



ADAM M. GLINICKI¹⁾
MICHAŁ A. GLINICKI²⁾
IRENEUSZ MIKULICKI³⁾

OCENA NAWIETRZENIA BETONÓW W NAWIERZCHNIACH JEZDNI I PARKINGÓW

STRESZCZENIE. W pracy przedstawiono rezultaty wdrożenia metodyki badań struktury porów powietrznych do oceny właściwości betonów nawierzchniowych. Na zlecenie inwestora lub nadzoru budowy przeprowadzono badania na próbkach stwardniałego betonu, pobranych z kilku placów budów: nawierzchni drogi, nawierzchni na przejściu granicznym, nawierzchni parkingów na gruncie i parkingów wielopoziomowych. Wyniki badań zestawiono z wymaganiami normowymi i krajowymi specyfikacjami technicznymi. W kilku przypadkach stwierdzono występowanie nieprawidłowości struktury porów powietrznych w betonie, pomimo zastosowania środków napowietrzających spełniających wymagania normowe. W innych nawierzchniach uzyskano obrazy struktury świadczące o właściwym napowietrzeniu betonów. Na podstawie analizy rozmieszczenia porów powietrznych w betonie, wbudowanym w nawierzchnię drogi krajowej w ciągu kilkunastu miesięcy, uzyskano świadectwo dobrej jednorodności, stałej wysokiej jakości produkcji mieszanki betonowej i wykonania nawierzchni. Wskazano możliwości optymalizacji mikrostruktury betonów nawierzchniowych na podstawie badania porów powietrznych w stwardniałym betonie.

1. WSTĘP

Stosowanie betonów napowietrzonych do wykonania nawierzchni drogowych jest praktyką rozpowszechnioną w wielu krajach, w których z powodu warunków klimatycznych zapewnienie mrozoodporności betonów ma pierwszorzędne znaczenie.

¹⁾ mgr inż. – GDDKiA Oddział w Białymstoku, Laboratorium Drogowe

²⁾ doc. dr hab. inż. – Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN oraz Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Warszawa

³⁾ mgr inż. – GDDKiA Oddział w Łodzi, Laboratorium Drogowe

Napowietrzanie mieszanki betonowej jest praktycznym sposobem zapobiegania rozsadzaniu betonu wskutek zamrażania wody w kapilarach, wynikającym z teorii ciśnienia hydraulicznego, sformułowanego przez Powersa [1] w 1945 roku. Od wielu lat są znane i akceptowane poglądy, że warunkiem koniecznym uzyskania odpowiedniej mrozoodporności jest właściwa ilość właściwie rozmieszczonych pęcherzyków powietrza w betonie (np. Fagerlund [2], Rusin [3]). Poprzez właściwe rozmieszczenie rozumie się równomierną przestrzenną dystrybucję drobnych pęcherzyków powietrza, które są rozmieszczone dostatecznie blisko siebie, tak aby działały jako komory kompensujące naprężenia, powstające wskutek przyrostu objętości wody zamarzającej w kapilarach.

Napowietrzanie mieszanki betonowej oraz liczne wymagania dotyczące składu i proporcji mieszanki, wynikające z wymagań mrozoodporności, stanowią podstawę współczesnej technologii betonów nawierzchniowych według Ogólnych Specyfikacji Technicznych GDDKiA [4] oraz normy na lotniskowe nawierzchnie z betonu cementowego [5]. Analogiczne wytyczne w zakresie budowy betonowych nawierzchni dróg formułuje niemiecki dokument ZTV Beton-StB 01 wprowadzony w 2001 roku [6]. W tym kontekście użytkownik nowej normy PN-EN 206-1: 2003 [7] natychmiast zauważa brak bezpośrednich wymagań mrozoodporności betonu, co stanowi istotną różnicę w porównaniu z zaleceniami normy PN-88/B-06250 [8], jak również z wymienionymi dokumentami administracji drogowej. Wdrożenie normy PN-EN 206-1: 2003 do stosowania w praktyce, wraz z krajową normą uzupełniającą PN-B-06265 [9], wymaga jej właściwego umiejscowienia obok specyfikacji GDDKiA.

Celem pracy jest przedstawienie wyników badań struktury porów powietrznych w betonach nawierzchniowych wykonanych na kilku odcinkach drogi i parkingach w latach 2001-2003. Badania zostały przeprowadzone w laboratorium IPPT PAN na próbkach stwardniałego betonu pobranych z wykonanych nawierzchni na zlecenie bądź inwestora bądź nadzoru budowy.

2. WYMAGANE NAPONIETRZENIE BETONU

Zapewnienie trwałości betonu jest przewodnim motywem normy PN-EN 206-1:2003. Wprowadzone zostały klasy oddziaływania środowiska obejmujące m.in. oddziaływanie mrozu, oznaczone XF1-XF4. Wymagania w odniesieniu do betonów narażonych na oddziaływanie mrozu są wszakże ograniczone do minimalnej klasy wytrzymałości na ściskanie, maksymalnego wskaźnika wodno-cementowego, minimalnej zawartości cementu oraz minimalnego napowietrzenia. W klasach ekspozycji XF2, XF3 i XF4 wymaga się napowietrzenia wynoszącego 4%, rozumianego jako minimalna zawartość powietrza w mieszance betonowej, określona metodą ciśnieniową. Górną granicę zawartości powietrza stanowi wyspecyfikowana wartość minimalna powiększona o 4%. Kryteria zgodności dotyczące zawartości powietrza w napowietrzonej mieszance betonowej określają maksymalne dopuszczalne

odchylenia pojedynczych wyników badania: -0,5% od dolnej granicy oraz +1,0% od górnej granicy. Zatem zawartości powietrza w napowietrzanej mieszance betonowej powinny mieścić się w granicach 3,5% - 9%.

Wymagania napowietrzenia według [7] zostały uproszczone w stosunku do wymagań normy PN-88/B-06250, w której potrzebne napowietrzenie było m.in. uzależnione od uziarnienia kruszywa (jedynie do 6% przy uziarnieniu kruszywa do 32 mm). Dopuszczalna według nowej normy w klasach XF2-XF4 wartość maksymalnego wskaźnika w/c wynosi od 0,45 do 0,55, podczas gdy norma [8] dopuszczała wskaźniki w/c w granicach 0,55-0,75. Ostrzejsze wymagania nowej normy dotyczą także minimalnej zawartości cementu od 300 do 340 kg/m³, gdy dotychczas wymagane minimalne zawartości cementu były nie większe niż 270 kg/m³. Intencją Autorów normy EN 206-1 należy odczytywać więc jako przekonanie, że odpowiednio niski wskaźnik w/c i odpowiednio wysoka zawartość cementu i wytrzymałość betonu na ściskanie usprawiedliwia znaczne uproszczenia wymagań dotyczących napowietrzenia betonu.

