B-06250:1988 Beton zwykły

PN-EN 206:2014 Beton - Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność

PN-EN 480-11:2008 Domieszki do betonu, zaprawy i zaczynu - Metody badań - Część 11: Oznaczenia charakterystyki porów powietrznych w stwardniałym betonie

PN-EN 1097-2 Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw - Część 2: Metody oznaczania odporności na rozdrabnianie

PN-EN 1367-6 Badania właściwości cieplnych i odporności kruszyw na działanie czynników atmosferycznych - Część 6: Mrozoodporność w obecności soli