



WOJCIECH KUBISSA¹⁾
MARIUSZ DĄBROWSKI²⁾
BARTŁOMIEJ CHOJNACKI³⁾
MICHAŁ A. GLINICKI⁴⁾

DURABILITY OF PAVING CONCRETE PRODUCED IN A LABORATORY SETTING AND OBTAINED IN FIELD AT EXPRESSWAY CONSTRUCTION SITE

TRWAŁOŚĆ BETONU NAWIERZCHNIOWEGO WYKONANEGO W WARUNKACH LABORATORYJNYCH I W SKALI BUDOWY DROGI EKSPRESOWEJ

STRESZCZENIE. W pracy przedstawiono badania doświadczalne właściwości betonu projektowanego na dolną warstwę nawierzchni drogowej. Porównano właściwości betonu dolnej warstwy w nawierzchni dwuwarstwowej z eksponowanym kruszywem, wbudowanego na odcinku próbnym drogi ekspresowej, z właściwościami betonu wykonanego w laboratorium z użyciem cementów typu CEM II/A-V i CEM II/A-S. Zakres badań objął mieszanki betonowe zawierające kruszywo granitowe i wapienne. Przeanalizowano podstawowe właściwości techniczne betonu: wytrzymałość na ściskanie i rozciąganie przy rozłupywaniu, charakterystykę porów powietrznych, mrozoodporność, szybkość absorpcji wody i głębokość penetracji jonów chlorkowych. Próbkę laboratoryjną i próbki-odwierty z nawierzchni wykazały zbliżone właściwości mechaniczne i odporność na działanie cyklicznego zamrażania i rozmrażania. Stosowanie cementów portlandzkich z dodatkami mineralnymi nie pogorszyło mrozoodporności betonu pomimo zaobserwowanych zmian w charakterystyce porów. Stwierdzono zwiększenie do 19% wytrzymałości na ściskanie oraz zmniejszenie do 22% sorpcyjności betonu.

SŁOWA KLUCZOWE: beton napowietrzony, cement CEM I, CEM II/A-S, CEM II/A-V, charakterystyka porów, mrozoodporność, nawierzchnia drogowa, sorpcyjność, trwałość.

ABSTRACT. The article describes an experimental study of the properties of concrete designed for the construction of the bottom layer of two-layered road pavement with the exposed aggregate surface. Two types of materials were studied: industrially-produced concrete placed on a highway trial section using slip form technology and concrete produced in a laboratory setting, containing CEM II/A-V and CEM II/A-S Portland cement. The tested mixes contained granite or limestone coarse aggregate. The following basic performance properties were studied: compressive strength and split tensile strength, air void characteristics, freeze-thaw resistance, water absorption rate and chloride penetration. The mechanical properties and freeze-thaw resistance results obtained on the laboratory specimens were similar to those obtained on the cores drilled from the pavement. Despite the observed changes in the air void system parameters, mineral admixtures to Portland cements did not reduce the freeze-thaw resistance of concrete. The compressive strength was higher by up to 19% and sorptivity decreased by up to 22% in concrete containing cement with mineral admixtures.

KEYWORDS: air-entrained concrete, air void characteristics, CEM I, CEM II/A-S, CEM II/A-V, durability, freeze-thaw resistance, road pavement, sorptivity.

DOI: 10.7409/rabdim.021.023

¹⁾ Politechnika Warszawska, Wydział Budownictwa, Mechaniki i Petrochemii w Płocku, ul. Łukasiewicza 17, 09-400 Płock; Wojciech.Kubissa@pw.edu.pl (✉)

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

³⁾ Politechnika Warszawska, Wydział Budownictwa, Mechaniki i Petrochemii w Płocku; bartekchojnacki@onet.eu

⁴⁾ Instytut Badawczy Dróg i Mostów, ul. Instytutowa 1, 03-302 Warszawa; rabdim@ibdim.edu.pl

1. WSTĘP

Do budowy nawierzchni sztywnych dróg ekspresowych i autostrad najczęściej stosuje się beton z cementu portlandzkiego CEM I klasy wytrzymałości 32,5 lub 42,5. Technologia budowy nawierzchni jedno- i dwuwarstwowych metodą ślizgową z takiego betonu została dobrze sprawdzona w praktyce zagranicznej i krajowej [1]. Nawierzchnie z betonu cementowego, o ile są właściwie zaprojektowane, starannie wykonane i utrzymywane, wykazują dużą trwałość eksploatacyjną nawet w warunkach najwyższego obciążenia ruchem o najwyższej kategorii [2, 3]. Wytyczne techniczne administracji drogowej w Polsce i w innych krajach europejskich dopuszczają stosowanie cementu z grupy CEM II lub CEM III (z dodatkiem mineralnym) do wykonania betonu nawierzchniowego, zwłaszcza przeznaczonego na drogi niższej kategorii ruchu. Zgodnie z [4] w kategorii ruchu KR5-KR7, oprócz cementu CEM I, dopuszcza się stosowanie cementu portlandzkiego żuźlowego CEM II/A-S i B-S. Praktyczne doświadczenia krajowe, związane ze stosowaniem cementu CEM II/ B-S 42,5 N-NA zostały niedawno zebrane przy budowie odcinka próbnego nawierzchni betonowej jednowarstwowej z odkrytym kruszywem (na terenie Cementowni Górażdże w Choruli), ale nie zostały opisane⁵⁾. Znane są natomiast pozytywne doświadczenia austriackie, związane z wykorzystaniem cementu CEM II/..-S (tzw. Deckenzement), tj. cementu specjalnego drogowego, zawierającego w składzie około 20% granulowanego żuźla wielkopieczowego [5]. Zastosowanie cementu CEM II/A-S i CEM II/B-S w betonie na nawierzchnie autostradowe zgodnie z TL Beton-StB 07 [6] możliwe jest jedynie po uzgodnieniu z zamawiającym. Niemieckie badania porównawcze [7] betonu z CEM I 42,5 R i betonu z CEM II/A-S 42,5 R dotyczyły trwałości w warunkach oddziaływania mrozu i soli odladzającej. Stwierdzono nieznaczne różnice trwałości betonu na próbkach laboratoryjnych. Próbkę betonu z kruszywem odkrytym wykazały wystarczająco trwałe osadzenie ziaren kruszywa na powierzchni, pomimo narażenia na działanie mrozu i soli odladzającej. Przy wzrastającej zawartości żuźla w cemencie, tj. w przypadku CEM II/B-S 42,5 N i CEM III/A 42,5 N, zaobserwowano zwiększony ubytek masy próbek wskutek ekspozycji na cykliczne zamrażanie-rozmrażanie [8]. Mniejszą odporność na działanie mrozu w przypadku betonu z powyższymi cementami w porównaniu z betonem z CEM I przypisuje się wolniejszemu przyrostowi wytrzymałości i szybszemu procesowi karbonatyzacji. W [9] przedstawiono badania modelowe betonu nawierzchniowego z kruszywem odkrytym, zaprojektowanego na górną warstwę nawierzchni KR5-KR7 przy wyko-

1. INTRODUCTION

The material of choice for the construction of rigid pavements on trunk roads and motorways is concrete containing CEM I Portland cement of strength class 32.5 or 42.5. It is suitable for slip form construction technique, which has been well proven in construction of one or two-layer pavements in numerous road construction projects in different countries [1]. If adequately designed and well constructed and maintained, pavements made of Portland cement show a high durability also on roads of the highest traffic class [2, 3]. CEM II and CEM III cement containing mineral admixtures are officially approved for construction of road pavements by road administration authorities in many European countries, in particular for lower traffic service levels. As per [4], for traffic service levels KR5-KR7, besides CEM I cement also CEM II/A-S and B-S slag cement may be used for the construction of road pavements. In Poland, some hands-on experience in the application of CEM II/ B-S 42.5 N-NA cement was acquired recently during construction of a pilot section of one layer exposed aggregate concrete pavement in the Górażdże cement plant in Chorula. Unfortunately, no reports were drawn up⁵⁾. Positive feedback from the use of CEM II/..-S, i.e. cement containing about 20% of ground granulated blast furnace slag designed specifically for road construction was received from Austria, where it is referred to by the name of Deckenzement [5]. However, TL Beton-StB 07 guidelines [6] require that ground granulated blast furnace slag (GGBFS) may be used for the construction of motorway pavements only upon prior approval by the contracting authority. The freeze-thaw and de-icing salt resistance of CEM I 42.5 R and CEM II/A-S 42.5 R mixes were compared in the study carried out in Germany [7]. Slight differences in durability were noted on the laboratory specimens. After exposure to freeze-thaw cycles and de-icing salt, the embedment of aggregate grains was considered sufficient in the tested specimens of exposed aggregate concrete. The specimens prepared with cement containing more slag, i.e. CEM II/B-S 42.5 N and CEM III/A 42.5 N exhibited a greater mass loss after freeze-thaw cycles [8]. Poorer freeze-thaw resistance of these concrete mixes, as compared to CEM I concrete, is attributed to a slower rate of strength gain and a higher carbonation rate. A model-based study of exposed aggregate concrete containing CEM I 42.5 N SR3/NA and CEM III/A 42.5 N LH/HSR/NA cement, designed for the construction of the upper layer of roads of KR5-KR7 traffic service levels was

⁵⁾ Informacja ustna – prof. Zbigniew Giergiczny

⁵⁾ Private information from Prof. Zbigniew Giergiczny

rzystaniu cementu CEM I 42.5N SR3/NA oraz CEM III/A 42.5N LH/HSR/NA. Zróżnicowanie współczynnika w/c (0,34 i 0,37) oraz rodzaju cement (CEM I i CEM III/A) w betonie nie spowodowało zasadniczych zmian wytrzymałości na zginanie, na rozłupywanie i na ściskanie. Przy odpowiednim napowietrzeniu stwierdzono dużą mrozoodporność betonu, a także bardzo dobrą odporność na złuszczenia powierzchniowe, niezależnie od rodzaju cementu. Wykazano większą podatność betonu z cementem CEM III/A na błędy pielęgnacji w czasie dojrzewania.