Z definicji domieszkami napowietrzającymi są substancje umożliwiające wprowadzenie podczas mieszania określonej ilości równomiernie rozmieszczonych pęcherzyków powietrza (wg PN-EN 206-1 zwykle o średnicach 10-300 μm), które pozostają w betonie stwardniałym. Według normy PN-EN 934-2: 2002 [10] wymagania dotyczące domieszek napowietrzających, zawarte w tablicy 5 tej normy, dotyczą - oprócz wytrzymałości na ściskanie betonu - zawartości powietrza w mieszance betonowej i charakterystyki rozkładu porów w stwardniałym betonie. Na betonie wzorcowym przeprowadza się więc sprawdzenie wskaźnika rozmieszczenia porów (ang. *spacing factor*), który nie powinien przekraczać 0,200 mm. Można mniemać, że skoro domieszka napowietrzająca spełnia wymagania stawiane w normie [10], to jej stosowanie w każdym betonie (nie tylko wzorcowym) automatycznie zapewni właściwe rozmieszczenie pęcherzyków powietrza przy zapewnieniu właściwej objętości wprowadzanego powietrza. Takie było prawdopodobnie założenie normy EN 206-1.

Na podstawie przepisów szczegółowych dotyczących betonów stosowanych w budownictwie komunikacyjnym [4] konieczność napowietrzania betonu wynika z samej definicji betonu nawierzchniowego: jest to beton napowietrzony o określonej wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu i mrozoodporności, wbudowany w nawierzchnię. Przez beton napowietrzony rozumie się beton zawierający dodatkowo wprowadzone powietrze w postaci pęcherzyków, w ilości nie mniejszej niż 3,5% objętości zagęszczonej masy betonowej, powstałe w wyniku działania dodanych domieszek napowietrzających. Powietrze celowo wprowadzane do mieszanki betonowej definiuje się jako mikroskopijne pęcherzyki zwykle o średnicy od 10 μm do 300 μm oraz kształcie sferycznym; wprowadzane do mieszanki betonowej z reguły przez zastosowanie środka powierzchniowo czynnego.

Wymagania OST D - 05.03.04 [4] dotyczą zarówno składników betonu, m.in.:

- zawartość cementu $\geq 350 \text{ kg/m}^3$, a zawartość cementu wraz z ziarnami do $0,25 \text{ mm} \leq 450 \text{ kg/m}^3$,

- wskaźnik wodno-cementowy $< 0,45$.
- domieszka napowietrzająca,
- kruszywa łamane i żwirowe o określonej mrozoodporności, ścieralności, nasiąkliwości, spełniające wymagania zawartości ziarn nieforemnych, zanieczyszczeń itd.

oraz właściwości betonu stwardniałego, tj.

- klasa betonu od B 30 do B 50,
- wytrzymałość betonu na rozciąganie przy zginaniu 4,0 - 6,5 MPa,
- nasiąkliwość betonu $\leq 5,0\%$,
- mrozoodporność betonu: min. F 150 (metoda zwykła wg PN-B/06250) oraz odporność na złuszczenie powierzchniowe wskutek oddziaływania mrozu i soli odladzających,
- wskaźnik rozmieszczenia porów powietrznych $\leq 0,200$ mm.

Zalecana zawartość powietrza w mieszance betonowej podana jest w tablicy 1.

Tablica 1. Zalecana zawartość powietrza w mieszance betonowej [4]

Table 1. Recommended air volume in concrete mix [4]

Maksymalna średnica ziaren kruszywa	Zawartość powietrza w mieszance [%]			
	bez domieszki upłynniającej lub uplastyczniającej		z domieszką upłynniająca lub uplastyczniająca	
	średnia dzienna	minimalna	średnia dzienna	minimalna
8 mm	5,5	5,0	6,5	6,0
16 mm	4,5	4,0	5,5	5,0
31,5 mm	4,0	3,5	5,0	4,5

Parametr rozmieszczenia porów powietrznych określa czy beton stwardniały (a nie mieszanka betonowa) jest właściwie napowietrzony, tj. czy potrzebna ilość porów powietrznych jest właściwie rozmieszczona, gdyż wiadomo [2], że struktura porów powietrznych w betonie jest krytycznym wskaźnikiem jego odporności na oddziaływanie mrozu i soli odladzających.

3. OPIS BADAŃ STRUKTURY PORÓW POWIETRZNYCH

Badania struktury porów powietrznych w betonie przeprowadzono na próbkach-odwiertach pobranych z nawierzchni jezdni lub parkingów. Odwierty rdzeniowe pobierano przy użyciu różnych wiertnic do betonu stosując wiertła koronkowe o średnicy

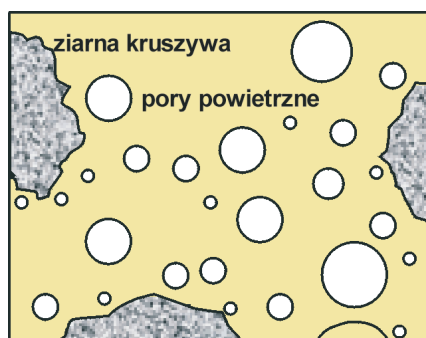
około 100 mm. Odwierty wykonano prostopadle do powierzchni jezdni przez całą grubość nawierzchni lub na głębokość co najmniej 150 mm.

Pobrane próbki walcowe zostały przecięte wzdłuż tworzącej walca, aby uzyskać próbki płaskie reprezentujące przekroje prostopadle do powierzchni jezdni. Wycięte próbki płaskie miały wymiary 100×100 mm (szerokość \times głębokość od powierzchni). W celach porównawczych wycięto także próbki płaskie z kostek betonowych o boku 150 mm, formowanych w laboratorium na etapie projektowania mieszanki betonowej. Technika przygotowania zgładów do obserwacji mikroskopowych i metoda analizy struktury porów powietrznych w betonie została szczegółowo opisana przez Załochę i Kasperkiewicza [11]. Stosowana w IPPT PAN automatyczna metoda analizy odpowiada określonej w normie PN-EN 480-11: 2000 [12] metodzie trawersowej, polegającej na zliczaniu i pomiarze długości przecięć linii trawersowej z porami powietrznymi. Rozkład średnic porów powietrznych określa się na podstawie długości przecięć linii trawersowej. W porównaniu z metodami analizy manualnej ([13], [14]) zastosowanie metody automatycznej analizy struktury porów pozwala znacznie przyspieszyć badanie przy zachowaniu wysokiej precyzji pomiarów.

Strukturę porów powietrznych charakteryzują następujące parametry:

- całkowita zawartość porów powietrznych - A ,
- wskaźnik rozmieszczenia porów - \bar{L} ,
- zawartość mikroporów o średnicy do $300 \mu\text{m}$ - A_{300} ,
- powierzchnia właściwa porów - α .

