

Ocena trwałości betonu w nowo wybudowanych odcinkach nawierzchni dróg ekspresowych w Polsce

Concrete durability evaluation in new built pavement sections of expressways in Poland

Michał A. Glinicki^{1,*}

¹Institute of Fundamental Technological Research, Polish Academy of Sciences, Warsaw, Poland

*Corresponding author: M.A. Glinicki, e-mail: mglinic@ippt.pan.pl

ORCID: 0000-0001-5604-6954

Streszczenie

W artykule przedstawiono przegląd zagadnień trwałości betonu zastosowanego na kilku odcinkach nowych dróg ekspresowych w Polsce. Dwuwarstwowe nawierzchnie z betonu niezbrojonego, dyblowane i kotwione, wykonano w technologii ślizgowej. Trwałość betonu w warunkach wpływu mrozu oraz oddziaływania soli odładzających określono na podstawie oceny stopnia napowietżenia, w tym wskaźnika rozmieszczenia porów i zawartości mikroporów, oznaczonej na próbkach rdzeniowych wywierconych z wykonanych nawierzchni. Stwierdzono drobne pęcherzyki powietrza wskazuje na optymalne efekty podwyższonej mrozoodporności bez wyraźnego negatywnego wpływu na wytrzymałość. Ustalono korelację zawartości mikroporów w stwardniałym betonie a wynikami pomiarów w mieszance betonowej za pomocą Super Air Meter. Ocenę trwałości betonu w środowisku o dużej wilgotności, w połączeniu z obciążeniem zmęczeniowym ruchem drogowym i oddziaływaniem roztworów soli odładzających, przeprowadzono wykorzystując nowe zasady doboru kruszyw niereaktywnych. Dobór kruszywa na podstawie analizy petrograficznej oraz oceny ekspansywnego zachowania się betonu został w pełni potwierdzony wynikami badań betonu formowanego na budowie. Przeprowadzono je w symulowanych warunkach eksploatacyjnych z zewnętrznym oddziaływaniem roztworu chlorku sodu. Omówiono przydatność przyjętej metody badań trwałości do poszukiwania alternatywnych materiałów do budowy nawierzchni.

Słowa kluczowe: badania w warunkach eksploatacyjnych, napowietżenie betonu, nawierzchnia niezbrojona dyblowana, selekcja składników, trwałość

Summary

A review of concrete durability at several sections of the new built expressways in Poland is presented. Two-layers jointed plain concrete pavements were constructed using a slip-form technology. For freeze-thaw and deicing salts durability of concrete the specified air void properties, including the spacing factor and the microvoids content, was evaluated on core specimens drilled from the constructed pavements. The observed system of fine air voids indicates optimal features for increased frost and scaling resistance without a significant negative impact on strength. The correlation was established between the microvoid content in the hardened concrete and the data of the Super Air Metre on fresh concrete mix was established. Concrete durability in high moisture environment, combined with fatigue traffic load and external supply of alkaline deicing salt solutions, was considered using newly developed principles of nonreactive aggregate selection. The aggregate selection based on petrographic analysis and the assessment of expansive behaviour of concrete was fully confirmed using the performance tests with external supply of sodium chloride. The suitability of the established methodology for durability acceptance testing for exploration of alternative materials for paving is discussed.

Keywords: air voids, durability, jointed plain concrete pavement, materials selection, performance test

1. Wprowadzenie

Praktyka wykonania nawierzchni, w tym odpowiedni dobór materiałów, projektowanie i przygotowania mieszanki betonowej, dobra technologia układania i teksturowania, ma duży wpływ na właściwości użytkowe dróg i autostrad (1, 2). Powszechnie przyjmuje się, że koniec okresu użytkowania nawierzchni powinien nastąpić na skutek skumulowanych obciążeń od ruchu pojazdów i oddziaływań środowiskowych, a nie na skutek niedostatecznych właściwości materiału. Docelowy projektowany okres eksploatacji betonowej nawierzchni dróg szybkiego ruchu wynosi zwykle co najmniej 30 lat przy niewielkich nakładach na utrzymanie (3).

W ostatnich latach w Polsce dokonano znacznej rozbudowy sieci autostrad i dróg ekspresowych. Program obejmował m.in. budowę licznych odcinków dwupasmowych dróg ekspresowych o nawierzchni z betonu. Znaczna część nowych betonowych dróg ekspresowych została zbudowana w regionie częstego występowania mrozu i podwyższonej wilgotności powietrza [rys. 1]. Celem artykułu jest przedstawienie przeglądu wyników oceny trwałości betonu w nawierzchniach na wybranych odcinkach dróg ekspresowych wybudowanych w latach 2018-2022. Zakres analizowanych danych ogranicza się do materiałowych aspektów trwałości nawierzchni.

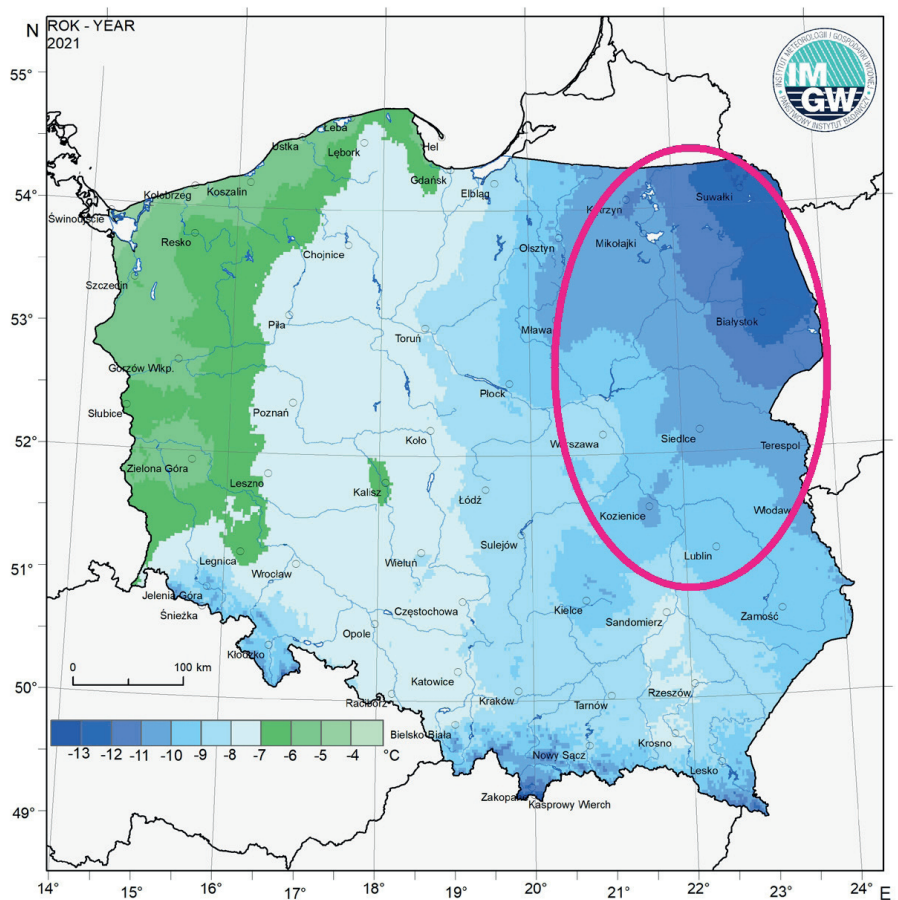
Dokumenty techniczne dotyczące projektowania i budowy dróg betonowych w sieci krajowej są opublikowane przez GDDKiA. Projektowanie grubości warstw polegało na wykorzystaniu typowych rozwiązań katalogowych (5). Przyjęta klasyfikacja ruchu do kategorii KR6 i KR7 odpowiadała projektowanej liczbie przejazdów z obciążeniem osi 115 kN, wynoszącej odpowiednio 16-38 mln oraz więcej od 38 mln. Wybrany rodzajem nawierzchni była niezbrojona nawierzchnia betonowa z odsłoniętą powierzchnią kruszywa [rys. 2], z dyblami i kotwami odpowiednio w spoinach poprzecznych i podłużnych. Wybraną technologią układania betonu było formowanie metodą ślizgową w dwóch warstwach łączonych „na mokro”, na warstwie podbudowy związanej cementem. Specyfikacje techniczne materiałów i technologii budowy oparto na ogólnych zasadach technicznych (6). Dla kategorii ruchu ciężkiego KR5-KR7 projektowaną klasą wytrzymałości betonu na ściskanie była klasa C35/45. Wymagana wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu wynosiła co najmniej 5,5 MPa. Przyjęto klasę ekspozycji XF4 wg PN-EN 206 (7) oraz kategorię środowiska E3 zgodnie z CEN/TR 16349 (8). Jedynie dla górnej warstwy betonu przyjęto dodatkową klasę ekspozycji XM2, obejmującą duże obciążenia ścierne kołami samochodów ciężarowych przejeżdżających po nawierzchni betonowej.

1. Introduction

The pavement construction practice including the adequate materials selection, concrete mix design and production, consistent paving and finishing technology has an important effect on the highway performance (1,2). It is commonly assumed that the end of pavement service life should be reached due to cumulative effects of traffic and environmental loads but not due to insufficient material properties. The target design life for a concrete highway pavement is usually at least 30 years with only minor maintenance efforts (3).

In recent years in Poland a major extension of national highway network has been conducted. It included the construction of several sections of divided-lane expressways made of Portland cement concrete. A substantial part of new built concrete expressways was constructed in the more 'wet-freeze' region than in other regions of Poland as indicated in Fig. 1. The objective of the paper is to present a review of concrete durability evaluated on selected sections of expressways constructed in the years from 2018 to 2022. The range of data analysed is restricted to the material aspects of pavement durability.