Zważając na warunki ekspozycji środowiskowej nawierzchni drogowych w regionie Europy Centralnej, beton nawierzchniowy [4] wykonuje się jako beton napowietrzony, tj. zawierający określoną ilość pęcherzyków powietrza w mieszance oraz min. 3,5% w stwardniałym betonie. Napowietrzanie mieszanki betonowej polega na użyciu domieszki napowietrzającej, umożliwiającej stabilizację pęcherzyków powietrza i ich równomierne rozłożenie w betonie [10-12]. W porach powietrznych może rozrastać się lód po wypełnieniu porów kapilarnych, dzięki temu wzrost objętości wody wskutek zamrażania nie wywołuje dużego naprężenia rozciągającego i ryzyko uszkodzeń betonu radykalnie się zmniejsza. Beton napowietrzony we właściwy sposób, zaprojektowany i wykonany zgodnie z zasadami [13-15] może być poddany znacznej liczbie cykli zamrażania-odmrażania bez istotnej utraty swoich właściwości fizycznych i mechanicznych. Niekorzystny wpływ granulowanego żużla wielkopieczowego w składzie cementu na charakterystykę porów (wskaźnik rozmieszczenia, zawartość mikroporów) w betonie obserwowany był przede wszystkim przy wzrastającej zawartości żużla. Na mrozoodporność zasadniczo wpływa stopień nasycenia porów betonu wodą, a zatem można oczekiwać jej związku z sorpcyjnością betonu [16]. Na wartości sorpcyjności wpływa nie tylko objętość porów w betonie, ale także ich charakterystyka (udział porów o charakterze kapilar), co odróżnia tę cechę od nasiąkliwości [17]. Wpływ stosowania cementu z dodatkami na zależności między mrozoodpornością i sorpcyjnością betonu projektowanego na nawierzchnie drogowe został rozpoznany jedynie fragmentarycznie.

Celem podjętych badań doświadczalnych było rozpoznanie wpływu cementu z niewielkim udziałem pozaklinkierowych składników głównych [18], tj. CEM II/A-S i CEM II/A-V na charakterystykę porów, wytrzymałość i wskaźniki trwałości betonu. Zakres badań obejmował porównanie właściwości betonu napowietrzonego wykonanego w warunkach laboratoryjnych oraz w warunkach budowy odcinka drogi ekspresowej [19].

presented in [9]. Different w/c ratios (0.34 and 0.37) and types of cement used in the mix (CEM I and CEM III/A) had no major effect on the values of bending strength, tensile splitting strength and compressive strength of hardened concrete. With appropriate air void system the tested mixes showed high resistance to freezing and thawing and very good resistance to surface scaling for all the tested types of cement. That said, the CEM III/A mix was found to be more susceptible to errors in the process of curing.

Taking into account the climate-related exposure conditions in the area of Central Europe, air entrainment is specified for concrete mixes designed for the construction of road pavements [4] with the appropriate amount of air required in the mix and min. 3.5% air voids in hardened concrete. In the air-entrainment process, a special agent is added to the concrete mix to stabilise and evenly distribute air bubbles [10-12]. The air voids produced in this way provide space for expansion of ice after prior filling of capillary pores, in this way greatly reduces the risk of frost damage due to expansion of the volume of water during freezing and the resulting in considerable tensile stresses. When designed and produced in accordance with the relevant guidelines and requirements [13-15] air-entrained concrete may be subjected to a great number of freeze-thaw cycles and largely retain its physical and mechanical properties. An adverse effect of GGBS addition to cement on the air-void parameters (spacing factor and micro air-void content) was more pronounced for higher slag contents. Some relationship between freeze-thaw resistance and sorptivity can be expected to hold true, with the former parameter influenced by the degree of saturation of air voids with water [16]. Sorptivity, in turn, depends not only on the volume of voids but also on the parameters of the air void system, specifically on the percentage of capillary pores, which makes it different from absorption [17]. The effect of using cement with additives on the relationships between freeze-thaw resistance and sorptivity of concrete mixes designed for the construction of road pavements has been investigated fragmentarily so far.

The objective of this experimental study was to investigate the effect of cement containing small amounts of secondary cementing materials [18], i.e. CEM II/A-S and CEM II/A-V on the parameters of the air void system, strength and durability factors of concrete. As part of the study, the performance of air-entrained concrete produced in a laboratory was compared to the performance of concrete used for construction of an expressway in Poland [19].

2. BADANIA DOŚWIADCZALNE

2.1. MATERIAŁY I PRÓBKİ

Z wybudowanego odcinka próbnego nawierzchni drogi ekspresowej, zaprojektowanej jako nawierzchnia dyblowana i kotwiona, z kruszywem odkrytym, pobrane zostały odwierty o średnicy 100 mm (Rys. 1). Warstwa nawierzchniowa została wykonana jako dwuwarstwowa; warstwy wykonano z mieszanek betonowych napowietrzonych o składzie odpowiednim na dolną i górną warstwę w technologii układania ślizgowego [5]. W warstwie dolnej zaprojektowano beton klasy C35/45 zgodnie z PN-EN 206 [20]. W składzie betonu na warstwę dolną zastosowany był cement CEM I 42,5 N/NA, kruszywo grube granitowe do 22,4 mm, piasek naturalny 0/2 mm, woda, domieszka napowietrzająca i upłynniająca. Receptura betonu na dolną warstwę nawierzchni (Tabl. 1) stała się wzorcem do zaprojektowania i wykonania mieszanek betonowych w laboratorium, przy czym zasadnicza intencjonalna różnica polegała na zastosowaniu cementu CEM II/A-V i CEM II/A-S w miejsce cementu CEM I.

Do sporządzenia laboratoryjnych mieszanek betonowych użyto następujące składniki:

- cement portlandzki CEM I 42,5N-NA, powierzchnia właściwa $3197 \text{ cm}^2/\text{g}$, $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} = 0,50\%$,
- cement CEM II/A-V 42,5N-NA, o powierzchni właściwej $3648 \text{ cm}^2/\text{g}$ i zawartości $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} = 0,95\%$, zawierający w składzie popiół lotny krzemionkowy [18],
- cement CEM II/A-S 42,5N, o powierzchni właściwej $3333 \text{ cm}^2/\text{g}$ i zawartości $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} = 0,63\%$, zawierający w składzie granulowany żużel wielkopiecowy [18],
- piasek rzeczny, frakcja 0/2 mm,
- kruszywo łamane – granit, frakcje 2/8 mm i 8/16 mm,
- kruszywo łamane – wapień, frakcje 2/8 mm i 8/16 mm,
- domieszka napowietrzająca o działaniu powierzchniowo czynnym,
- domieszka uplastyczniająca na bazie zmodyfikowanych lignosulfonianów,
- domieszka upłynniająca na bazie modyfikowanych fosfonianów,
- woda zarobowa.

W celu określenia wpływu rodzaju kruszywa na właściwości betonu nawierzchniowego zaprojektowano mieszanki z dwoma typami kruszywa grubego spełniającego wymagania [4] podobnymi pod względem uziarnienia oraz właściwości mechanicznych. Inna porowatość i właściwości chemiczne wybranych kruszyw miały w założeniu spowodować

2. EXPERIMENTAL TESTS

2.1. MATERIALS AND SPECIMENS

The field samples were 100 mm cores (Fig. 1) cut from a completed section of an expressway located in Poland, with exposed aggregate jointed plan concrete pavement (JPCP). A two-layer system was designed for the project, each layer was made of a specifically designed air-entrained mix and placed by a slip-form machine [5]. The bottom layer was made of C35/45 mix as per EN 206 [20]. The concrete for the bottom layer was made of CEM I 42.5 N/NA cement, minus 22.4 mm granite aggregate, 0/2 mm natural sand, water, air-entraining agent and super plasticiser. The design of the concrete mix for the bottom layer of pavement (Table 1) was used as the basis to design and produce laboratory mixes, except that CEM I cement was replaced by CEM II/A-V and CEM II/A-S cement.

Table 1. Design of concrete mix for the bottom layer of the pavement under analysis [kg/m^3]

Tablica 1. Skład betonu w dolnej warstwie nawierzchni betonowej [kg/m^3]

Ingredient Składnik	Content [kg/m^3] Zawartość
CEM I 42.5 N-NA cement	360
0/2 Sand / Piasek	545
2/8 Granite aggregate / Granit	359
8/16 Granite aggregate / Granit	489
16/22.4 Granite aggregate / Granit	463
Water / Woda	140
Air-entraining agent / Domieszka napowietrzająca	1.08
Plasticiser / domieszka uplastyczniająca	2.88

The laboratory mixes were prepared from:

- CEM I 42.5 N-NA Portland cement, specific surface $3.197 \text{ cm}^2/\text{g}$, $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} = 0.50\%$,
- CEM II/A-V 42.5 N-NA cement, specific surface $3.648 \text{ cm}^2/\text{g}$, $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} = 0.95\%$, containing siliceous fly ash [18],
- CEM II/A 42.5 N-NA cement, specific surface $3.333 \text{ cm}^2/\text{g}$, $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} = 0.63\%$, containing ground granulated blast furnace slag (GGBS) [18],
- 0/2 mm alluvial sand,
- 2/8 mm and 8/16 mm crushed granite,
- 2/8 mm and 8/16 mm crushed limestone,
- surface-active air entraining agent,
- modified lignosulfonate based plasticiser,

wać zróżnicowanie strefy kontaktowej, która ma zasadniczy wpływ na właściwości betonu.

