

Prof. dr hab. inż. Michał A. Glinicki¹, dr inż. Mariusz Dąbrowski¹, inż. Michał Skrzypczyński²

¹Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa

²Chryso Polska; Warszawa

Wpływ pielęgnacji na właściwości napowietrzonego betonu w górnej warstwie nawierzchni z kruszywem odkrytym – badania modelowe

Influence of curing on the properties of air-entrained concrete in the upper layer of exposed aggregate pavement – modelling study

Słowa kluczowe: beton napowietrzony, charakterystyka porów, mrozoodporność, nawierzchnia drogowa, pielęgnacja, przepuszczalność, warstwa z kruszywem odkrytym

Keywords: air entrained concrete, curing, durability, exposed aggregate pavement, frost resistance, road pavement, permeability, scaling resistance

1. Wprowadzenie

Technologia nawierzchni betonowej z kruszywem odkrytym stosowana jest z powodzeniem w krajach europejskich. Jest to technologia nawierzchni dwuwarstwowej – warstwy są układane i zagęszczane w niewielkim odstępie czasu, tak aby zachować monolityczne połączenie międzywarstwowe. Beton w górnej warstwie nie tylko przyczynia się do spełnienia wymagań nośności całej nawierzchni (1), lecz także zapewnia odporność na oddziaływanie czynników środowiskowych i eksploatacyjnych, (2, 3). Prawidłowo wykonana nawierzchnia z górną warstwą z kruszywem odkrytym zapewnia projektowaną przyczepność kół pojazdów bez nadmiernego wzrostu hałasu wywołanego ich ruchem (4, 5). Wykonanie górnej powierzchni warstwy z kruszywem odkrytym wymaga dużego doświadczenia wykonawcy, a popełnione błędy mogą niekorzystnie wpłynąć na przyczepność kół pojazdów i komfort jazdy lub spowodować przedwczesne zmniejszenie tych właściwości.

Projektowanie składu betonu, z którego ma być wykonana górna warstwa nawierzchni drogowej w przypadku kategorii ruchu KR5-KR7 z kruszywem odkrytym polega na doborze składników i proporcji mieszanki, aby spełnić przede wszystkim wymagania dotyczące klasy środowiska – na przykład XF4 i XM2 według PN-EN 206 (6) oraz mrozoodporności i wytrzymałości (7, 8). Na ogół

1. Introduction

The concrete pavement technology with exposed aggregate is successfully used in European countries. It is a double-layered technology - the layers are laid and compacted at small intervals of time so as to maintain a monolithic interlayer bond. The concrete in the top layer not only contributes to the fulfilment of the load-bearing requirements of the entire pavement (1), but it also meets the requirements of resistance to environmental and operational factors (2, 3). A correctly executed top layer of pavement with exposed aggregate ensures the designed level of friction with wheels of vehicles without an excessive increase in noise caused by traffic (4, 5). Execution of the surface of the top layer with exposed aggregate requires a contractor to be very experienced because any mistakes may adversely affect the skid resistance, driving comfort or even cause a premature reduction of these functional properties.

The designing of the composition of the concrete that is intended for the top layer of motorway pavements with exposed aggregate involves both the selection of components and proportions of a mixture in order to meet the requirements of environmental class [XF4 and XM2 according to PN-EN 206 (6)], as well as the requirements of strength and frost resistance (7, 8). It generally

wymagania dotyczą dużej zawartości cementu około 420 kg/m^3 i małego stosunku $w/c < 0,45$. W przypadku wymagań dotyczących wytrzymałości $f_{\text{t}} \geq 5,5 \text{ MPa}$, (9), stosuje się jeszcze mniejszy stosunek $w/c < 0,40$. Jakość kruszywa grubego określa następująco norma PN-EN 12620 (10): LA_{20} , PSV_{53} , f_1 , $C_{100/0}$, FI_{15} lub SI_{15} , a mrozoodporność z równoczesnym pokryciem powierzchni próbki roztworem soli $\leq 6\%$. Jako kruszywo grube o uziarnieniu do 8 mm stosuje się szczególnie kruszywa łamane ze skał o dużej odporności na ścieranie, zwłaszcza o dużym wskaźniku polerowalności PSV, jak na przykład gabro. Niezbędną konsystencję i właściwe napowietrzenie mieszanki uzyskuje się dzięki równoczesnemu zastosowaniu domieszek: upłynniającej i napowietrzającej (11).

Oprócz projektowania mieszanki, do niewralgicznych etapów technologii układania nawierzchni z kruszywem odkrytym zalicza się przede wszystkim, (12):

- właściwe zagęszczenie betonu w warstwie górnej, przy zachowaniu odpowiedniej charakterystyki porów powietrznych,
- równomierne pokrycie powierzchni preparatem opóźniającym i pielęgnującym,
- usunięcie w odpowiednim czasie warstewki zaczynu z powierzchni przez szczotkowanie,
- wykonanie w odpowiednim czasie szczelin dylatacyjnych.

Pod nazwą preparatu pielęgnacyjnego rozumie się ciekłą domieszkę naniesioną natryskiem na powierzchnię nawierzchni drogowej, stanowiącą powłokę zabezpieczającą przed nadmiernym odparowaniem wody z betonu. Dodatek domieszki opóźniającej i pielęgnacyjnej w zależności od szybkości wiązania betonu w określonych warunkach pogodowych określa się doświadczalnie. W niektórych krajach, na przykład w Belgii i w Anglii, zamiast natrysku stosuje się przykrywanie nawierzchni folią polietylenową, co pozwala uniknąć kłopotów z równomiernym natryskiem w wietrzne dni. Nierówny rozkład tych domieszek może niekorzystnie wpływać na teksturę i właściwości użytkowe warstwy nawierzchni z kruszywem odkrytym. Natryskowe stosowanie domieszek może stanowić problem dla mniej doświadczonych wykonawców.

Jak wykazali Jeong i in. (13), wysychanie powierzchni betonu w pierwszych godzinach po ułożeniu nawierzchni, nawet bez stosowania warstwy z odkrytym kruszywem, może powodować skrócenie funkcjonalności nawierzchni. Przeglądowe prace omawiające ogólne zasady pielęgnacji betonu, zwłaszcza wymaganą długotrwałość pielęgnacji, na przykład Woyciechowskiego i Chudan (14), nie dotyczą jednak nawierzchni z kruszywem odkrytym. Warto także przypomnieć, że zasady pielęgnacji, odnoszące się zwłaszcza do betonu o w/c mniejszym od 0,4, omawia szczegółowo Aitcin (15). Szczelność powłok pielęgnacyjnych według właściwych aprobat technicznych, wynosząca minimum 50%, jest znacznie mniejsza od wymagań specjalistów austriackich lub francuskich, w przypadku tych ostatnich podaje ją norma NF P18-370 (16). Przedstawione podsumowanie stanu techniki stanowiło motywację dla autorów do podjęcia badań właściwości i mikrostruktury betonu z kruszywem odkrytym, poddanego zróżnicowanej pielęgnacji.

requires a high content of cement of approx. 420 kg/m^3 and a low w/c ratio of $< 0,45$, but in the case of high bending strength requirements of $f_{\text{t}} \geq 5.5 \text{ MPa}$, an even lower w/c ratio of $< 0,40$ is used. The required quality of coarse aggregate is determined by the following properties according to PN-EN 12620 (10): LA_{20} , PSV_{53} , f_1 , $C_{100/0}$, FI_{15} or SI_{15} , and also frost resistance in salt $\leq 6\%$. Crushed aggregates made of rocks with high polishing resistance such as gabbro are especially used as coarse aggregates with a grain size of up to 8 mm. The necessary consistency and appropriate air entrainment of the mixture (11) are achieved with the use of plasticizers and air entraining admixtures, which comply with PN-EN 206 compatibility requirements.