Wskaźnik rozmieszczenia porów powietrznych określa uśrednioną największą odległość od dowolnego punktu w stwardniałym zaccynie cementowym do najbliższej pustki powietrznej, jak pokazano schematycznie na rysunku 1. Według wzorów podanych w normie [12] wskaźnik rozmieszczenia porów oblicza się na podstawie wartości A (zawartość porów powietrznych w stwardniałym betonie) oraz α (powierzchnia właściwa porów), określanych bezpośrednio na podstawie pomiarów.



Rys.1 Schematyczna ilustracja rozmieszczenia porów powietrznych w przekroju betonu
Fig.1. Schematic distribution of air voids in a cross section of hardened concrete

4. WYNIKI BADAŃ NAPOWIETRZENIA BETONÓW “IN SITU”

4.1. NAWIERZCHNIA PARKINGU DWUPOZIOMOWEGO

Badania przeprowadzone w IPPT PAN na zlecenie inwestora dotyczyły betonu w górnej płycie odkrytego parkingu samochodów przed hipermarketem. Badania zostały przeprowadzone na etapie projektu mieszanki betonowej i wyboru dostawcy betonu oraz podczas kontroli jakości wbudowanego betonu. Przedmiotem wyboru był projekt betonu klasy B 37, wykonanego przy wskaźniku w/c $\leq 0,45$, z użyciem grysów granitowych lub bazaltowych o uziarnieniu do 16 mm. Porównywane mieszanki betonowe zostały napowietrzone przy zastosowaniu środków napowietrzających, spełniających wymagania odpowiednich norm. W tabelicy 2 podano zawartość cementu i wskaźnik wodno-cementowy sześciu porównywanych mieszanek betonowych. Zamieszczone zbiorcze wyniki badania struktury porów powietrznych wskazują, że wskaźnik rozmieszczenia porów $\leq 0,200$ mm – wymagany w świetle normy [10] – uzyskano w przypadku betonów oznaczonych BP 8, BP 11 i BP 12. Na podstawie wysokiej zawartości mikroporów o średnicy poniżej 300 μm oraz wysokiej powierzchni właściwej porów, można wnioskować o wysokiej jakości procesu napowietrzania betonu: pęcherzyki powietrza, głównie o średnicy poniżej 0,5 mm, są rozmieszczone równomiernie i blisko siebie. Porównanie rozkładu wielkości porów w betonie pozwala jednoznacznie odróżnić właściwe i nieprawidłowe struktury porów powietrznych, co zilustrowano przykładowo na rysunku 2. W odróżnieniu od struktury porów w betonie BP 12, w betonie BP 4 przeważają pęcherzyki powietrza o średnicach powyżej 0,5 mm, a zawartość mikroporów wynosi jedynie 0,8%. Taką znaczną różnicę struktury porów powietrznych zauważono przy różnicy zawartości powietrza niewiele przekraczającej 1%. Uzyskane wyniki badań umożliwiły inwestorowi szczegółową ocenę oferentów i dokonanie wyboru najlepszego wykonawcy.

Tablica 2. Wyniki badania struktury porów powietrznych w próbkach betonów przeznaczonych na nawierzchnię parkingu

Table 2. Results of air void structure tests on specimens of concrete designed for parking pavement

Oznaczenie betonu	Wskaźnik w/c	Zawartość cementu [kg/m ³]	\bar{L} [mm]	α [mm ² /mm ³]	A_{300} [%]	A [%]
BP1	0,39	386	0,23	26	0,89	3,29
BP4	0,38	386	0,32	16	0,83	4,55
BP6	0,43	395	0,21	28	1,34	3,82
BP8	0,45	364	0,19	23	1,60	6,15
BP11	0,38	370	0,16	24	2,34	6,66
BP12	0,38	370	0,15	30	2,84	5,71

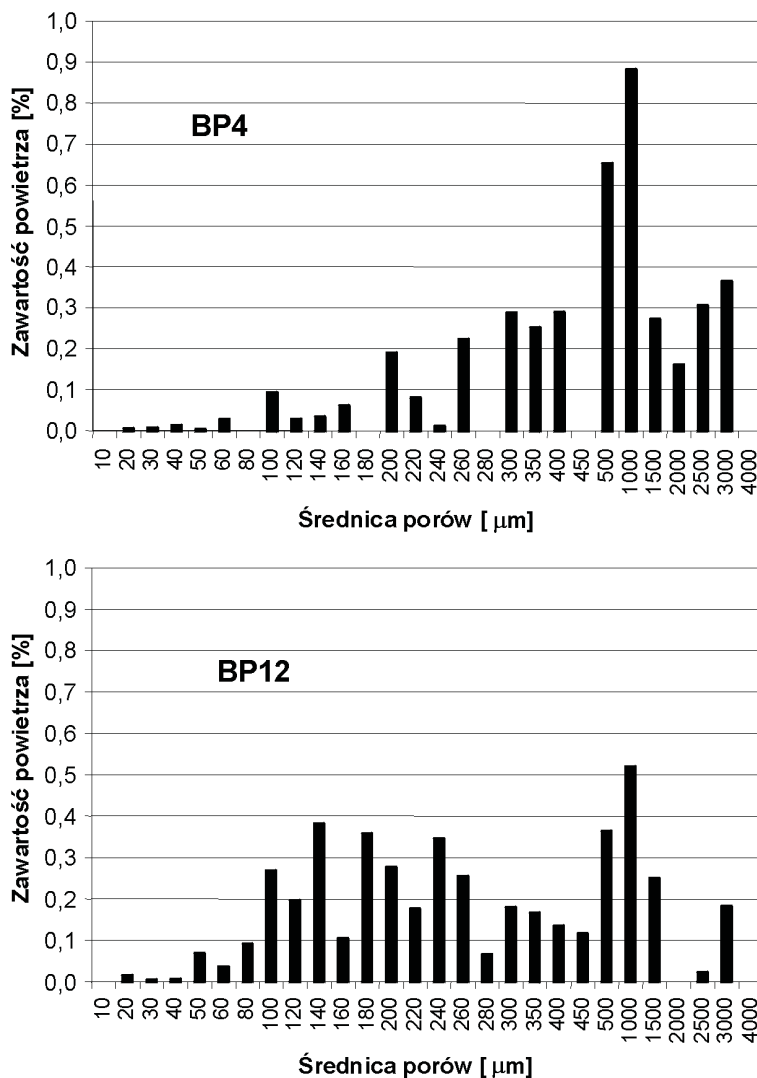
Przyjęto oznaczenia:

\bar{L} – wskaźnik rozmieszczenia porów według PN-EN 480-11:2000,

A_{300} – zawartość mikroporów o średnicy $\leq 300 \mu\text{m}$,

α – powierzchnia właściwa porów,

A – zawartość powietrza w stwardniałym betonie.