- modified phosphonate-based superplasticiser,
- water.

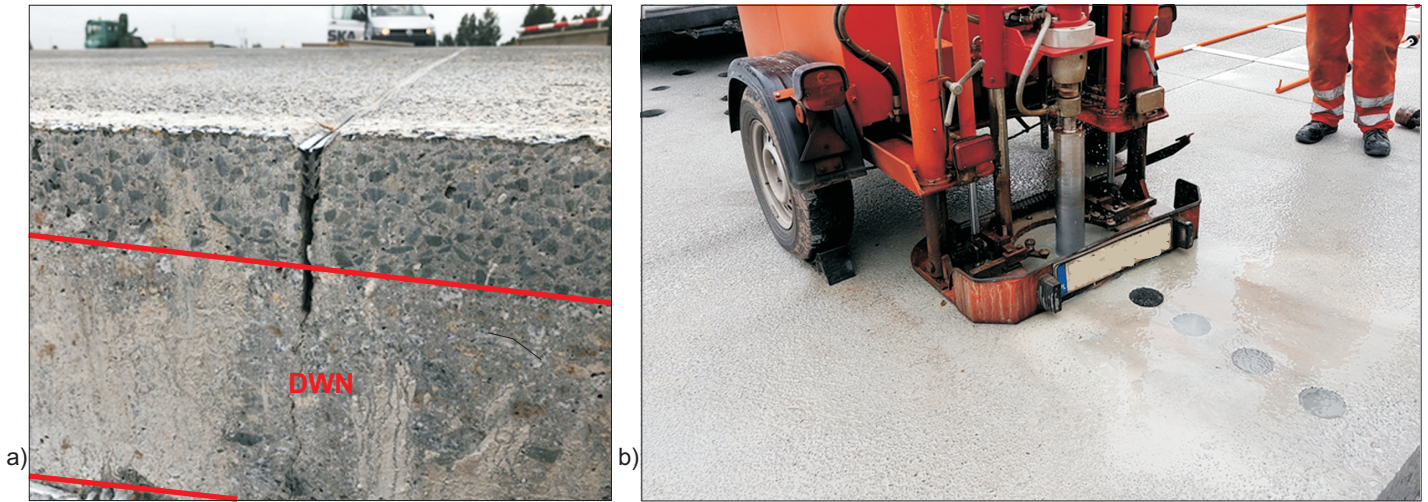


Fig. 1. Cross-section through a two-layer pavement system with the bottom layer (DWN) framed in red (a) and the process of cutting of the cores from the trial section of expressway (b)

Rys. 1. Przekrój nawierzchni dwuwarstwowej – wyszczególniona dolna warstwa DWN (a) oraz widok pobierania próbek-odwiertów z odcinka próbnego nawierzchni drogi ekspresowej (b)

Uziarnienie użytego kruszywa i mieszanek kruszywa przedstawiono na Rys. 2. Z powyższych składników zaprojektowano dwie serie mieszanek betonowych o intencjonalnie różnym wskaźniku wodno-cementowym $w/c = 0,40$ i $w/c = 0,37$; skład mieszanek przedstawiono odpowiednio w Tabl. 2 i 3. Zawartość domieszek ustalono doświadczalnie kierując się kryterium konsystencji S1 oraz zawartości powietrza w mieszance w zakresie od 4,5% do 6%.

In order to determine the effect of aggregate type on the properties of pavement concrete, mixtures with two types of coarse aggregate were designed to meet the requirements [4] similar in terms of grain size distribution and mechanical properties. The different porosity and chemical properties of the selected aggregates were supposed to cause the differentiation of the contact zone, which has a major impact on the properties of concrete.

Grain size distributions of aggregate and aggregate mixes are presented in Fig. 2. Two series of concrete mixes were prepared with the above ingredients with intentionally different water/ cement ratios, i.e. $w/c = 0.40$ and $w/c = 0.37$, the compositions of which are given in Table 2 and Table 3. The amounts of admixtures were determined experimentally, taking S1 consistency and 4.5% to 6% air content as the guiding criterion.

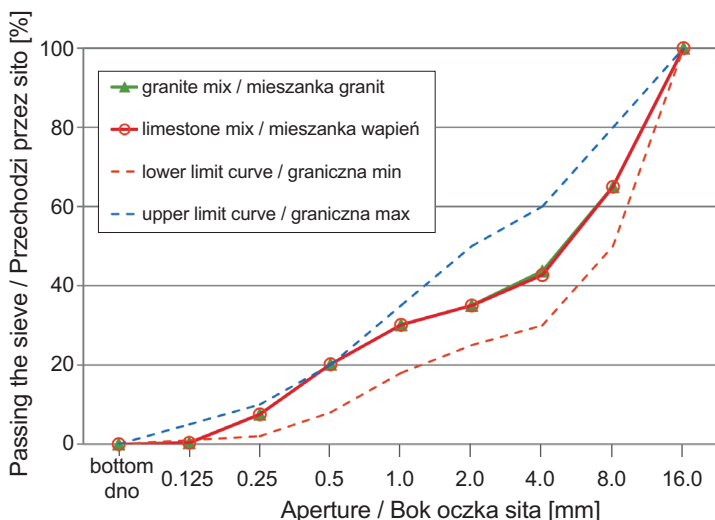


Fig. 2. Grading curves of fine and coarse aggregate
Rys. 2. Krzywe uziarnienia mieszanek kruszywa drobnego i grubego

Table 2. Composition of $w/c = 0.4$ concrete mixes [kg/m^3]
 Tablica 2. Skład mieszanek betonowych [kg/m^3] przy $w/c = 0,4$

Ingredient Składnik	Mix designation / Oznaczenie mieszanki betonowej					
	C1	C2	C3	C4	C5	C6
CEM I 42.5 N-NA	360	360	–	–	–	–
CEM II A-V 42.5 N-NA	–	–	–	–	360	360
CEM II A-S 42.5 N	–	–	360	360	–	–
0/2 Sand / Piasek	638	638	636	634	633	633
2/8 Granite aggregate / Granit	547	–	545	–	543	–
8/16 Granite aggregate / Granit	638	–	636	–	633	–
2/8 Limestone aggregate / Wapień	–	561	–	559	–	557
8/16 Limestone aggregate / Wapień	–	655	–	653	–	650
Water / Woda	144	144	144	144	144	144
Air-entraining agent / Domieszka napowietrzająca	0.36	0.36	0.47	0.50	1.44	1.44
Plasticiser / Domieszka uplastyczniająca	1.62	1.62	1.98	2.16	2.34	2,52

Table 3. Composition of $w/c = 0.37$ concrete mixes [kg/m^3]
 Tablica 3. Skład mieszanek betonowych [kg/m^3] przy $w/c = 0,37$

Ingredient Składnik	Mix designation / Oznaczenie mieszanki betonowej					
	C11	C12	C13	C14	C15	C16
CEM I 42.5 N-NA	360	360	–	–	–	–
CEM II A-V 42.5 N-NA	–	–	–	–	360	360
CEM II A-S 42.5 N	–	–	360	360	–	–
0/2 Sand / Piasek	647	647	644	644	641	641
2/8 Granite aggregate / Granit	555	–	552	–	549	–
8/16 Granite aggregate / Granit	647	–	644	–	641	–
2/8 Limestone aggregate / Wapień	–	569	–	567	–	564
8/16 Limestone aggregate / Wapień	–	664	–	661	–	658
Water / Woda	133	133	133	133	133	133
Air-entraining agent / Domieszka napowietrzająca	0.40	0.43	0.50	0.54	1.44	1.44
Plasticiser / Domieszka uplastyczniająca	2.88	3.60	3.60	3.60	3.60	3.60
Super plasticiser / Domieszka upłynniająca	0	0	0.54	0.72	1.08	1.26

W mieszarce laboratoryjnej o pojemności 100 dm^3 wykonano mieszanki betonowe, z których uformowano po trzydzieści próbek sześciennych o krawędzi 100 mm . Właściwości mieszanki wyznaczono metodami normowymi – zawartość powietrza oznaczono metodą ciśnieniową według PN-EN 12350-7 [21], konsystencję oznaczono metodą opadu stożka według PN-EN 12350-2 [22]. Próbki zagęszczano na stole wibracyjnym w dwóch warstwach; po rozformowaniu dojrzewały w wodzie przez 28 lub 90 dni do czasu badania. Wyjątkiem były próbki przeznaczone do oznaczenia wnikań chlorków, które po 28 dniach dojrzewania w wodzie przechowywano przez 20 dni w warunkach powietrzno-suchych, w temperaturze $20 \pm 2^\circ\text{C}$ i wilgotności powietrza $55 \pm 5\%$.

