



KINGA DZIEDZIC¹⁾
MARIUSZ DĄBROWSKI²⁾
ANETA ANTOLIK³⁾
ADAM GLINICKI⁴⁾

CHARACTERISTICS OF CONCRETE MIX AIR-ENTRAINMENT APPLYING THE SEQUENTIAL PRESSURE METHOD

CHARAKTERYSTYKA NAPOWIETRZENIA MIESZANKI BETONOWEJ METODĄ SEKWENCYJNO-CIŚNIENIOWĄ

STRESZCZENIE. Napowietrzenie mieszanki betonowej stosuje się w celu podwyższenia mrozoodporności betonu i jego odporności na złuszczenia powierzchniowe. Przeprowadzono badania możliwości charakteryzowania jakości napowietrzenia mieszanki betonowej za pomocą pomiarów metodą sekwencyjno-ciśnieniową, oceniając zgodność jej wyników z wynikami pomiaru charakterystyki porów w betonie stwardniałym. Przedstawiono wyniki badań mieszanek zaprojektowanych i wykonanych w laboratorium, jak i mieszanek wykonanych przemysłowo na budowie drogi ekspresowej. Analizowano relację tzw. liczby SAM mieszanki betonowej w odniesieniu do zawartości mikroporów A_{300} w stwardniałym betonie oraz odporności na cykliczne działanie mrozu w obecności soli odładzających. Wykazano wyraźną korelację między parametrem charakteryzującym napowietrzenie mieszanki betonowej (liczba SAM) a zawartością mikroporów w betonie stwardniałym.

SŁOWA KLUCZOWE: beton, charakterystyka porów, metoda sekwencyjno-ciśnieniowa, mrozoodporność, napowietrzenie, zawartość mikroporów, złuszczenia powierzchniowe.

ABSTRACT. The purpose of introducing air into the concrete mix is to increase the freeze-thaw and scaling resistance of hardened concrete. The utility of the sequential pressure method (*Super Air Meter* - SAM) for assessment of the air entrainment quality was verified by comparing the results obtained with this method with the results of the air-void analysis of hardened concrete. The results of the tests carried out on mixes designed and produced at a laboratory and the mixes produced on an industrial scale during expressway construction are considered. Furthermore, the relationships between the SAM number and the micro air-void content A_{300} in hardened concrete and the freeze-thaw and de-icing salt resistance are analysed as part of this research. A clear co-relation between the SAM number, a parameter that characterises the air-entrainment of the concrete mix, and the microvoid content has been demonstrated.

KEYWORDS: air-entrainment, air-void parameters, concrete, freeze-thaw resistance, microvoid content, sequential pressure method, surface scaling.

DOI: 10.7409/rabdim.020.007

¹⁾ Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk, ul. Pawińskiego 5b, 02-106 Warszawa; kdzie@ippt.pan.pl (✉)

²⁾ Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk, ul. Pawińskiego 5b, 02-106 Warszawa; mdabrow@ippt.pan.pl

³⁾ Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk, ul. Pawińskiego 5b, 02-106 Warszawa; aantolik@ippt.pan.pl

⁴⁾ GDDKiA Oddział w Białymstoku, WT-LD, ul. Zambrowska 2, 16-001 Kleosin; aglinicki@gddkia.gov.pl

1. WPROWADZENIE

Napowietrzenie mieszanki betonowej jest typowym rozwiązaniem technologicznym, stosowanym w celu uzyskania mrozoodporności betonu i jego odporności na złuszczenia powierzchniowe. Z uwagi na warunki ekspozycji środowiskowej, wymienione właściwości betonu są niezbędnym warunkiem trwałości obiektów inżynierskich i nawierzchni dróg w Polsce [1, 2]. Środowisko betonu nawierzchniowego w kategorii ruchu KR5-KR7, określone zgodnie z PN-EN 206 [3], PN-B-06265 [4] oraz CEN/TR 16349 [5], podano w Tabl. 1. Na drogach o mniejszym znaczeniu uzasadnione może być przyjęcie klasy środowiska XF3 zamiast XF4, jeżeli nie stosuje się soli odładzających do zimowego utrzymania nawierzchni. W przypadku obiektów inżynierskich w strefie oddziaływania środków odładzających wyróżnia się klasy ekspozycji XD3 i XF2 lub XF4, zgodnie z PN-EN 1992-2 [6]. Poza strefą mgły solnej środowisko kategoryzuje się jako XF3. Minimalna zawartość powietrza w mieszance betonowej przeznaczonej do wykonania betonu odpornego na agresję środowiska XF4 lub XF3 wynosi 4% [3]. Jednakże spełnienie recepturowych ograniczeń składu betonu zgodnie z PN-EN 206 nie jest warunkiem wystarczającym uzyskania dużej mrozoodporności betonu; niezbędna jest też właściwa mikrostruktura porów powietrznych w betonie [2, 7].

Table 1. Environment of pavement concrete in the KR5-KR7 traffic category [7]
Tablica 1. Środowisko betonu nawierzchniowego w kategorii ruchu KR5-KR7 [7]

Concrete layer Warstwa betonu	Exposition class acc. to PN-EN 206, PN-B-06265 Klasa ekspozycji wg PN-EN 206, PN-B-06265	Environment category acc. to CEN/TR 16349 Kategoria środowiska wg CEN/TR 16349
Upper or single-layer pavement Górna lub nawierzchnia jednowarstwowa	XF4, XM2	E3
Bottom Dolna	XF4	E3

Zapobieganie uszkodzeniom mrozowym betonu polega na odpowiednim projektowaniu składu mieszanki betonowej, zwłaszcza właściwym doborze kruszywa mrozoodpornego, ograniczenia współczynnika woda-cement i zastosowania domieszek napowietrzających [8, 9]. Znane jest też rozwiązanie polegające na zastosowaniu cementu napowietrzającego [10]. Niezbędne jest zapewnienie równomiernego rozmieszczenia pęcherzyków powietrza mieszance betonowej i w stwardniałym betonie, najlepiej o średnicach mniejszych od 300 μm . Kontrola napowietrzenia mieszanki betonowej w wytwórni betonu i na budowie odbywa się za pomocą pomiarów zawartości powietrza metodą ciśnieniową. Jednak pomiar całkowitej objętości powietrza w mieszance betonowej nie daje informacji o wielkości i rozkładzie pustek powietrznych, a co za tym idzie o jakości napowietrzenia betonu. Metody ilościowego i jakościowego badania napowietrzenia mieszanki betonowej

1. INTRODUCTION

Introduction of air into the concrete mix is a typical technique applied to increase the freeze-thaw and scaling resistance of hardened concrete. These properties are critical to the durability of road pavements and structures in Poland due to the prevailing exposure conditions during their operation [1, 2]. The exposure classes of concrete used for construction pavements of roads of KR5-KR7 traffic service level, determined acc. to EN 206 [3], PN-B-06265 [4], and CEN/TR 16349 [5], are given in Table 1. On roads of lesser importance, XF3 class can be applied instead of class XF4, as long as de-icing salts are not used for winter maintenance there. Where de-icing agents are used, XD3 and XF2 or XF4 exposure classes should be applied in accordance with EN 1992-2 [6]. The environments beyond the salt spray zone get XF3 classification. The concrete mixes designed for XF4 or XF3 exposure classes should contain at least 4% of air [3]. Satisfying the composition limits as given in EN 206 will not, as such, ensure obtaining a high freeze-thaw resistance - this because an appropriate microstructure of air voids is indispensable for that [2, 7].