In addition to the designing of a mixture, the critical stages of technology of placing a pavement with exposed aggregate include (12):

- the correct compaction of the concrete in the top layer while retaining the proper characteristics of air voids,
- uniform coverage of the surface with retarding and curing agents,
- the removal of a thin layer of mortar from the surface at the appropriate time by brushing,
- uniform coverage of the surface with a curing agent,
- the cutting of expansion joints carried out at the right time.

A curing agent is considered to be a liquid product sprayed on a surface that creates a coating that protects against excessive evaporation of water. The dosage of retarding and curing agents, depending on the rate of cement setting under certain weather conditions, is determined experimentally based on construction experience. In some countries (Belgium, UK), instead of spraying a curing agent, coverage with a polyethylene film is used. This enables problems, such as non-uniform spraying on windy days, to be avoided. The unequal distribution of the retarding and curing agents may adversely affect the texture depth and performance properties of an exposed aggregate layer. The technical specifications do not always explicitly limit the permissible wind speed during the placing of a concrete pavement. The use of spray agents can be a problem for less experienced contractors.

As was proved by Jeong et al. (13), the drying of a concrete surface in the first few hours after laying the pavement (without exposing the aggregate) can have an effect that causes the reduction of the long-term performance of the pavement. Review studies such as (14) that describe the general principles of curing, especially a required length of curing, do not, however, relate to pavements with exposed aggregate. It should be reminding that the rules of curing, especially concrete with low w/c ratio is presented in details by Aitcin (15). The tightness of the curing coatings, amounting to a minimum of 50% according to the relevant technical approvals, is much lower than the tightness required by the Austrian or French NF P18-370 (15) requirements (the closure factor of at least 90% within 6 hours, 85% within 24 hours). The presented summary of the state of technology was the motivation behind undertaking investigations of the properties and microstructure of concrete with exposed aggregate that was subjected to various curing.

2. Program badań doświadczalnych

2.1. Materiały i próbki

Zgodnie z wymaganiami dotyczącymi składu betonu zaprojektowano napowietrzone mieszanki betonowe o składzie podanym w tablicy 1. Zastosowano dwa rodzaje cementu CEM I oraz CEM III/A, których skład i właściwości przedstawiono w tablicy 2. Wybrano także dwa różne stosunki w/c, wynoszące 0,34 i 0,37. Mieszanka betonowa z CEM I o w/c=0,34 stanowiła beton odniesienia. Dwie pozostałe mieszanki zostały zaprojektowane w celu sprawdzenia wpływu zmiany składu i rodzaju cementów oraz różnych stosunków w/c na właściwości betonu. Chociaż CEM III/A nie jest stosowany w warstwie nawierzchni z odkrytym kruszywem, wybór uzasadniała celowość sprawdzenia efektów pielęgnacji w przypadku cementu o małej zawartości klinkieru, wynoszącej około 50%. Przyjęcie drugiego w/c na poziomie 0,37 wynikało z utrzymania lepszej konsystencji mieszanki betonowej przez dłuższy czas.

Wykonano trzy rodzaje próbek do badań: płytki o wymiarach 800x500x80 mm, beleczki o wymiarach 150x150x700 mm, kostki sześciennie o boku 150 mm i 100 mm. Po zagęszczeniu mieszanki w formach płytkowych na stole wibracyjnym, ich powierzchnię ręcznie zacierano i pokrywano warstwą domieszki opóźniającej wiązanie Chryso Road TSR 02, w ilości około 0,1 kg/m² betonu. Po odpowiednim czasie twardnienia cienką warstwę zaprawy usuwano za pomocą myjki ciśnieniowej. Wynik tego toku postępowania, naśladującego technologię wykonania warstwy nawierzchni drogowej z kruszywem odkrytym, przedstawiono na rysunku 1. Widoczne na powierzchni płytki betonowej ziarna kruszywa zostały pozbawione zaprawy do głębokości około 1 mm.

Formy płytkowe z betonem, bezpośrednio po wypełnieniu mieszanką, umieszczono w pomieszczeniu laboratoryjnym o wilgotności względnej ok. 65% w temperaturze 20-22°C. Jedną z dwóch płytek pokryto domieszką pielęgnacyjną Chryso Cure HPE, o współczynniku zamykania porów wynoszącym co najmniej 90% w ciągu 6 godzin i 85% w ciągu 24 godzin. Natomiast w przypadku drugiej płytki nie zastosowano tej pielęgnacji. Po 2 dniach próbki rozformowano i przechowywano w tym samym pomieszczeniu laboratoryjnym przez 88 dni, a więc razem przez 90 dni. W przypadku

Tablica 1 / Table 1

SKŁAD MIESZANKI BETONOWEJ

CONCRETE MIX DESIGN

Beton/ Concrete	Cement	Zawartość / Content, kg/m ³					
		Cement	Woda Water	Kruszywo / Aggregate		SP ³⁾	AEA ⁴⁾
				Drobne / Fine ¹⁾	Grube / Coarse ²⁾		
C I_0.34	CEM I 42.5N SR3/NA	430	145	553	1326	3.0	0.9
C III_0.34	CEM III/A 42.5N LH/HSR/NA		145	553	1326	3.0	0.9
C I_0.37	CEM I 42.5N SR3/NA		160	542	1298	1.7	0.7

¹⁾piasek/natural sand, 0-2mm; ²⁾ grys łamany gabro 2-5mm i 4-8mm/crushed gabbro rocks 2-5 mm and 4-8 mm;

³⁾superplastyfikator/superplasticizer Chryso Plast Omega 132;

⁴⁾ domieszka napowietrzająca/air entraining agent Chryso Air A.

2. Program of experimental tests

2.1. Materials and samples

The air entrained concrete mixtures, with their composition specified in Table 1, were designed according to prescriptive requirements. Two cements CEM I and CEM III/A cement (composition and properties in Table 2) with two different w/c ratios equal to 0.34 and 0.37 were used. The concrete mixture of CEM I with w/c ratio of 0.34 was the reference concrete. The other two mixtures were designed in order to test the effect of changes in the composition and properties of the cement, and also any changes in the w/c ratio. Although CEM III/A is not used in the pavement layer with exposed aggregates, its choice was justified with the intention to test the effects of curing in the case of the reduction of clinker content to 50%. The increase in the w/c ratio to 0.37 was justified with the intention to maintain the consistency of the mixture for a longer period of time.

Plate samples with dimensions of 800x500x80 mm, beams with dimensions of 150x150x700 mm and cubic samples with dimensions of 150 mm and 100 mm were made. After compaction of the mixture in plate moulds on a jolting table, the surface was manually trowelled and covered with the retarding agent Chryso Road TSR 02 added of about 0.1 kg/m². After an appropriate hardening time, a thin layer of mortar was removed using a pressure washer. The result of the operations that imitate the placing of the layer with



Rys. 1. Powierzchnia próbki betonowej z odkrytym kruszywem

Fig. 1. Exposed aggregate surface of concrete specimen

normowych próbek sześciennych i beleczek nie zastosowano technologii odkrycia kruszywa; próbki te rozformowano po upływie doby i przechowywano w komorze klimatycznej o wilgotności względnej 95%, w temperaturze $20 \pm 2^\circ\text{C}$, zgodnie z wymaganiami normowymi.