The laboratory mixes were prepared in a 100 dm^3 laboratory concrete mixer and, after mixing, thirty 100 mm concrete cubes were moulded from each mix. The properties of the test mixes were tested using methods prescribed by the relevant European standards, i.e. air content with the pressure method as per EN 12350-7 [21] and consistency with the slump test as per EN 12350-2 [22]. The specimens were compacted on a vibrating table and, after demoulding, were cured in water for 28 or 90 days and taken out from the water just before the test. An exception to this were the specimens used for testing chloride ion penetration, whose curing process consisted of 28 days of water curing followed by 20 days of air dry curing at $20 \pm 2^\circ\text{C}$ and $55 \pm 5\% \text{ RH}$.

2.2. METODY BADAŃ

Na próbkach stwardniałego betonu przeprowadzono badania następujących właściwości:

- wytrzymałość na ściskanie po 28 i 90 dniach zgodnie z PN-EN 12390-3 [23],
- wytrzymałość na rozciąganie przez rozłupywanie po 28 dniach zgodnie z PN-EN 12390-6 [24],
- mrozoodporność metodą bezpośrednią zgodnie z PN-B-06265 [25] przy 150 cyklach zamrażania/rozmarzania,
- charakterystyka porów powietrznych zgodnie z PN-EN 480-11 [26] - oznaczenie za pomocą skanera Rapid Air 457 [27],
- sorpcyjność zgodnie z metodyką [17],
- głębokość wnikania chlorków w atmosferze mgły solnej, wytworzonej w komorze Ascott Standard S1000iP, zgodnie z ASTM B117 [28].

Próby wytrzymałościowe wykonano przy użyciu prasy Toni Technik o nośności 3000 kN. Przyrost siły został ustalony na poziomie 0,05 MPa/s w próbie wytrzymałości na rozciąganie i 0,5 MPa/s w próbie wytrzymałości na ściskanie. Wytrzymałość betonu w odwiertach z nawierzchni wyznaczono po poprzednim wycięciu próbek o wysokości 100 mm i przygotowaniu powierzchni przez oszlifowanie zgodnie z normą.

Badanie odporności betonu na działanie mrozu na próbkach formowanych rozpoczęto po 28 dniach dojrzewania próbek w wodzie. Wiek betonu w próbkach z odwiertów wynosił około 120 dni. Próbki z odwiertów przeznaczone do zamrażania zostały przed badaniem nasycone wodą przez 30 dni. Próbki porównawcze pozostawały w wodzie przez cały czas trwania cyklicznego zamrażania/rozmarzania.

Badanie sorpcyjności przeprowadzono na połówkach próbek sześciennych o krawędzi 100 mm metodą masową. Przed badaniem sorpcyjności próbki wysuszono w suszarce laboratoryjnej do stałej masy w temperaturze 105°C. Badania przeprowadzono w temperaturze 20 ± 2°C. Próbki zważono, a następnie umieszczono poziomo powierzchnią rozłupaną do góry w naczyniu z wodą w taki sposób, żeby były zanurzone na głębokość 3-5 mm powyżej dolnej płaszczyzny próbki. W określonych przedziałach czasu (po 15, 30 minutach, 1 godzinie i potem co godzinę do 6 godzin trwania badania) od rozpoczęcia badania próbki ponownie ważono w celu określenia przyrostu ich masy wynikającego z podciągania kapilarnego wody. W przypadku odwiertów z nawierzchni, sorpcyjność oznaczono na próbkach walcowych o wysokości około 50 mm, wyciętych z odwiertu dolnej warstwy betonu z górnej i dolnej części odwiertu. Sorpcyjność S w $g/(cm^2 \cdot h^{0.5})$ zdefiniowano jako nachylenie funkcji liniowej wyrażającej

2.2. TEST METHODS

Hardened concrete specimens were tested for:

- compressive strength after 28 and 90 days of curing, as per EN 12390-3 [23],
- tensile splitting strength after 28 days of curing, as per EN 12390-6 [24],
- freeze/ thaw resistance with the direct method, as per PN-B-06265 [25], after 150 cycles,
- air void characteristics as per EN 480-11 [26] with Rapid Air 457 scanner [27],
- sorptivity as per [17],
- chloride ion penetration in salt spray environment as per ASTM B117 [28] using Ascott Standard S1000iP salt spray test chamber.

Strength tests were performed using 3000 kN Toni Technik press machine. The load increase rate was set at 0.05 MPa/s for the tensile test and at 0.5 MPa/s for the compression test. Parameters of field concrete mixes were determined on 100 mm high cores cut from the pavement and prepared for testing by grinding in accordance with the standard test method.

Specimens moulded in the laboratory were tested for freeze- -thaw resistance after 28 days of curing in water. The concrete in the cores was ca. 120 days old. Before freezing the core specimens were saturated in water for a period of 30 days. The controls remained submerged in water during the freeze-thaw test.

Sorptivity was determined on halves of 100 mm cubes, based on the weight measurement. Before the test, the specimens were dried in a drying oven at 105°C to constant weight. The test temperature was 20 ± 2°C. The specimens were weighed and then placed horizontally in a tray with water with the split surface up so that water level was 3-5 mm above the lower surface of the specimen. After predefined times, i.e. after 15, 30, 60 minutes and then every 60 minutes for the six hours of the test duration, the specimens were weighted to determine the increase of weight due to capillary water absorption. In the case of field concrete the specimens for the sorptivity test were ca. 50 mm high cylinders cut from the top and bottom of cores cut from the bottom layer of the concrete pavement. Sorptivity S , expressed in $g/(cm^2 \cdot h^{0.5})$, was defined as the slope of the linear function representing the relationship between the increase of weight Δm of absorbed water divided by the surface area F and root of time $t^{0.5}$ [16, 17]:

$$\Delta m / F = S \cdot t^{0.5}. \quad (1)$$

zależność przyrostu masy Δm wody absorbowanej przez powierzchnię F od pierwiastka z czasu $t^{0,5}$ [16, 17]:

$$\Delta m / F = S \cdot t^{0,5}. \quad (1)$$

Badanie głębokości wnikania chlorków przeprowadzone w komorze mgły solnej obejmowało 60 cykli; jeden cykl składał się z dwugodzinnego działania rozpylonego 10% roztworu NaCl w temperaturze 30°C i czterogodzinnego osuszania próbek w temperaturze 35°C. Po zakończeniu ekspozycji na mgłę solną próbki zostały przecięte i spryskane azotanem srebra, co pozwoliło na określenie głębokości wniknięcia chlorków. Do badań wykorzystano po 3 próbki z każdej serii wykonując po 6 pomiarów na każdej z dwóch połówek uzyskanych po przecięciu próbki na pół.

3. WYNIKI BADAŃ

3.1. WŁAŚCIWOŚCI MIESZANEK WYKONANYCH W LABORATORIUM

Jak pokazano w Tabl.4, konsystencja wszystkich mieszanek była jednakowa (opad stożka w granicach 10-30 mm), utrzymano również projektowaną jednakową zawartość powietrza w mieszankach. Uzyskanie tych właściwości wymagało odpowiedniego dozowania domieszek.

W mieszankach z $w/c=0,4$ zastosowanie cementu CEM II wymagało zwiększenia ilości domieszki uplastyczniającej w porównaniu z cementem CEM I: o około 25% i 45% odpowiednio w przypadku CEM II/A-S i CEM II/A-V. Kruszywo wapienne wymagało zwiększenia ilości plastyfikatora o około 10% w porównaniu z ilością użytą w mieszance o podobnej recepturze z kruszywem granitowym. W seriach z $w/c = 0,37$ zastosowano domieszkę uplastyczniającą w ilości 1,0% masy cementu oraz dodatkowo domieszkę upłynniającą w seriach z cementem CEM II w ilości od 0,15% masy cementu w serii z CEM II/A-S i kruszywem granitowym do 0,35% masy cementu w serii z CEM II/A-V z kruszywem wapiennym.

The chloride ion penetration test included 60 cycles, each cycle consisting of two-hour exposure to the salt spray of 10% NaCl solution at 30°C and four-hour drying of specimens at 35°C. After exposure to salt spray, the specimens were split and sprayed with silver nitrate to measure the depth of chloride ion penetration. Three specimens from each series were tested, taking six measurements on each half of the specimen.

3. TEST RESULTS

3.1. PROPERTIES OF LABORATORY MIXES

As it can be seen in Table 4, with a 10-30 mm slump range all the lab mixes had the same consistency. Also, the amount of air was at the specified level for all the tested mixes. This was achieved by appropriate proportioning of the admixtures.

In the case of mixes with $w/c = 0.4$ the amount of plasticiser added to the mixes was increased by ca. 25% in the case of CEM II/A-S and by ca. 45% in the case of CEM II/A-V to obtain the same parameters as for the CEM II mix. In the case of limestone aggregate, ca. 10% more plasticiser was needed to obtain the same values as in the case of granite aggregate used in the mix of similar design. In the test series with $w/c = 0.37$ plasticiser was dosed at a rate of 1.0% of the weight of cement, supplemented with superplasticiser in the CEM II test series, dosed a rate of 0.15% of the weight of cement in the case of CEM II/A-S cement and granite aggregate and 0.35% in the case of CEM II/A-V cement and limestone aggregate.