Rys.2. Rozkład średnic porów powietrza w betonie przeznaczonym na nawierzchnię parkingu (BP4, BP12)

Fig.2. Distribution of air void diameters in concrete designed for parking pavement (BP4, BP12)

Kontrola jakości napowietrzania betonu wbudowanego w nawierzchnię parkingu, przeprowadzona po 5 tygodniach od wykonania, na odwiertach o średnicy 100 mm, potwierdziła zgodność z projektem betonu. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono wskaźnik rozmieszczenia porów w betonie wynoszący 0,11 mm, zawartość mikroporów 3,0%, oraz powierzchnię właściwą porów wynoszącą 30 mm⁻¹. Świadczyło to o wysokiej jakości produkcji betonu i prawidłowej technologii układania i zagęszczania betonu.

4.2. NAWIERZCHNIA PARKINGU TIR PRZED CENTRUM DYSTRYBUCJI

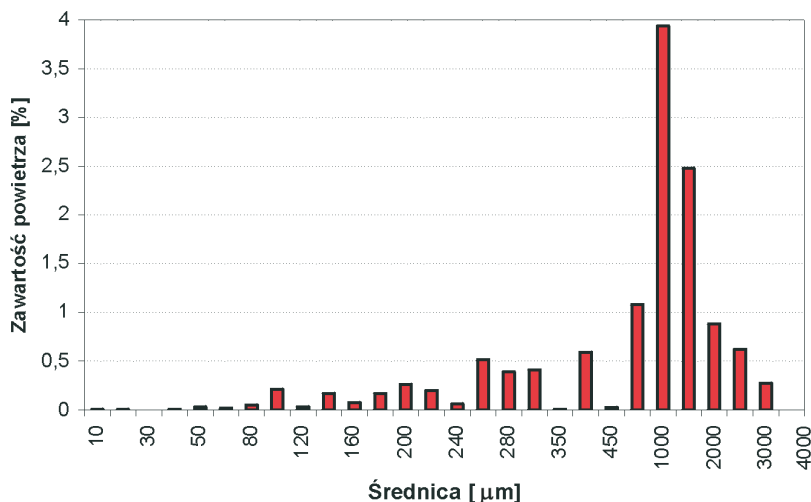
Badania dotyczyły nawierzchni parkingu na samochody ciężarowe, wykonanego z betonu na podbudowie z gruntu stabilizowanego cementem. Beton napowietrzony klasy B 35 wykonany został m.in. z cementu CEM I 42,5 NA, z użyciem superplastyfikatora i domieszki napowietrzającej (tabl. 3). Projektowano mrozoodporność betonu F150 wg PN-B/88-06250. Według dokumentacji zmierzona zawartość powietrza w mieszance betonowej wynosiła 5%.

Tablica 3. Proporcje mieszanki betonowej B 35 na nawierzchnię parkingu
Table 3. Mix design for B 35 concrete for parking pavement

Składniki	Zawartość [kg/m ³]
cement CEM I 42,5 NA	385
grys bazaltowy 8-16	568
grys bazaltowy 2-8	662
piasek płukany	662
woda	168
superplastyfikator 1,4% m.c.	5,4
domieszka napowietrzająca 0,033% m.c.	0,127
razem	2450

W związku z wątpliwościami inwestora odnośnie jakości wbudowanego betonu przeprowadzono badania strukturalne na odwiertach z nawierzchni. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono całkowitą zawartość powietrza w stwardniałym betonie 13,8%, wskaźnik rozmieszczenia porów w betonie wynoszący 0,22 mm oraz powierzchnię właściwą porów wynoszącą 9,3 mm⁻¹. Bardzo wysoka zawartość powietrza oraz niska powierzchnia właściwa porów świadczą o niewłaściwym napowietrzeniu mieszanki. Jak pokazano na rozkładzie zawartości powietrza w funkcji średnicy porów (rys. 3) przeważająca część porów w stwardniałym betonie miała średnice w granicach od 0,45 mm do 2,0 mm (a nie 0,01- 0,30 mm jak domniemano w

normie PN-EN 206-1). Łączna ilość powietrza i rozkład wielkości porów była zapewne wynikiem nadmiernej ilości środka napowietrzającego albo niestabilnością napowietrzenia; ewentualnym przyrostem napowietrzenia w czasie transportu można byłoby wytłumaczyć rozbieżność wyników pomiaru zawartości powietrza w stwardniałym betonie (na odwiertach z nawierzchni) i w mieszance betonowej - możliwe że pomiaru dokonano przy węźle, a nie na placu budowy.



Rys.3. Rozkład średnic porów powietrza w betonie wbudowanym w nawierzchnię parkingu (wartości średnie z dwóch próbek AV 16 i AV 17)

Fig. 4. Distribution of air void diameters in concrete pavement (average of two specimens AV 16 and AV 17)

4.3. NAWIERZCHNIA JEZDNI NA ODCINKU DROGI KRAJOWEJ

Badania przeprowadzone zostały w dwóch etapach: podczas projektowania mieszanki betonowej (na kostkach o boku 150 mm formowanych w laboratorium) oraz podczas budowy nawierzchni (na próbkach-odwiertach o średnicy 100mm pobranych z nawierzchni). W składzie zastosowanej mieszanki betonowej B 40 zastosowano cement CEM I 32,5, grysy amfibolitowe i kwarcytowe do 32 mm, superplastyfikator i domieszkę napowietrzającą (tabl. 4). Wyniki badania struktury porów powietrznych są przedstawione w tabelicy 5. Przyjęto oznaczenia identyczne jak w tabelicy 2.

Tablica 4. Proporcje mieszanki betonowej B 40
Table 4. Mix design for B 40 concrete

Składniki	Zawartość [kg/m ³]
cement CEM I 32,5 R	360
grys 16-32mm	645
grys 8-16 mm	475
grys 2-8 mm	228
piasek 0-2 mm	551
woda	144
superplastyfikator 0,5% m.c.	1,80
domieszka napowietrzająca 0,033% m.c.	0,58
razem	2403

Tablica 5. Wyniki badania struktury porów powietrznych w betonie nawierzchniowym
Table 5. Test results of air void structure in concrete pavement

Oznaczenie próbki	\bar{L} [mm]	α [mm ² /mm ³]	A_{300} [%]	A [%]
etap projektowania mieszanki betonowej				
DK_01A	0,11	49	2,00	3,61
DK_01B	0,10	53	2,07	3,70
DK_02A	0,15	41	1,27	2,65
DK_02B	0,11	47	1,82	3,95
etap kontroli jakości zbudowanej nawierzchni				
DK2_1	0,11	35	3,40	6,75
DK2_2	0,12	46	1,81	3,66
DK3_1	0,12	41	2,32	4,49
DK3_2	0,12	48	1,80	3,29
DK3_3	0,12	50	1,81	3,09
DK3_4	0,16	38	0,94	2,66
DK4_1	0,12	47	2,12	3,48
DK4_2	0,13	43	1,93	3,24

Z przeprowadzonych badań na etapie projektowania mieszanki betonowej wynika, że wskaźnik rozmieszczenia porów w betonie zawierał się w granicach od 0,11 do 0,15 mm, natomiast powierzchnia właściwa porów wynosiła od 35 do 53 mm⁻¹. Jak stwierdzono, parametry struktury porów powietrznych betonu wbudowanego w nawierzchnię nie odbiegały zasadniczo od parametrów określonych na etapie projektowania mieszanki: w ciągu kilkunastu miesięcy prowadzenia prac betonowych wskaźnik rozmieszczenia porów powietrznych w stwardniałym betonie utrzymywał się w granicach 0,11-0,16 mm. Świadczy to o wysokiej jakości napowietrzenia mieszanki betonowej.