2.2. Metody badań

Badania wytrzymałości na ściskanie, na rozciąganie przy zginaniu oraz na rozciąganie przy rozłupywaniu wykonano zgodnie z wymaganiami normowymi. Pomiary prowadzono na trzech próbkach z każdego rodzaju betonu.

Badania porów powietrznych przeprowadzono na zglądach polewanych, wyciętych z próbek sześciennych. Pomiary wykonano za pomocą mikroskopowej metody do automatycznej analizy rozkładu porów w betonie (17), zachowując długość linii trawersowej 2400 mm zgodnie z PN-EN 480-11 (18), przy zmniejszonej do 80 mm wysokości przekroju próbek.

Szybkość powierzchniowej absorpcji wody oznaczono zgodnie z ASTM C1585 (19). Próbki w kształcie dysku o średnicy 100 mm i wysokości 50 mm, wycięte z próbek płytkowych z eksponowanym kruszywem po trzech miesiącach dojrzewania w pomieszczeniu laboratoryjnym o wilgotności względnej około 65%, w temperaturze $20\text{--}22^\circ\text{C}$, umieszczono w komorze klimatycznej w powietrzu w temperaturze 50°C i wilgotności względnej 80%, na 3 dni. Następnie każdą próbkę przechowywano przez 15 dni w szczelnie zamkniętych pojemnikach w temperaturze $20\text{--}22^\circ\text{C}$, zgodnie z wymaganiami normowymi. Pomiar szybkości absorpcji wody przeprowadzono na próbkach zanurzonych w wodzie na głębokość 3 ± 1 mm. Początkową szybkość absorpcji (S_i) wyznaczono na podstawie pomiaru masy wody zaabsorbowanej w ciągu pierwszych 6 godzin trwania pomiaru, jako średnią z oznaczeń na trzech próbkach.

Badanie współczynnika migracji jonów chlorkowych przeprowadzono zgodnie z NT Build 492, z zastosowaniem zewnętrznego pola elektrycznego (20). Pomiary przeprowadzono na próbkach o średnicy 100 mm i wysokości 50 mm, wyciętych z próbek płytkowych z eksponowanym kruszywem, stosując trzy próbki do wyznaczenia średniego współczynnika migracji, w stanie nieustalonym D_{nssm} .

Mrozoodporność określono stosując 200 cykli zamrażania i rozmrażania według PN-B-06250 (21), na próbkach twardniejących przez 56 dni. Masę odprysków zmierzono zgodnie z CEN/TS 12390-9 (22) na trzech próbkach o wymiarach $150 \times 150 \times 80$ mm. Powierzchnia betonu z eksponowanym kruszywem została pokryta warstwą 3% roztworu NaCl. Ocenę odporności na powierzchniowe złuszczenia po 56 cyklach zamrażania i rozmrażania przeprowadzono zgodnie z normą szwedzką SS 137244 (23).

3. Wyniki badań i ich ocena

3.1. Podstawowe właściwości mieszanki i betonu

Wszystkie mieszanki betonowe wykazały zbliżoną gęstość w przedziale $2435\text{--}2400$ kg/m^3 oraz podobne napowietrzenie w zakresie

exposed aggregate is shown in Fig. 1. The grains of aggregate that are visible on the surface were exposed to a depth of about 1 mm.

Immediately after filling with the mix the plate moulds with concrete were placed in a laboratory at RH of about 65% and at temperature of $20\text{--}22^\circ\text{C}$. One of the two identical plates was covered with the Chryso Cure HPE (NF P18-370) curing agent, while the second plate was left without any treatment. After 2 days the samples were taken from the moulds and stored in a dry laboratory to reach the age of 90 days. Standard cubic samples and beams were made without exposing the aggregate; they were demoulded after one day and cured in a curing chamber at RH min. 95% and at temperature of $20 \pm 2^\circ\text{C}$ in accordance with the standard requirements.

2.2. Test methods

According to the relevant PN-EN standards, compressive strength, bending tensile strength and splitting tensile strength tests were performed. Strength was measured on three samples of each type of concrete.

The air void characteristics was determined on polished samples that were cut from the cubic samples. Using a microscopic system for automated pore distribution analysis in concrete (17), the measurements were made keeping the traverse length of 2400 mm according to PN-EN 480-11 (18), at a reduced cross-section height of 80 mm.

The surface water absorption rate was determined according to ASTM C1585 (19). Disc shape samples with a diameter of 100mm and a height of 50mm, which were cut from the plate sample with exposed aggregate, after 3 months of curing in laboratory room at RH of about 65% and a temperature of $20\text{--}22^\circ\text{C}$, were placed in a CST climate chamber at an air temperature of 50°C and humidity RH of 80% for a period of 3 days. Each sample was then stored individually for 15 days in sealed containers at a temperature of $20\text{--}22^\circ\text{C}$ in accordance with standard requirements. The water absorption rate was measured on the samples immersed in water up to a height of 3 ± 1 mm their bottom. The initial absorption rate (S_i) was determined as the mean value from the measurements of three samples by measuring the weight of water absorbed during the first 6 hours of the test.

The chloride ion permeability test was performed using the electromigration method according to NT Build 492 (20). Measurements were carried out on samples with a diameter of 100 mm and a height of 50mm, which were cut from the plate samples with exposed aggregate. A mean value of chloride migration coefficient D_{nssm} was determined on the basis of the results from three of the samples.

Internal frost resistance was determined using the traditional "F200" method, i.e. with 200 freeze and thaw cycles on 56-day old samples according to PN-B-06250 (20). Frost salt scaling resistance was determined according to CEN/TS 12390-9 (21) on three samples with dimensions of $150 \times 150 \times 80$ mm. The concrete surface with exposed aggregate was subjected to a 3% NaCl solution. Evaluation of surface scaling resistance after 56

Tablica 2 / Table 2

SKŁAD I WŁAŚCIWOŚCI CEMENTU

PROPERTIES OF CEMENTS USED

Rodzaj cementu Type of cement	Skład/Composition, %					Wytrzymałość na ściskanie Compressive strength, MPa			
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	LOI	2 dni / 2 days	7 dni / 7 days	28 dni / 28 days	90 dni / 90 days
CEM I 42.5N -SR3/NA ¹	65.7	21.6	3.7	3.5	1.56	24.2	37.2	56.0	60.2
CEM III/A 42.5N LH/HSR/NA ¹	52.0	27.9	5.55	1.63	1.95	14.2	n.d. ²	50.3	n.d. ²

¹ Cementy specjalne z dwóch zakładów/Special cements from two plants

² Nie oznaczone/Not determine

od 5,3% do 6% [tablica 3]. Projektowany opad stożka 50 mm został w przybliżeniu osiągnięty, ale po upływie 70 minut stwierdzono wyraźny spadek konsystencji, dość typowy w przypadku mieszanek o małym w/c. W przypadku większego w/c stwierdzono korzystne, chociaż niewielkie, przedłużenie okresu stałej konsystencji.

Charakterystyka porów powietrznych w betonie, której znaczenie omówiono między innymi w pracach (24, 25), została przedstawiona w tablicy 4 przy przyjęciu oznaczeń zgodnych z PN-EN 480-11:

A- całkowita zawartość powietrza w stwardniałym betonie;

α - powierzchnia właściwa porów powietrznych;

• - wskaźnik rozmieszczenia porów;

A_{300} - zawartość mikroporów (podana norma nie stosuje klasyfikacji IUPAC).