Freeze-thaw damage is mitigated by an appropriate design of the concrete mix, including selection of frost resistant aggregates, limitation of the water-cement ratio and the use of air-entraining agents, as the primary measures [8, 9]. Another option is to use air-entraining Portland cement [10]. It is critical to ensure uniform distribution of air bubbles in the concrete mix and air voids in hardened concrete, which should preferably be smaller than 300 μm in size. The efficiency of the air-entrainment process is checked at the concrete batching plant and at the construction site by measuring the air content with the pressure method. This parameter does not, however, give an indication as to the size distribution and the spacing of air-voids, i.e. the parameters which define the quality of the air-entrainment process. The qualitative and quantitative methods of examination of the air-entrainment efficiency

omówiono w [11]. Rozkład i wielkość pęcherzyków powietrza można zweryfikować na zglądach betonowych zgodnie z PN-EN 480-11 [12], ale ta metoda nie może być podstawą do bieżącej korekty receptury na budowie. Istnieje wiele czynników technologicznych, przez które można utracić część powietrza z mieszanki lub spowodować powstanie dużych pustek powietrznych, które dodatkowo obniżą wytrzymałość betonu. Do istotnych czynników wpływających na stabilność napowietrzenia mieszanki betonowej należą czas mieszania, temperatura, transport, układanie i zagęszczenie mieszanki [7]. Stąd wynika potrzeba badania charakterystyki porów powietrznych na kolejnych etapach betonowania konstrukcji.

Wypełnieniem powyższej niszy w wyznaczaniu charakterystyki porów w mieszance betonowej stała się metoda sekwencyjno-ciśnieniowa opracowana na Oklahoma State University przez Ley i Tabb [13]. Jest to zmodyfikowany pomiar metodą ciśnieniową wykorzystujący sekwencję ciśnienia. Metoda wykorzystuje aparat SAM (ang. *Super Air Meter*), dzięki któremu informację o dystrybucji porów powietrznych w mieszance uzyskuje się w ciągu około 15 minut. Podstawą do oceny dystrybucji pęcherzyków powietrza, zgodnie z koncepcją autorów wynalazku [14], jest tendencja rozpuszczania się i niszczenia pęcherzyków powietrza w mieszance na skutek zwiększania ciśnienia w układzie. Wynikiem pomiaru jest tzw. liczba *SAM* - wartość empiryczna, która – jak utrzymują autorzy wynalazku – jest skorelowana z jakością napowietrzenia mieszanki. Ley i Tabb w swoich badaniach [14] stwierdzają występowanie zależności między liczbą *SAM* a wskaźnikiem rozmieszczenia porów \bar{L} , wyznaczanym z modelu Powersa zgodnie z normą ASTM C457 [15]. Występowanie takiej zależności potwierdzono w pewnym stopniu na podstawie licznych badań mieszanek betonowych i betonu w skali laboratoryjnej i w warunkach polowych w USA [16, 17].

Celem podjętych badań była weryfikacja możliwości charakteryzowania rozkładu wielkości porów w napowietrzonej mieszance betonowej poprzez poszukiwanie korelacji wyników pomiaru napowietrzenia mieszanki metodą sekwencyjno-ciśnieniową i wyników pomiaru charakterystyki porów w betonie stwardniałym. Zakres prowadzonych prac eksperymentalnych obejmował analizę zawartości mikroporów z uwzględnieniem wpływu czynników materiałowych na pomiary napowietrzenia metodą sekwencyjno-ciśnieniową. Wyniki pomiarów liczby *SAM* w mieszance odniesiono do zawartości mikroporów A_{300} w betonie oraz jego odporności na powierzchniowe łuszczenie w obecności soli odladzających.

are discussed in [11]. The size distribution and the spacing of air-voids in hardened concrete can be identified on polished sections according to EN 480-11 [12]. This method is not, however, suitable for adjusting the mix design during the site works. There a number of production-related factors due to which some amount of air can escape from the mix or large air-voids can develop, affecting the strength of concrete. The factors relevant to the stability of the entrained air include the mixing time, temperature, conditions during transport, placement of concrete and compaction [7]. Thus, it is so important to determine the air voids system parameters at the subsequent concrete pouring stages.

This gap in the air void analysis methods has been filled by the sequential pressure method developed at the Oklahoma State University by Ley and Tabb [13]. It is a modified pressure method, in which pressure is applied sequentially. The apparatus used in this method is called Super Air Meter, which is capable of providing the air void size distribution data within ca. 15 minutes. The idea of the invention [14] is that the air-void distribution can be assessed on the basis of the degree to which the air bubbles are dissolved and destroyed as a result of the increasing pressure in the system. The result of this measurement is the so-called *SAM* number, whose correlation to air-entrainment quality of the mix is claimed by the inventors of this method. In their research, Ley and Tabb [14] confirmed the relationship between the *SAM* number and the spacing factor \bar{L} , determined with the Power's model according to ASTM C457 [15]. This relationship has been confirmed to some degree on the basis of numerous tests of the concrete mixes and hardened concrete specimens, both at laboratory facilities and in field in the U.S. [16, 17].

The objective of this research was to verify the possibility of describing the air-void size distribution in an air-entrained concrete mix by correlating the results of the sequential pressure method with the results of the air-void analysis of the hardened concrete specimens. The scope of experiments covered an analysis of the microvoids content, taking account of the effect of the material-related factors on the air-entrainment values measured with the sequential pressure method. The *SAM* number values obtained from the testing of the concrete mix were related to the microvoid content A_{300} in hardened concrete and to the de-icing salt scaling resistance.

2. BADANIA DOŚWIADCZALNE

2.1. MATERIAŁY DO BADAŃ

Przeprowadzono badania mieszanek betonowych napowietrzonych, przeznaczonych do wykonania dwuwarstwowej nawierzchni drogowej oraz drogowego obiektu inżynierskiego. Zaprojektowano i wykonano laboratoryjne mieszanki betonowe oraz pobrano próbki mieszanek przemysłowych na budowie drogi ekspresowej. Składniki omawianych mieszanek przedstawiono w Tabl. 2. Projektowana gęstość objętościowa mieszanek wynosiła od 2286 kg/m³ do 2550 kg/m³ oraz około 2460 kg/m³, odpowiednio w przypadku mieszanek wykonanych w laboratorium i na budowie drogi. Projektowana zawartość powietrza w mieszankach wynosiła odpowiednio od 0% do 15% oraz od 5% do 6,5%. Konsystencja mieszanek betonowych mierzona opadem stożka wynosiła od 30 mm do 150 mm dla mieszanek laboratoryjnych oraz do 30 mm dla mieszanek przemysłowych. Do wykonania laboratoryjnych mieszanek betonowych użyto cementu portlandzkiego CEM I 42,5R, piasku kopalnego oraz gysu amfibolitowego w dwóch frakcjach. Zastosowano domieszkę napowietrzającą na bazie syntetycznych środków powierzchniowo czynnych i domieszkę uplastyczniającą na bazie zmodyfikowanych lingnosulfonianów. W każdym wariantcie składu betonu dozowano domieszkę napowietrzającą w przedziale 0,00-0,15% masy cementu, aby zróżnicować zawartość powietrza, a w konsekwencji zmianę dystrybucji porów. Próbkę mieszanek przemysłowych pobrano na budowie drogi ekspresowej przed maszyną układającą nawierzchnię dwuwarstwową metodą ślizgową.