The technical documents relevant to the design and construction of concrete roads in the national network are published by GDDKiA. The thickness design is based on typical solutions catalogued in (5). According to the traffic classification, the category KR6 and KR7 is relevant for the designed number of 115 kN axle load pas-



Rys. 1. Minimalna roczna temperatura w Polsce według oficjalnych danych IMGW (4)

Fig. 1. The minimum annual temperatures in Poland after official records of IMGW (4)

W przypadku wykończenia powierzchni w formie odkrytego kruszywa projektowanie mieszanki betonowej dla klasy ekspozycji XM2 jest bardzo ograniczone: zawartość cementu co najmniej 420 kg/m^3 , stosunek wody do cementu $< 0,40$, mineralne kruszywo grube o dużej odporności na ścieranie i dużym wskaźniku odporności na polerowanie - co najmniej 50 (6). Skurcz betonu przy wysychaniu (9) – ważna właściwość dla nawierzchni niezbrojonych – jest zwykle pomijany podczas doboru materiałów i projektowania mieszanki. Dzieje się tak dlatego, że system spoin nacinanych w płycie formowanej ślizgowo wkrótce po związaniu cementu jest zaprojektowany, aby kompensować odkształcenia płyty spowodowane wysychaniem betonu i zmianami temperatury otoczenia.

Główna część artykułu poświęcona jest trwałości betonu w środowisku zamrażania-rozmrażania oraz oddziaływania soli odładzających – klasa ekspozycji XF4. Odbywa się ona w środowisku o dużej wilgotności, w połączeniu ze szkodliwym działaniem zmęczeniowym wywołanym ruchem drogowym i zewnętrznym oddziaływaniem roztworu soli odładzającej [ekspozycja E3].

2. Struktura napowietżenia nawierzchni betonowej

Do niedawna w celu weryfikacji docelowej trwałości betonu w środowisku XF4 stosowano wyłącznie bezpośrednie oznaczenie mrozoodporności w przyspieszonych warunkach cyklicznego zamrażania i rozmrażania. Postępując zgodnie z metodą opisaną w (10) ustalono kryteria wymaganej mrozoodporności: zmniejszenie masy lub wytrzymałości na ścislenie próbek odpowiednio o 5% lub 20% po określonej liczbie cykli zamrażania-rozmrażania. Dla dolnej warstwy nawierzchni obecnie określona liczba cykli zamrażania i rozmrażania wynosi 200 w rejonie wschodniej Polski. Dla górnej warstwy nawierzchni betonowej określa się odporność na złuszczenie powierzchniowe zgodnie z PKN-CEN/TS 12390-9 (11), przyjmując kryterium masy złuszczonego materiału nie większej niż $0,5 \text{ kg/m}^2$ po 56 normowych cyklach zamrażania i rozmrażania w roztworze soli odładzającej.

Zniszczenia powodowane przez zamrażanie i rozmrażanie w roztworze soli ogranicza się przez odpowiednie projektowanie mieszanki betonowej, w tym przede wszystkim dobór mrozoodpornych kruszyw, ograniczenie stosunku wodno-cementowego oraz zastosowanie domieszek napowietrzających. Beton napowietrzony produkuje się z domieszką napowietrzającą, pozwalającą na utrzymanie w mieszance odpowiedniej ilości małych, równomiernie rozmieszczonych pęcherzyków powietrza, które pozostają w stwardniałym betonie.



Rys. 2. Widok makrotekstury nawierzchni betonowej z odsłoniętym kruszywem

Fig. 2. A macrotexture view of jointed concrete pavement of exposed aggregate finish

sages of 16-38 million and higher than 38 million, respectively. The selected type of pavement was a jointed plain concrete pavement with exposed aggregate surface [Fig.2], with dowels and anchors in the transverse and longitudinal joints, respectively. The selected technology was the slip-form casting in two concrete layers wet-on-wet on cement-treated base layer. Technical specifications for materials and the construction technology were based on general technical specifications (6). For heavy traffic category KR5-KR7 the designed concrete compressive strength class is C35/45, the flexural tensile strength $\geq 5.5 \text{ MPa}$ is required. The environmental aggression class is XF4 according to PN-EN 206 (7) and the E3 environment category is assumed in accordance with CEN/TR 16349 (8). Only for the upper concrete layer the additional criterion of XM2 environmental class of exposure is assumed that covers high abrasion loads by the trucks wheels on concrete pavement surface.

For the exposed aggregate finish the assumed concrete mix design for XM2 environmental exposure is a prescriptive one: the cement content is at least 420 kg/m^3 , the water to cement ratio is < 0.40 and the suitable coarse aggregate is required to exhibit high crushing resistance and the polishing stone value of at least 50 (6). The drying shrinkage of concrete (9) – an important properties for unreinforced pavement application – is usually ignored during the materials selection and mix design. It is because the system of joints induced in the slip-formed slab soon after cement setting time, is designed to accommodate the slab deformations due to concrete drying and ambient temperature variation.

The main part of this paper is devoted to concrete durability in freeze-thaw/deicing salt environment [XF4 exposure] and in high moisture environment, combined with detrimental traffic load

Ze względu na dobrze poznany wpływ rozkładu wielkości porów powietrznych w betonie na jego odporność na agresję mrozu i soli odladzających (12), powszechnie stosuje się cyfrową ocenę układu porów powietrznych. W ramach projektu NATO Science for Peace opracowano metodologię cyfrowej analizy ilościowej mikrostruktury betonu (13). W wyniku, wskaźnik rozmieszczenia porów powietrznych został po raz pierwszy określony w specyfikacjach technicznych dróg w 2003 roku jako właściwość uzupełniająca mrozoodporność oznaczaną bezpośrednio. Już w 2004 roku wskaźnik rozmieszczenia porów został oficjalnie wykorzystany do oceny diagnostycznej odcinka betonowej autostrady A4 pod Wrocławiem, opracowanej przez zespół ekspercki przy Ministerstwie Transportu. Bogate doświadczenie w ocenie pustek powietrznych na różnych budowach krajowych zostało przekazane społeczności inżynierów i technologów, np. (14). W wyniku zdobytych doświadczeń opracowano sformalizowaną technikę wyznaczania opisu porów powietrznych na szlifach próbek rdzeniowych odwierconych z górnej i dolnej warstwy nawierzchni. Metodę cięcia próbek-odwiertów i odpowiednie odstępy między liniami oraz całkowitą długość linii trawersowej ustalono, aby zliczania pustek powietrznych odbywało się w sposób miarodajny. Zaproponowana metoda została zaakceptowana i zastosowana do ogólnych specyfikacji technicznych (6).

Kryteria zgodności betonu ułożonego w dwuwarstwowych nawierzchniach drogowych z wymaganą trwałością w środowisku XF4 przedstawiono w tabelicy 1. Potwierdzenie uzyskuje się na próbkach rdzeniowych pobranych z górnej i dolnej warstwy nawierzchni. Warunkiem zgodności wytrzymałości na ściskanie betonu umieszczonego w warstwie dolnej jest klasa wytrzymałości nie mniejsza niż CC40 wg PN-EN 13877-2.

Tablica 1

KRYTERIA ZGODNOŚCI Z WYMAGANIAMI XF4 DLA UŁOŻONEGO W DWÓCH WARSTWACH BETONU NAWIERZCHNIOWEGO – WERYFIKACJA NA PRÓBKACH RDZENIOWYCH

| Beton w nawierzchni | Kryteria | Metoda badania |
|--|--|--------------------|
| <u>Obie warstwy:</u> Charakterystyka porów powietrznych w betonie: - zawartość mikroporów A_{300} , nie mniej niż - wskaźnik rozmieszczenia, nie więcej niż | 1,5% 0,20 mm | PN-EN 480-11 |
| <u>Górna warstwa:</u> Odporność na złuszczenie powierzchniowe: S_{56} – średnia masa złuszczeń po 56 cyklach FT, S_{28} – średnia masa złuszczeń po 28 cyklach FT, nie większa niż | $S_{56} < 0,50 \text{ kg/m}^2$ i $S_{56} / S_{28} < 2$ | PKN-CEN/TS 12390-9 |

Table 1

XF4 CRITERIA FOR PLACED TWO-LAYER PAVEMENT CONCRETE – VERIFICATION ON CORE SPECIMENS

| Placed concrete in the pavement | Criteria | Test method |
|--|--|--------------------|
| <u>Both layers:</u> Air void characteristics in concrete: - micropores content (A_{300}), not less than - spacing factor, not more than | 1.5 % 0.20 mm | PN-EN 480-11 |
| <u>The upper layer:</u> Scaling resistance: S_{56} – the average mass of scaled material after 56 F-T cycles, S_{28} – the average mass of scaled material after 28 F-T cycles, not higher than | $S_{56} < 0.50 \text{ kg/m}^2$ and $S_{56} / S_{28} < 2$ | PKN-CEN/TS 12390-9 |

fatigue action and external supply of alkaline deicing salt solution [E3 exposure].

2. Air void characteristics in concrete pavement

Historically, for verification of target durability of concrete in XF4 environmental aggression, direct frost resistance testing was used under accelerated the freeze-thaw cycling conditions. Following the method described in (10), the acceptable criteria for adequate frost resistance were developed: reduction of the mass or compressive strength of samples by 5% or 20%, respectively, after the prescribed number of the freeze-thaw cycles. For the lower pavement layer, the currently specified number of freeze-thaw cycles is 200 in the region of eastern Poland. For the upper layer of concrete pavement, the scaling resistance according to PKN-CEN/TS 12390-9 (11) is currently specified. The mass of scaled material not greater than 0.5 kg/m² after 56 standard cycles of freezing and thawing in the presence of deicing salt solution.