Wyniki wskazują na zbliżoną strukturę porów w trzech seriach próbek. Rozkład wielkości porów powietrznych w betonie miał powierzchnię właściwą α wynoszącą około 33 mm⁻¹ oraz wskaźniki \bar{L} w granicach 0,13-0,14 mm i A_{300} w zakresie 3,6-3,9%. Zgodność z wymaganiami wieloletniej trwałości w środowisku XF4, a mianowicie $\bar{L} \leq 0,18$ mm, $A_{300} \geq 1,8\%$, wskazywała także na prawidłowe napowietrzenie. O korzystnej strukturze porów powietrznych świadczą również proporcje zawartości mikroporów A_{300} do całkowitej zawartości porów A, przekraczające 50% we wszystkich trzech rodzajach betonu. W odróżnieniu od wyników podanych w pracy Giergicznego i in. (26), nie stwierdzono pogorszenia struktury porów w betonie z cementu CEM III/A w porównaniu z betonem z cementu CEM I, co pozytywnie świadczy o efektywności zastosowanych domieszek.

Pomiary wytrzymałości betonu na ściskanie przedstawione w tablicy 5 wykazują znaczne różnice po 7 dniach twardnienia, sięgające 17 MPa. Po upływie 28 dni twardnienia wytrzymałość betonu o w/c = 0,34 jest zbliżona, mieści się w przedziale 64-67 MPa. Zwiększenie stosunku w/c do 0,37 spowodowało względne zmniejszenie wytrzymałości o około 12% po 7 dniach twardnienia i około 4% po 28 dniach twardnienia. Średnie wartości wytrzymałości na zginanie mieściły się w przedziale od 7,8 do 8,6 MPa (tablica 5). Największa różnica wytrzymałości na zginanie, wynosząca 9%, była związana ze zmianą rodzaju cementu, natomiast wzrost w/c wywołał względne zmniejszenie wytrzymałości o 6%. Największą wytrzymałość na rozłupywanie wykazały próbki betonu C III_0.34, odpowiednio przewyższając o 0,6 MPa i 1 MPa wytrzymałość

Tablica 3 / Table 3

WŁAŚCIWOŚCI MIESZANKI BETONOWEJ

PROPERTIES OF FRESH CONCRETE MIX

Beton Concrete series	Opad stożka Slump mm		Zawartość powietrza Air content %	Gęstość Density kg/m ³
	10 min	70min		
C I_0.34	40	20	5.3	2440
C III_0.34	40	15	6.0	2435
C I_0.37	45	30	5.7	2435

Tablica 4 / Table 4

CHARAKTERYSTYKA PORÓW POWIETRZNYCH W BETONIE STWARDNIAŁYM

AIR VOID CHARACTERISTICS OF HARDENED CONCRETE

Beton Concrete series	Charakterystyka porów powietrznych/ Air void characteristics			
	A %	α mm ⁻¹	\bar{L} mm	A_{300} %
C I_0.34	6.06	32.61	0.14	3.63
C III_0.34	6.31	33.02	0.13	3.90
C I_0.37	6.27	33.78	0.13	3.66

freeze-thaw cycles was carried out in accordance with the Swedish Standard SS 137244 (22).

3. Test results and their evaluation

3.1. Basic properties of the mixture and concrete

The results of the concrete mixture tests that are given in Table 3 show that all the mixtures have a similar density of about 2435-2400 kg/m³ and approximate air content in a range of 5.3-6%. The projected slump of 50 mm was approximately obtained, but after 70 minutes there was a noticeable drop in consistency, which is quite typical for mixtures with low w/c ratios. With an increase in w/c ratio, a beneficial although not too big extension of consistency stability over time was observed.

Tablica 5 / Table 5

WYTRZYMAŁOŚĆ PRÓBEK BETONU: NA ŚCISKANIE W WIEKU 7 I 28 DNI, NA ROZCIĄGANIE PRZY ZGINANIU ORAZ NA ROZCIĄGANIE PRZY ROZŁUPYWANIU W WIEKU 28 DNI

CONCRETE STRENGTH DATA: THE COMPRESSIVE STRENGTH AFTER 7 AND 28 DAYS OF CURING; FLEXURAL AND SPLITTING STRENGTH AFTER 28 DAYS OF CURING

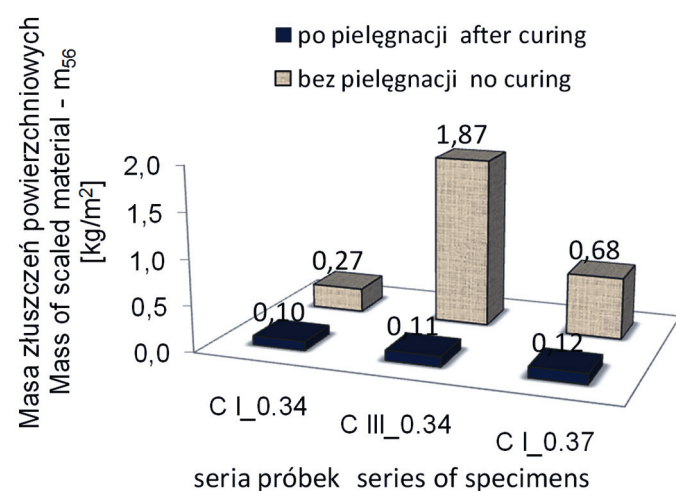
Beton Concrete	Wytrzymałość na ściskanie po Compressive strength at the age of, MPa		Wytrzymałość na zginanie Flexural strength, MPa	Wytrzymałość na rozłupywanie Splitting strength, MPa
	7 dni/days	28 dni/days		
C I_0.34	57.6±0.6	63.5±0.7	8.6±0.6	4.4±0.2
C III_0.34	39.2±0.6	66.8±0.6	7.8±0.1	4.9±0.3
C I_0.37	49.8±0.3	60.7±0.5	8.1±0.2	3.9±0.3

betonu z cementu CEM I przy jednakowym w/c i zwiększonym do 0,37. Wymagania dotyczące wytrzymałości betonu na nawierzchnie drogowe, odpowiednie dla najwyższej kategorii ruchu KR7, (9), są spełnione z zapasem przez wszystkie trzy rodzaje betonu.

Po 200 cyklach zamrażania i rozmrażania próbek nie stwierdzono wyraźnych zmian ich masy (tablica 6). Wpływ zwiększenia w/c na spadek wytrzymałości na ściskanie wskutek zamrażania i rozmrażania okazał się większy niż wpływ zmiany rodzaju cementu: spadek wytrzymałości zwiększył się z 4% do 12% wskutek zwiększenia stosunku wodno-cementowego. Kryterium stopnia mrozoodporności F200 (11) w odniesieniu do trzech rodzajów betonu zostało spełnione z dużym zapasem.