2. EXPERIMENTAL INVESTIGATION

2.1. TEST MATERIALS

The tests were carried out on air-entrained concrete mixes designed for construction of a two-layer road pavement and a road bridge. Both laboratory designed and prepared and field mixes were used in the tests, the latter produced in relation to the expressway construction project. The compositions of these mixes are given in Table 2 below. The bulk densities of the mixes prepared at a laboratory were in the range of 2,550 kg/m³ to 2,286 kg/m³. The bulk density of the mix prepared for the road construction project was ca. 2,460 kg/m³. The total air content in fresh concrete was specified at 0% to 15% – for laboratory mixes, and 5% to 6.5% – for field mixes. The consistency of the concrete mixes determined by the slump cone test was in the range of 30-150 mm for laboratory mixes and up to 30 mm for the field mixes. The ingredients used to produce laboratory mixes included CEM I 42.5R Portland cement, quarried sand and a blend of two fractions of crushed amphibolite. The admixtures included air-entraining agent based on synthetic surfactants and a plasticiser based on modified lignosulfonates. Air-entraining agent was added to each concrete mix composition at a varying rate of 0.00-0.15% of the weight of cement to obtain varied air contents and thus different air-void distributions. The samples of the field mixes were obtained at the expressway jobsite, taken in front of the slip-form paver. The concrete slab was made in two-lifts using slip-form paving technique.

Table 2. Components of entrained concrete mixtures
Tablica 2. Składniki napowietrzonych mieszanek betonowych

Components / Składniki	Conditions for making mixes / Warunki wykonania mieszanki	
	laboratory / laboratoryjne	field / polowe
Cement	CEM I 42.5R, content 360-430 kg/m ³ CEM I 42.5R, zawartość 360-430 kg/m ³	CEM I 42.5N, content 375-420 kg/m ³ CEM I 42.5N - NA, zawartość 375-420 kg/m ³
Water / woda	w/c = 0.4 - 0.45	w/c = 0.35 - 0.39
Fine aggregate / kruszywo drobne	pit sand, fraction 0/2 / piasek kopalny, frakcja 0/2	pit sand, fraction 0/2 / piasek kopalny, frakcja 0/2
Coarse aggregate / kruszywo grube	crushed amphibolite, fraction 2/8 or 2/8 and 8/16 grys amfibolitowy, frakcja 2/8 lub 2/8 i 8/16	crushed gabbro, fraction 2/8 or 2/8 and 8/22 grys gabro, frakcja 2/8 lub 2/8 i 8/22
Admixes / domieszki	air-entraining (0-0.15%), plastifying (0-0.6%) napowietrzająca (0-0.15%), uplastyczniająca (0-0.6%)	air-entraining; plastifying napowietrzająca; uplastyczniająca

Wybór składników mieszanek betonowych został oparty o zasady projektowania betonu napowietrzonego [18]. Podstawą wyboru kruszyw mineralnych do betonu były właściwości użytkowe, niezbędne w zastosowaniach do nawierzchni z kruszywem odkrytym i obiektów inżynierskich [19-22]

The mix components were specified in accordance with the air-entrained concrete design guidelines [18]. Aggregates were selected based on the performance properties, as specified for construction of exposed aggregate road surfaces and road structures [19-22]. The CEM I 42.5 R

Cement portlandzki CEM I 42,5 R lub N, jest najczęściej stosowanym cementem do wykonania nawierzchni dróg o kategorii ruchu KR5-KR7, zgodnie z [23] i [24], a także obiektów inżynierskich, zgodnie z [25].

2.2. METODYKA BADAŃ

Mieszanki betonowe poddano pomiarom metodą sekwencyjno-ciśnieniową wg AASHTO TP 118 [26]. Zawartość powietrza w mieszankach oznaczono normowym urządzeniem pomiarowym wykorzystującym metodę ciśnieniową wg PN-EN 12350-7 [27]. Urządzenie pomiarowe SAM przedstawiono na Rys. 1. Budowa i zasada działania aparatu SAM są wzorowane na aparacie ciśnieniowym do badania zawartości powietrza wg PN-EN 12350-7 [27]. Wprowadzone modyfikacje aparatu obejmują zastosowanie cyfrowego miernika z zaprogramowaną procedurą kierującą użytkownika przez kolejne etapy pomiaru oraz instalację dwóch dodatkowych zacisków zabezpieczających pokrywę przez rozszczelnieniem (z uwagi na zwiększone ciśnienie wewnątrz komory pomiarowej).

or N Portland cement is the most often used cement type for paving of roads of traffic service class KR5-KR7 in accordance with [23] and [24] and for construction of road structures in accordance with [25].

2.2. TEST METHODS

Concrete mixes were tested with the sequential pressure method according to AASHTO TP 118 [26]. The total air content in the mixes was determined by means of a standard testing device utilising the pressure testing method according to EN 12350-7 [27]. This testing device, called Super Air Meter (SAM) is presented in Fig. 1. The design and principle of operation of this device is based on the apparatus used for measuring the air void content according to EN 12350-7 [27]. The modifications made to the original apparatus include introduction of a digital meter with a programmed procedure guiding the user through the subsequent steps of the test procedure and two additional clamps to secure the cover more firmly (as required due to a higher pressure in the metering chamber).

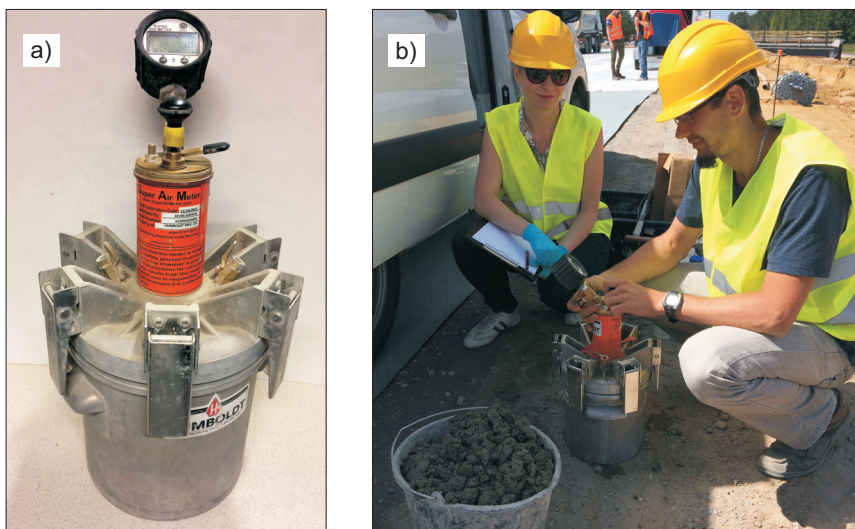


Fig. 1. View of Super Air Meter device: a) in a laboratory, b) on field of road construction
Rys. 1. Widok urządzenia Super Air Meter: a) w laboratorium, b) na placu budowy drogi

Badanie metodą sekwencyjno-ciśnieniową polega na zwiększaniu ciśnienia układu w dwóch sekwencjach złożonych z trzech kroków zadawanego ciśnienia. Po pierwszym kroku, (ciśnienie w górnej komorze 100 kPa) i wyrównaniu ciśnienia w dwóch komorach aparatu uzyskuje się zawartość powietrza, podobnie jak w metodzie ciśnieniowej. Aplikując dwa kolejne kroki (207 kPa i 310 kPa) uzyskuje się ciśnienie równowagi po pierwszej sekwencji P_{C_1} . Następnie należy rozprężyć urządzenie (zwolnić ciśnienie) i wykonać drugą sekwencję złożoną z takich samych trzech kroków ciśnienia, uzyskując drugie ciśnienie równowagi P_{C_2} . Różnica pomiędzy P_{C_2} i P_{C_1} określana jest jako liczba SAM (ang. SAM number). Według twórców metody [14] duża różnica (duża

In the sequential pressure method the test pressure is gradually increased in two sequences, each consisting of three pressure applications steps. After the first step, with the pressure in the upper chamber increased to 100 kPa and equalisation of pressure between two chambers of the testing device the amount of air is measured in the same way as in the conventional pressure method. After the next two pressure application steps (207 kPa and 310 kPa) the first equalised pressure P_{C_1} is read. Next the testing device is depressurised and the second sequence is applied, consisting of the same three pressure steps, after which the second equalised pressure P_{C_2} is read. The difference between P_{C_2} and P_{C_1} is called the SAM number. According to the

liczba SAM) świadczy o dużych odległościach pomiędzy pęcherzykami powietrza w mieszance wyrażonych wskaźnikiem rozmieszczenia \bar{L} .

