Daria Jóźwiak-Niedźwiedzka
Danuta Kowalska

Ocena parametrów struktury napowietrzenia betonów w nawierzchniach lotniskowych

ESTIMATION OF THE PARAMETERS OF THE AIR-VOID STRUCTURE IN AIRFIELD PAVEMENTS CONCRETE

Streszczenie

Tematem referatu jest ocena struktury porów powietrznych betonów wbudowanych na czterech obiektach lotniskowych w Polsce. Badania przeprowadzono na rdzeniach pobranych z nawierzchni (płaszczyzna postoju samolotów, droga startowa), wykonanych w roku 2007. Betony wykonano z cementu CEM I 42,5 przy stałym w/c, zastosowano piasek płukany i kruszywo granitowe do 22 mm, zmienna była natomiast konsystencja (zależna od sposobu układania) i domieszki pochodzące od różnych producentów.

Za podstawowe parametry świadczące o jakości napowietrzenia przyjęto całkowitą zawartość powietrza A, współczynnik rozmieszczenia porów powietrznych $\bar{L}$, powierzchnię właściwą porów α oraz zawartość mikroporów A_{300}, tj. porów mniejszych niż 300 μm. Badania przeprowadzono zgodnie z PN-EN 480-11:2000 za pomocą cyfrowej analizy obrazu na specjalnie do tego celu przygotowanych próbkach.

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono duże różnice w wartościach parametrów struktury napowietrzenia, mimo zastosowania domieszki napowietrzającej. Większość wyników badań znacząco odbiega od ogólnie przyjętych za poprawne. Okazuje się więc, że mimo dobrych receptur i właściwości mieszanek betonowych uzyskana struktura porowatości betonów nawierzchniowych nie zapewnia odporności na powierzchniowe łuszczenie. Można zatem przypuszczać, że popełniono błędy przy układaniu, zagęszczaniu czy pielęgnacji betonu w nawierzchniach.

dr inż. Daria Jóźwiak-Niedźwiedzka – Instytut Podstawowych Problemów Techniki, Polska Akademia Nauk
mgr inż. Danuta Kowalska – Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych

Abstract

Estimation of the parameters of the air-void structure in airfield pavements concrete is presented in the paper. The investigations were made on the cores taken from the four different polish airfields. The airfield pavements of cement concretes have been performed with the same water/cement ratio – equal 0.39, the same type of Portland cement CEM I 42.5R, sand fraction 0÷2 mm, and aggregate – granite, max. grain size 22 mm.

The microstructure of concretes was observed on the polished sections and the measurement of air voids sizes and their distribution (Air-content A, specific surface α, spacing factor $\overline{L}$ and A_{300} – content of micropores below 0.3 mm) using digital image analysis was carried on according to PN-EN 480-11:2000.

Obtained results showed significant differences in the concrete microstructures although the air-entraining agents were used. The results of a large majority of tested specimens differ from the values considered as acceptable. The scaling resistance test is necessary to explore the airfield concrete durability due to cyclic freezing and thawing in the presence of the saline solution or the solution used at the airfield pavements i.e. sodium acetate, sodium formate, urea.

1. Wstęp

Betonowe nawierzchnie lotniskowe (część pola wzlotów przeznaczona do ruchu, postoju i obsługi statków powietrznych, które wykonano z betonu [1]), muszą zapewnić bezpieczeństwo startów i lądowań statków powietrznych. Od nawierzchni lotniskowej wymaga się ciągłej sprawności technicznej i eksploatacyjnej, a w konsekwencji odpowiedniego zabezpieczenia ich przed oddziaływaniem destrukcyjnym. W okresie użytkowania nawierzchnie lotniskowe narażone są na szkodliwe działanie czynników zewnętrznych środowiska. Są to głównie zamrażanie i odmrażanie, działanie mediów występujących w procesie eksploatacyjnym, w tym głównie środków odladzających nawierzchnie, olejów, smarów, oddziaływanie termiczne pochodzące od silników lotniczych [2]. Ponadto dodatkowy destrukcyjny czynnik stanowią środki stosowane do odladzania samolotów.