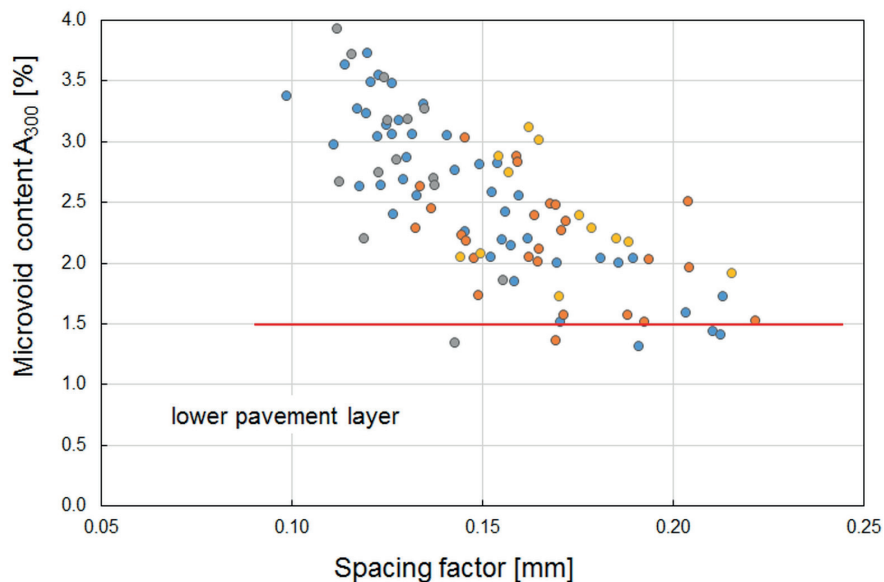
Freeze-thaw salt-scaling damage is mitigated by the appropriate design of the concrete mix, including selection of frost resistant aggregates, limitation of the water-cement ratio, and the use of air-entraining agents, as the primary measures. Air entrained concrete is manufactured with an air entraining admixture that allows for introduction of the proper amount of small, evenly spaced air bubbles, that remain in hardened concrete. Due to the well-established influence of the air voids distribution in concrete on their resistance to freeze-thaw/deicing salt aggression (12), the digital evaluation of the air void system is commonly applied. As a deliverable of NATO Science for Peace project the methodology for digital quantitative analysis of microstructure concrete was

Oznaczenie stopnia napowietrzenia wykonano mikroskopowo z rejestracją cyfrową (14) na wypolerowanych i kontrastowanych zglądach z próbek rdzeniowych. Choć oceniane nawierzchnie wykonano z mieszanek o zróżnicowanym składzie, ich składnikami wspólnymi było zastosowanie cementu portlandzkiego CEM I 42,5 oraz zawartość zaczynu w granicach 26-27,5% lub 28,5-31% odpowiednio dla warstwy dolnej i górnej. Maksymalny wymiar ziaren kruszywa wynosił odpowiednio 22 mm lub 8 mm. Zastosowano domieszki napowietrzające i uplastyczniające, których zawartość dostosowano do docelowej ilości powietrza i urabialności mieszanki.

Przykład statystycznego odwzorowania wielkości porów powietrznych w betonie wbudowanym na wybranych odcinkach dróg ekspresowych przedstawiono na rys. 3. Obraz mikrostruktury porów był korzystny, tylko nieliczne wyniki pomiarów wykraczały poza dominujący zakres całkowitej zawartości porów powietrznych od 3 do 7,5%. Zarówno rozmieszczenie porów, jak i zawartość mikroporów mieszczą się bardzo dobrze w akceptowanym zakresie. Stwierdzono, że zwiększona zawartość mikroporów była skorelowana ze zmniejszonym wskaźnikiem rozmieszczenia, co świadczy o korzystnym rozkładzie wielkości porów powietrznych. Tę korelację stwierdzono zarówno w betonach dla warstwy dolnej, jak i dla warstwy górnej. Całkowita zawartość powietrza była zwykle nieco mniejsza w dolnej warstwie betonu, jednak nie wpływało to w sposób widoczny na zawartość mikroporów. Na podstawie powierzchni właściwej, najczęściej w zakresie od 25 do 45 mm⁻¹, pory powietrzne konsekwentnie zaliczają się do kategorii drobnych pęcherzyków o przewidywanym korzystnym wpływie na odporność na zamrażanie-rozmarzanie oraz na złuszczenia powierzchniowe, z niewielkim wpływem na zmniejszenie wytrzymałości.

3. Struktura napowietrzenia w mieszankach stosowanych na budowie

Skuteczność procesu napowietrzania jest kontrolowana na placu budowy przez pomiar zawartości powietrza w dostarczonej mieszance betonowej. Normowa metoda ciśnieniowa nie daje jednak żadnych informacji co do rozkładu wielkości i rozmieszczenia porów powietrznych w betonie. Ponieważ kilka czynników technologicznych może wpływać na trwałość napowietrzenia (15), pożądane jest oszacowanie wielkości opisujących układ porów powietrznych w produkowanych mieszankach betonowych. Zmodyfikowaną metodę ciśnieniową, w której ciśnienie przykłada się sekwencyjnie, zwaną sekwencyjną metodą ciśnieniową, zastosowano do oceny układu porów w mieszankach na placu budowy. Skuteczność metody znana jest z badań laboratoryjnych i terenowych w USA (15, 16), które wykazały zależność między



Rys. 3. Statystyczne odwzorowanie wielkości porów powietrznych w dolnej warstwie betonu na kilku wykonanych odcinkach nawierzchni dróg ekspresowych

Fig. 3. Statistical representation of air void entrainment characteristics in the lower layer of concrete in several constructed sections of expressway pavements

developed (13). In result, the air void spacing factor was specified for the first time in the road technical specifications in 2003 as the supplementing the freeze-thaw resistance and the frost-salt scaling resistance. Already in 2004 it was officially applied for diagnostic evaluation of paved section of A4 highway near Wrocław performed by the expert group assembled by the Polish Ministry of Transportation. An extensive experience in air void characterization gained on various construction sites was transferred to the concrete community, e.g., (14). Following the experience gained the formalized technique for the determination of air voids description on polished sections of specimens cored from the upper and the lower layer of pavements. The core sectioning method and the proper spacing between the lines and the total length of the traverse lines is selected to obtain the meaningful air void counting. The proposed technique was accepted and implemented into the general technical specifications (6).

The acceptance criteria for XF4 durability of concrete placed in two-layer road pavements are shown in Table 1. These are confirmed on core specimens taken from the upper and the lower layer of pavement. The relevant acceptance criterion for the compressive strength of concrete placed in the lower layer is the strength class not lower than CC40 as per PN-EN 13877-2.

Air voids properties determination was performed using digital image technique (14) on polished and contrasted sections of the core specimens. Tested pavements were constructed with different mix designs, but the common features included the use of Portland cement CEM I 42.5 and the paste content of about 26-27.5% or 28.5-31% for the lower and the upper layer, respectively. The maximum aggregate size was adequate 22 mm or 8 mm. Both air-entraining and water reducing admixtures were used, with the content adjusted to the target air content and mix workability.



Rys. 4. Urządzenie Super Air Meter w użyciu na placu budowy drogi

Fig. 4. Super Air Meter device in field use at road construction jobsite

liczbą SAM oznaczoną w mieszance betonowej a wskaźnikiem rozmieszczenia porów w stwardniałym betonie.

Próbki mieszanek dostarczonych w warstwie górnej i warstwie dolnej nawierzchni drogi ekspresowej pobrano na placu budowy przed układarką ślizgową. Składnikami mieszanki były cement portlandzki CEM I 42,5N-NA, piasek kopalny i kruszywo łamane gabrowe [frakcja 2/8 lub 2/8 i 8/22] oraz domieszki napowietrzające i zmniejszające ilość wody zarobowej. Mieszanki stosowane na innej budowie, zawierające kruszywa łamane amfibolitowe zostały odwzorowane w laboratorium przy zróżnicowanej zawartości powietrza, aby rozszerzyć zakres porównań między mieszanką a stwardniałym betonem (17). Mieszanki polowe i laboratoryjne zbadano porównawczo mierząc zawartość powietrza za pomocą normowego aparatu ciśnieniowego i urządzenia Super Air Meter [SAM]. Otrzymano bardzo dobrą zgodność wyników uzyskanych w przypadku obu urządzeń pomiarowych, ze współczynnikiem determinacji R^2 około 0,9. Wytrzymałość na ściskanie mierzona na formowanych próbkach sześciennych mieściła się w przedziale 48,8-65,1 MPa i była skorelowana z całkowitą zawartością powietrza w mieszankach. Ustalono korelację między liczbą SAM oznaczoną na mieszankach betonowych a zawartością porów mniejszych niż 300 μm w stwardniałym betonie. Mieszanki betonowe o liczbie SAM mniejszej od 0,4 wykazały porównywalną jakość układu porów jak beton stwardniały o zawartości mikroporów $A_{300} \geq 1,5\%$. Próbki betonu wytwarzanego na placu budowy wykazują podobną zależność, jaką ustalono na próbkach betonu wykonanego w laboratorium.

Zależność między liczbą SAM a ubytkiem masy w wyniku złuszczenia się próbek betonu na placu budowy i w laboratorium po 56

An example of statistical representation of the air voids magnitude in concrete placed in the selected expressway sections is shown in Fig. 3. The overall picture of air entrainment is good with only few data beyond the dominating range of total air void content from 3 to 7.5%. Both the spacing factor and the microvoid content fall very well into the accepted data range. An increased microvoid content was found correlated with reduced spacing factor, demonstrating the beneficial properties of the air void system. The such correlation was found both in the mixes for the lower layer and for the upper layer. The total air content was usually slightly smaller in the concrete of the lower layer, but the microvoid content was not visibly affected. On the basis of specific surface, mostly within the range from 25 to 45 mm^{-1} , the air voids fall consistently into the category of fine bubbles of predicted beneficial response to freeze-thaw/scaling aggression, with only minor strength reduction effects.

3. The air voids structure in the fresh mixes, applied during building

The efficiency of the air-entrainment process is controlled at the construction site by measuring the air content in the fresh mix delivered. However, a standard pressure method does not give any indication of the size distribution and the spacing of air voids in concrete. Because few technological factors can affect the stability of the entrained air system (15), it is desirable to obtain some estimation of the air void system properties in concrete mixtures produced. A modified pressure method, in which pressure is applied sequentially, called a sequential pressure method, was applied for air voids system evaluation in job mixes. Its efficiency is known from the laboratory and field tests in the U.S. (15, 16), which are confirmed a relationship between the SAM number of fresh mix and the spacing factor in the hardened concrete.

The specimens of mixtures delivered for the upper layer and the lower layer of expressway pavement were taken at the jobsite in front of the slip-form paver. Mix components included CEM I 42.5N-NA Portland cement, pit sand and crushed gabbro aggregate [the fraction 2/8 or 2/8 and 8/22], as well as the air-entraining and water reducing admixtures. The job mixes containing crushed amphibolite aggregate were replicated in the laboratory with different air contents to extend the comparison range of the fresh-to-hardened air void distribution (17). The total air content in the field and laboratory mixes, measured with the air entrainment pressure meter and the Super Air Meter [SAM] was compared. A very good fit of the data obtained with these two testing devices was obtained, with a coefficient of determination R^2 of about 0.9. The compressive strength measured on concrete cubes was in the range of 48.8-65.1 MPa and it was clearly correlated with the total air content in the mixes. A correlation between the SAM number determined on concrete mixes and the content of microvoids smaller than 300 μm in hardened concrete was established. Concrete mixes with the SAM number below 0.4 have comparable quality of air-void system as hardened concrete with $A_{300} \geq 1.5\%$. Field concrete specimens prepared in the building site show the similar relation, which was established on the concrete samples in the laboratory.