Z mieszanek betonowych wykonano próbki sześciennie o bokach 100 mm i 150 mm, które po okresie normowego dojrzewania zostały wykorzystane do wyznaczenia wytrzymałości na ściskanie wg PN-EN 12390-3:2011 [28] (3 próbki sześciennie 100 mm) oraz charakterystyki porów w betonie stwardniałym wg PN-EN 480-11:2008 [12] (2 kostki sześciennie 150 mm). Pomiarów charakterystyk porów powietrznych wykonano za pomocą komputerowego systemu automatycznej analizy obrazu [29], obejmowały wyznaczenie: wskaźnika rozmieszczenia porów, zawartości mikroporów A_{300} , powierzchni właściwej porów a i całkowitej zawartości porów A [12]. Do oznaczenia odporności betonu na powierzchniowe łuszczenie według PKN-CEN/TS 12390-9:2017-07 [30] (metoda slab test) wykonano 4 próbki sześciennie o boku 150 mm. Próbki dojrzewały w warunkach normowej temperatury i wilgotności do czasu badania.

3. WYNIKI BADAŃ

3.1. ZAWARTOŚĆ POWIETRZA I WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCISKANIE

Zestawienie wyników pomiaru całkowitej zawartości powietrza w mieszankach betonowych, wykonanych w warunkach laboratoryjnych i przemysłowych, przedstawiono na Rys. 2. Pomiarów przeprowadzono dwoma sposobami – standardowym aparatem ciśnieniowym oraz aparatem SAM. Zawartość powietrza w badanych mieszankach laboratoryjnych (oznaczonych na wykresie jako „lab”) wynosiła od 1,1% do 10,1%, natomiast w mieszankach przemysłowych („field”) od 3,7% do 7,1%. Wyniki uzyskane przy użyciu dwóch urządzeń wykazały dobrą zgodność, z dopasowaniem około 0,9. Nie stwierdzono istotnego wpływu konsystencji mieszanki betonowej na powyższą korelację w zakresie opadu stożka do 30 mm (mieszanki przemysłowe) i 30-150 mm (mieszanki laboratoryjne).

W przypadku mieszanek laboratoryjnych szeroki zakres całkowitej zawartości powietrza był uzyskany celowo i przekładał się na zróżnicowanie wytrzymałości na ściskanie betonu. Wytrzymałość na ściskanie próbek sześciennych wynosiła od 48,8 MPa do 65,1 MPa. Na Rys. 3 przedstawiono korelację wytrzymałości na ściskanie betonu i zawartości powietrza w mieszance betonowej. Zależność jest wyraźnie malejąca, zbliżona do zależności liniowej. W przedziale zmienności zawartości powietrza od 2 do 6% spadek wytrzymałości betonu na ściskanie wynosił średnio około 1,6 MPa na 1% powietrza.

authors of this method [14] a high value of this difference (i.e. SAM number) indicates large distances between the air voids in the mix, as represented by the spacing factor \bar{L} .

The concrete mixes were used to produce 100 mm and 150 mm concrete cubes, which after the standard curing period were subjected to the compressive strength test according to the procedure of EN 12390-3:2011 [28] (three 100 mm cubes) and air void system analysis according to EN 480-11:2008 [12] (two 150 mm cubes). The automatic image analysis [29] was employed to determine the air void system parameters, including: spacing factor, A_{300} microvoid content, specific surface of air voids a and air content A [12]. Scaling resistance of concrete was determined on four 150 mm cubes with the slab test method acc. to PKN-CEN/TS 12390-9:2017-07 [30]. Before the test the specimens were cured at the standard temperature and humidity conditions.

3. TEST RESULTS

3.1. FRESH AIR CONTENT AND COMPRESSIVE STRENGTH

The total air contents in the laboratory and field mixes are given in Fig. 2. Measurements were carried out with two test methods using the air entrainment pressure meter and the Super Air Meter respectively. The total air content ranged 1.1-10.1% in the laboratory mixes (marked “lab”) and 3.7-7.1% in the field mixes (marked “field”) on the graph). The data obtained with these two testing devices exhibited good consistency, with the value of R^2 , representing the goodness of fit, of ca. 0.9. The consistency of the concrete mix was not found to have any significant effect on the above correlation for slump values up to 30 mm (field mixes) and 30-150 mm (laboratory mixes).

In the case of the tested laboratory mixes the wide range of the total content of air was obtained intentionally and translated to a varied compressive strength of the hardened concrete. The compressive strength measured on concrete cubes was in the range of 48.8-65.1 MPa. The correlation between the compressive strength of concrete and the total air content in the concrete mix is presented in Fig. 3 below. As it can be seen, this relationship is clearly decreasing, tending to linear. In the air content range of 2-6% the compressive strength decreased by ca. 1.6 MPa per 1% of air content.

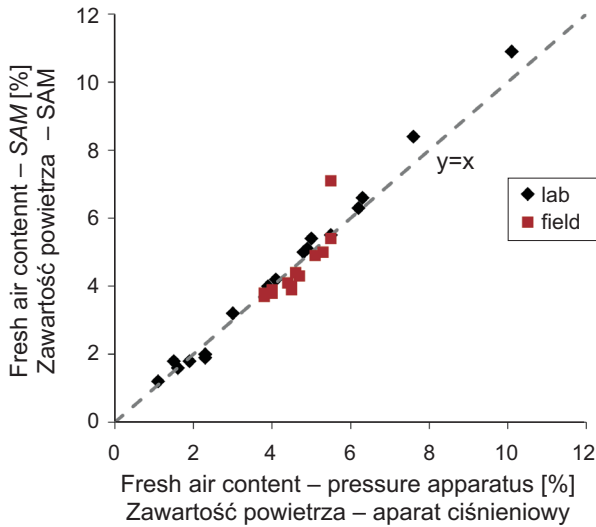


Fig. 2. Comparison of the fresh air content in concrete mixes measured by a pressure apparatus and SAM apparatus; mixes made in a laboratory (lab), and sampled during pavement construction (field)

Rys. 2. Porównanie zawartości powietrza w mieszankach betonowych mierzonej aparatem ciśnieniowym i aparatem SAM; mieszanki wykonane w laboratorium (lab) i pobrane na budowie nawierzchni (field)

3.2. CHARAKTERYSTYKA PORÓW W MIESZANCE I STWARDNIAŁYM BETONIE

Na Rys. 4 przedstawiono korelację liczby SAM mieszank betonowych i zawartości mikroporów o średnicach mniejszych niż $300\ \mu\text{m}$ w stwardniałym betonie przygotowanym w laboratorium. Liczby SAM analizowanych mieszank wynosiły od 0,09 do 0,77, natomiast zawartość mikroporów A_{300} mieściła się w granicach od 0,17% do 4,2%. Na wykresie można zaobserwować wyraźny trend: im wyższa liczba SAM , tym niższa zawartość A_{300} . Przerwane linie wyznaczają wartości graniczne SAM zgodnie z [31] i A_{300} zgodnie z [23]. Kierując się tymi kryteriami mieszanki betonowe, które uzyskały liczbę SAM niższą niż 0,4 oraz beton stwardniały o $A_{300} \geq 1,5\%$ charakteryzują się porównywalną jakością mikrostruktury porów. Ocena jakości napowietżenia w mieszance betonowej projektowanej w laboratorium była zgodna z oceną w stwardniałym betonie w 89%.