Występujące w Polsce warunki klimatyczne, charakteryzujące się co najmniej kilkudziesięcioma przejściami przez 0°C, kilkunastoma dniami z zamarzającą mżawką i dużą liczbą dni dżdżystych, są wyjątkowo niesprzyjające dla trwałości nawierzchni, [3]. Aby zapewnić odporność betonu na działanie ujemnej, cyklicznej temperatury w obecności soli odladzających na nawierzchnie lotniskowe, stosuje się wyłącznie napowietrzone betony, zgodnie z normą PN-V-83002:1999 „Lotniskowe nawierzchnie z betonu cementowego. Wymagania ogólne i metody badań" [4]. Napowietrzanie mieszanki betonowej jest powszechnie przyjętym sposobem przeciwdziałania niszczenia matrycy cementowej na skutek naprężeń spowodowanych zwiększeniem się objętości zamarzającej wody w kapilarach. Rozmiary porów w matrycy cementowej zmieniają się w szerokim zakresie i większość porów jest dostępna dla wody. Jednak nie łączna porowatość (objętość wolnych przestrzeni), ale rozkład porów, ich rozmiary i ciągłość wpływają na trwałość zaczynu cementowego i betonu. Związek między mrozoodpornością a strukturą porowatości stwardniałego zaczynu cementowego przyjęto określać wskaźnikiem rozmieszczenia porów powietrznych $\bar{L}$ (*spacing factor*), interpretowanym jako parametr powiązany z maksymalną odległością średniego punktu w zaczynie cementowym od brzegu najbliższego pora, Powers [5]. Innymi parametrami charakteryzującymi strukturę porów w betonie oprócz całkowitej porowatości i wskaźnika $\bar{L}$ są: powierzchnia właściwa układu porów powietrznych α oraz zawartość mikroporów A_{300}. Powierzchnia właściwa przedstawia wynik podzielenia całkowitej powierzchni porów powietrznych przez ich objętość i jest wyrażona w $mm^2/mm^3 = mm^{-1}$. Parametr A_{300} określa zawartość powietrza w porach powietrznych o średnicy 0,3 mm (300 µm) lub mniejszej, które są najbardziej skuteczne w ochronie przeciw uszkodzeniu betonu podczas cykli zamrażania i odmrażania [6].

2. Wymagania dotyczące napowietrzenia nawierzchni lotniskowej z betonu cementowego

Wymaganie odporności betonu nawierzchniowego na zmienne działanie temperatur odnosi się tylko do mrozoodporności wewnętrznej betonu oznaczanej zgodnie z nieaktualną już normą PN-88/B-06250 [7]. Specyfikacje techniczne obowiązujące przy prowadzeniu prac podczas budowy lub modernizacji lotnisk opracowywane są z uwzględnieniem postanowień normy PN-EN 206-1 [8], biorąc również pod uwagę odporność na powierzchniowe złuszczenie (dotyczy to np. obiektu 2, z którego pobrano próbki do badań). Ze względu na agresywne oddziaływanie zamrażania/rozmrażania ze środkami odladzającymi, beto-

ny nawierzchniowe klasyfikuje się do klasy ekspozycji XF4. Zalecane wartości graniczne dotyczące składu oraz właściwości betonu podane w ww. normie są następujące: minimalna zawartość cementu – 340 kg/m^3, w/c – maks. 0,45, minimalna zawartość powietrza w mieszance betonowej – 4,0 %. Wartości te nie spełniają dotychczasowych wymagań dla betonu stosowanego do budowy lotnisk wojskowych. Specyfikacje techniczne, oprócz obowiązku kontroli zawartości powietrza w mieszance betonowej, zawierają czasem zalecenie wykonania dodatkowo badania równomierności rozmieszczenia pęcherzyków powietrza w betonie metodą mikroskopową.

Zalecaną zawartość powietrza w mieszance betonowej według Katalogu Typowych Konstrukcji Nawierzchni Sztywnych [9] przedstawiono w tablicy 1.

Tablica 1. Zalecana zawartość powietrza w mieszance betonowej

Maksymalny wymiar ziaren kruszywa (mm)	Zawartość powietrza w mieszance betonowej (% obj.)			
	bez domieszki uplastyczniającej lub upłynniającej		z domieszką uplastyczniającą lub upłynniającą	
	średnia dzienna	minimalna	średnia dzienna	minimalna
32	4,0	3,5	5,0	4,5

W celu porównania, zgodnie z wymaganiami Federal Aviation Administration (FAA), [10], w betonie na nawierzchnie lotniskowe wymagana wartość w/c wynosi maks. 0,45, przy czym w przypadku nawierzchni narażonych na zamrażanie/rozmrażanie i wpływ środków odladzających ustala się tę wartość na poziomie niższym. Zalecaną zawartość powietrza w różnych warunkach klimatycznych (określoną zgodnie z normą ASTM C231 [11]) podano w tablicy 2.