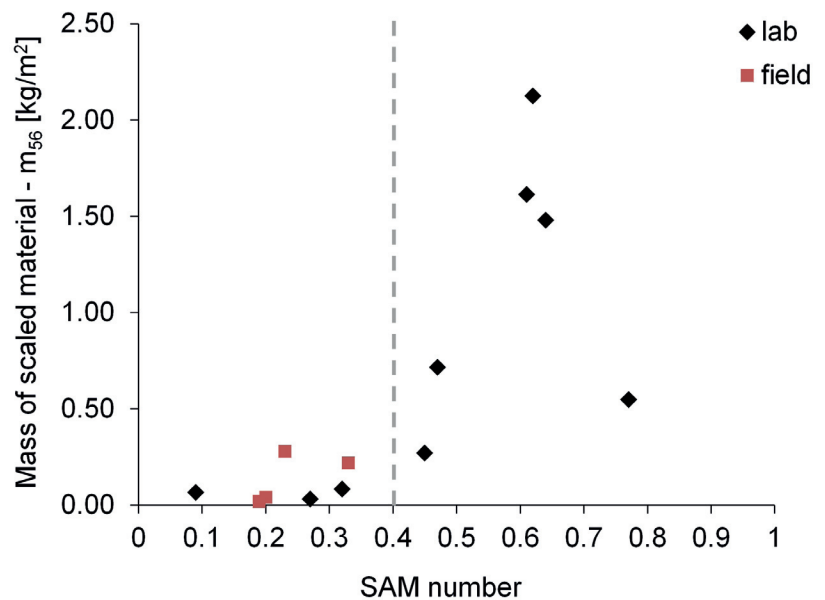
cyklach zamrażania i rozmrażania z dodatkiem soli odladzającej przedstawiono na rys. 5. Wraz ze wzrostem liczby SAM zwiększa się masa złuszczeń, co oznacza zmniejszanie się odporności na zamarzanie i rozmrażanie przy dodatku roztworu soli. Ubytek masy staje się znaczny, gdy liczba SAM przekracza 0,4. Poniżej tego progu ubytek masy nie przekraczał 0,3 kg/m².

Spójność pomiarów zawartości powietrza w mieszankach została uznana za zadowalającą, co oznacza, że urządzenie SAM i konwencjonalny aparat ciśnieniowy mogą być do tych badań stosowane zamiennie. Podobną zgodność wyników pomiarów opisali inni badacze (15, 16), uzyskując w badaniach laboratoryjnych 85% korelację między liczbą SAM a wskaźnikiem rozmieszczenia porów w stwardniałym betonie. Z otrzymanej obecnie zależności wynika, że jako kryterium odpowiedniej zawartości mikroporów $A_{300} \geq 1,5\%$ można przyjąć wartość graniczną SAM = 0,4, co stwierdzono dla 89% mieszanek laboratoryjnych i 75% badanych mieszanek przygotowanych na placu budowy.

Stwierdzona korelacja między liczbą SAM a masą złuszczonego materiału [rys. 5] potwierdza korzystny wpływ małych, równomiernie rozmieszczonych porów powietrznych w wierzchniej warstwie stwardniałego betonu. Jak zaproponowali Brandt i Kasperkiewicz (13), małe pustki powietrzne mogą łagodzić efekt bleedingu [pojawiania się warstwy wody na powierzchni betonu] i przerywać połączenia między porami kapilarnymi, poprawiając w ten sposób odporność betonu na zamarzanie i rozmrażanie. Odpowiedni wskaźnik rozmieszczenia porów jest jedną z nielicznych właściwości mikrostruktury betonu, określających wymaganą trwałość betonu na oddziaływania środowiskowe określone klasą ekspozycji XF4. Z praktycznych obserwacji wynika, że warunkiem dużej odporności betonu na złuszczenie powierzchniowe jest spełnienie przynajmniej dwóch następujących kryteriów: wskaźnika rozmieszczenia porów w stwardniałym betonie mniejszego niż 0,2 mm oraz wytrzymałość betonu na ścisnienie większa od 40 MPa. Oprócz małego współczynnika w/c oraz zaawansowanego procesu twardnienia zaczynu cementowego [stopień hydratacji cementu] zasadniczym rodzajem mikrostruktury betonu napowietrzonego, odpowiadającą za dobrą odporność na zamarzanie i rozmrażanie w obecności soli odladzających, jest odpowiedni układ porów powietrznych. W związku z tym ustalona korelacja między liczbą SAM a zawartością mikroporów jest obiecującą metodą do jeszcze lepszej kontroli właściwości betonu w nawierzchniach podczas ich wykonania.

4. Dobór materiałów pod kątem odporności na korozję kruszywa spowodowaną przez alkalia

Do oceny trwałości betonu w środowisku o dużej wilgotności [E3], przy jednoczesnym szkodliwym zmęczeniowym działaniu obciążenia ruchem drogowym oraz zewnętrznym oddziaływaniu



Rys. 5. Korelacja między liczbą SAM w mieszance betonowej a masą złuszczeń z powierzchni betonu wyznaczona metodą normową (11)

Fig. 5. Correlation between SAM number in a concrete mix and mass of scaled material determined using standard frost-salt scaling test

A relationship between the SAM number and the mass loss due to scaling of the field and laboratory concrete specimens after 56 freeze-thaw cycles with de-icing salt is shown in Fig. 5. With an increase of the SAM number the mass of scaled material is increasing, which means the decreasing of the freeze-thaw scaling resistance in the solution of salt. The increase of the loss of mass becomes higher when the value of SAM number exceeds 0.4. Below this threshold, the loss of mass did not exceed 0.3 kg/m².

The general consistency of fresh air content in the mixtures was found satisfactory, which means that the SAM testing device and the conventional metre can be used alternatively for this purpose. A similar consistency of the test data sets has been reported by other researchers (15, 16), who obtained in laboratory testing the 85% correlation between the SAM number and the spacing factor in hardened concrete. The currently obtained relationship shows that the 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 and 75% of field mixes.

The correlation found between the SAM number and the mass of scaled material [Fig. 5] confirms a beneficial effect of small, uniformly spaced air voids in the top layer of hardened concrete. As suggested by Brandt and Kasperkiewicz (13), 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. 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 adequate if at least the following two criteria are satisfied: the spacing factor

roztworów soli odladzających zastosowano opracowane zasady selekcji kruszyw niereaktywnych. Doświadczenia zdobyte podczas badań terenowych przedwcześnie uszkodzonego odcinka nawierzchni betonowej wykonanej w latach 2002-2003 (18) wykazały, że dotychczasowa ocena reaktywności kruszywa była niewłaściwa, ponieważ pomijała zawartość kwarcu mikro- i krypto-kryształicznego w kruszywie łamanym. Dotychczasowe metody stosowane do selekcji niereaktywnych kruszyw mineralnych opierały się na szybkich pomiarach ubytku masy kruszywa w 4% roztworze wodorotlenku sodu w temperaturze 90°C. Podstawą nowych specyfikacji wprowadzonych w 2019 r. są badania obejmujące analizę petrograficzną minerałów reaktywnych w kruszywie oraz ekspansję próbek zaprawy i betonu w warunkach przyspieszonych, odpowiednio w temperaturze 80°C i 38°C (19). Dodatkowo do oceny właściwości stosowanych mieszanek betonowych napowietrzonych do budowy dróg i mostów wprowadzono badania ekspansji betonu w temperaturze 60°C przy zewnętrznym oddziaływaniu roztworu soli odladzającej, zgodnie z metodą równoważną (20). Metoda badawcza polega na przechowywaniu betonowych próbek w cyklicznie zmiennych warunkach ekspozycji środowiskowej przez co najmniej 20 tygodni.

IPPT PAN asystował we wdrażaniu nowych metod badawczych w laboratoriach badawczych administracji drogowej, szkoląc personel laboratoryjny, a także dostarczając wyniki potwierdzające nieszkodliwe zachowanie wybranych przez wykonawcę kruszyw. Konsultacje dotyczące selekcji materiałów i projektowania mieszanek do budowy nowych dwuwarstwowych odcinków dróg ekspresowych obejmowały petrograficzne wykrywanie potencjalnie reaktywnych minerałów w kruszywach krzemionkowych i węglanowych oraz ocenę ekspansji betonu wykonanego na placu budowy dróg.

Zakres badanych kruszyw grubych obejmował kruszywa łamane wytwarzane z wapieni, dolomitów, piaskowców i szarogłazów, potencjalnie nadających się do produkcji mocnych i trwałych betonów. W składzie mineralnym kruszyw wapiennych i dolomitów nie stwierdzono reaktywnych form kwarcu. Kwarc mikro- i krypto-kryształiczny oraz kwarc w stanie odkształcenia stwierdzono w ziarnach kruszywa z szarogłazu, piaskowca, kwarcytu i żwiru. W ziarnach kruszywa porfirowego stwierdzono znaczną ilość minerałów reaktywnych, a mianowicie chalcedonu, trydymitu i kwarcu mikrokrystalicznego.

W celu oceny mieszanek dostarczanych na plac budowy, przeznaczonych do układania metodą ślizgową, przeprowadzono badania ekspansji w temperaturze 60°C przy zewnętrznym oddziaływaniu roztworu NaCl wraz z kontrolą zmian modułu sprężystości. Próbki w kształcie belek o wymiarach 75x75x285 mm ze stalowymi czopikami do pomiaru ekspansji uformowano na budowie z mieszanki dostarczonej na górną warstwę nawierzchni betonowej dwuwarstwowej z odsłoniętą powierzchnią kruszywa, przeznaczonej dla ruchu ciężkiego kategorii KR6-KR7. Skład napowietrzanej mieszanki betonowej oraz jej właściwości przedstawiono w tablicy 2. Zastosowano kruszywa mineralne ze skał: gabro - oznaczenie GB, amfibolit - dwa kamieniołomy: AM1, AM2. Jako kruszywo drobne zastosowano naturalny piasek pochodzenia rzeczno-lodowcowego. Do określenia potencjalnej reaktywności kruszywa wykorzy-

of the pores in hardened concrete of less than 0.2 mm and the concrete compressive strength higher than 40 MPa. Besides the small w/c ratio of concrete and an advanced cement paste hardening process [the degree of cement hydration] an adequate air void system is the main microstructural feature of air-entrained 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 performance of concrete in the pavements.