Na kolejnym wykresie (Rys. 5) zestawiono wyniki oznaczenia liczby SAM i A_{300} dla mieszank betonowych pobranych na budowie nawierzchni drogowej metodą ślizgową. Mieszanki charakteryzowały się liczbami SAM od 0,07 do 0,64. Zawartość mikroporów w próbkach betonowych uformowanych z pobranych mieszank wynosiła od 0,64 do 2,7%. Uzyskane wskaźniki w przypadku betonu przemysłowego wykazują podobny trend, jak w betonie laboratoryjnym, jednak przyjmując

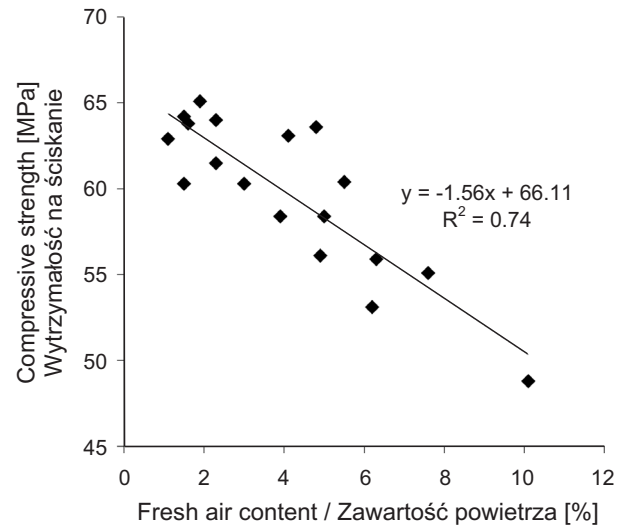


Fig. 3. Relationship between the compressive strength of concrete and the air content in concrete mixes
Rys. 3. Zależność wytrzymałości na ściskanie betonu od zawartości powietrza w mieszankach betonowych

3.2. AIR VOID CHARACTERISTICS IN CONCRETE MIX AND IN HARDENED CONCRETE

Fig. 4 presents a correlation between the SAM number of concrete mixes and the content of microvoids smaller than $300\ \mu\text{m}$ in a laboratory produced hardened concrete. The SAM number of the analysed mixes ranged from 0.09 to 0.77 and A_{300} microvoid content ranged from 0.17 to 4.2%. It can be easily seen from the graph that as the value of SAM increases the content of A_{300} decreases. The broken lines delineate the limit values of SAM acc. to [31], and A_{300} acc. to [23]. Based on these criteria, the concrete mixes with the SAM number below 0.4 have comparable quality of air-void system as hardened concrete with $A_{300} \geq 1.5\%$. In the case of the laboratory mixes, a consistency of 89% was obtained between the air-entrainment quality ratings obtained on the mix and on the hardened concrete specimens.

The next graph (Fig. 5) represents the SAM number and A_{300} test data obtained for the field mixes sampled during construction of road pavement with the slip-form paving technique. For these mixes the SAM number was in the range of 0.07-0.64. The content of microvoids determined on the concrete specimens produced from the sampled field mixtures was in the range of 0.64-2.7%. The results obtained on the field concrete specimens exhibit a similar trend as established on the laboratory concrete specimens. However, the goodness of fit between the data

takie same kryteria oceny charakterystyki napowietrzenia uzyskujemy zgodność w 62% przypadków. Przyjmując dodatkowe kryterium ze względu na minimalną całkowitą zawartość powietrza w mieszance i odrzucając mieszanki z zawartością poniżej 4%, otrzymujemy zgodność wynoszącą 75%.

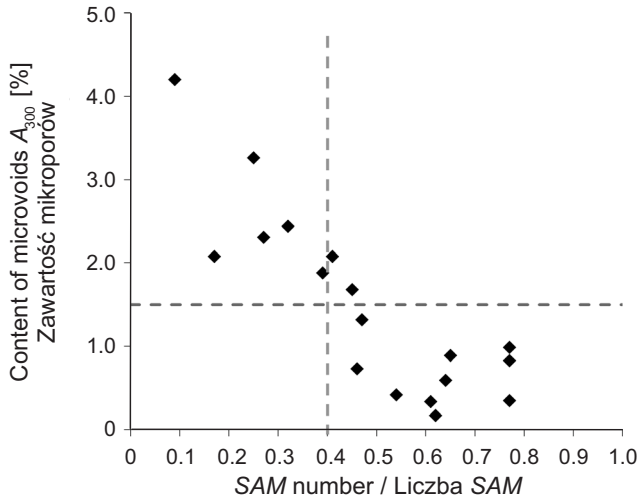


Fig. 4. Correlation between SAM number and content of microvoids A_{300} – mixes designed in a laboratory
Rys. 4. Korelacja pomiędzy liczbą SAM a zawartością mikroporów A_{300} – mieszanki zaprojektowane w laboratorium

3.3. ODPORNOŚĆ NA ZŁUSZCZENIA POWIERZCHNIOWE

Rys. 6 ilustruje zależność pomiędzy liczbą SAM i masą złuszczonego materiału z powierzchni próbek, w przypadku wybranych rodzajów betonu wykonanego w warunkach laboratoryjnych i przemysłowych po 56 cyklach zamrażania i rozmrażania w obecności soli. Wraz ze wzrostem liczby SAM następuje wzrost masy złuszczonego materiału, a co za tym idzie spadek odporności betonu na powierzchniowe łuszczenie. Masa złuszczonego materiału rośnie gwałtownie, gdy liczba SAM mieszanki przekroczy wartość 0,4. Poniżej tej wartości masa złuszczonego materiału nie przekraczała 0,3 kg/m².

Fig. 6. Correlation between SAM number in a concrete mix and mass of scaled material on concrete specimens made in a laboratory (lab), and sampled during pavement construction (field)
Rys. 6. Korelacja liczby SAM w mieszance betonowej i masy złuszczonego materiału na próbkach betonu wykonanego w laboratorium (lab) i pobranego na budowie nawierzchni (field)

sets obtained with the same air-entrainment quality evaluation criteria was 62% in this case. A 75% goodness of fit is obtained after adopting an additional criterion of the minimum total air content in the mix and leaving out the mixes with the air content below 4%.

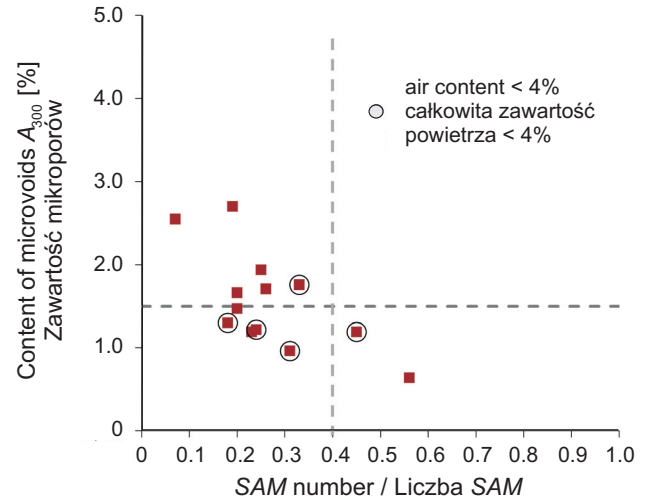
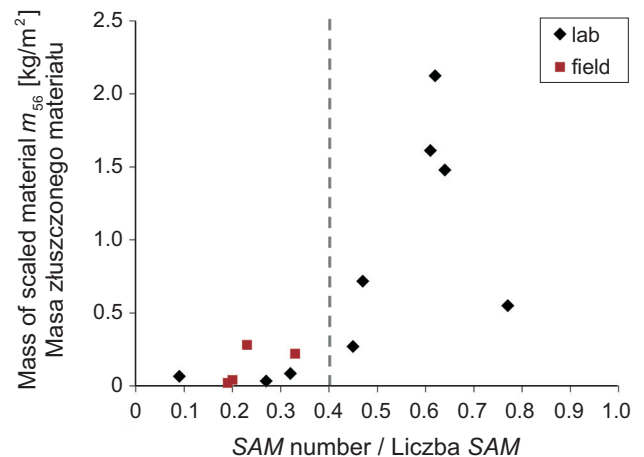