Table 4. Properties of the tested mixes
Tablica 4. Właściwości mieszanki betonowej

Mix properties / Właściwości mieszanek Test series / Seria $w/c = 0.40$	CEM I		CEM II/A-V		CEM II/A-S	
	C1	C2	C3	C4	C5	C6
Consistency – Slump method [mm] Konsystencja – Opad stożka	30	30	20	30	20	20
Temperature / Temperatura [°C]	19.4	20.3	20.7	20.9	24.2	24.5
Air content / Zawartość powietrza [%]	5.5	5.5	5.0	4.5	4.5	4.5
Mix properties / Właściwości mieszanek Test series / Seria $w/c = 0.37$	CEM I		CEM II/A-V		CEM II/A-S	
	C11	C12	C13	C14	C15	C16
Consistency – Slump method [mm] Konsystencja – Opad stożka	10	10	20	10	10	20
Temperature / Temperatura [°C]	25.2	25.2	23.2	23.3	22.9	23.9
Air content / Zawartość powietrza [%]	6.0	5.0	5.5	4.5	6.5	6.0

Odpowiednie napowietrzenie mieszanek z CEM II/A-S i CEM II/A-V wymagało zwiększenia ilości domieszki napowietrzającej, odpowiednio o około 30% i 300%, w porównaniu do ilości domieszki stosowanej w mieszankach z cementem CEM I. Zróznicowanie dozowania domieszki napowietrzającej związane ze zróznicowaniem rodzaju kruszywa grubego było nieznaczne, do 10%.

3.2. CHARAKTERYSTYKA PORÓW POWIETRZNYCH W BETONIE WYKONANYM W LABORATORIUM

Chociaż zawartość powietrza w mieszance betonowej mieściła się w założonych granicach od 4,5% do 6,5%, stwierdzono znacznie większe zróznicowanie zawartości powietrza w betonie stwardniałym – w granicach od 2,52% do 9,37% (Tabl. 5). W serii $w/c = 0,37$ zaobserwowano systematycznie mniejszą zawartość powietrza w betonie stwardniałym, o $0,8 \pm 0,6\%$, w porównaniu z zawartością powietrza w mieszance. W przypadku betonu z cementem CEM II/A-V i CEM II/A-S różnice te mieściły się w granicach od 0,3 do 2,0%. W serii $w/c = 0,40$ w większości obserwowano większą zawartość powietrza w betonie stwardniałym niż w mieszance – różnice te mieściły się w granicach od 0,2-0,5% i 0,8-1,0% odpowiednio w przypadku betonu z cementem CEM II/A-V i CEM II/A-S. Wyjątkowo dużą zawartość powietrza, większą o 3,9% niż w mieszance, stwierdzono w stwardniałym betonie C1, czego nie udało się wytłumaczyć.

In order to ensure appropriate air void structure, in CEM II/A-S and CEM II/A-V mixes the percentage of the air-entraining agent was increased by ca. 30% and 300%, as compared to the CEM I mixes. Variation in the amount of air-entraining agent to account for different types of aggregate were slight, i.e. did not exceed 10%.

3.2. AIR VOID CHARACTERISTICS IN LABORATORY SPECIMENS

With the air content in fresh concrete falling within the predefined range of 4.5-6.5% a much greater variation of this parameter was noted in hardened concrete, i.e. between 2.52% and 9.37% (Table 5). A systematic decrease of the content of the air in hardened concrete by $0.8 \pm 0.6\%$ was observed in the $w/c = 0.37$ test series. In the case of CEM II/A-V and CEM II/A-S mixes these differences were 0.3-2.0%. In the $w/c = 0.40$ test series, the amount of air was greater in hardened concrete, as compared to the mix. The differences were 0.2-0.5% in the case of CEM II/A-V and 0.8-1.0% in the case of CEM II/A-S. An extraordinarily high air content in hardened concrete, by 3.9% higher than in the mix, was observed in C1 concrete and no explanation has been found for that.

Table 5. Air void characteristics in concrete as per EN 480-11

Tablica 5. Charakterystyka porów powietrznych w betonie wyznaczona zgodnie z PN-EN 480-11

Air void parameters / Parametry rozmieszczenia porów $w/c = 0.40$ Series / Seria	CEM I		CEM II/A-V		CEM II/A-S	
	C1	C2	C3	C4	C5	C6
Air content / Zawartość powietrza [%]	9.37	5.29	5.21	5.04	5.51	3.68
Specific surface / Powierzchnia właściwa [mm^{-1}]	29.94	26.50	23.81	21.03	21.18	21.97
Spacing factor / Wskaźnik rozmieszczenia [mm]	0.09	0.17	0.19	0.22	0.21	0.25
Micro void content / Zawartość mikroporów [%]	4.33	2.23	1.90	1.78	1.86	1.43
Air void parameters / Parametry rozmieszczenia porów $w/c = 0.37$ Series / Seria	CEM I		CEM II/A-V		CEM II/A-S	
	C11	C12	C13	C14	C15	C16
Air content / Zawartość powietrza [%]	5.06	4.33	5.15	2.52	6.05	5.72
Specific surface / Powierzchnia właściwa [mm^{-1}]	21.44	21.00	18.76	13.75	28.69	26.33
Spacing factor / Wskaźnik rozmieszczenia [mm]	0.22	0.24	0.25	0.47	0.15	0.17
Micro void content / Zawartość mikroporów [%]	1.61	1.54	1.52	0.52	2.95	2.87

Powierzchnia właściwa systemu porów mieściła się w granicach 21-30 mm^{-1} w serii $w/c = 0,40$, natomiast w serii $w/c = 0,37$ zróznicowanie powierzchni właściwej było większe, od 14 do 29 mm^{-1} . Wskaźnik rozmieszczenia porów w betonie wynosił od 0,15 do 0,25 mm, z wyjątkiem przypadków C1 i C4, w których stwierdzono wyjątkowo mały i wyjątkowo duży wskaźnik rozmieszczenia, odpowiednio

The specific surface of air voids was 21-30 mm^{-1} in the $w/c = 0.40$ series and 14-29 mm^{-1} , i.e. more varied in the $w/c = 0.37$ series. The spacing factor was generally 0.15-0.25 mm except for C1 and C4 where exceptionally low and high values were noted of 0.09 mm and 0.47 mm respectively. Leaving out the extraordinary cases of C1 and C4, the micro air-void content was in the range

0,09 mm i 0,47 mm. Pomijając wyjątkowe przypadki C1 i C4, zawartość mikroporów w betonie mieściła się w granicach 1,43% do 2,95%. Wpływ rodzaju cementu na wskaźnik rozmieszczenia porów i zawartość mikroporów w betonie omówiony będzie w rozdziale 4.

3.3. WYTRZYMAŁOŚĆ I TRWAŁOŚĆ BETONU

Wytrzymałość na ściskanie betonu wbudowanego w odcinek próbną nawierzchni została wyznaczona na próbkach kontrolnych o boku 150 mm po 28 dniach dojrzewania normowego wynosiła $52,0 \pm 1,9$ MPa. Wyniki badań trwałościowych betonu nawierzchniowego w odwiertach były następujące:

- 1) Mrozoodporność:
 - wytrzymałość na ściskanie (dla próbek „świadków”): $64,9 \pm 2,4$ MPa,
 - wytrzymałość na ściskanie po 150 cyklach zamrażania/rozmarzania: $62,6 \pm 5,3$ MPa,
 - ubytek wytrzymałości na ściskanie: 3,6%,
- 2) Penetracja chlorków w komorze mgły solnej – 60 cykli: $5,3 \pm 2,6$ mm,
- 3) Sorpcyjność [$\text{cm/h}^{0.5}$]: $0,096 \pm 0,006$ górna część odwiertu; $0,067 \pm 0,012$ dolna część odwiertu.

Wytrzymałość betonu w próbkach laboratoryjnych w wieku 28 dni przedstawiono w Tabl. 6, natomiast w Tabl. 7 podano wyznaczone wskaźniki trwałości. Wytrzymałość na ściskanie mieściła się w granicach od 49 do 60 MPa, wytrzymałość na rozłupywanie – w granicach od 3,0 do 4,4 MPa. Na tej podstawie można wnioskować o spełnieniu kryterium klasy wytrzymałości C35/45, z wyjątkiem betonu C1. Względny wzrost wytrzymałości na ściskanie w okresie od 28 do 90 dni dojrzewania wynosił od 8% do 13 % w przypadku betonu z cementu CEM I i CEM II/A-V, natomiast wzrastał od 9% do 14% w przypadku betonu z cementu CEM II/A-S. Wyjątkiem od tej reguły był anomalny przypadek betonu C1.

Table 6. Concrete strength measured on 100 mm cubes
Tablica 6. Wytrzymałość próbek betonowych o boku 100 mm

Strength after 28 days of curing Wytrzymałość betonu po 28 dniach dojrzewania $w/c = 0.40$ Series / Seria	CEM I		CEM II/A-V		CEM II/A-S	
	C1	C2	C3	C4	C5	C6
Compressive strength / Wytrzymałość na ściskanie [MPa]	48.9 ± 2.1	51.1 ± 1.0	54.9 ± 2.3	56.1 ± 2.2	58.4 ± 2.2	56.51 ± 2.2
Tensile splitting strength / Wytrzymałość na rozłupywanie [MPa]	3.4 ± 0.4	3.9 ± 0.3	3.1 ± 0.2	3.7 ± 0.5	4.0 ± 0.1	4.1 ± 0.5
Strength after 28 days of curing Wytrzymałość betonu po 28 dniach dojrzewania $w/c = 0.37$ Series / Seria	CEM I		CEM II/A-V		CEM II/A-S	
	C11	C12	C13	C14	C15	C16
Compressive strength / Wytrzymałość na ściskanie [MPa]	57.7 ± 0.6	59.8 ± 1.5	62.3 ± 2.5	60.0 ± 2.1	53.8 ± 2.2	54.9 ± 1.8
Tensile splitting strength / Wytrzymałość na rozłupywanie [MPa]	4.0 ± 0.1	4.3 ± 0.2	4.1 ± 0.2	4.2 ± 0.6	4.0 ± 0.2	4.4 ± 0.3

1.43-2.95%. The effect of the type of cement on the spacing factor and micro air-void content in hardened concrete is discussed in Sec. 4 below.