3.2. Wskaźniki trwałości betonu w warstwie z kruszywem odkrytym

Zróznicowanie pielęgnacji warstwy betonu z kruszywem odkrytym wywołało znaczne pogorszenie wskaźników przepuszczalności wody oraz odporności na powierzchniowe złuszczenia. Wyniki doświadczalne przedstawiono w tablicy 7 i na rysunku 2. Pomia-



Rys. 2. Wpływ pielęgnacji na odporność na powierzchniowe złuszczenia betonu w warstwie z eksponowanym kruszywem

Fig. 2. Influence of curing condition on the scaling resistance of exposed aggregate concrete

Tablica 6 / Table 6

SPADEK MASY PRÓBEK I WYTRZYMAŁOŚCI NA ŚCISKANIE PO 200 CYKLACH ZAMRAŻANIA-ROZMRAŻANIA ZGODNIE Z PN-B-06250

MASS REDUCTION AND COMPRESSIVE STRENGTH REDUCTION AFTER 200 CYCLES OF FREEZING AND THAWING ACCORDING TO PN-B-06250

Beton Concrete series	Ubytek masy Mass loss, %	Spadek wytrzymałości na ściskanie Reduction of compressive strength %
C I_0.34	-0.1	3.6
C III_0.34	-0.1	5.6
C I_0.37	-0.2	12.3

The characteristics of air voids in concrete, the importance of which was described in studies (23, 24), is presented in Table 4 using the following notation according to PN-EN 480-11:

A - the total air content in hardened concrete,

α - the surface area of the air pore system,

\bar{L} - the spacing factor,

A_{300} - the content of micropores with a diameter of less than 300 μm (the standard does not follow IUPAC classification).

The results indicate a similar structure of pores in the three sample series. The air void size distribution is determined by the specific surface α of about 33 mm^{-1} and the spacing factor \bar{L} of 0.13-0.14 mm and A_{300} from 3.6 to 3.9%. The compliance with the criteria for long-term durability in XF4 aggressive environment, i.e. $\bar{L} \leq 0.18$ mm, $A_{300} \geq 1.8\%$, is the indication of proper air voids distribution. The beneficial characteristics of air voids is also confirmed by the proportions of the content of micropores to the total voids content, which exceed 50% in all three types of concrete. Unlike the results given in paper (25), there was no deterioration in the voids characteristics due to the change of CEM I to CEM III/A, which confirms the effectiveness of the set of admixtures.

The compressive strength measurements presented in Table 5 show significant differences in the strength after 7 days old con-

Tablica 7 / Table 7

WSKAŹNIKI PRZEPUSZCZALNOŚCI BETONU W WARSTWIE Z EKSPONOWANYM KRUSZYWEM: POCZĄTKOWA SZYBKOŚĆ ABSORPCJI WODY S_i ORAZ WSPÓŁCZYNNIK MIGRACJI JONÓW CHLORKOWYCH D_{nssm}

PERMEABILITY INDICATORS FOR EXPOSED AGGREGATE CONCRETE SPECIMENS: INITIAL RATE OF WATER ABSORPTION S_i AND CHLORIDE MIGRATION COEFFICIENT D_{nssm}

Ozn. betonu Concrete series	Początkowa szybkość absorpcji / Initial rate of absorption S_i $10^{-4} \text{ mm/s}^{1/2}$		Współczynnik / Coefficient D_{nssm} $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	
	po pielęgnacji / after curing	bez pielęgnacji / without curing	po pielęgnacji / after curing	bez pielęgnacji / without curing
C I_0.34	5.1±0.8	16.2±1.1	8.70±1.7	16.4±0.3
C III_0.34	4.3±0.2	9.5±0.2	2.2±0.2	3.8±0.8
C I_0.37	6.4±1.5	26.1±3.4	11.8±0.8	14.9±1.2

ry szybkości absorpcji wody wykazały niewielkie zróżnicowanie S_i w przypadku właściwie pielęgnowanych powierzchni betonu. W przypadku braku pielęgnacji stwierdzono znaczny wzrost S_i ; dwukrotny w przypadku CEM III/A i 3,5- krotny przy zwiększonym stosunku w/c. Interesująca zmiana dotyczy wpływu żużla wielkopieczowego jako składnika cementu: stwierdzono najmniejszą początkową szybkość absorpcji $4 \cdot 10^{-4} \text{ mm/s}^{1/2}$, o 40% niższą niż w przypadku betonu referencyjnego z CEM I. Brak właściwej pielęgnacji miał większe znaczenie w przypadku betonu o większym stosunku w/c; wówczas początkowa szybkość absorpcji była aż 5 razy większa niż w przypadku właściwie pielęgnowanego betonu referencyjnego.

Na podstawie pomiaru współczynnika migracji D_{nssm} stwierdzono znaczny wpływ cementu hutniczego zmniejszający migrację jonów chlorkowych w betonie. Zastosowano skalę oceny odporności betonu na penetrację jonów chlorkowych na podstawie współczynnika D_{nssm} znaną z monografii Tanga i in. (27). Odporność betonu z cementem CEM I określono jako „dopuszczalną” ($8 < D_{nssm} < 16 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$), niezależnie od stosunku w/c. Zróżnicowanie współczynnika D_{nssm} wyznaczonego na próbkach pielęgnowanych i bez pielęgnacji okazało się niewielkie, bliskie rozrzutu wyników, w przypadku serii C III_0.34 i C I_0.37. W przypadku betonu referencyjnego, z CEM I przy najmniejszym w/c, stwierdzono dwukrotny wzrost współczynnika of D_{nssm} wskutek braku pielęgnacji.

Podana wcześniej pozytywna ocena rozkładu wielkości porów w betonie napowietrzonym pozwala na przewidywanie dużej odporności betonu na powierzchniowe złuszczenia wskutek oddziaływania mrozu i soli odladzającej (27). Bezpośrednie sprawdzenie mrozoodporności powierzchniowej na podstawie masy złuszczeń powierzchniowych [rysunek 2] potwierdza przewidywaną dużą odporność w przypadku dobrze pielęgnowanych próbek betonu. Całkowita masa złuszczeń po 56 cyklach zamrażania i rozmrażania mieściła się w granicach od 0,10 do 0,12 kg/m^2 . Stosując skalę oceny według szwedzkiej normy SS 137244 trzy betony o różnym składzie, niezależnie od rodzaju cementu i stosunku w/c, kwalifikują się do klasy „bardzo dobrej” odporności na powierzchniowe złuszczenia. Jednakże brak pielęgnacji powoduje znaczne zmniejszenie

crete of hardening, reaching 17 MPa. After 28 days, the strength of concrete at w/c=0.34 is similar, in the range from 64 to 67 MPa. The increase of w/c ratio to 0.37 resulted in a relative decrease in strength of about 12% after 7 days and about 4% after 28 days of hardening. Average values of bending strength were in the range from 7.8 to 8.6 MPa (table 5). The highest difference in bending strength of 9% was related to the change of cement type. The increase of w/c resulted in a relative reduction of bending strength by 6%. The highest splitting strength has C III_0.34 concrete, higher by 0.6 MPa and 1 MPa than the strength of CEM I concrete with the same and increased w/c, respectively. The strength requirements, which are suitable for the highest traffic category KR7 (9), are fully met for all three types of concrete.

After 200 cycles of freezing and thawing of the samples, there were no significant changes in the sample mass (Table 6). The effect of an increase in the w/c ratio on the change in compressive strength was higher than the effect of changing the cement type: the drop in strength was increased from 4 to 12% due to w/c increase. The criterion for F200 class of frost resistance (11) was easily achieved for three tested concrete mixes.

3.2. Indicators of the durability of concrete in a layer with exposed aggregate

Differentiation of the curing of the concrete layer with exposed aggregate caused a significant deterioration of both the permeability index of liquid media and also the resistance to surface scaling. The results of experiments are shown in Table 7 and Fig. 2. Water absorption rates show a slight variation of S_i in the case of appropriate curing of concrete surfaces.