Tablica 2. Zalecana zawartość powietrza w mieszance betonowej wg FAA [10]

Poziom narażenia	Zawartość powietrza [%]				
	maksymalny wymiar ziaren kruszywa [mm]				
	51	38	25	19	13
Łagodny	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
Umiarkowany	4,0	4,5	4,5	5,0	5,5
Surowy	5,0	5,5	6,0	6,0	7,0

Poziom narażenia:
- Łagodny – brak narażenia na zamrażanie/rozmrażanie i środki odladzające. Poprawa urabialności przeważa nad względami trwałości.
- Umiarkowany – występuje narażenie na zamrażanie/rozmrażanie, ale beton nie jest wcześniej poddany działaniu wilgoci lub wody w długim okresie, brak oddziaływania środków odladzających.
- Surowy – beton narażony na działanie środków odladzających i innych czynników agresywnych lub występuje ciągłe oddziaływanie wilgoci lub wody przed zamarzaniem.

Prawidłowo zaprojektowana, wyprodukowana i wbudowana mieszanka betonowa jest niezbędna do uzyskania trwałego betonu. Beton, który będzie narażony na mróz, musi zawierać system odpowiednio rozmieszczonych porów powietrznych. Charakterystykę porów powietrznych w stwardniałym betonie określa się wg normy PN-EN 480-11:2000 [12], w USA wg ASTM C457, [13]. Wymagany w USA wskaźnik rozmieszczenia porów w betonie nawierzchniowym wynosi maks. 0,20 mm [14], tyle samo co w [15].

Celem referatu jest przedstawienie wyników badań mikrostruktury porów powietrznych w lotniskowych nawierzchniach z betonu cementowego, wykonanych w 2007 roku na czterech lotniskach w Polsce, w których mimo poprawnej receptury nie uzyskano wymaganych parametrów napowietrzenia z uwagi na odporność betonu na cykle zamrażania przy stosowaniu środków do odladzania nawierzchni.

3. Opis przeprowadzonych badań

3.1. Badane betony

Cztery betony nawierzchniowe poddane ocenie z uwagi na ich parametry charakteryzujące układ porów wykonane były przy takim samym wskaźniku wodno/cementowym równym 0,39. Jako kruszywa grubego użyto grysu granitowego frakcji 2–8 mm, 8–16 mm oraz 16–22 mm, jako drobnego – piasku frakcji 0÷2 mm. Betony były wykonane na cemencie CEM I 42,5R (zawartość cementu od 370 do 397 kg/m^3). Porównywane mieszanki betonowe zostały napowietrzone przy użyciu różnych środków (tablica 3). Z uwagi na sposób układania mieszanki betonowej, mechaniczny bądź ręczny, zróżnicowano konsystencję mieszanek. Wyniki badania porowatości mieszanki betonowej pokazano w tablicy 3.

Tablica 3. Zastosowane domieszki oraz porowatość mieszanek badana metodą ciśnieniową

Oznaczenie nawierzchni	Baza domieszki upłynniającej	Baza domieszki napowietrzającej	Konsystencja	Porowatość
				V, [%]
1	naftaleno-sulfoniany	żywice naturalne	plastyczna	5,0
2	naftaleno-ligno-sulfoniany	syntetyczne tensydy	gęstoplastyczna	4,9
3	sulfonowane polikondensaty naftalenowe i melaminowe	syntetyczne tensydy	gęstoplastyczna	4,6
4	–	wodny roztwór soli amin alifatycznych i detergentów*	gęstoplastyczna	4,6

**domieszka kompleksowa.*

3.2. Opis badań struktury napowietrzenia

Badania zostały przeprowadzone na próbkach stwardniałego betonu pobranego w wieku bliskim wykonania badania wytrzymałości na ściskanie, tj. po ok. 28 dniach dojrzewania z czterech wykonanych nawierzchni lotniskowych, płaszczyzny postoju samolotu lub drogi startowej.