3.3. STRENGTH AND DURABILITY OF CONCRETE

Compressive strength of concrete placed on the pilot section of pavement, measured on 150 mm cubes after 28 days of curing in standard conditions was 52.0 ± 1.9 MPa. The following durability parameters were obtained on the cores cut from the pavement:

- 1) Freeze-thaw resistance:
 - compressive strength (controls): 64.9 ± 2.4 MPa,
 - compressive strength after 150 freeze-thaw cycles: 62.6 ± 5.3 MPa,
 - decrease in compressive strength: 3.6%,
- 2) Chloride penetration in the salt spray test, 60 cycles: 5.3 ± 2.6 mm,
- 3) Sorptivity [$\text{cm/h}^{0.5}$]: 0.096 ± 0.006 upper part of the core; 0.067 ± 0.012 bottom part of the core.

The strength of concrete measured on the laboratory specimens after 28 days of curing is given in Table 6 and the durability factors are given in Table 7. Compressive strength was in the range 49-60 MPa and the tensile splitting strength was in the range 3.0-4.4 MPa. On this basis we can judge that the C35/45 strength criterion was satisfied by all the mixes except for C1. The relative increase of compressive strength from 28th to 90th day ranged 8-13% in the case of CEM I and CEM II/A-V mixes and 9-14% in the case of CEM II/A-S mix. The only exception from that rule was C1 mix, considered an anomaly in this case.

Table 7. Durability factors of concrete mixes made with three types of cement
 Tablica 7. Wskaźniki trwałości betonu wykonanego z trzema rodzajami cementu

Property of concrete / Właściwości betonu <i>w/c</i> = 0.40 Series / Seria	CEM I		CEM II/A-V		CEM II/A-S	
	C1	C2	C3	C4	C5	C6
Freeze-thaw resistance: compressive strength (controls after 90 days) [MPa] Mrozoodporność: wytrzymałość na ściskanie (próbki „świadki” – 90 dni)	46.0 ± 1.2	57.6 ± 0.9	62.2 ± 2.2	62.7 ± 1.6	72.0 ± 2.4	67.2 ± 1.4
Freeze-thaw resistance: compressive strength after 150 freeze-thaw cycles [MPa] Mrozoodporność: wytrzymałość na ściskanie po 150 cyklach zamrażania/rozmrażania	47.1 ± 3.4	58.8 ± 2.0	59.8 ± 1.3	61.2 ± 2.3	66.3 ± 1.9	65.0 ± 1.4
Chloride penetration measured in a salt spray chamber, 60 cycles [mm] Penetracja chlorków w komorze mgły solnej – 60 cykli	9.2 ± 1.8	6.5 ± 2.3	8.0 ± 3.1	7.8 ± 2.4	8.1 ± 3.7	8.6 ± 2.5
Sorptivity / Sorpcyjność [cm/h ^{0.5}]	0.078 ± 0.010	0.058 ± 0.009	0.062 ± 0.008	0.074 ± 0.005	0.070 ± 0.005	0.057 ± 0.009
Property of concrete / Właściwości betonu <i>w/c</i> = 0.37 Series / Seria	CEM I		CEM II/A-V		CEM II/A-S	
	C11	C12	C13	C14	C15	C16
Freeze-thaw resistance: compressive strength (controls after 90 days) [MPa] Mrozoodporność: wytrzymałość na ściskanie (próbki „świadki” – 90 dni)	64.0 ± 1.5	64.4 ± 2.7	70.4 ± 1.7	66.8 ± 2.7	62.6 ± 1.7	65.2 ± 2.5
Freeze-thaw resistance: compressive strength after 150 freeze-thaw cycles [MPa] Mrozoodporność: wytrzymałość na ściskanie po 150 cyklach zamrażania/rozmrażania	62.2 ± 2.4	62.4 ± 2.1	67.3 ± 1.2	63.6 ± 2.8	57.2 ± 2.0	62.6 ± 1.4
Chloride penetration measured in a salt spray chamber, 60 cycles [mm] Penetracja chlorków w komorze mgły solnej – 60 cykli	6.5 ± 2.4	5.5 ± 1.3	6.1 ± 1.5	6.0 ± 1.6	9.1 ± 1.7	9.3 ± 3.6
Sorptivity / Sorpcyjność [cm/h ^{0.5}]	0.078 ± 0.007	0.074 ± 0.005	0.073 ± 0.002	0.069 ± 0.007	0.061 ± 0.006	0.066 ± 0.003

Ubytek wytrzymałości na ściskanie wywołany cyklicznym zamrażaniem/rozmrażaniem mieścił się w granicach 2-9%, ale w przypadku betonu z CEM I i *w/c* = 0,40 zaobserwowano niewielki wzrost wytrzymałości, wynoszący 2%. Świadczy to o spełnieniu wymagania stopnia mrozoodporności F150 z dużym zapasem. We wszystkich próbkach betonu wykonanych w laboratorium i odwiertach z nawierzchni, ubytek masy podczas badań mrozoodporności wynosił od 0,09% do 0,30%, tj. był zdecydowanie mniejszy niż graniczna wartość 5%, wymagana przez normę w przypadku stopnia mrozoodporności F150. Nie stwierdzono też spekań próbek po zakończeniu cyklicznego zamrażania/rozmrażania.

Wyznaczona sorpcyjność betonu w granicach od 0,06 do 0,08 cm/h^{0.5} odpowiada wysokiej klasie trwałości betonu wg wartości granicznych podanych w [17]. Pomiar penetracji chlorków w komorze mgły solnej wykonane na próbkach wykonanych w laboratorium wykazały jej zróżnicowanie

The decrease in compressive strength after exposure to freeze-thaw cycles was in the range of 2-9%, except for the mix with CEM I cement and *w/c* = 0.40 where compressive strength actually increased slightly, i.e. by 2%. This satisfies the F150 criterion by a wide margin. In all the tested specimens, made both from laboratory mixes and from the cores cut from the pavement, the loss of weight during the freeze-thaw test was in the range of 0.09-0.30%, i.e. much smaller than the 5% limit prescribed by the standard for F150 freeze-thaw resistance class. No cracks were observed after freeze-thaw cycles.

Based on the limit values given in [17] with the obtained sorptivity values of 0.06-0.08 cm/h^{0.5} the mixes classify in the high durability class. Chloride ion penetration measured in the salt spray test varied from 5.5 mm to 9.3 mm in the case of the laboratory mixes. No relationships nor dependency were found with the type of cement or aggregate

w granicach 5,5 mm do 9,3 mm. Nie stwierdzono prawidłowości i zależności wyniku od rodzaju cementu, kruszywa i współczynnika w/c . Najmniejszą głębokość penetracji chlorków 5,3 mm stwierdzono w próbkach z odwiertów z nawierzchni.

4. ANALIZA I DYSKUSJA WYNIKÓW

Przy zastosowaniu współczynnika przeliczeniowego 0,90, wynikającego z różnicy wielkości próbek, wytrzymałość 28-dniowa na ściskanie betonu o $w/c = 0,37$ wykonanego z cementem CEM I (ozn. C11 i C12) okazała się zgodna z wytrzymałością betonu w próbkach kontrolnych z budowy. Również mrozoodporność betonu z CEM I przy takim samym w/c , określona spadkiem wytrzymałości o 3% po 150 cyklach zamrażania/odmrażania, odpowiadała mrozoodporności betonu nawierzchniowego w odwiertach (analogiczny spadek wytrzymałości o 3,6%). Zatem te dwie podstawowe właściwości betonu nawierzchniowego zostały właściwie odwzorowane w mieszankach laboratoryjnych. Stwierdzenie to stanowi uzasadnienie traktowania wyników badań laboratoryjnych jako znaczących w odniesieniu do betonu w rzeczywistej nawierzchni drogowej.

Wpływ cementu CEM II/A-V na wytrzymałość betonu na ściskanie był korzystny, w stosunku do wytrzymałości betonu z cementu CEM I stwierdzono względny przyrost sięgający do 12%. Zaobserwowano też korzystny wpływ cementu CEM II/A-S na wytrzymałość betonu przy $w/c = 0,40$ (wzrost o 11-19%), natomiast przy $w/c = 0,37$ zaobserwowano niewielki spadek wytrzymałości o 7-8%. Korzystne efekty stosowania obu rodzajów CEM II/A na wytrzymałość powiększyły się jeszcze po 90 dniach dojrzewania betonu, co jest zgodne ze stwierdzeniami znanymi z literatury, np. [29].