In the case of the lack of curing, a significant increase of S_i was found: double for CEM III/A and 3.5 times for an increased w/c ratio. An interesting observation can be made for the role of blast furnace slag as a cement component - the lowest initial absorption rate of $4 \cdot 10^{-4} \text{ mm/s}^{1/2}$ was found, which is 40% lower than in the case of the reference concrete of CEM I. The lack of appropriate curing was more significant for the concrete with the higher w/c ratio. The initial absorption rate was then 5 times higher than in the case of the well cured reference concrete.

odporności betonu. W przypadku betonu z CEM III/A stwierdzono wzrost m_{56} do 1,9 kg/m², co odpowiada klasie "niedostatecznej" odporności na powierzchniowe złuszczenia. Brak pielęgnacji w przypadku betonu o stosunku w/c = 0,37 spowodował wzrost masy złuszczeń do 0,7 kg/m², której odpowiada jedynie kategoria "dopuszczalnej" odporności na powierzchniowe złuszczenia. Zmierzony znaczny przyrost masy złuszczeń w przypadku betonu z cementu hutniczego można przypuszczalnie przypisać zwiększonej karbonatacji betonu, jak to sugerowano w pracy Giergiczego i in. (26). Beton z tego cementu okazał się najbardziej podatny na brak pielęgnacji, co potwierdza szczególne jej znaczenie w przypadku stosowania cementu z dodatkami mineralnymi (28), z uwagi na wolniejszy przebieg hydratacji tych składników.

4. Dyskusja

Do interpretacji wyników niezbędne jest odniesienie do pojęcia tekstury nawierzchni, która ma znaczny wpływ na jej właściwości przeciwpoślizgowe, jak też na hałaśliwość. Odkrywanie kruszywa powoduje, że na powierzchni betonu powstają nierówności: tzw. makroteksturę tworzą nierówności spowodowane wystającymi ziarnami kruszywa, tzw. mikroteksturę natomiast tworzą drobne nierówności, spowodowane chropowatością powierzchni wystających grubych ziaren. Pomiar profilu nierówności metodą objętościową zgodnie z PN-EN 13036-1 (29) umożliwia wyznaczenie średniej głębokości tekstury MTD. Zgodnie z licznymi doświadczeniami austriackimi i niemieckimi wymaga się, aby średnia głębokość tekstury nowej nawierzchni betonowej wynosiła około 0,9 ± 0,1 mm. Ponieważ wskutek działania mrozu i roztworów soli odladzającej na beton powstają złuszczenia powierzchniowe, z upływem lat następuje erozja istniejących nierówności nawierzchni. Wykorzystując opisane wcześniej wyniki badań modelowych można prognozować zmiany średniej głębokości tekstury. Przyjmując gęstość zaprawy około 2100 kg/m³ wyznaczona doświadczalnie masa złuszczeń powierzchniowych 1,87 kg/m² odpowiada objętości złuszczonej warstwy materiału o grubości 0,9 mm na powierzchni 1 m². Zatem mała odporność betonu na powierzchniowe złuszczenia przyczyniłaby się do dwukrotnego zwiększenia średniej głębokości tekstury w porównaniu do nawierzchni nowej. W konsekwencji można oczekiwać zarówno zwiększenia hałaśliwości nawierzchni, jak również zmniejszenia komfortu jazdy, określanego wskaźnikiem równości IRI, (30). Takich negatywnych skutków można więc oczekiwać przy niewłaściwej pielęgnacji nawierzchni z kruszywem odkrytym, na przykład nierównomiernym pokryciu lub miejscowym braku pokrycia nawierzchni domieszką pielęgnacyjną.

Odpowiedni skład betonu o projektowanej dużej wytrzymałości na rozciąganie, właściwej w środowisku XF4 i XM2, uzyskuje się przy zastosowaniu kruszywa ze skały bardzo twardej, o dużej odporności na ścieranie, wraz z jednoczesnym zmniejszeniem stosunku w/c i prawidłowym napowietrzeniem betonu. Aby uzyskać dużą odporność na złuszczenia powierzchniowe, niezbędna jest staranna ochrona przed wczesnym odparowaniem wody z ułożonej mieszanki. Teoretycznie przy w/c mniejszym od 0,40 pojawia się zagrożenie tak zwanym samoosuszeniem (31), prowadzącym

On the basis of the measurement of migration coefficient D_{nssm} , a significant influence of slag cement on the inhibition of the penetration of chloride ions into the concrete was found. The scale of evaluating the resistance of concrete against the penetration of chloride ions was used on the basis of the coefficient D_{nssm} , which is known from Giergiczny et al (26) paper. The resistance of concrete with CEM I was classified as "acceptable" ($8 < D_{nssm} < 16 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$), irrespective of the w/c ratio. The difference of the coefficient D_{nssm} , which was determined on samples that were both cured and not cured, was low for series C III_0.34 and C I_0.37. In the case of the reference concrete containing CEM I with the lower w/c ratio, a double increase in the coefficient D_{nssm} was found due to a lack of curing.

The aforementioned positive assessment of the pore size distribution in air entrained concrete enables a high concrete resistance to surface scaling due to the effects of frost and de-icing salt being predicted (27). Direct verification of surface frost resistance on the basis of the mass of scaled-off particles (Fig. 2) confirms the predicted high resistance in the case of well-cured concrete samples. The total weight of scaled-off material after 56 freezing and thawing cycles ranged from 0.10 to 0.12 kg/m².

Using the scale of evaluation according to the Swedish Standard SS 137244, the concrete made according to the three recipes, irrespective of cement type and w/c ratio, qualifies as having a "very good" class of surface scaling resistance. However, there is a lack of curing resulted in a significant reduction in concrete durability. In the case of concrete with CEM III/A cement, an increase of m_{56} to 1.9 kg/m² (class of "insufficient" resistance to surface scaling) was observed.*

The lack of curing in the case of the concrete with a w/c ratio equal to 0.37 resulted in an increase in the mass of scaled material to 0.7 kg/m², which only corresponds to the category of "acceptable" resistance to surface scaling. The found significant increase in the mass of scaled-off material in the case of the concrete with slag cement can be probably associated with the increase in concrete carbonation, as was suggested in paper of one of the authors (25). Concrete with this type of cement proved to be the most susceptible to the insufficient curing, which confirms its particular importance in the case of the use of cement with mineral additives (28). This is due to the slower hardening of these additives.

4. Discussion

For the interpretation of the presented results it is necessary to refer to the notion of pavement texture, that has a significant influence on the skid resistance and traffic noise. The exposure of aggregates increases the roughness of pavement: macro-texture is caused by protruding aggregate grains, micro-texture is related to surface roughness of large grains. The roughness profile me-

*Editor remark: The influence of different factors of concrete production and curing are described in the book: „Durability of Concrete in Cold Climates” by M. Pigeon and R. Plean; Taylor & Francis, 1995

zarówno do powstawania spękań, jak też zahamowania postępu hydratacji. Jak stwierdzono w pracy Kurdowskiego, Witka i Śliwińskiego (32), stosunkowo mały stopień hydratacji cementu okazał się korzystny w przypadku betonu w nawierzchni autostrady, który wykazał dużą trwałość w siedemdziesięcioletnim okresie eksploatacji. W warstwie z kruszywem odkrytym ważną jest specyficzna forma odporności kruszywa na ścieranie, tj. duża odporność na polerowanie PSV, związana z wspomnianą wcześniej mikroteksturą nawierzchni.