4. Materials selection for ASR durability

The durability of concrete in high moisture environment [E3], combined with detrimental traffic load fatigue action and external supply of alkaline deicing salt solutions was considered using newly developed principles of nonreactive aggregate selection. Experience gained during a field study of premature damage to the concrete pavement section constructed in 2002-2003 (18) revealed that the previous assessment of aggregate reactivity was erroneous because it missed the presence of micro- and cryptocrystalline quartz in the crushed rock aggregate. The past methods used for screening of nonreactive mineral aggregate were based on quick measurements of the aggregate mass loss in 4% solution of sodium hydroxide at 90°C. Thus the new specifications introduced in 2019 are based on the petrographic analysis of potentially reactive minerals in aggregate and the expansion testing of mortar and concrete specimens at accelerated conditions at the temperature of 80° and 38 °C, respectively (19). Additionally, for the performance evaluation of air entrained concrete mixtures for roads and bridges the 60°C expansion test at external alkali supply was introduced, equivalent to (20). The procedure consists of concrete prisms storage in cyclic changing environmental exposure conditions for at least 20 weeks.

IPPT PAN assisted in implementation of new test methods in road administration test laboratories, providing the training for laboratory personnel and also providing corroborative evidence of innocuous behaviour of aggregate selected by the contractor. The delivered advice on materials selection and mix design for construction of new two-layered expressway sections consisted of the petrographic detection of potentially reactive minerals in either siliceous or carbonate aggregate and the evaluation of expansive behaviour of concrete mixtures, produced on the roads constructed place.

The range of the investigated coarse aggregate covered crushed aggregates produced using limestone, dolomite, sandstone and greywacke rocks, potentially suitable for making strong and durable concrete. No reactive forms of quartz were found in the mineralogical composition of the limestone aggregates and the dolomite aggregates. Micro- and cryptocrystalline quartz and the strained quartz occurred in the particles of greywacke, sandstone, quartzite and gravel aggregates. A considerable amount of reactive minerals like chalcedony, tridymite and microcrystalline quartz was found in the grains of porphyry aggregate.

stano przyspieszone badanie ekspansji zaprawy w jednomolowym roztworze NaOH w temperaturze 80°C, równoważne metodom ASTM C1260 i RILEM AAR-2. Wszystkie kruszywa mineralne wykazywały zachowanie potencjalnie nieekspansywne – wydłużenie próbek było mniejsze niż 0,1% po 14 dniach ekspozycji.

Próbki betonu zaformowane na placu budowy z mieszanek produkowanych przemysłowo wykazywały jedynie niewielką ekspansję pod wpływem naprzemiennej ekspozycji na dużą wilgotność/suszenie/moczenie w roztworze NaCl [rys. 6]. Wydłużenie końcowe próbek betonowych [po 10 cyklach tj. 140 dniach] wynosiło 0,05 - 0,16 mm/m, a więc było znacznie mniejsze od wartości granicznej 0,3 mm/m ustalonej dla odpowiedniej odporności betonu na reakcję sodu i potasu z-krzemionką w nawierzchni przy zewnętrznym dostępie soli odladzającej (21). Jest to zgodne z oczekiwanym brakiem reaktywności stosowanych kruszyw drobnych i grubych, wykazaną na podstawie przyspieszonych badań zaprawy. Nie zanotowano wyraźnych zmian rezonansowego modułu sprężystości pod wpływem cyklicznej ekspozycji środowiskowej. Potwierdzono, że beton zawierający łamane kruszywo, do którego należało gabbro lub amfibolit zachowuje się prawidłowo, wykazując stałość objętości i stałość właściwości sprężystych. Tym samym uzyskane wyniki oznaczania ekspansji betonu odpowiadają oczekiwaniom dla znanych kruszyw niereaktywnych, często stosowanych w Polsce w nawierzchniach z odsłoniętym kruszywem.

Unikanie przedwczesnych uszkodzeń w wyniku reakcji alkalia-krzemionka jest bardzo ważne dla zapewnienia stałych właściwości mechanicznych betonu w okresie użytkowania nawierzchni (22). Znaczenie stosowanej metody cyklicznej ekspozycji w dużej wilgotności, suszenie i moczenie w roztworze NaCl jest związane z jej przydatnością do symulacji rzeczywistych oddziaływań środowiska i obciążeń eksploatacyjnych betonu w nawierzchniach

For the evaluation of the mixtures delivered for slip-form pavement construction the 60°C expansion tests at external supply of NaCl solution were performed along with the elastic modulus monitoring. The prismatic specimens 75x75x285 mm with steel studs for the expansion measurement were cast at the road construction site, using the mixture delivered for the upper layer of two-layer concrete pavements with exposed aggregate surface, designed for heavy traffic category KR6-KR7. The air entrained concrete mix design and fresh mix properties are shown in Table 2. Crushed rock mineral aggregates were used: gabbro [designation GB], amphibolite [two quarries, AM1, AM2]. Natural sand of fluvioglacial origin was used as fine aggregate. For potential reactivity properties of aggregate the accelerated mortar bar test was used in 1 molar NaOH solution at the temperature of 80°C, equivalent to ASTM C1260 and RILEM AAR-2 procedures. All mineral aggregates exhibited the potentially non-expansive behaviour – the expansion of specimens was less than 0.1% at 14 days of accelerated exposure.

Concrete specimens manufactured at a construction site using industrially produced mixes exhibited only slight expansion when exposed to alternating wet/dry/NaCl solution exposure [Fig. 6]. The terminal expansion for concrete specimens after 10 cycles i.e. 140 days, was 0.05 - 0.16 mm/m, thus was clearly smaller than the limiting value 0.3 mm/m established for adequate ASR performance of pavement concrete at external alkali supply (21). That observation is consistent with non-reactive behaviour of fine and coarse aggregates involved as shown by accelerated mortar bar tests. No significant changes of the resonant modulus of elasticity were observed due to cyclic environmental exposure. The concrete mixes containing crushed gabbro or amphibolite aggregate were confirmed to perform properly, showing the volumetric stability and elastic properties stability. Thus the obtained concrete expansion results correspond to expectations for well-known non-reactive

Tablica 2 / Table 2

SKŁAD MIESZANKI, WŁAŚCIWOŚCI MIESZANKI I BETONU – MIESZANKI BETONOWE WYKONANE NA BUDOWIE

MIX DESIGN AND CONCRETE PROPERTIES – CONSTRUCTION SITE MIXES

| Składniki / Constituents | Oznaczenie mieszanki / Mix designation | | |
|---|--|--------------|--------------|
| | GWB_Wys | GWB_17/1 | GWB_Suw |
| Rodzaj cementu / Type of cement | GEM I 42.5 N | GEM I 42.5 N | GEM I 42.5 N |
| Zawartość alkaliów / Alkali content, % Na ₂ O _{eq} | 0.53 | 0.53 | 0.56 |
| Zawartość cementu / Cement content, kg/m ³ | 420 | 420 | 420 |
| Woda / Water, kg/m ³ | 149 | 151 | 165 |
| Piasek kwarcowy 0/2 mm / Quartz sand 0/2 mm, kg/m ³ | 523 (s) | 603 (sb) | 597 (sc) |
| Kruszywo łamane 2/8 mm / Crushed aggregate 2/8 mm, kg/m ³ | 1365 (GA) | 1237 (AM1) | 1211 (AM2) |
| Plastyfikator / Plasticizer, % m.c. | 0.60 | 0.60 | 0.45 |
| Domieszka napowietrzająca / Air-entraining admixture, % m.c. | 0.83 | 0.25 | 0.12 |
| Właściwości mieszanki i betonu / Fresh mix and hardened concrete properties | | | |
| Zawartość powietrza / Air content, % | 5.4 | 5.7 | 6.5 |
| Opad stożka / Slump, mm | 16 | 13 | 3 |
| Gęstość pozorna / Apparent density, kg/m ³ | 2410 | 2440 | 2350 |
| Wytrzymałość na ściskanie f _{c28} / Compressive strength f _{c28} MPa | 63.4 ± 2.0 | 66.1 ± 2.7 | 63.1 ± 2.5 |
| (sa) piasek z kopalni A / sand from the quarry A; (sb) kopalni B; (sc) kopalni C m.c. – w stosunku do masy cementu / by mass of cement | | | |

dróg szybkiego ruchu. Są to bardzo złożone oddziaływania, które polegają na nakładaniu się cyklicznych obciążeń ruchem pojazdów i zmian pogodowych wywołujących wahania temperatury i wilgotności. Nakładanie się degradacji mikrostruktury spowodowanej cyklicznym obciążeniem [wywołującym mikrospękania do około 5 μm w matrycy cementowej] z zewnętrznym dostępem alkaliów może zmniejszyć trwałość nawierzchni. Zarówno próbki terenowe, jak i laboratoryjne potwierdziły akumulację sodu w betonie na głębokości do 20 mm oraz dwukrotne zwiększenie stężenia Na_2O na powierzchni (23). W pracy Breitenbüchera i in. (24) wykazano, że wnikanie jonów alkalicznych z zewnątrz jest potęgowane przez przejeżdżające samochody ciężarowe. Badanie absorpcji wody wykazało znaczny wzrost absorpcji początkowej powodowany ekspansją próbek betonu oraz liczbą spękań w betonie stwierdzonych pod skaningowym mikroskopem elektronowym.