Nie stwierdzono znaczącego wpływu cementu CEM II/A-V i CEM II/A-S na pogorszenie mrozoodporności betonu: względny spadek wytrzymałości w granicach od 2,4% do 8,5% niewiele odbiegał od spadku wytrzymałości zaobserwowanego w przypadku betonu z CEM I. Można to powiązać z występowaniem dwóch jednoczesnych efektów: omówionego powyżej korzystnego wpływu tych cementów na wytrzymałość betonu oraz jedynie niewielkiego negatywnego wpływu na charakterystykę porów powietrznych. Jak pokazano w Tabl. 5, zastosowanie cementów CEM II/A spowodowało powstanie porów powietrznych o względnie większych średnicach, co odzwierciedla obniżenie powierzchni właściwej porów do poziomu 0,7-0,9 powierzchni charakteryzującej pory w przypadku CEM I. Zaobserwowaną niewielką zmianę rozkładu wielkości porów powietrznych charakteryzuje też względny wzrost wskaźnika rozmieszczenia o 0,05-0,12 mm w serii mieszanek o $w/c = 0,40$. W przypadku

or w/c ratio. The smallest depth of penetration was 5.3 mm, obtained on the specimens made from the cores cut from the pavement.

4. ANALYSIS OF RESULTS AND DISCUSSION

After application of conversion factor of 0.90 to account for different sizes of specimens, the 28 days compressive strength of $w/c = 0.37$ mixes made with CEM I cement (designated C11 and C12) was found to be consistent with the value obtained on the controls made from field samples. Also, freeze-thaw resistance of concrete made with CEM I with the same w/c value determined by the decrease in compressive strength by 3% after 150 freeze-thaw cycles corresponded to the frost resistance of field concrete, measured on cores (the same decrease, i.e. by 3.6%). Therefore, it can be said that these two basic properties of concrete designed for pavement construction were adequately represented in the laboratory mixes. This conclusion justifies treating laboratory results as representative of the actual road pavement concrete.

The effect of CEM II/A-V cement on the compressive strength was favourable, increasing its value by up to 12%, as compared to the concrete containing CEM I cement. CEM II/A-S cement had also a favourable effect, increasing the strength by 11-19% for $w/c = 0.40$ mixes. On the other hand, a slight decrease of strength, i.e. by 7-8% was noted in the case of $w/c = 0.37$ mixes. The effect of both types of CEM II/A cement on the strength of concrete was even more favourable after 90 days of curing, which is consistent with previous reports, for example [29].

CEM II/A-V and CEM II/A-S cement did not considerably affect the freeze-thaw resistance of concrete with a relative decrease of strength in the range 2.4-8.5%, close to the decrease noted for CEM I concrete. This can be explained by the concurrence of two effects: the above-described favourable effect of these cement on the strength of concrete and only a slight impact on the air void characteristics. As it can be seen from Table 5 above, CEM II/A created relatively larger voids, as evidenced by the decrease in the specific surface to the level of 0.7-0.9 of the value obtained for CEM I mixes. The observed small change in air void distribution is also indicated by the relative increase in the spacing factor by 0.05-0.12 mm in the $w/c = 0.40$ mixes. In the case of the $w/c = 0.37$ mixes CEM II/A-S improved the air void characteristics, as compared to CEM I mixes, i.e. decreased the spacing factor by 0.07 mm and increased the micro void content by 1.3%. While an adverse effect of GGBS on the air void

$w/c = 0,37$ zastosowanie cementu CEM II/A-S w miejsce cementu CEM I spowodowało korzystną zmianę charakterystyki porów: względne zmniejszenie wskaźnika rozmieszczenia o 0,07 mm oraz względne zwiększenie zawartości mikroporów o 1,3%. Z literatury znany jest negatywny wpływ cementu z udziałem granulowanego żużla wielkopieczowego na charakterystykę porów w betonie napowietrzonym [5], [8], ale negatywne skutki obserwowano w przypadku CEM II/B-S i CEM III/A, tj. przy znacznie większej zawartości żużla w składzie cementu.

Kolejnym czynnikiem, który mógł pozytywnie wpłynąć na mrozoodporność betonu z cementu CEM II/A-V i CEM II/A-S, jest zredukowana sorpcyjność w stosunku do sorpcyjności betonu z CEM I. Sorpcyjność rozumiana jest jako cecha wyrażająca szybkość wnikania w beton wody pod ciśnieniem atmosferycznym, spowodowanego działaniem sił kapilarnych [30]. Względna redukcja sorpcyjności mieściła się zasadniczo w granicach od 6% do 22%. Chociaż w przypadku $w/c = 0,40$ i zastosowania cementu CEM II/A-V (beton C4) zaobserwowano pewien wzrost sorpcyjności, niemniej był to wzrost nieistotny z uwagi na rejestrowany rozrzut wyników.

Stwierdzono, że sorpcyjność betonu w próbkach laboratoryjnych odpowiadała sorpcyjności betonu z nawierzchni drogowej jedynie z dolnej części odwiertu. Zwiększona o 43% sorpcyjność betonu w odwiercie z górnej części dolnej warstwy nawierzchni świadczy o pewnej niejednorodności betonu ułożonego w warunkach przemysłowych. Efekty takie obserwuje się zwłaszcza przy intensywnym wibrowaniu mieszanki o gęstej konsystencji, a takie właśnie mieszanki stosuje się w technologii ślizgowego układania nawierzchni drogowych [5], [31]. Niemniej jednak, sorpcyjność odwiertów rdzeniowych jak i próbek wykonanych w laboratorium spełnia warunki sorpcyjności $< 0,150 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$, odpowiednie do klasy ekspozycji XF4 zaproponowane w pracy [17].

Próbki-odwierty z nawierzchni betonowej wykazały największą odporność na penetrację chlorków w komorze mgły solnej. Laboratoryjne próbki betonu z cementu CEM I przy $w/c = 0,37$ wykazały nieco większą głębokość wnikania chlorków – o 3-21%. W pozostałych przypadkach betonu głębokość wnikania chlorków była większa o 20-71%. Zwiększoną penetrację chlorków wykazuje też beton wykonany z cementu CEM II/A-V i CEM II/A-S, co wskazuje na negatywny pod tym względem efekt stosowania takich cementów. Z literatury znany jest na ogół korzystny wpływ dodatków mineralnych popiołu i żużla do cementu i do betonu, np. [31], na zmniejszenie głębokości wnikania chlorków, z tym że źródłem danych są wyniki badań przeprowadzonych zupełnie inną metodą. Badanie w komorze mgły solnej [28]

characteristics in air-entrained concrete have been reported by other researchers [5], [8] in this study adverse effects were observed in the case of CEM II/B-S and CEM III/A mixes containing a much greater amount of GGBS introduced by cement.

Smaller sorptivity, as compared to CEM I mixes is another factor that could be responsible for better freeze-thaw resistance of mixes containing CEM II/A-V and CEM II/A-S cement. Sorptivity is defined as a parameter representing the rate of water absorption by concrete at atmospheric pressure, due to capillary action [30]. The relative decrease of sorptivity was generally in the range of 6-22%. Some increase of sorptivity was also noted in the case of $w/c = 0.40$ mix containing CEM II/A-V cement (C4 concrete mix), yet it is considered irrelevant in view of the observed dispersion of results.

It was found that the sorptivity of laboratory concrete corresponded to that of the field concrete only in the case of specimens made from the bottom part of the cores. In the upper part of the cores sorptivity was higher by 43%, which indicates some degree of non-uniformity of the concrete produced on an industrial scale. This effect is observed especially in the case of intense vibration of higher-density mixes, typically used for slip form construction [5], [31]. Nevertheless, all the sorptivity values, obtained on specimens made from cores and from lab concrete meet the requirement of $< 0.150 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h}^{0.5})$, as proposed for XF4 exposure class in [17].

The highest resistance to chloride penetration in the salt spray chamber was obtained on the specimens made from the pavement cores. The penetration depth was slightly greater, i.e. by 3-21% in the case of $w/c = 0.37$ lab concrete containing CEM I cement. In the other cases, the ion chloride penetration depth was greater by 20-71%. A higher chloride ion penetration was obtained also for CEM II/A-V and CEM II/A-S mixes, indicating an adverse effect of these cement in this respect. So far, fly ash and GGBS added to cement or directly to the concrete mix were reported, for example in [31], to reduce the depth of chloride ion penetration, yet it must be noted that these results were obtained using a completely different test method. The salt spray test [28] is widely used for testing the corrosion resistance of metals and anti-corrosion coatings and is very seldom used for testing concrete. This is why there are no definite evaluation criteria. This being so, the chloride penetration results obtained in the salt spray test should be considered preliminary and a more in-depth interpretation should be attempted future studies.

jest szeroko stosowane w przypadku materiałów metalowych i powłok antykorozyjnych, ale rzadko wykorzystywane w przypadku betonu. Dlatego nie ma jednoznacznych kryteriów oceny. W związku tym pomiary penetracji chlorków w komorze mgły solnej należy traktować jako wyniki wstępne i w dalszych badaniach należy podjąć próbę ich pogłębionej interpretacji.

Wyniki przeprowadzonych badań świadczą o korzystnych efektach stosowania cementu CEM II/A-V i CEM II/A-S w betonie o recepturze zaprojektowanej do wykonania dolnej warstwy nawierzchni dwuwarstwowej. Korzystnych efektów obecności popiołu lotnego krzemionkowego lub granulowanego żużla wielkopiecowego w cemencie należy też oczekiwać z uwagi na zmniejszone ryzyko wystąpienia szkodliwej reakcji alkalia-kruszywo [32]. Aby wykazać ich przydatność w technologii betonu nawierzchniowego z kruszywem odkrytym, należy prowadzić dalsze badania ukierunkowane na właściwości fizyczne i trwałość betonu w górnej warstwie nawierzchni.