Przygotowanie próbek do badania parametrów charakteryzujących układ porów w stwardniałym zaczynie wymagało specjalnie opracowanej procedury, zastosowanej systematycznie do wszystkich próbek. W omawianych badaniach stosowano próbki o wymiarach 100×100×25 mm, wycięte z rdzeni pobranych z konstrukcji, fot. 1. Po usunięciu niepożądanych cząstek, pochodzących od cięcia i po wysuszeniu próbka poddawana

była wielokrotnemu szlifowaniu coraz drobniejszymi proszkami szlifierskimi (SiC), o różnych gradacjach. Po zakończeniu etapu szlifowania próbka podlegała kontroli jakości wykonania. Kolejnym etapem obróbki było kontrastowanie powierzchni zgładu w celu wyodrębnienia porów z badanej powierzchni tak, aby mogły być łatwo rozpoznane przez system analizy obrazu. Po tej operacji zgład betonowy z porami wypełnionymi kontrastującym z pozostałą częścią próbki białym pigmentem był badany za pomocą systemu automatycznej analizy obrazu. W celu zachowania jednakowych warunków przeprowadzanych testów pomiary wykonywano w czasie nie przekraczającym 2 godz. od zakończenia obróbki.

Fot.1. Zdjęcie przykładowego odwiertu pobranego z nawierzchni: a) po dostarczeniu do laboratorium, b) po przecięciu

System automatycznej analizy obrazu (opisany szczegółowo w [16]) posłużył do oznaczenia parametrów, charakteryzujących układ porów w stwardniałym betonie. W skład systemu wchodziły analizator obrazu Image Pro Plus 4.1 z dodatkowym modułem Scope Pro, mikroskop stereoskopowy Nikon SMZ800, kamera Sony DXC950P oraz stolik skaningowy Marzhäuser SCAN 150x150.

Parametry charakteryzujące układ porów w stwardniałym betonie, tj.:

- całkowita zawartość powietrza A [%],
- wskaźnik rozmieszczenia porów $\overline{L}$ [mm],
- powierzchnia właściwą porów α [mm^{-2}/mm^{-3}] oraz
- zawartość mikroporów A_{300} [%],
- wyznaczono wg zaleceń normy PN-EN 480-11:2000 [12], przyjmując obliczenia metodą linii trawersowej wykonane automatycznie.

3. Wyniki badań

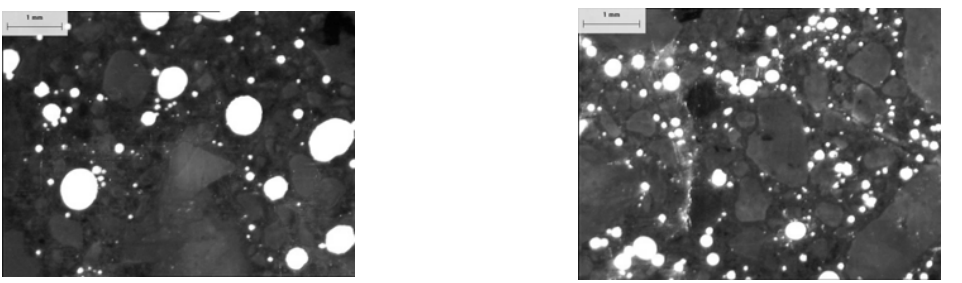
W tablicy 4 zestawiono wartości parametrów struktury porów powietrznych (średnie z dwóch próbek) w badanych betonach. Otrzymano zróżnicowane wyniki całkowitej zawartości powietrza wszystkich betonów, w odróżnieniu od wyników badania porowatości w mieszance betonowej metodą ciśnieniową, tablica 3.