Uzyskane w ramach nadzoru budowy wyniki badania mrozoodporności betonu wykazały po 150 cyklach zamrażania i odmrażania według normy [8]:

- ubytek masy od 0 do 0,27 % (jezdnia lewa) oraz od 0,05 do 0,42% (jezdnia prawa),
- spadek wytrzymałości na ściskanie : od 4,0 do 13,1 % (jezdnia lewa) oraz od 6,3 do 9,3 % (jezdnia prawa).

Wytrzymałość betonu na ściskanie po 28 dniach wynosiła od 40,4 do 58,0 MPa (jezdnia lewa) oraz od 42,3 do 52,4 MPa (jezdnia prawa). Otrzymane wyniki wytrzymałości i mrozoodporności betonu świadczą o wysokiej jakości oraz trwałości betonu i korespondują z wynikami struktury porów powietrznych w betonie.

4.4. NAWIERZCHNIA DROGOWEGO PRZEJŚCIA GRANICZNEGO

Badania przeprowadzone zostały na próbkach-odwiertach o średnicy 100mm, pobranych z nawierzchni. Skład zastosowanej mieszanki betonowej B 40 podano w tablicy 6. Podczas betonowania odcinka próbnego nawierzchni zmierzona zawartość powietrza w mieszance betonowej, określona metodą ciśnieniową, wynosiła od 4,0 do 5,6%.

Tablica 6. Proporcje mieszanki betonowej B 40 na nawierzchnię przejścia granicznego
Table 6. Mix design for B 40 concrete for a frontier facilities pavement

Składniki	Zawartość [kg/m ³]
cement CEM I 42,5 NA	395
grys granodiorytowy 8-16	568
grys granodiorytowy 2-8	662
piasek płukany	662
woda	156
superplastyfikator 1,4% m.c.	5,4
domieszka napowietrzająca 0,033% m.c.	0,127
razem	2448

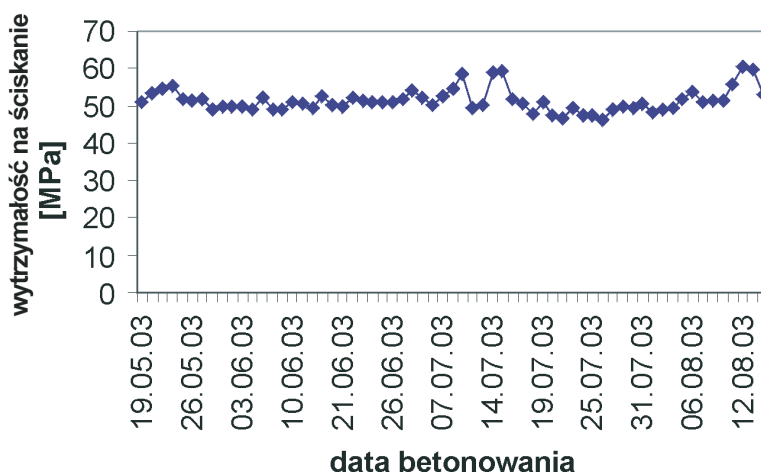
Uzyskane wyniki badania struktury porów powietrznych, przedstawione w tablicy 7 (oznaczenia identyczne jak w tabl. 2), świadczą o dobrej jakości procesu napowietrzania betonu: pęcherzyki powietrza, głównie o średnicy poniżej 0,5 mm, są rozmieszczone równomiernie i blisko siebie. Wskaźnik rozstawu porów w betonie wynosił 0,11- 0,12 mm, natomiast powierzchnia właściwa porów wynosiła od 35 do 53 mm⁻¹. Parametry struktury porów powietrznych betonu wbudowanego w nawierzchnię drogowego przejścia granicznego spełniają wymagania normy [10] oraz ogólnych specyfikacji [4].

Tablica 7. Wyniki badania struktury porów powietrznych w próbkach pobranych z nawierzchni betonowej

Table 7. Results of air void structure tests on specimens cored out of concrete pavement

Oznaczenie próbki	\bar{L} [mm]	α [mm ² /mm ³]	A_{300} [%]	A [%]
PG1_G	0,11	34,5	2,47	6,45
PG1_D	0,11	28,3	3,09	7,81
PG2_G	0,11	30,0	2,85	6,97
PG2_D	0,12	32,2	3,30	6,42

W ramach badań nadzoru budowy stwierdzono prawidłową wytrzymałość wbudowanego betonu. Badania przeprowadzone na odcinku próbnym wykazały wytrzymałość betonu na ściskanie w granicach od 34,0 do 35,8 MPa po 7 dniach (na odwiertach o średnicy 100 mm). Wytrzymałość betonu po 28 dniach wynosiła: od 46,7 do 52,4 MPa przy ściskaniu próbek sześciennych o boku 150 mm oraz od 5,6 do 6,0 MPa przy rozciąganiu przy zginaniu. Wyniki kontroli wytrzymałości na ściskanie na próbkach kostkowych pobieranych w kolejnych dniach betonowania nawierzchni pokazano na rysunku 4 (każdy punkt oznacza wartość średnią z trzech wyników badania kostek o boku 150 mm). Chociaż zawartość powietrza w stwardniałym betonie sięgała 7,8% uzyskano właściwy i stabilny poziom wytrzymałości betonu.



Rys.4. Wytrzymałość na ściskanie betonu wbudowanego w nawierzchnię drogowego przejścia granicznego