5. WNIOSKI

Przeprowadzone badania wytrzymałości i mrozoodporności betonu w odwiertach pobranych z odcinka próbnego nawierzchni drogi ekspresowej pozwoliły na odwzorowanie tych właściwości w próbkach betonu wykonanego w laboratorium. Na podstawie przeprowadzonych badań doświadczalnych oraz wykonanej analizy wyników można sformułować następujące wnioski:

1. Wpływu cementu CEM II/A-V i CEM II/A-S w porównaniu z cementem CEM I na mrozoodporność betonu był niewielki. Po 150 cyklach zamrażania/rozmarzania względny spadek wytrzymałości w granicach od 2,4% do 8,5% niewiele odbiegał od spadku wytrzymałości w przypadku betonu z CEM I.
2. Zastosowanie cementu CEM II/A-V i CEM II/A-S w betonie napowietrzonym spowodowało obniżenie powierzchni właściwej porów do poziomu 0,7-0,9 powierzchni charakteryzującej pory w przypadku CEM I, a także względny wzrost wskaźnika rozmieszczenia o 0,05-0,12 mm w serii mieszanek o $w/c = 0,40$. W przypadku $w/c = 0,37$ zastosowanie cementu CEM II/A-S w miejsce cementu CEM I spowodowało korzystną zmianę charakterystyki porów: względne zmniejszenie wskaźnika rozmieszczenia o 0,07 mm oraz względne zwiększenie zawartości mikroporów o 1,3%.
3. Efektem zastosowania CEM II/A-V i CEM II/A-S jest zredukowana sorpcyjność betonu w granicach od 6% do 22% w stosunku do sorpcyjności betonu z CEM I.

The results obtained in this study demonstrate the beneficial effects of CEM II/A-V and CEM II/A-S cements when used in concrete for the lower layer of a two-layer concrete pavement system. Siliceous fly ash and GGBS can be expected to cause beneficial effects also due to reduced risk of the deleterious alkali-aggregate reaction [32]. Further studies are required, focussing on the physical properties and durability of concrete in the upper layer of the pavement system, in order to justify their use in the concrete mixes designed for exposed aggregate pavement concrete.

5. CONCLUSIONS

The strength and freeze-thaw resistance tests carried out on specimens prepared from the cores cut from the pavement of a pilot section of an expressway in Poland allowed representation of these properties in laboratory specimens. Based on the experimental tests carried out in this study, including analysis of the obtained results we can conclude that:

1. Substitution of CEM I with CEM II/A-V and CEM II/A-S cement of the same strength class 42.5 had little effect on the freeze-thaw resistance of hardened concrete. The relative decrease of strength of concrete containing these cement after 150 freeze-thaw cycles was in the range of 2.4-8.5%, close to such a decrease noted for CEM I concrete.
2. When used in air-entrained concrete, CEM II/A-V and CEM II/A-S cements reduced the specific surface of air voids to the level of 0.7-0.9 of the value obtained for CEM I mixes and, in the case of $w/c = 0.40$ test series, increased the spacing factor by 0.05-0.12 mm. In the case of $w/c = 0.37$ mixes CEM II/A-S improved the air void characteristics, as compared to CEM I mixes, i.e. decreased the spacing factor by 0.07 mm and increased the micro void content by 1.3%.
3. CEM II/A-V and CEM II/A-S cements reduced the sorptivity of hardened concrete by 6-22%, as compared to CEM I concrete.
4. CEM II/A-V cement had a favourable effect on the compressive strength of concrete, which was by 12% higher than the value obtained for CEM I concrete. CEM II/A-S cement had also a favourable effect, increasing the strength by 11-19% in the case of $w/c = 0.40$ mixes. On the other hand, a slight decrease of strength, i.e. by 7-8% was noted in the case of $w/c = 0.37$ mixes.

4. Zastosowanie cementu CEM II/A-V poskutkowało wzrostem wytrzymałości betonu na ściskanie sięgający do 12% w stosunku do wytrzymałości betonu z cementu CEM I. Stwierdzono korzystny wpływ cementu CEM II/A-S na wytrzymałość betonu przy $w/c = 0,40$ (wzrost o 11-19%), natomiast przy $w/c = 0,37$ zaobserwowano niewielki spadek wytrzymałości o 7-8%.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] Mackiewicz P., Szydło A., Krawczyk B.: Influence of the construction technology on the texture and roughness of concrete pavements. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **17**, 2, 2018, 111-126, DOI: 10.7409/rabdim.018.007
- [2] Szydło A., Mackiewicz P., Wardega R., Krawczyk B.: Katalog typowych konstrukcji nawierzchni sztywnych. Załącznik do zarządzenia Nr 30 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad, Warszawa, 16.06.2014
- [3] Rudnicki T., Jurczak R.: Recycling of a Concrete Pavement after over 80 Years in Service. *Materials*, **13**, 10, 2020, 2262, DOI: 10.3390/ma13102262
- [4] Warunki Wykonania i Odbioru Robót Budowlanych D-05.03.04 v02 Nawierzchnia z betonu cementowego (dokument wzorcowy). GDDKiA, Warszawa, 30 września 2019, <https://www.gov.pl/attachment/f0191eb6-a635-49ea-b0a9-f33a7c0c5905> (dostęp 20.09.2021)
- [5] Glinicki M.A.: Inżynieria betonowych nawierzchni drogowych. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2019
- [6] TL Beton-StB: Technische Lieferbedingungen für Baustoffe und Baustoffgemische für Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndeckenaus Beton. FGSV, Köln 2007
- [7] Breitenbücher R., Bou-Young Youn: Qualitätssicherung von Waschbetonoberflächen, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. Straßenbau, Heft S 66, 2010
- [8] Breitenbücher R., Costner C.: Waschbetonoberflächen, Mindestluftporengehalt in Waschbeton. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 1084, Bonn 2013
- [9] Glinicki M.A., Dąbrowski M., Skrzypczyński M.: Influence of curing on the properties of air-entrained concrete in the upper layer of exposed aggregate pavement-modelling study. *Cement, Wapno, Beton*, **22/84**, 4, 2017, 271-281
- [10] Łażniewska-Piekarczyk B., Gołaszewski J.: Relationship Between Air-Content in Fresh Cement Paste, Mortar, Mix and Hardened Concrete Acc. to PN-EN 480-1 with Air-Entraining CEM II/BV. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **471**, 3, 2019, 032044
- [11] Piasta W., Marczevska J.: Microstructural changes in air-entrained mortars and then subjected to freeze-thaw cycles and sulphate attack. *Cement, Wapno, Beton*, **21/83**, 6, 2016, 439-446
- [12] Tunstall L.E., Ley M.T., Scherer G.W.: Air entraining admixtures: Mechanisms, evaluations, and interactions. *Cement and Concrete Research*, **150**, 2021, 106557, DOI: 10.1016/j.cemconres.2021.106557
- [13] 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
- [14] 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
- [15] Giergiczyński Z., Baran T., Dziuk D., Ostrowski M.: The increase of concrete frost resistance by using cement with air-entraining agent. *Cement, Wapno, Beton*, **21/83**, 2, 2016, 96-105
- [16] Kubissa W.: Sorpcyjność betonu. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2016
- [17] Kubissa W., Jaskulski R.: Measuring and Time Variability of The Sorptivity of Concrete. *Procedia Engineering*, **57**, 2013, 634-641, DOI: 10.1016/j.proeng.2013.04.080
- [18] PN-EN 197-1:2012 Cement – Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku
- [19] Dziedzic K., Dąbrowski M., Antolik A., Glinicki A.: Characteristics of concrete mix air-entrainment applying the sequential pressure method. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **19**, 2, 2020, 107-118, DOI: 10.7409/rabdim.020.007
- [20] PN-EN 206:2016 Beton – Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność
- [21] PN-EN 12350-7:2019 Badania mieszanki betonowej – Część 7: Badanie zawartości powietrza – Metody ciśnieniowe
- [22] PN-EN 12350-2:2019 Badanie mieszanki betonowej – Część 2: Badanie konsystencji metodą opadu stożka
- [23] PN-EN 12390-3:2019 Badania betonu – Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań
- [24] PN-EN 12390-6:2011 Badania betonu – Część 6: Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu próbek do badań

- [25] PN-B-06265:2018 Beton – Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność – Krajowe uzupełnienie PN-EN 206+A1:2016-1
- [26] PN-EN 480-11:2008 Domieszki do betonu, zaprawy i zaczynu – Metody badań – Część 11: Oznaczanie charakterystyki porów powietrznych w stwardniałym betonie
- [27] *Glinicki M.A.*: Methods of qualitative and quantitative assessment of concrete air entrainment. *Cement, Wapno, Beton*, **19/81**, 6, 2014, 359-369
- [28] ASTM B117-19 Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus
- [29] *Kaszuba S.*: Kształtowanie składu trwałego betonu z udziałem cementów wieloskładnikowych (CEM II, CEM III) do zastosowania w budownictwie drogowo-mostowym. Praca doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice 2019
- [30] *Śliwiński J., Tracz T.*: Sorpcyjność betonu zwykłego i wysokowartościowego. *Cement, Wapno, Beton*, **12/74**, 1, 2007, 27-33
- [31] *Glinicki M.A., Marks M., Józwiak-Niedźwiedzka D.*: Automatic categorization of chloride migration into concrete modified with CFBC ash. *Computers and Concrete*, **9**, 5, 2012, 375-387
- [32] *Krispel S.*: Portland-slag cements – reduction of the residual risk of aggregates containing reactive components, in: M.A.T.M. Broekmans and B.J. Wigum (eds.), *Proceedings of the 13th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*, Trondheim, Norway, 2008, 873-882