Fig. 5. Correlation between SAM number and content of microvoids A_{300} – field mixes
Rys. 5. Korelacja pomiędzy liczbą SAM a zawartością mikroporów A_{300} – mieszanki przemysłowe

3.3. SCALING RESISTANCE

Fig. 6 represents the dependency between the SAM number and the loss of mass due to scaling for the selected types of the laboratory and field concrete mixes after 56 freeze-thaw cycles with de-icing salt. With an increase of the SAM number the loss of mass due to scaling also increases, which means a decreasing freeze-thaw scaling resistance. The increase of the loss of mass becomes rapid when the value of SAM number exceeds 0.4. Below this threshold, the loss of mass did not exceed 0.3 kg/m².



4. DYSKUSJA

Zgodnie ze specyfikacjami GDDKiA [23], [25] dotyczącymi trwałości betonu, ważne jest zapewnienie odpowiedniej zawartości powietrza w mieszance betonowej. Dlatego pierwszym etapem programu badawczego było porównanie oznaczenia zawartości powietrza konwencjonalną metodą ciśnieniową i aparatem SAM. Stwierdzono, że zbieżność uzyskanych wyników jest wystarczająca, a co za tym idzie w tym przypadku aparat SAM można stosować zamiennie ze standardowym urządzeniem. Podobną zbieżność uzyskano w innych badaniach [14], [16].

Z przeprowadzonych badań wytrzymałości na ściskanie wynika, że wzrost całkowitej zawartości powietrza w mieszance o 1% powoduje spadek wytrzymałości na ściskanie o około 1,5 MPa. W technologii betonu zwykło się przyjmować, że wzrost zawartości powietrza w betonie o 1% powoduje spadek wytrzymałości o 5,5% [32], jednak przy współczesnych domieszkach napowietrzających spadek wytrzymałości jest wyraźnie niższy, na co zwrócono uwagę w [7], [24].

Zestawienie pomiarów liczby *SAM* ze wskaźnikami opisującymi mikrostrukturę porów w betonie stwardniałym pozwala ocenić przydatność metody sekwencyjno-ciśnieniowej do oceny jakości wprowadzonego powietrza do mieszanki betonowej. Ley i inni [14] w swoich badaniach stwierdzili, że sekwencyjna metoda ciśnieniowa wykonana aparatem SAM koreluje ze wskaźnikiem rozmieszczenia porów z dokładnością 85% w badaniach laboratoryjnych. W [31] zwrócono uwagę, że bardziej uzasadnione może być porównanie liczby *SAM* ze wskaźnikiem opisującym wielkość pęcherzyków powietrznych dominujących w mieszance betonowej. Wyniki i zależności przedstawione na Rys. 4 wskazują, że liczba *SAM* wykazuje dość dobrą korelację z zawartością mikroporów poniżej 300 μm (A_{300}). Zawartość mikroporów w betonie jest skorelowana z liczbą *SAM* w mieszance betonowej w sposób zbliżony do korelacji liniowej. Wskazują na to wyniki badań mieszanek betonowych wykonanych w laboratorium i mieszanek dostarczonych na budowę nawierzchni drogi ekspresowej. Zaobserwowano, że graniczna liczba *SAM* = 0.4 może stanowić kryterium zapewnienia prawidłowej zawartości mikroporów $A_{300} \geq 1,5\%$, sprawdzające się w 89% w przypadku mieszanek laboratoryjnych.

Zestawienie wyników metody sekwencyjno-ciśnieniowej z wynikami badania odporności betonu na powierzchniowe łuszczenie pozwoliło na stwierdzenie korelacji trwałości betonu i liczby *SAM*. Wyniki badań powierzchniowego łuszczenia nie pokazywały istotnych zniszczeń betonu, jeżeli liczba *SAM* mieszanki betonowej nie przekraczała 0.40. Obserwowana korelacja wskazuje, że sama metoda ma potencjał

4. DISCUSSION

Ensuring an appropriate content of air in the concrete mix is a requirement of the GDDKiA's (Polish highway agency) specifications relating to the durability of concrete [23], [25]. For this reason, the first step of this research program was to compare the air content values obtained with a conventional air entrainment pressure meter and with the Super Air Meter test device. The consistency of results was found satisfactory, which means that SAM testing device and the conventional meter can be used alternatively for this purpose. A similar consistency of the test data sets has been reported by other researchers [14], [16].

From the results of the compressive strength test it transpires that an increase of the total air content in the concrete mix by 1% reduces the compressive strength by ca. 1.5 MPa. It is generally assumed, when specifying concrete mixes, that an increase of the content of air by 1% reduces the compressive strength by 5.5% [32]. However, contemporary air-entraining agents actually cause a considerably smaller reduction, as pointed out in [7], [24].

By comparing the *SAM* numbers with the values describing the air-void system in hardened concrete we can assess the suitability of sequential pressure method for evaluating the quality of the air-entrainment process. Ley et al. [14] obtained in laboratory testing an 85% correlation between the *SAM* numbers obtained with the sequential pressure method and the spacing factor. In [31] a point is made that it would be more appropriate to compare the *SAM* number with a factor that represented a prevailing size of air voids contained in the concrete mix. The test data and relationships presented in Fig. 4 show that the *SAM* number exhibits a satisfactory correlation with the content of microvoids smaller than 300 μm (A_{300}). The relationship between the content of microvoids in concrete and the *SAM* numbers obtained on the concrete mix approximates a linear correlation. This is indicated by the results of the laboratory tests of both the laboratory and field mixes, the latter sampled during expressway construction project. It has been observed that a limit value of *SAM* = 0.4 can be used as criterion of the adequate content of micro air-voids $A_{300} \geq 1.5\%$, which was found valid for 89% of laboratory mixes.

A correlation between the durability of concrete and the value of the *SAM* number was ascertained by comparing the results obtained with the sequential pressure method and the scaling resistance test data. When the value of *SAM* number did not exceed 0.40 the results showed no

do stosowania w celu przewidywania odporności betonu na powierzchniowe łuszczenie. Jednak należy wziąć też pod uwagę korzystne efekty małego współczynnika w/c i wysokiej jakości kruszywa, odzwierciedlone przez stosunkowo wysoką wytrzymałość betonu na ściskanie, w przeważającej większości z wynikami > 55 MPa. Zgodnie z wyjaśnieniem w [33], [34], przy znacznie podwyższonej wytrzymałości betonu obserwuje się znaczne zmniejszenie masy złuszczonego materiału, ale dopiero przy w/c poniżej 0,30 napowietrzenie mieszanki betonowej ma mniejsze znaczenie.