Obserwacje w skali laboratoryjnej nie obejmują ważnych czynników występujących w skali przemysłowej. Z powodu dużego modułu powierzchniowego beton nawierzchniowy jest narażony na przyspieszone wysychanie, zwłaszcza w sprzyjających temu warunkach pogodowych. W konsekwencji pojawia się zagrożenie wystąpieniem spękań wskutek skurczu plastycznego. Z literatury znane są opinie, że najbardziej narażona na błędy pielęgnacji jest warstwa betonu o grubości 2-3 cm od górnej powierzchni, niższe warstwy raczej nie (30). Zaobserwowano m.in. ośmio do dziesięciokrotny wzrost przepuszczalności gazu wskutek braku pielęgnacji, tj. znacznie większy niż dwu do cztero-krotny wzrost S_i stwierdzony w badaniach autorów. Spękania w tej warstwie mogą inicjować rozwój uszkodzeń objawiających się przedwczesną utratą trwałości eksploatacyjnej, zwłaszcza zmniejszonej odporności na ścieranie nawierzchni. Zagadnienie pielęgnacji betonu o stosunku w/c około 0,35, jaki praktycznie stosuje się w przypadku górnej warstwy nawierzchni z kruszywem odkrytym, wymaga dalszych badań.

5. Wnioski

Przeprowadzone badania laboratoryjne betonu napowietrzonego, wykonanego metodą modelującą wykonanie górnej warstwy nawierzchni drogowej w przypadku kategorii ruchu KR5-KR7 z kruszywem odkrytym, pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków:

1. Przy małym stosunku w/c (0,34 i 0,37) oraz zastosowaniu cementów CEM I 42,5N i CEM III/A 42,5N beton wykazał po 28 dniach wytrzymałość na ściskanie 61-67 MPa, na zginanie 7,9-8,6 MPa i na rozłupywanie 3,9-4,9 MPa. Przekracza to znacznie wymagania dla betonu nawierzchniowego.
2. Prawidłowy rozkład wielkości porów powietrznych w betonie, o powierzchni właściwej porów α około 33 mm^{-1} oraz wskaźniku \bar{L} w granicach 0,13-0,14 mm i A_{300} w przedziale 3,6-3,9%, uzyskano niezależnie od w/c i rodzaju cementu.
3. Zróżnicowanie stosunku w/c (0,34 i 0,37) oraz rodzaju cementu (CEM I 42,5N i CEM III/A 42,5N) w prawidłowo napowietrzonym betonie nie wpłynęło zasadniczo na mrozoodporność. Zmniejszenie wytrzymałości po 200 cyklach zamrażania i rozmrażania mieściło się w granicach od 4% do 12%. Najmniejszy spadek wytrzymałości stwierdzono przy zastosowaniu CEM I, w/c=0,34 i prawidłowym napowietrzeniu.
4. Prawidłowo napowietrzona warstwa betonu z kruszywem odkrytym, pielęgnowana za pomocą powłoki o szczelności >85%,

asurement according to PN-EN 13036-1 (29) enables to determine the mean texture depth MTD. According to numerous Austrian and German experiences the required average texture depth should be about $0.9 \pm 0.1 \text{ mm}$. Because of aggressive action of frost and deicing salts on concrete the pavement surface is subjected to scaling and in a course of its exploitation the surface is eroded. Referring to the presented data on frost salt scaling it is possible to predict roughly changes in mean texture depth. Assuming the mortar density is about 2100 kg/m^3 , the experimentally determined mass of scaled-off material of 1.87 kg/m^2 equals to the volume of the scaled layer with a thickness of about 0.9 mm, spread evenly over a surface of 1 m^2 . Therefore a low frost-salt scaling resistance of concrete would result in doubling the mean texture depth in respect to new pavement. As a result, an increase in the noise of the pavement traffic, as well as a reduction in the driving comfort that is determined by the IRI index (29), can be expected. Such negative effects can be seen for the pavement with exposed aggregate that was improperly cured, e.g. unevenly covered, or with a local lack of surface coverage with a curing agent.

The appropriate concrete composition with a high designed tensile strength, which is suitable for XF4 and XM2 environments, is obtained using very hard rock aggregate with high polishing resistance at a reduced water-cement ratio and proper air-entrainment. To achieve high resistance to surface scaling, very careful protection against early evaporation of water from the mixture is required. Theoretically, with the w/c ratio below 0.40, there is also a risk of so-called self-drying (31), which leads to both cracks and inhabitation in the development of cement hydration. As shown by Kurdowski, Witek and Śliwiński (32) a relatively low degree of hydration turned out to be beneficial for concrete in highway pavement, that was durable during 70 years of exploitation. In the exposed aggregate concrete layer a specific form of wear resistance of aggregate is needed, i.e. a high polished stone value PSV, related to above mentioned micro-texture of pavement.

Laboratory-scale observations do not include the important factors that occur on an industrial scale. Due to the high surface modulus (surface to volume ratio), the surface concrete is exposed to accelerated drying, especially in dry weather conditions. This results in the risk of cracks occurring due to plastic shrinkage. In literature there are opinions that a surface concrete layer of about 2 to 3 cm in thickness is the most vulnerable to curing errors. This is not the case for lower layers (30). An increase of about 8 to 10 times in gas permeability due to a lack of curing can be found in literature. This is considerably greater than the 2 to 4 times increase in S_i , which was observed in the authors' tests. Cracks in this layer may initiate the development of damage that results in a premature loss of service life - especially, reduced abrasion resistance. The issue of curing concrete with a w/c ratio of about 0.35, which is applicable in the case of the top layer of a pavement with exposed aggregate, requires further investigation.

wykazała bardzo dobrą odporność na złuszczenia powierzchniowe - masa złuszczeń m_{56} wynosiła 0,10-0,12 kg/m², niezależnie od rodzaju cementu i w/c.

5. Brak pielęgnacji warstwy betonu z kruszywem odkrytym spowodował wzrost szybkości absorpcji wody i zwiększenie współczynnika migracji jonów chlorkowych, odpowiednio o 100-300% i 30-50%.

6. Wskutek braku pielęgnacji warstwy betonu stwierdzono znaczny wzrost masy złuszczeń powierzchniowych; masa m_{56} wynosiła od 0,27 do 1,87 kg/m². Największy przyrost masy złuszczeń powierzchniowych stwierdzono w przypadku betonu z cementu CEM III/A, potwierdzając tym samym jego zwiększoną podatność na błędy pielęgnacji.

Ważność powyższych wniosków jest ograniczona do przeprowadzonych badań na modelach nawierzchni z betonu, dojrzewającego i badanego w warunkach laboratoryjnych. Niezbędne jest rozszerzenie badań, aby objąć zakres temperatury i wilgotności otoczenia występujący podczas wykonania nawierzchni z kruszywem odkrytym w różnych warunkach pogodowych na drodze

Badania wykonano w ramach Projektu ASR-RID współfinansowanego przez NBCiR i GDDKiA. Materiały do badań dostarczyła firma Chryso Polska sp. z o.o.