5. Właściwości mieszanek betonowych i ich składników

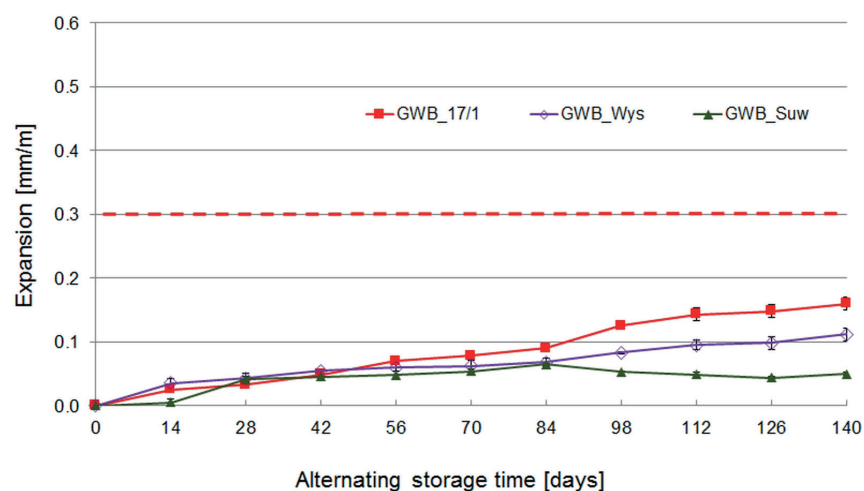
Pogłębiona ocena trwałości betonu na nawierzchnie może być przydatna zarówno do opracowania skutecznych metod napraw przedłużających żywotność nawierzchni powyżej 30 lat, jak i do doboru alternatywnych składników mieszanek. Czynniki ekonomiczne i względy środowiskowe przyczyniają się do rozwoju alternatywnych materiałów do budowy nawierzchni (25, 26). Rosnące koszty uprawnień do emisji CO_2 w Europie powodują wzrost wykorzystania cementów o zmniejszonej zawartości klinkieru. Skuteczne ograniczenie emisji dwutlenku węgla można osiągnąć stosując cementy o jak najmniejszej zawartości klinkieru, do których należy cement hutniczy CEM III/A - zawierający ok. 50% żużla wielkopieczowego. Jednak do tej pory w odniesieniu do nawierzchni dwuwarstwowych specyfikacje techniczne wymagają stosowania tego samego rodzaju cementu na górną i dolną warstwę nawierzchni. Wykorzystanie alternatywnych kruszyw, często lokalnych kruszyw mineralnych, do budowy nawierzchni drogowych jest również ważnym czynnikiem

aggregates frequently used for exposed aggregate pavements in Poland.

The avoidance of premature damage due to the alkali-silica reaction is very important to ensure stable mechanical properties of concrete during the service life (22). The significance of the cyclic dry-wet-external alkali exposure test method is related to its suitability to simulate the actual environmental effects and service loads acting on concrete in highway pavements. These are highly complex actions, that involve superposition of cyclic loadings by vehicle traffic and weather changes inducing temperature and humidity variation. The superposition of microstructural degradation caused by cyclic loading [microcracks of about 5 μm within the cement matrix] with an external alkali supply can reduce the pavement durability. Both field and laboratory samples confirmed the accumulation of sodium up to 20 mm in concrete and enrichment of Na_2O concentration on the surface by a factor of two (23). It was shown by Breitenbücher et al. (24) that the ingress of externally supplied alkalis is enhanced by the overrunning traffic. The water absorption test revealed the significant increase of the initial water absorption that corresponded to the expansion of concrete prisms and the number of cracks observed under the scanning electron microscope.

5. The properties of the concrete mixes and their constituents

Further properties of the pavement concrete durability might be useful for the development of effective repair methods to extend pavement service life beyond 30 years or for the selection of alternative mix components. The economic environmental factors are the driving forces for alternative materials development for paving (25, 26). The increasing costs of CO_2 emission allowances in Europe drive the growth of the use of cements with the lower clinker content. A reduction in carbon dioxide emissions can be the



Rys. 6. Ekspansja próbek betonu podczas badania w temperaturze 60°C z zewnętrznym dostępem 3% roztworu NaCl. Mieszanki wykonane na placu budowy

Fig. 6. Expansion of concrete prisms in the 60°C concrete test with external alkali supply using 3% NaCl solution [construction site mixes]

ekonomicznym przy wyborze rodzaju nawierzchni. Wpływ zastosowanego kruszywa na możliwość zmniejszenia śladu węglowego betonu nawierzchniowego analizował Rudnicki (27). Zastosowanie alternatywnych kruszyw lokalnych leżących w odległości 80 km od placu budowy pozwoliło na zmniejszenie śladu węglowego o około 19%. Zagadnienie potencjalnego wykorzystania alternatywnych cementów i kruszyw do budowy nawierzchni były przedmiotem badań w odniesieniu do nowo wybudowanych odcinków nawierzchni betonowych przez laboratoryjne odtworzenie składów roboczych z wykorzystaniem cementów z udziałem popiołu lotnego lub żużla oraz kruszyw o wątpliwej - granicznej reaktywności.

Właściwości porów powietrznych, wytrzymałość na ściskanie i mrozoodporność betonu zbadano na próbkach rdzeniowych wyciętych z odcinka próbnego wykonanej nawierzchni oraz na próbkach wykonanych w laboratorium przy porównywalnym stosunku wodno-cementowym. Skład mieszanki betonowej przy w/c = 0,40 oraz dane dotyczące wytrzymałości i mrozoodporności przedstawiono w tablicy 3.

Stwierdzono, że cementy CEM II/A-V i CEM II/A-S powodują zmniejszenie powierzchni właściwej porów powietrznych do pozio-

replication with the use of fly-ash or slag blended cements and aggregates of the doubtful reactivity.

The air voids properties, compressive strength, and freeze-thaw resistance of concrete were tested on core specimens cut from the trial section of constructed pavement and on the specimens manufactured in the laboratory with the comparable water-to-cement ratio. The concrete mix design at w/c = 0.40, the strength and frost resistance data is shown in Table 3.

The use of CEM II/A-V and CEM II/A-S cements was found to decrease the specific surface area of air voids to the level of 0.7-0.9 of the value obtained for CEM I mixes. At the same time, the spacing factor was increased by 0.05-0.12 mm for concrete of w/c = 0.40 test series. However, for w/c = 0.37 mixes the cement CEM II/A-S was found to improve the air voids in comparison to CEM I mixes by decreasing the spacing factor by 0.07 mm and increasing the microvoid content by 1.3%. The substitution of CEM I by CEM II/A-V and CEM II/A-S cements had the little effect on the freeze-thaw resistance of hardened concrete. The relative decrease of strength of concrete containing these cements after 150 freeze-thaw cycles was in the range of 2.4-8.5%, close to such a decrease

Tablica 3 / Table 3

SKŁAD MIESZANKI ODTWORZONEJ W LABORATORIUM DLA BETONU DOLNEJ WARSTWY ORAZ WYTRZYMAŁOŚĆ BETONU ZMIERZONA NA PRÓBKACH SZEŚCIENNYCH O BOKU 100 MM (28)

LABORATORY MIX DESIGN FOR LOWER LAYER CONCRETE AND THE STRENGTH PROPERTIES MEASURED ON 100 MM CUBE SPECIMENS (28)

| Składniki / Constituents, kg/m ³ | Oznaczenie mieszanki | | | | | |
|--|----------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | 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 piasek / sand | 638 | 638 | 636 | 634 | 633 | 633 |
| 2/8 granit / granite | 547 | - | 545 | - | 543 | - |
| 8/16 granit / granite | 638 | - | 636 | - | 633 | - |
| 2/8 wapień / | - | 561 | - | 559 | - | 557 |
| 8/16 wapień | - | 655 | - | 653 | - | 650 |
| Woda / Water | 144 | 144 | 144 | 144 | 144 | 144 |
| Domieszka napowietrzająca / Air-entraining admixture | 0.36 | 0.36 | 0.47 | 0.50 | 1.44 | 1.44 |
| Domieszka redukująca ilość wody zarobowej / Water reducing admixture | 1.62 | 1.62 | 1.98 | 2.16 | 2.34 | 2.52 |
| Wytrzymałość betonu, MPa | | | | | | |
| Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach / Compressive strength after 28 days | 48.9 ±2.1 | 51.1 ±1.0 | 54.9 ±2.3 | 56.1 ±2.2 | 58.4 ±2.2 | 56.5 ±2.2 |
| Wytrzymałość na rozciąganie po 28 dniach / Tensile splitting strength after 28 days | 3.4 ±0.4 | 3.9 ±0.3 | 3.1 ±0.2 | 3.7 ±0.5 | 4.0 ±0.1 | 4.1 ±0.5 |
| Odporność na zamrażanie i rozmrażanie: wytrzymałość na ściskanie, próbki kontrolne po 90 dniach / Freeze-thaw resistance: compressive strength of control samples after 90 days | 46.0 ±1.2 | 57.6 ±0.9 | 62.2 ±2.2 | 62.7 ±1.6 | 72.0 ±2.4 | 67.2 ±1.4 |
| Odporność na zamrażanie i rozmrażanie: wytrzymałość na ściskanie po 150 cyklach zamrażania i rozmrażania / Freeze-thaw resistance: compressive strength after 150 freeze-thaw cycles | 47.1 ±3.4 | 58.8 ±2.0 | 59.8 ±1.3 | 61.2 ±2.3 | 66.3 ±1.9 | 65.0 ±1.4 |

mu 0,7-0,9 wartości uzyskanej w przypadku CEM I. Jednocześnie powodują względne zwiększenie wskaźnika rozmieszczenia porów o 0,05-0,12 mm w przypadku betonu serii w/c=0,40. Jednak dla mieszanek w/c = 0,37 stwierdzono, że cement CEM II/A-S poprawia rozmieszczenie porów powietrznych w porównaniu z mieszankami z CEM I, zmniejszając współczynnik rozstawu o 0,07 mm i zwiększając zawartość mikroporów o 1,3%. Zastąpienie CEM I cementem CEM II/A-V lub CEM II/A-S miało niewielki wpływ na mrozoodporność betonu. Względny spadek wytrzymałości betonu zawierającego te cementy po 150 cyklach zamrażania-rozmrażania mieścił się w przedziale 2,4-8,5%, zbliżonym do takiego spadku obserwowanego dla betonu z CEM I. Ponadto cementy CEM II/A-V i CEM II/A-S zmniejszyły sorpcyjność stwardniałego betonu o 6-22% w porównaniu z betonem CEM I. Oba cementy z dodatkami miały raczej korzystny wpływ na wytrzymałość betonu na ściskanie (28).