Fig.4. Compressive strength of concrete in a frontier facilities pavement

5. Dyskusja Wyników

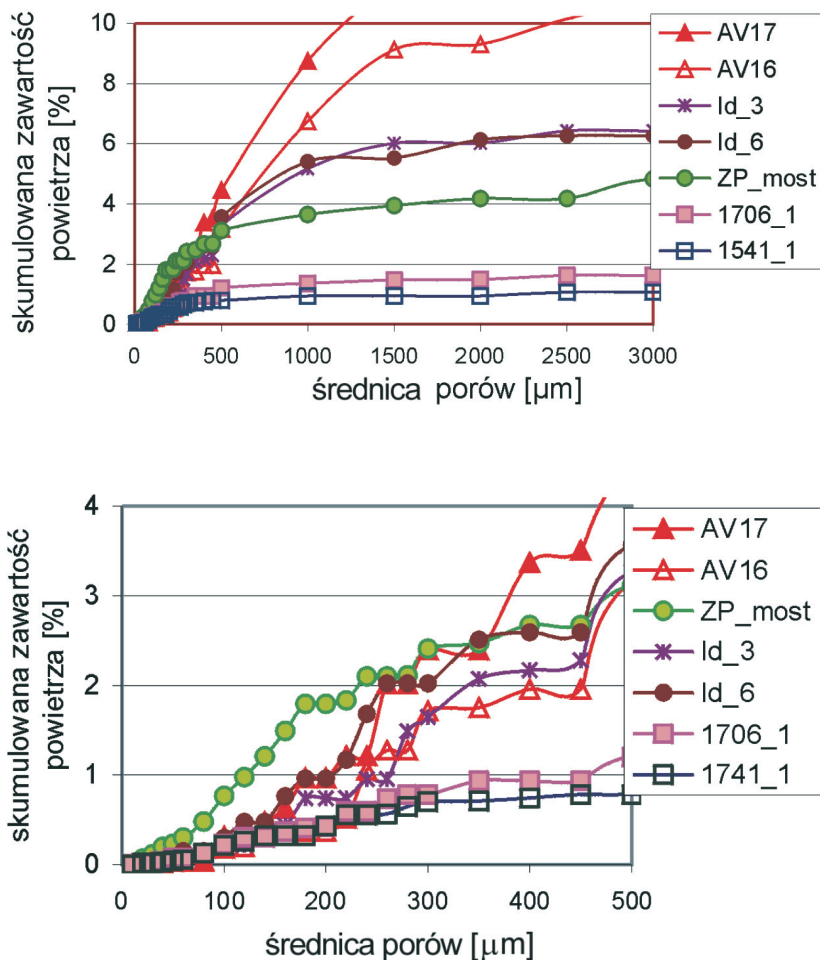
Na podstawie przeprowadzonych doświadczeń można stwierdzić, że nie zawsze uzyskuje się właściwą strukturę porów powietrznych w krajowych betonach wbudowanych w konstrukcje narażone na mróz i nieraz środki odladzające, pomimo zastosowania domieszek napowietrzających zgodnych z normami. Nierzadko wprowadzone powietrze zawiera pęcherzyki o średnicach powyżej 0,300 mm, które nie spełniają właściwej funkcji zapewnienia mrozoodporności, a przy średnicach pęcherzyków sięgających 2mm znacząco obniżają wytrzymałość betonu. Jak można więc zauważyć, normowy zapis wg PN-EN 206-1, definiujący pęcherzyki powietrza wprowadzane do betonu przy napowietrzaniu: "zwykle o średnicach 10-300 μm ", nie koresponduje z wnioskami wynikającymi z praktyki. Jednocześnie sformułowane w tej normie wymagania na całkowitą objętość powietrza w mieszance (i stosowana metoda badawcza) zupełnie nie korespondują z podaną definicją pęcherzyków powietrza wprowadzanych przy napowietrzaniu.

Zaobserwowane relacje między wynikami pomiarów zawartości powietrza w stwardniałym betonie *A* oraz wynikami pomiarów zawartości powietrza w mieszance betonowej wymagają komentarza. Regularnie obserwuje się różnice tych wielkości, są przecież mierzone w odmienny sposób: w betonie – pomiar bezpośredni na powierzchni przekroju, w mieszance - pomiar pośredni na podstawie zmiany wysokości słupa wody w ciśnieniowym naczyniu pomiarowym. Również inny jest zakres pomiarowy: metoda ciśnieniowa wskazuje całkowitą zawartość powietrza, w tym bardzo duże i bardzo małe pęcherzyki powietrza, które są poza zakresem pomiarowym

metody według PN-EN 480-11. Metoda ciśnieniowa określa całkowitą zawartość powietrza, w tym: pustki wskutek niedostatecznego zagęszczenia mieszanki (do 1-1,5%), pustki w kruszywie oraz pory powietrzne powstałe wskutek napowietrzania. Przy stosowaniu różnych dodatków mineralnych do betonów wykonanych w laboratorium IPPT PAN zaobserwowano różnice zawartości powietrza określone w mieszance i w stwardniałym betonie wynoszące około 1-1,5%. Przy przemysłowej produkcji betonu różnice te mogą być większe, uwarunkowane sposobem transportu mieszanki i zagęszczania. Ucieczka wprowadzonego powietrza na etapie wbudowania mieszanki jest zjawiskiem spotykanym, a kontrola zawartości powietrza w mieszance nie wychwyci tej patologii. Faktyczną intencją napowietrzania jest bowiem uzyskanie właściwego rozmieszczenia porów w stwardniałym betonie, wbudowanym w konstrukcję, a nie tylko napowietrzenie mieszanki.

Przeprowadzona analiza struktury porów powietrznych w badanych betonach nawierzchniowych pozwala nie tylko na porównanie z wymaganiami czy eliminację nieprawidłowości technologicznych, ale także dostarcza danych do możliwej optymalizacji napowietrzenia. Szacuje się bowiem, że z powodu wzrostu ogólnej porowatości betonu o 1% spadek wytrzymałości wynosi około 5%. Dlatego celowa jest optymalizacja napowietrzenia [15] zmierzająca do obniżenia ogólnej porowatości betonu przy jednoczesnym zapewnieniu właściwej ochrony przed rozsadzaniem betonu wskutek zamrażania wody. Na podstawie uzyskanych wyników badań na rysunkach 5-6 przedstawiono rozkład zawartości porów powietrznych w betonach nawierzchniowych w funkcji średnicy porów. W odróżnieniu od wykresów na rysunkach 2-3, tutaj na osi pionowej przedstawiono skumulowaną zawartość powietrza. Przedstawiono przykłady betonów niedostatecznie napowietrzonych (ozn. 1541, 1706, XII_L1A, XII_L1B), zbyt napowietrzonych (ozn. AV16, AV17) oraz dobrze napowietrzonych czyli charakteryzujących się współczynnikiem rozmieszczenia porów poniżej 0,2mm (pozostałe). Właściwa wartość współczynnika rozmieszczenia porów odpowiada tu zawartości powietrza 2-3,5% w zakresie średnic porów do 500 μm oraz jedynie 2-3% zawartości powietrza w zakresie średnic porów między 500 i 3000 μm . Niedostateczne napowietrzenie betonu widać już po zawartości porów do 500 μm , która nie sięga 1,5%. Natomiast nadmierne napowietrzenie oznacza dużą zawartość porów powietrznych o średnicach powyżej 500 μm , przekraczającą nawet 8%.