Literatura / References

1. A. Szydło, Nawierzchnie drogowe z betonu cementowego. Teoria, Wymiarowanie, Realizacja. Polski Cement, Kraków 2004.
2. ZTV Beton-StB, Additional technical conditions of contract and directives for the construction of base courses with hydraulic binders and concrete pavements. Forschung Gessellschaft fur Strassen- und Verkehrswessen e.V., Koln 2007.
3. RVS 08.17.02, Technische Vertragsbedingungen-Betondecken-Deckenherstellung (Technical Contract Conditions-Concrete Pavements-Pavement Construction), Osterreichische Forschungsgesellschaft Strasse-Schiene-Verker, Wien 2011.
4. M. Haider, R. Wehr, M. Conter, M. Kriegisch, S. Gasparoni, Texture and noise characteristics of exposed aggregate concrete road surfaces, 12th International Symposium on Concrete Roads, 23-26 September 2014, Prague.
5. J. Skarabis, Nachbehandlung von Fahrbahndecken aus Waschbeton, Strasse und Autobahn **63**, 5, 289-292 (2012).
6. PN-EN 206:2014 Beton - Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.
7. GDDKiA, Specyfikacja techniczna nawierzchnia z betonu cementowego, Wzorcowe Dokumenty Kontraktowe (WDK) dla systemów „Projektuj i buduj” i „Utrzymaj standard”, https://www.gddkia.gov.pl/userfiles/articles/s/specyfikacja_13123/III_betony/OST%20NAWIERZCHNIA%20Z%20BETONU%20CEMENTOWEGO%2015.07.2014.pdf (dostęp 4.02.2017).
8. M. A. Glinicki, Trwałość betonu w nawierzchniach drogowych: wpływ mikrostruktury, projektowanie materiałowe, diagnostyka. Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Warszawa 2011.
9. A. Szydło, P. Mackiewicz, R. Wardęga, B. Krawczyk, Katalog typowych konstrukcji nawierzchni sztywnych, Załącznik do zarządzenia Nr 30 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 16.06.2014 r.

5. Conclusions

The experimental tests on air entrained concrete, which were carried out in a laboratory in a way that modeled the execution of top layer of road pavement with exposed aggregate for KR5 to KR7 traffic load, allowed the following conclusions to be drawn:

1. For low w/c ratio (0.34 and 0.37) and the type of cement used (CEM I 42.5N and CEM III/A 42.5N) the compressive strength of concrete was 61-67 MPa, the bending strength from 7.8 to 8.6 MPa and the splitting strength from 3.9 to 4.9 MPa. The specified strength criteria for pavement concrete were easily met. A change in cement type resulted in an increase of compressive and splitting strength by 5% and 11% respectively, and a decrease of bending strength by 9%.

2. The proper air entrainment, characterized by specific surface α of 33 mm⁻¹, spacing factor \bar{L} from 0.13 to 0.14mm and A_{300} from 3.6 to 3.9%, was obtained irrespective of w/c and cement type.

3. The w/c increase (from 0.34 to 0.37) and change of cement type (CEM I 42.5N and CEM III/A 42.5N) in properly air-entrained concrete did not influence significantly the internal frost resistance F200 – a decrease of the compressive strength after 200 freeze-thaw cycles was in the range from 4% to 12%. The lowest reduction of strength was observed for concrete with CEM I, w/c=0.34 and proper air entrainment.

4. The properly air-entrained concrete layer with exposed aggregate, which was cured with a curing agent with closure capacity > 85%, was characterized by a very good resistance to surface scaling - the mass of scaled-off material m_{56} was equal to 0.10-0.12 kg/m², irrespective of the type of cement and w/c ratio.

5. The lack of curing of concrete layer with exposed aggregate resulted in an increase in the water absorption rate and an increase in the chloride ions migration rate by 100-300% and 30-50%, respectively.

6. Due to a lack of curing a increase in the mass of scaled-off material m_{56} , ranged from 0.27 to 1.87 kg/m², was found. The greatest increase in scaled-off mass was found in the case of concrete from CEM III/A, confirming its increased susceptibility to curing errors.

The conclusions above are limited to tests on pavement models made of concrete that hardens and was tested in laboratory conditions. Further tests should be performed to extend the temperature and humidity range to cover the real field conditions during paving and exposing the aggregates in different weather conditions.

Acknowledgement

The investigation was performed as a part of ASR-RID Project cofinanced by National Center for Research and Development and General Directorate for Roads and Bridges in Poland. Materials for testing were supplied by Chryso Polska.

10. PN-EN 12620:2010 Aggregates for concrete.
11. M. A. Glinicki, R. Jaskulski, M. Dąbrowski, Design principles and testing of internal frost resistance of concrete for road structures-critical review, *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **15** (1), 21-43 (2016), doi: 10.7409/rabdim.016.002.
12. A. Akkari, B. Izevbekha, Composite Pavements and Exposed Aggregate Texturing at MnROAD., Cells 70, 71 and 72, 6. Construction Report and Early Performance Evaluation, Minnesota Department of Transportation, Maplewood MN, 2012.
13. J.-H. Jeong, D. G. Zollinger, Development of Test Methodology and Model for Evaluation of Curing Effectiveness in Concrete Pavement Construction, *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board* **1861**(1), 17-25 (2003), doi:10.3141/1861-03.
14. P. Woyciechowski, A. Chudan, Metody i środki pielęgnacji betonu w formach i „in situ”, XVII Ogólnopolska Konferencja Warsztat Pracy Projektanta Konstrukcji, Ustroń, 20 ÷ 23 lutego 2002 r., PZiTb O/Gliwice.
15. P.-C. Aitcin, The problems with high strength and low w/c ratio concretes, *Cement-Wapno-Beton* **81** (2), 127-137 (2014).
16. NF P18-370:2013 Adjuvants - Produits de cure pour bétons et mortiers - Définition, spécifications et marquage.
17. M. A. Glinicki, Z. Zieliński, Frost salt scaling resistance of concrete containing CFBC fly ash, *Mat. Struct.*, **42**, 7, 993-1002 (2009).
18. PN-EN 480-11:2008 Admixtures for concrete, mortar and grout. Test methods. Determination of air void characteristics in hardened concrete.
19. ASTM C1585:2013 Measurement of rate of absorption of water by hydraulic-cement concretes.
20. NT Build 492:1999 Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments.
21. PN-B-06250: 1988 Beton zwykły.
22. GEN/TS 12390-9:2007 Testing Hardened Concrete – Part 9: Freeze-Thaw Resistance – Scaling.
23. SS 137244:2005 Betongprovning - Hårdnad betong - Avflagning vid frysning.
24. J. Wawrzeńczyk, A. Molendowska, Air void structure in relation to the frost resistance of air-entrained concrete by with microspheres, *Cement-Wapno-Beton*, **78**, 5, 278-287 (2011).
25. M. A. Glinicki, Methods of qualitative and quantitative assessment of concrete air entrainment, *Cement-Wapno-Beton*, **81**, 6, 359-369 (2014).
26. Z. Giergiczny, M. A. Glinicki, M. Sokołowski, M. Zieliński, Air void system and frost salt scaling of concrete containing slag blended cement, *Constr. Build. Mat.*, **23**, 2451-2456 (2009).
27. L. Tang, L.-O. Nilsson, P. A. M. Basheer, Resistance of Concrete to Chloride Ingress: Testing and modelling, CRC Press, London and New York, 2011.
28. R. Breitenbucher, C. Koster, Mindestluftporengehalt in Waschbeton. *Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik*, Heft 1084, Bonn 2013.
29. PN-EN 13036-1:2010 Road and airfield surface characteristics. Test methods. Measurement of pavement surface macrotexture depth using a volumetric patch technique.
30. Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide - A Manual of Practice, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington 2008.
31. T. S. Poole, Curing Portland Cement Concrete Pavements, Volume II, FHWA-HRT-05-038, McLean 2006.
32. W. Kurdowski, A. Witek, J. Śliwiński, Concrete pavement on highway after 70 years of exploitation, the assessment of durability reason, *Cement-Wapno-Beton*, **83**, 1, 27-35 (2016).