Napowietrzony beton stosowany na budowie na dolną warstwę nawierzchni, odtworzony w laboratorium z użyciem cementów z popiołem lotnym lub żużłem wielkopieczowym, poddano badaniom odporności na ASR przy zewnętrznym oddziaływaniu 3% roztworu NaCl. Badania ekspansji w warunkach naprzemiennej ekspozycji w dużej wilgotności/suszenie/moczenie w roztworze NaCl przeprowadzono stosując beton zawierający miejscowe kruszywo łamane, żwirowe oraz granitowe (29). Jako kruszywo drobne zastosowano lokalny piasek kwarcowy pochodzenia rzeczno-lodowcowego. Długotrwałe badania próbek betonowych w temperaturze 38°C wykazały niepewność oznaczenia potencjalnej reaktywności kruszyw [Tablica 4], gdyż ekspansja po 52 tygodniach była bliska wartości granicznej 0,04% przy ustalonej niepewności $\pm 0,012\%$.

Tablica 4

POTENCJALNA REAKTYWNOŚĆ KRUSZYWA WYZNACZONA NA PRÓBKACH BETONU W TEMPERATURZE 38°C I WILGOTNOŚCI RH >95% ORAZ OBECNOŚĆ MINERAŁÓW REAKTYWNYCH

| Rodzaj kruszywa i oznaczenie | Ekspansja betonu po 52 tygodniach [%] | Znalezione minerały reaktywne |
|------------------------------|---------------------------------------|---|
| Łamany żwir 2-22 mm [PD1] | 0,034 \pm 0,003 | kwarc w stanie odkształcenia, kwarc mikro- i kryptokrystaliczny [czert] |
| Łamany żwir 2-22 mm [PD3] | 0,054 \pm 0,003 | kwarc w stanie odkształcenia, kwarc mikro- i kryptokrystaliczny, chalcedonity |
| Łamany granit 2-22 mm [GT1] | 0,030 \pm 0,002 | kwarc w stanie odkształcenia |
| Łamany granit 2-22 mm [GT3] | 0,047 \pm 0,006 | kwarc w stanie odkształcenia i kwarc mikrokrystaliczny [myrmekit] |
| Piasek kwarcowy 0/2 mm |) | kwarc w stanie odkształcenia, kwarc mikro- i kryptokrystaliczny |

) brak danych; ekspansja w przyspieszonym badaniu zaprawy 0,27% po 14 dniach przy 1 molowym roztworze NaOH w temperaturze 80°C

Table 4

POTENTIAL REACTIVITY OF AGGREGATE DETERMINED USING THE CONCRETE PRISM TEST AT 38°C AND RH >95%, AND PRESENCE OF REACTIVE MINERALS

| Aggregate type and notation | Concrete prism expansion after 52 weeks, % | Detected reactive minerals |
|------------------------------|--|--|
| Crushed gravel 2-22mm [PD1] | 0.034 \pm 0.003 | strained quartz, micro- and cryptocrystalline quartz [chert] |
| Crushed gravel 2-22mm [PD3] | 0.054 \pm 0.003 | strained quartz, micro- and cryptocrystalline quartz, chalcedonite |
| Crushed granite 2-22mm [GT1] | 0.030 \pm 0.002 | strained quartz |
| Crushed granite 2-22mm [GT3] | 0.047 \pm 0.006 | strained and microcrystalline quartz [myrmekites] |
| Quartz sand 0/2mm | n.d.) | strained quartz, micro- and cryptocrystalline quartz |

) no data; the expansion in accelerated mortar bar test of 0.27% after 14 days at 1 molar NaOH solution at 80 °C

noted for CEM I concrete. Moreover, 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. Both blended cements had rather a favourable effect on the compressive strength of concrete (28).

Air-entrained concrete applied mixtures for the lower pavement layer replicated in the laboratory with the use of fly-ash or blastfurnace slag blended cements were subjected to ASR performance evaluation at external 3% NaCl solution. The 60 °C expansion tests were performed on concrete containing local crushed gravel aggregate and crushed granite aggregate (29). Local quartz sand of fluvioglacial origin was used as fine aggregate. The concrete prism long test at 38 °C revealed some uncertainty of potential reactivity of aggregate [Table 4], since the 52 weeks expansion was close to the limiting value of 0.04% within the established uncertainty range $\pm 0.012\%$. Furthermore the petrographic analysis of aggregates revealed some moderate presence of slow reacting minerals.

After 10 exposure cycles the expansion of concrete specimens [Table 5] was within the range from 0.42 to 1.12 mm/m for concrete containing CEM I. SEM-based examination of concrete microstructure revealed the presence of alkali-silica reaction products in the cracks in aggregate grains, and in air voids also in cement paste cracks. When Portland cement was replaced by fly-ash or blastfurnace slag blended cements the expansion was substantially reduced by 22-63% and 11-56%, respectively. The effectiveness of CEM II/A-V in suppressing the expansion of concrete due to alkali-silica reaction was regularly greater than that of CEM II/B-S cement. Beneficial effects of blended cements use were also

Tablica 5 / Table 5

ŚREDNIE WYDŁUŻENIE PRÓBEK BETONOWYCH [mm/m] PO 10 CYKLACH NAPRZEMIENNEJ EKSPOZYCJI NA DUŻĄ WILGOTNOŚĆ/SUSZENIE/MOCZENIE W ROZTWORZE NaCl ORAZ PROCENTOWA ZMIANA W STOSUNKU DO BETONU Z CEMENTU PORTLANDZKIEGO CEM I (29)

AVERAGE ELONGATION OF CONCRETE SAMPLES [MM/M] AFTER 10 CYCLES OF ALTERNATING EXPOSURE TO HIGH HUMIDITY/DRYING/SOAKING IN NaCl SOLUTION AND PERCENTAGE CHANGE COMPARED TO CEM I PORTLAND CEMENT CONCRETE (29)

| Kruszywo grube w betonie Coarse aggregate in concrete | Rodzaj cementu / Type of cement | | |
|--|---------------------------------|-------------------|-------------------|
| | CEM I 42.5 R | CEM II/A-V 42.5 N | CEM II/B-S 42.5 N |
| Kruszony granit [GT1] / Crushed granite [GT1] | 0.459 | 0.246 (-46%) | 0.320 (-30%) |
| Kruszony granit [GT3] / Crushed granite [GT3] | 0.462 | 0.309 (-33%) | 0.411 (-11%) |
| Kruszony żwir [PD1] / Crushed gravel [PD1] | 1.119 | 0.410 (-63%) | 0.497 (-56%) |
| Kruszony żwir [PD3] / Crushed gravel [PD3] | 0.416 | 0.324 (-22%) | 0.365 (-12%) |

Ponadto analiza petrograficzna kruszywa wykazała umiarkowaną zawartość minerałów wolno reagujących.

Po 10 cyklach ekspozycji wydłużenie próbek betonowych [Tablica 5] mieściło się w zakresie od 0,42 do 1,12 mm/m w przypadku betonu z CEM I. Badanie mikrostruktury betonu za pomocą skaningowej mikroskopii elektronowej wykazało zawartość produktów reakcji alkalia-krzemionka w spękaniach w ziarnach kruszywa, także w porach i spękaniach w matrycy cementowej. Gdy cement portlandzki został zastąpiony cementem z popiołem lotnym lub żużlem wielkopieczowym, ekspansja próbek została znacznie zmniejszona, odpowiednio o 22-63% i 11-56%. Skuteczność CEM II/A-V w zmniejszeniu ekspansji betonu w wyniku reakcji alkalia-krzemionka była większa niż cementu CEM II/B-S. Stwierdzono również korzystny wpływ stosowania cementów z dodatkami w odniesieniu do właściwości sprężystych betonu – obniżenie modułu sprężystości nie przekroczyło 6%.

Porównując wydłużenie próbek podane w tablicy 5 i poprzednio przedstawione na rysunku 6, oczywiste jest, że odporność na ASR betonu stosowanego na budowie i wykonanego w laboratorium z cementu zawierającego dodatki mineralne jest bardzo różna. Chociaż efekty ograniczania zmian ASR przy stosowaniu CEM II/A-V i CEM II/B-S są znaczne, odporność na ASR betonu wykonanego według przepisów laboratoryjnych jest daleko mniejsza w stosunku do betonu obecnie stosowanego na budowie. Dlatego sprawdzane składniki mieszanki betonowej, zawierającego miejscowe kruszywo grube i miejscowy piasek kwarcowy, należy uznać za niedostateczne do zmniejszenia ryzyka ekspansji przy zewnętrznym dostępie soli odładzającej. Jednakże przedstawiona metoda sprawdzania odporności betonu na ASR w warunkach eksploatacyjnych może być bardzo przydatny przy doborze alternatywnych składników, gdy usunięte zostaną wymagania stosowania tego samego cementu w dolnej i górnej warstwie nawierzchni. Taka różnorodność materiałowa umożliwi dalsze poszukiwanie i sprawdzanie potencjalnej przydatności tańszych i przyjaznych dla środowiska kruszyw, np. kruszywo pochodzące z recyklingu betonu (30, 31).

6. Podsumowanie i uwagi końcowe

W latach 2018-2022 przeprowadzono w Polsce rozbudowę sieci krajowych dróg ekspresowych i autostrad. Program obejmował

observed in respect to elastic properties of concrete – the final decrease in the modulus of elasticity was less than 6%.

When comparing the expansion data shown in Table 5 and previously presented in Figure 6, it is clear that the ASR concrete performance of field concrete and laboratory replicated concrete with blended cements is significantly different. Although the ASR mitigation effects brought by CEM II/A-V and CEM II/B-S cements are significant, they are still far from matching the ASR performance of currently used field mixes. Therefore such an alternative mix design for concrete containing the investigated local coarse aggregate and local quartz sand is found inadequate for sufficient reduction of expansion risk at external alkali supply. However, the presented method of ASR durability validation can be very useful for the selection of alternative materials when the restrictions for the use of the same cement for the lower and upper pavement layer are lifted. Such material flexibility could allow for even further exploration of potential usefulness of less-expensive and environmentally friendly aggregates, like recycled concrete aggregates (30, 31).