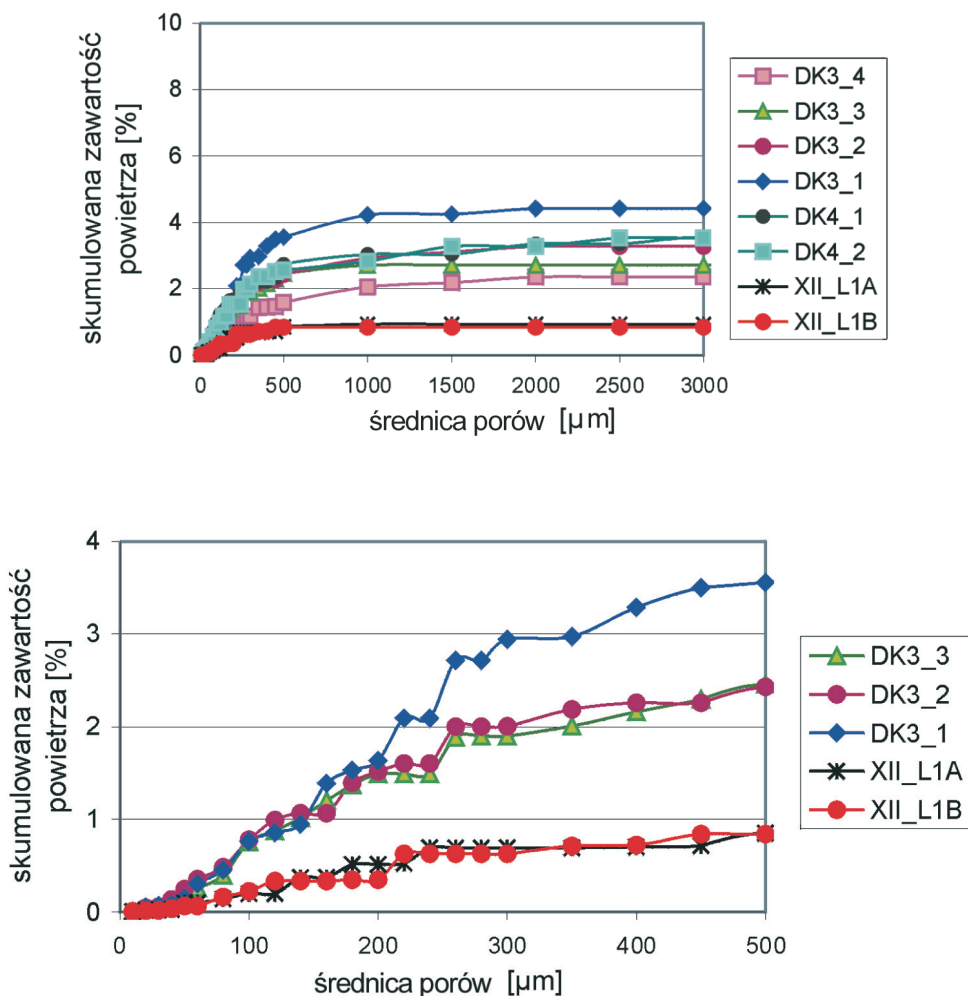
Kolejne przykłady rozkładu średnic porów powietrznych w betonach nawierzchniowych przedstawiono na rysunku 6. Jak widać, w zakresie średnic do 300 μm zawartość powietrza wzrasta w przybliżeniu liniowo ze wzrostem średnicy porów. Charakterystyczny w przypadku betonów właściwie napowietrzonych pozostaje niewielki wzrost porowatości w zakresie średnic powyżej 500 μm . Uznaje się, że w tym zakresie średnic pory znacząco wpływają na obniżenie wytrzymałości betonu, a zatem płaski odcinek wykresu odpowiada minimalizacji negatywnego wpływu porów na wytrzymałość. Przedstawione wykresy dostarczają więc ilościowych argumentów, potwierdzających założenie przyjmowane w technologii betonów napowietrzonych, że właściwe napowietrzenie jedynie nieznacznie obniża wytrzymałość betonu.



Rys.5. Skumulowana zawartość powietrza w betonie w funkcji średnicy porów w zakresie do 3000 μm oraz fragment tego wykresu w zakresie do 500 μm

Fig.5. Cumulative air volume versus void diameter in concrete specimens (up to 3000 μm and an enlarged part of the diagram up to 500 μm)

Na rysunku 7 przedstawiono liczbę zarejestrowanych porów powietrznych w funkcji ich średnicy w zakresie do 300 μm . Na przedstawionych przykładach widać, w przypadku właściwie napowietrzonego betonu znaczący liczbowo udział mają pory o średnicach do 60 μm . Potwierdza to spostrzeżenie sformułowane w [16], a jednocześnie otrzymuje się liczbowe dane do optymalizacji mikrostruktury betonu.



Rys.6. Skumulowana zawartość powietrza w betonie w funkcji średnicy porów w zakresie do 3000 μm oraz fragment tego wykresu w zakresie do 500 μm

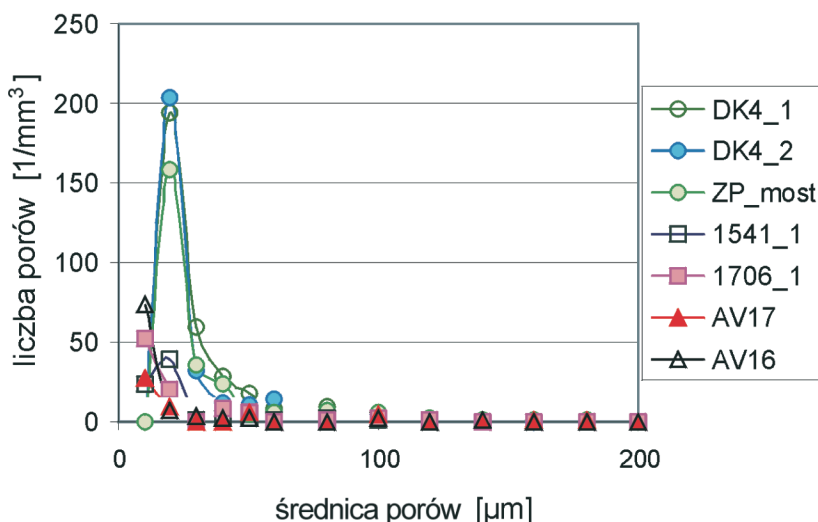
Fig.6. Cumulative air volume versus void diameter in concrete specimens (up to 3000 μm and an enlarged part of the diagram up to 500 μm)

Przedstawione wyniki badań betonów “in-situ” pozwalają stwierdzić, że kontrola jakości napowietrzania na podstawie badania struktury porów powietrznych w stwardniałym betonie ma duże znaczenie. Badania betonu stosowanego w klasach ekspozycji XF2, XF3 i XF4 należałoby realizować następująco:

- na etapie projektowania mieszanki betonowej napowietrzanej: oprócz zaleceń technologicznych normy PN-EN 206-1 należy sprawdzić wskaźnik rozmieszczenia porów powietrznych w betonie stwardniałym; potwierdzenie właściwego

rozmieszczenia porów powietrznych trzeba traktować jako warunek konieczny uzyskania struktury betonów mrozoodpornych;

- b) na etapie kontroli jakości wbudowanego betonu: sprawdzenie wskaźnika rozmieszczenia porów powietrznych w betonie stwardniałym należy przeprowadzić na odwiertach pobranych w konstrukcji (min. 2 odwierty o średnicy 100 mm, badanie na przekrojach prostopadłych do powierzchni zewnętrznych konstrukcji, określenie wskaźnika rozmieszczenia porów w warstwie 100 mm od zewnętrznej powierzchni, częstotliwość badania: min. 1 na obiekt lub na 5000 m³ betonu lub na 25 000 m² zewnętrznej powierzchni konstrukcji narażonej na mróz, wilgoć i ewentualnie środki odładzające).