Zaobserwowana korelacja między liczbą SAM a masą złuszczonego materiału (Rys. 6) potwierdza korzystny efekt obecności małych, równomiernie rozmieszczonych pustek powietrznych w górnej warstwie stwardniałego betonu. Próby przewidywania odporności betonu na powierzchniowe złuszczenia na podstawie charakterystyki porów znane są z publikacji [35], [36]. Jak zasugerowano w [33] obecność małych pustek powietrznych powinna zmniejszyć zjawisko bleedingu (tworzenia się warstwy cieczy na powierzchni betonu) i zredukować łączność systemu porów kapilarnych, przyczyniając się w ten sposób do zwiększenia mrozoodporności betonu. Pomimo licznych prób dokładnego wyjaśnienia tego zjawiska [37], mechanizm poprawy odporności na powierzchniowe złuszczenie nie został jeszcze wnikliwie rozpoznany. Odpowiedni wskaźnik rozmieszczenia porów jest jednym z kilku warunków niezbędnych do zapewnienia trwałości betonu w środowisku agresji określonej klasą ekspozycji XF4. Zgodnie z praktycznymi spostrzeżeniami uznaje się, że wysoką odporność betonu na powierzchniowe złuszczenie uzyskuje się, gdy spełnione są co najmniej dwa warunki: wskaźnik rozmieszczenia porów jest $< 0,2$ mm, a wytrzymałość na ściskanie jest > 40 MPa. Obok małego współczynnika w/c i odpowiedniego zaawansowania twardnienia betonu (stopnia hydratacji zawartego w nim cementu), właściwy system pustek powietrznych jest główną cechą mikrostruktury, odpowiedzialną za wysoką mrozoodporność w soli. Dlatego stwierdzona korelacja między liczbą SAM a zawartością mikroporów jest obiecującym narzędziem do lepszej kontroli mrozoodporności betonu.

Nowe, interesujące kierunki wykorzystania metody sekwencyjno-ciśnieniowej obejmują modelowanie mrozoodporności betonu przy wykorzystaniu liczby SAM jako parametru wejściowego określającego jakość betonu [38]. Ponadto podejmowane są próby prognozowania innych właściwości stwardniałego betonu na podstawie liczby SAM . W pracy [39] wykazano związek pomiędzy liczbą SAM a współczynnikiem absorpcji wody w przypadku betonów o matrycy charakteryzującej się wysoką przepuszczalnością – im wyższa liczba SAM tym wyższa absorpcja. Ponieważ trwałość betonu [40]

significant damage to concrete. The established correlation indicates that the method could be used for predicting the scaling resistance of concrete. That said, the beneficial effect of a small w/c ratio and a high quality of aggregate, reflected by a relatively high compressive strength of concrete, in most cases higher than 55 MPa, must also be taken into consideration. As explained in [33], [34], a considerable increase of the compressive strength of concrete reduces the loss of mass as much. It is worthwhile noting, though, that the effect of the air content diminishes only when the w/c ratio gets below 0.30.

The observed correlation between the SAM number and the loss of mass (Fig. 6) confirms the beneficial effect of small, uniformly spaced air voids in the superficial layer of hardened concrete. The attempts to predict the scaling resistance of concrete on the basis of the air void system analysis are known from the available publications on the subject [35], [36]. As suggested in [33], small size air-voids can mitigate the bleeding effect (development of a layer of water on top of concrete) and reduce connectivity of capillary pores, thus improving the freeze-thaw resistance of concrete. Although a number of attempts have been undertaken to explain this phenomenon [37], the way in which it improves the scaling resistance has not, as yet, been satisfactorily investigated. An appropriate value of the spacing factor is one of a few conditions determining the required durability of concrete to the environmental actions defined by the XF4 exposure class. Based on practical observations, a high scaling resistance of concrete is deemed conditional on satisfying at least the following two criteria: spacing factor in hardened concrete of less than 0.2 mm and compressive strength higher than 40 MPa. Besides a small value of w/c ratio and an adequate hardening process (degree of hydration of the cement contained in the mix) an adequate air void system is the main feature of the structure of concrete responsible for a high freeze-thaw and de-icing salt resistance. Hence, the established correlation between the SAM number and the microvoid content is a promising tool for a better control of the freeze-thaw resistance of concrete.

The prospective fields of application of the sequential pressure method include modelling of the freeze-thaw resistance of concrete by using the SAM number as the input parameter defining the quality of concrete [38]. In addition, attempts are made to use the SAM number for predicting other properties of hardened concrete. In [39] the authors confirmed a relationship between the SAM number and the water absorption rate, i.e. the higher the value of SAM , the higher the absorption rate, for the concrete

jest ściśle związana z odpornością betonu na przenikanie agresywnych mediów, ten kierunek badań ma istotne znaczenie dla optymalizacji składu betonu z uwagi na trwałość elementów betonowych konstrukcji inżynierskich.

5. WNIOSKI

Przeprowadzone badania oraz uzyskane wyniki pozwalają na sformułowanie poniższych wniosków.

1. Przeprowadzone badania charakterystyki porów w mieszance betonowej i betonie stwardniałym wykazały korelację pomiędzy liczbą SAM a zawartością mikroporów A_{300} w stwardniałym betonie. Wzrost liczby SAM skutkuje zmniejszeniem A_{300} .
2. Zaobserwowana korelacja pomiędzy liczbą SAM i A_{300} pozwoliła wskazać graniczną wartość liczby SAM równą 0.40, poniżej której zawartość mikroporów w stwardniałym betonie jest wyższa niż $A_{300} \geq 1.5\%$. Zgodność przewidywania uzyskano w przypadku 89% mieszanek betonowych wykonanych w laboratorium oraz 75% mieszanek przemysłowych (przy eliminacji mieszanek niedostatecznie napowietrzonych).
3. Stwierdzono korelację odporności betonu na powierzchniowe złuszczenie i liczby SAM . Masa złuszczonego betonu, wskutek cyklicznego zamrażania i rozmrażania, w obecności soli odladzającej była mniejsza od $0,30 \text{ kg/m}^2$, jeżeli liczba SAM nie przekraczała 0.40.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] Szydło A., Mackiewicz P., Wardęga R., Krawczyk B.: Katalog typowych konstrukcji nawierzchni sztywnych. Załącznik do zarządzenia nr 30 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 16.06.2014 r.
- [2] Glinicki A., Radomski W.: Diagnostyka mrozoodporności betonu w drogowych obiektach mostowych. *Drogownictwo*, **81**, 9, 2013, 268-276
- [3] PN-EN 206+A1:2016-12 Beton - Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność
- [4] PN-B-06265:2018-10 Beton - Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność - Krajowe uzupełnienie PN-EN 206+A1:2016-12
- [5] CEN/TR 16349:2012 Framework for a specification on the avoidance of a damaging Alkali-Silica Reaction (ASR) in concrete
- [6] PN-EN 1992-2 Eurokod 2. Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 2: Mosty z betonu. Obliczanie i reguły konstrukcyjne
- [7] Glinicki M.A.: Inżynieria betonowych nawierzchni drogowych, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2019

types with the cement matrix featuring a high water permeability. Since the durability of concrete [40] is closely related to the resistance of concrete to the penetration by aggressive external factors, this research topic is highly relevant to optimisation of the composition of concrete in terms of durability of the concrete components of various civil engineering structures.

5. CONCLUSIONS

The performed investigation and the obtained results allow to draw the following conclusions.