6. Summary and concluding remarks

In Poland, a major extension of the national highway network was carried out in 2018-2022. It included several sections of divided-lane expressways made of Portland cement concrete, constructed in the 'wet-freeze' region with the designed durability for the environmental aggression classes XF4 and E3. For concrete durability evaluation the developed verification methods were applied, covering the air voids in both the upper and lower layer of pavement as well as the nonreactive aggregate selection and mix design in respect to the resistance to alkali-silica reaction at external alkaline deicers exposure. The acceptance criteria for XF4 durability of concrete placed in two-layer road pavements, related to the spacing factor and the microvoid content were confirmed on core specimens. The established correlation between the microvoid content in hardened concrete and the SAM number in fresh mix may contribute to a better control of the freeze-thaw performance of the concrete in pavements. The developed durability verification methods were applied for preliminary exploration of possibilities of alternative materials use, particularly local mineral aggregate or blended cements. Considering the current economic factors and

kilka odcinków dwupasmych dróg ekspresowych wykonanych z betonu, wybudowanych w regionie częstego występowania mrozu i opadów, o projektowanej trwałości w środowisku XF4 i E3. Do oceny trwałości betonu zastosowanego w nawierzchniach zastosowano metodę określania napowietrzenia, zarówno w górnej, jak i dolnej warstwie nawierzchni. Ponadto przeprowadzono weryfikację doboru kruszywa niereaktywnego i składu mieszanki pod kątem odporności na reakcję alkalia-krzemionka przy zewnętrznym działaniu oblodzeń. Na próbkach-odwiertach potwierdzono spełnienie trwałości XF4 betonu układanego w dwuwarstwowych nawierzchniach drogowych, obejmujących rozmieszczenie i zawartość mikroporów w stwardniałym betonie. Stwierdzona korelacja między zawartością mikroporów w betonie stwardniałym a liczbą SAM w mieszance betonowej może przyczynić się do lepszej kontroli mrozoodporności betonu w nawierzchniach. Opracowane metody weryfikacji trwałości pozwoliły na wstępne rozpoznania możliwości wykorzystania różnych materiałów alternatywnych, w szczególności lokalnych kruszyw mineralnych lub cementów CEM II/A-V i CEM II/B-S z dodatkami mineralnymi. Uwzględniając czynniki ekonomiczne i zagadnienia środowiskowe, przedstawiona metoda stanowi dobrą metodą do szeroko zakrojonej eksploracji alternatywnych materiałów o potencjalnej przydatności do budowy trwałych nawierzchni betonowych.

the environmental concerns the established methodology provides useful tools for the wide range of exploration alternative materials suitability for durable concrete paving.

Acknowledgement

The paper is based on the presentation given during 14th International Symposium on Concrete Roads, 25-28 June 2023 in Kraków; the text has not been published elsewhere.

Informacje dodatkowe

Artykuł powstał na podstawie referatu wygłoszonego podczas konferencji 14th International Symposium on Concrete Roads, 25-28 czerwca 2023 w Krakowie. Tekst referatu nie został opublikowany.

Literatura / References

1. P.C.Taylor, S.H. Kosmatka, G.F. Voigt, et al., Integrated Materials and Construction Practices for Concrete Pavement: A State-of-the-Practice Manual. FHWA HIF - 07 – 004, Federal Highway Administration (2006).
2. P.Mackiewicz, A. Szydło, B. Krawczyk, Influence of the construction technology on the texture and roughness of concrete pavements. Roads and Bridges - Drogi i Mosty, **17**(2), 111–126 (2018).
3. N.J. Delatte, Concrete Pavement Design, Construction, and Performance, CRC Press, 2015
4. IMGW, Klimat Polski 2021; https://www.imgw.pl/sites/default/files/2022-04/imgw-pib_raport-klimat-polski_2021_0.pdf.
5. A.Szydło, P. Mackiewicz, R. Wardęga, B. Krawczyk, Katalog typowych konstrukcji nawierzchni sztywnych, Załącznik do zarządzenia Nr 30 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad, Warszawa 2014.
6. GDDKIA, Zarządzenie Nr 23 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 7 czerwca 2018r. w sprawie stosowania Ogólnych Specyfikacji Technicznych w Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad, Załącznik 1 Ogólna Specyfikacja Techniczna D-05.03.04 Nawierzchnia z betonu cementowego, Warszawa 2018.
7. PN-EN 206 +A2:2021-08 Beton - Wymagania, właściwości użytkowe, produkcja i zgodność
8. CEN/TR 16349 Framework for a specification on the avoidance of a damaging Alkali-Silica Reaction (ASR) in concrete, 2012.

9. W. Kurdowski, Kinds of concrete shrinkages, their importance and prevention methods. *Cem. Wapno Beton*, **26**(2), 109-117 (2021). <https://doi.org/10.32047/CWB.2021.26.2.5>
10. PN-B-06265:2022-08 Beton - Wymagania, właściwości użytkowe, produkcja i zgodność - Krajowe uzupełnienie PN-EN 206+A2:2021-08.
11. PKN-CEN/TS 12390-9 Badania betonu - Część 9: Oznaczanie odporności na zamrażanie i rozmrażanie w obecności soli odladzających – Złuszczenie, 2017.
12. Y.Kang, W. Hansen, C. Borgnakke, Effect of air-void system on frost expansion of highway concrete exposed to deicer salt. *International J. Pavement Eng.* **13**(3), 259-266 (2012). <https://doi.org/10.1080/10298436.2011.633169>.
13. A.M.Brandt, J. Kasperkiewicz, (eds.) Metody diagnozowania betonów i betonów wysokowartościowych na podstawie badań strukturalnych. Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN & NATO Scientific Affairs Division, Warszawa 2003, ISBN 83-917926-8-4.
14. M.A.Glinicki, M. Zieliński, 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), 45-52 (2008).
15. M.T.Ley, D. Welchel, J. Peery, J. Leflore, Determining the air-void distribution in fresh concrete with the Sequential Air Method. *Constr. Build. Mater.* **150**, 723-737 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.037>.
16. H.Hall, M.T. Ley, D. Welchel, ... J.M.Gudimettla, M. Praul, Field and laboratory validation of the sequential air method. *Mater. Struct.* **53**(1), 14 (2020).
17. K.Dziedzic, M. Dąbrowski, A. Antolik, A.Glinicki, Characteristics of concrete mix air-entrainment applying the sequential pressure method. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty* **19**, 107 – 118 (2020). <https://doi.org/10.7409/rabdim.020.007>.
18. M.A.Glinicki, D. Józwiak-Niedźwiedzka, A. Antolik, K. Dziedzic, M. Dąbrowski, K. Bogusz, P.Lisowski, Analysis of causes of damage to single-layer concrete highway pavement. *Roads and Bridges-Drogi i Mosty*, **21**, 3, 183-201 (2022). <https://doi.org/10.7409/rabdim.022.011>.
19. GDDKiA, Wytyczne techniczne klasyfikacji kruszyw krajowych i zapobiegania reakcji alkalicznej w betonie stosowanym w nawierzchniach dróg i drogowych obiektach inżynierskich. Warszawa 2019; <https://www.gov.pl/web/gddkia/reaktywnosc-kruszyw>.
20. TP B-StB Technische Prüfvorschriften für Verkehrsflächenbefestigungen - Betonbauweisen: Teil 1.1.09 AKR-Potenzial und Dauerhaftigkeit von Beton (60°C-Betonversuch mit Alkalizufuhr). FGSV-Verl., Köln 2018.
21. Ch.Müller, M. Seidel, M. Böhm, J. Stark, H.-M. Ludwig, K. Seyfarth, AKR-Untersuchungen für Fahrbahndecken aus Beton mit Waschbetonoberfläche. *Straßenbau Heft S 90*, Bergisch Gladbach 2015, ISBN: 978-3-95606-218-6.
22. A. Hafci, L. Turanli, F. Bektas, Effect of ASR expansion on mechanical properties of concrete. *Cem. Wapno Beton*, **26**(1), 12-23 (2021). <https://doi.org/10.32047/CWB.2021.26.1.2>.
23. H.Zeitlhofer, B. Achleitner, G. Maier, C. Bos, M. Peyerl, S. Krispel, ASR testing versus field experience in Austria. 16th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Lisbon 2022, 527-538.
24. R.Breitenbücher, R. Przondziona, B. Meng, E. Krütt, F. Weise, Alkali-Kieselsäure-Reaktion in Betonfahrbahndecken unter Berücksichtigung von Verkehr und Taumitteln. *Straße und Autobahn* **70** (8), 655-664 (2019).
25. X.Liu, Q.Cui, Ch.W.Schwartz, Introduction of mechanistic-empirical pavement design into pavement carbon footprint analysis. *International Journal of Pavement Engineering*, **19**:9, 763-771 (2018).
26. B. Środa, Innovative technologies in the cement industry. *Cem. Wapno Beton*, **26**(5), 444-451 (2021). <https://doi.org/10.32047/CWB.2021.26.5.7>.
27. T.Rudnicki, The impact of the aggregate used on the possibility of reducing the carbon footprint in pavement concrete. *Sustainability*, **14**(24), 16478 (2022); <https://doi.org/10.3390/su142416478>.
28. W.Kubissa, M.Dąbrowski, B. Chojnacki, M.A. Glinicki, Durability of paving concrete produced in a laboratory setting and obtained in field at expressway construction site. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **20**, 4, 397-412 (2021). <https://doi.org/10.7409/rabdim.021.023>.
29. K.Bogusz, M.A. Glinicki, Volumetric stability and elastic properties of concrete subjected to simulated service exposure conditions on road pavements. *Cem. Wapno Beton*, **27**(6), 412-426 (2022). <https://doi.org/10.32047/CWB.2022.27.6.4>.
30. J.Cassiani, G. Martinez-Arguelles, R. Peñabaena-Niebles, S. Keßler, M. Dugarte, Sustainable concrete formulations to mitigate Alkali-Silica reaction in recycled concrete aggregates (RCA) for concrete infrastructure. *Constr. Build. Mater.* **307**, 124919 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124919>.
31. A.Behnood, J.Olek, M.A.Glinicki, Predicting compressive strength of recycled concrete aggregate using M5' model. *Int. Symp. Brittle Matrix Composites* **11**, 28-30 September 2015, IPPT PAN, Warsaw 2015, 381-391.i