Rys.7. Liczba porów powietrza w funkcji średnicy porów w zakresie do 200 µm
Fig.7. Number of air voids as a function void diameter up to 200 µm

Postulowana częstotliwość badań, odpowiadająca dotychczas stosowanej częstotliwości pobierania próbek do badań mrozoodporności, powinna zostać zweryfikowana w pierwszych latach praktyki w tym zakresie.

6. WNIOSKI

Chociaż technologia betonów napowietrzonych jest znana od wielu lat, faktyczną kontrolę jakości napowietrzania umożliwiają – realizowane w Polsce od niedawna – badania struktury porów powietrznych. Na podstawie badań struktury porów powietrznych w próbkach stwardniałych betonów, pobranych z wykonanych nawierzchni betonowych, stwierdzono występowanie nieprawidłowości struktury napowietrzania, takich jak:

- niedostateczna lub nadmierna zawartość powietrza w stwardniałym betonie,
- niekorzystny rozkład średnic pęcherzyków powietrza: mało pęcherzyków o średnicach poniżej 300 μm , a nadmiar pęcherzyków o większych średnicach aż do 4 mm,
- niewłaściwe rozmieszczenie pęcherzyków powietrza, opisane wysokimi wartościami wskaźnika rozmieszczenia porów $L > 0,200$ mm.

Niewłaściwą strukturę porów powietrznych w betonie uzyskano w kilku przypadkach, pomimo zastosowania środków napowietrzających spełniających wymagania normowe.

W innych badanych przypadkach nawierzchni uzyskano wyniki świadczące o właściwej strukturze napowietrzenia betonów. Na podstawie analizy wskaźnika rozmieszczenia porów powietrznych w stwardniałym betonie w ciągu kilkunastu miesięcy prowadzenia prac betonowych betonie uzyskano świadectwo dobrej jednorodności, wysokiej jakości produkcji mieszanki betonowej i wykonania nawierzchni.

Wprowadzenie wymagania właściwej struktury porów powietrznych w stwardniałym betonie w OST GDDKiA jest uzasadnione i warte powtórzenia w krajowej normie PN-B-06265 z powodu braku takiego wymagania w PN-EN 206-1. Faktycznie nie będzie to nowy zapis normowy, a jedynie przedłużenie ważności wymagania sformułowanego w odniesieniu do betonu wzorcowego w normie PN-EN 934-2 na beton kontrolowany na odwiertach z wykonanej konstrukcji.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Powers T.C.: A working hypothesis for further studies of frost resistance. Jour. American Concrete Institute, 16, 4, 245-272, 1945
- [2] Fagerlund G.: Trwałość konstrukcji betonowych. Arkady, Warszawa 1997
- [3] Rusin Z.: Technologia betonów mrozoodpornych. Polski Cement, Kraków 2002
- [4] Ogólne Specyfikacje Techniczne D- 05.03.04 "Nawierzchnia betonowa". GDDKiA, Warszawa 2003
- [5] PN-V-83002 Lotniskowe nawierzchnie z betonu cementowego. Wymagania ogólne i metody badań. PKN, 1999
- [6] ZTV Beton-StB 01 "Uzupełniające techniczne warunki kontraktów i wytyczne w zakresie budowy betonowych nawierzchni dróg". Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Bonn 2001 (w jęz.niem.)
- [7] PN-EN 206-1: 2003 Beton - Część 1. Wymagania, właściwości, produkcja, zgodność. PKN, 2003
- [8] PN-88/B-06250 Beton zwykły. PKN, 1988
- [9] PN-B-06265 Krajowe uzupełnienie do normy PN-EN 206-1. PKN, 2003 (projekt)
- [10] PN-EN 934-2: 2002 Domieszki do betonu, zaprawy i zaczynu - Domieszki do betonu. Definicje i wymagania. PKN, 2002

- [11] *Zalocha D., Kasperkiewicz J.*: Zastosowanie ilościowej analizy obrazu do oceny struktury porów w betonie napowietrzonym. DROGI i MOSTY, nr 2/2002, 107-118
- [12] PN-EN 480-11: 2000 Domieszki do betonu, zaprawy i zaczynu. Oznaczanie charakterystyki porów powietrznych w stwardniałym betonie. PKN, 2000
- [13] *Elsen J., Lens N., Vyncke J., Aare T., Quenard D., Smolej V.*: Quality assurance and quality control of air entrained concrete. Cement and Concrete Research, 24, 1267-1276, 1994
- [14] *Elsen J.*: Automated air void analysis on hardened concrete. Results of a European intercomparison testing program. Cement and Concrete Research, 31, 1027-1031, 2001
- [15] *Rusin Z.*: Napowietrzanie betonu - możliwość optymalizacji. Konferencja DNI BETONU, Polski Cement, Szczyrk 2002
- [16] *Pigeon M., Pleau R.*: Durability of concrete in cold climates. E&FN SPON, 1995

EVALUATION OF AIR-ENTRAINMENT IN CONCRETE ROADS AND PARKING PAVEMENTS

Abstract

Application of air void structure testing method for evaluation of durability of concrete pavements in freeze-thaw conditions is presented. Tests were performed on hardened concrete specimens cored out of several recently constructed pavements like a road pavement, a frontier facilities pavement, ground and multistory parking slabs. Results of tests were analysed in relation to requirements imposed by national technical specifications and standards. Non-adequate air-pore structure was detected in some cases in spite of application of air entrainment admixtures conforming to standards. In several cases the test results confirmed the proper entrained air void structure. During several months of concrete pavement construction the monitored spacing factor of air voids in concrete was well below 0.200 mm and the adequate frost resistance test results were obtained. The significance of air voids structure parameters is discussed in relation to the commonly specified total air volume in concrete mix. Some possibilities for optimization of air voids structure in concrete pavements are indicated.

PODZIĘKOWANIE

Badania przeprowadzono w ramach Projektu Badawczego NATO Science for Peace SfP 97.1888, koordynowanego przez prof. A.M.Brandta w latach 1999-2003. W przygotowaniu próbek i oznaczaniu charakterystyki porów powietrznych w stwardniałym betonie uczestniczyli: mgr inż. Agnieszka Litorowicz, mgr inż. Dariusz Załocha oraz mgr inż. Marek Zieliński z IPPT PAN.