1. The air void system properties determined on the concrete mix and on the hardened concrete specimens indicated a correlation between the SAM number and the microvoid content A_{300} in hardened concrete. With an increase of the SAM number the value of A_{300} decreases.
2. The observed correlation between the values of SAM and A_{300} enabled determination of a threshold value of $SAM = 0.40$ below which the content of microvoids in hardened concrete becomes higher than $A_{300} \geq 1.5\%$. A satisfactory goodness of fit was found for 89% of the tested laboratory mixes and 75% of the tested field mixes (after leaving out mixes with an unsatisfactory air entrainment result).
3. There is a correlation between the scaling resistance of concrete and the SAM number. With the SAM number not higher than 0.40 the loss of mass due to alternate freezing and thawing with de-icing salt was less than 0.30 kg/m^2 .
- [8] Śliwiński J.: Podstawowe właściwości betonu i jego trwałość. *Cement-Wapno-Beton*, Vol. **14/76**, No. 5, 2009, 245-254
- [9] Boss P., Giergiczyński Z.: Testing the frost resistance of concrete with different cement types-experience from laboratory and practice. *Architecture-Civil Engineering-Environment*, Vol. **3**, 2010, 41-51
- [10] Giergiczyński Z., Baran T., Dziuk D., Ostrowski M.: The increase of concrete frost resistance by using cement with air-entraining agent. *Cement-Wapno-Beton*, Vol. **21/83**, No. 2, 2016, 96-105
- [11] Glinicki M.A.: Methods of qualitative and quantitative assessment of concrete air entrainment. *Cement-Wapno-Beton*, Vol. **19/81**, No. 6, 2014, 359-369
- [12] PN-EN 480-11:2008 Domieszki do betonu, zaprawy i zaczynu - Metody badań - Część 11: Oznaczanie charakterystyki porów powietrznych w stwardniałym betonie

- [13] *Ley T., Tabb B.*: Development of a Robust Field Technique to Quantify the Air-Void Distribution in Fresh Concrete. Report No. OTCREOS9.1-31-F, Oklahoma Transportation Center, 2013
- [14] *Ley M.T., Welchel D., Peery J., LeFlore J.*: Determining the air-void distribution in fresh concrete with the Sequential Air Method. *Construction and Building Materials*, **150**, 2017, 723-737, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.06.037
- [15] ASTM C457 Standard Test Method for Microscopical Determination of Parameters of the Air-Void System in Hardened Concrete. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016
- [16] *Tanesi J., Kim H., Beyene M., Ardani A.*: Super Air Meter for Assessing Air-Void System of Fresh Concrete. *Advances in Civil Engineering Materials*, **5**, 2016, 22-37, DOI: 10.1520/ACEM20150009
- [17] *Riding K.A., Albahtiti M.T.*: Concrete Pavement Quality Control Testing Requirements Needed for the Super Air Meter. Kansas Department of Transportation, October 2016
- [18] *Glinicki M.A., Jaskulski R., Dąbrowski M.*: Design principles and testing of internal frost resistance of concrete for road structures-critical review. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **15**, 1, 2016, 21-43, DOI: 10.7409/rabdim.016.002
- [19] *Mackiewicz P., Szydło A., Krawczyk B.*: Wpływ technologii wykonania nawierzchni betonowych na teksturę i równość. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **17**, 2, 2018, 111-126, DOI: 10.7409/rabdim.018.007
- [20] *Wasilewska M., Gardziejczyk W., Gierasimiuk P.*: Ocena właściwości przeciwpoślizgowych nawierzchni betonowych z odkrytym kruszywem w początkowym okresie ich użytkowania. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **16**, 4, 2017, 295-308, DOI: 10.7409/rabdim.017.019
- [21] *Jóźwiak-Niedźwiedzka D., Gibas K., Glinicki M.A.*: Petrographic identification of reactive minerals in domestic aggregates and their classification according to RILEM and ASTM recommendations. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **16**, 3, 2017, 223-239, DOI: 10.7409/rabdim.017.015
- [22] *Jóźwiak-Niedźwiedzka D., Antolik A., Dziedzic K., Glinicki M.A., Gibas K.*: Resistance of selected aggregates from igneous rocks to alkali-silica reaction: verification. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **18**, 1, 2019, 67-83, DOI: 10.7409/rabdim.019.005
- [23] Warunki Wykonania i Odbioru Robót Budowlanych D-05.03.04 v02, Nawierzchnia z betonu cementowego (dokument wzorcowy). Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad, Warszawa, 30 września 2019, www.gddkia.gov.pl/pl/1118/dokumenty-techniczne
- [24] *Glinicki M.A.*: Właściwości betonu nawierzchniowego z kruszywem odkrytym - wpływ rodzaju cementu i pielęgnacji. *Drogownictwo*, **74**, 4, 2019, 99-104
- [25] Warunki Wykonania i Odbioru Robót Budowlanych M-13.01.00 v03, Beton konstrukcyjny w drogowych obiektach inżynierskich (dokument wzorcowy). Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad, Warszawa, 30 września 2019, www.gddkia.gov.pl/pl/1118/dokumenty-techniczne
- [26] AASHTO TP 118-17 Standard Method of Test for Characterization of the Air-Void System of Freshly Mixed Concrete by the Sequential Pressure Method
- [27] PN-EN 12350-7:2011 Badania mieszanki betonowej - Część 7: Badanie zawartości powietrza - Metody ciśnieniowe
- [28] PN-EN 12390-3:2011 Badania betonu - Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań
- [29] *Glinicki M.A., Zieliński M.*: The influence of CFBC fly ash addition on phase composition of air-entrained concrete. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences - Technical Sciences*, **56**, 1, 2008, 45-52
- [30] PKN-CEN/TS 12390-9:2017 Badania betonu - Część 9: Oznaczanie odporności na zamrażanie i rozmrażanie w obecności soli odładzających - Złuszczenie
- [31] *Dąbrowski M., Glinicki M.A., Dziedzic K., Antolik A.*: Validation of sequential pressure method for evaluation of the content of micro-voids in air entrained concrete, *Construction and Building Materials*, **227**, 2019, 116633-1-12, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.08.014
- [32] *Neville A.M.*: Właściwości betonu. *Polski Cement*, Kraków 2000
- [33] *Valenza J.J., Scherer G.W.*: A review of salt scaling: II. Mechanisms. *Cement and Concrete Research*, **37** 2007, 1022-1034, DOI: 10.1016/j.cemconres.2007.03.003
- [34] *Fagerlund G.*: Frost Destruction of Concrete - A Study of the validity of different mechanisms. *Nordic Concrete Research*, **58**, 1, 2018, 35-54, DOI: 10.2478/ncr-2018-0003
- [35] *Reiterman P., Keppert M.*: Effect of various de-icers containing chloride ions on scaling resistance and chloride penetration depth of highway concrete. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **19**, 1, 2020, 51-64, DOI: 10.7409/rabdim.020.003
- [36] *Marks M., Jóźwiak-Niedźwiedzka D., Glinicki M.A., Olek J.*: Assessment of scaling durability of concrete with CFBC ash by automatic classification rules. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **24**, 7, 2012, 860-867
- [37] *Liu Z., Hansen W.*: Freeze-thaw durability of high strength concrete under deicer salt exposure. *Construction and Building Materials*, **102**, 2016, 478-48, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.194
- [38] *Moradillo M.K., Qiao C., Ghantous R.M., Zaw M., Hall H., Ley M.T., Weiss W.J.*: Quantifying the freeze-thaw performance of air-entrained concrete using the time to reach critical saturation modelling approach. *Cement and Concrete Composites*, **106**, 2020, 103479, DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2019.103479
- [39] *Moradillo M. K., Qiao C., Hall H., Ley M.T., Reese S.R., Weiss W.J.*: Quantifying fluid filling of the air voids in air entrained concrete using neutron radiography. *Cement and Concrete Composites*, **104**, 2019, 103407, DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2019.103407
- [40] *Jóźwiak-Niedźwiedzka D., Gibas K., Glinicki M.A., Nowowiejski G.*: Influence of high calcium fly ash on permeability of concrete in respect to aggressive media. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **10**, 3, 2011, 39-62