Tablica 4. Badane parametry mikrostruktury porów powietrznych

Oznaczenie nawierzchni	Zawartość powietrza	Wskaźnik rozstawu porów	Powierzchnia właściwa	Zawartość mikroporów
	A, [%]	$\bar{L}$ [mm]	α [mm^{-1}]	A_{300} [%]
1	4,30	0,28	17,4	0,95
2	5,12	0,20	21,8	2,27
3	2,26	0,26	27,1	0,89
4	1,51	0,29	26,8	0,52

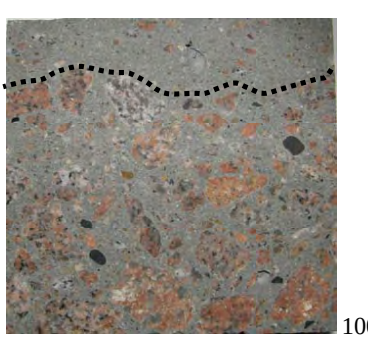
Największą zawartość powietrza A wykazały betony nr 1 i 2. Na fot. 2 widać różnice w sposobie rozmieszczenia oraz wielkości i ilości wprowadzonych pęcherzyków powietrza w tych betonach. Choć beton nr 1 zawierał 4,30 % powietrza, to jednak pozostałe parametry odbiegały od ogólnie przyjętych za właściwe z uwagi na trwałość mrozową.

Najlepsze wyniki z uwagi na ilość, wielkość oraz sposób rozmieszczenia pęcherzyków powietrza wykazał beton nr 2, tj. $A > 5\%$, $\bar{L} < 0{,}20$, $\alpha > 20$ and $A_{300} > 1{,}5$.



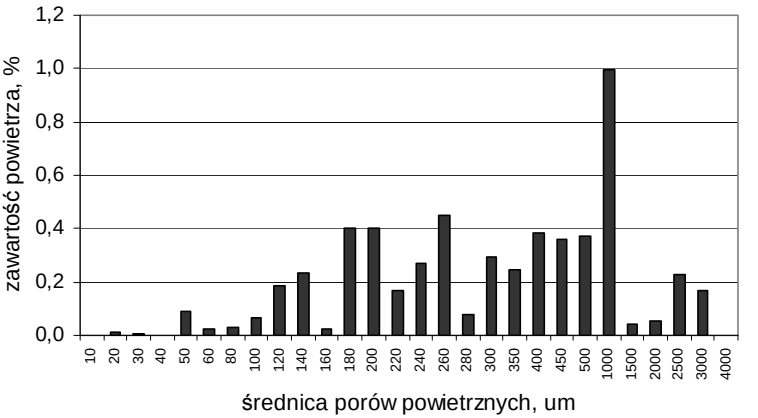
Fot. 2. Przykład rozmieszczenia i wielkości porów powietrznych w badanych betonach (beton nr 1 – lewa fotografia, beton nr 2 – prawa fotografia)

Największą wartość współczynnika rozstawu porów oraz najmniejszą zawartość mikroporów wykazał beton oznaczony numerem 4, wykonany bez dodatku domieszki upłynniającej, jedynie z domieszką napowietrzającą. Beton nr 3 miał dwukrotnie mniejszą zawartość powietrza niż wykazało badanie porowatości mieszanki betonowej. Prawdopodobnie zmniejszenie całkowitej porowatości wynikało z błędów przy układaniu, czy też zbyt długim wibrowaniu mieszanki betonowej. Na fot. 3 zaprezentowano przekrój poprzeczny przez próbkę z widoczną przewibrowaną strefą, ok. 25 mm.

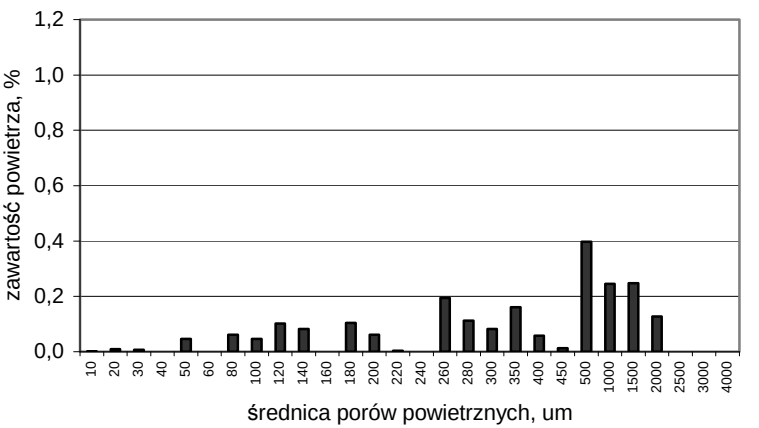


100x100 mm

Fot. 3. Przekrój poprzeczny przez próbkę nr 3 – widoczna granica między strefą przewibrowaną (brak kruszywa grubego) a poprawnie rozłożonym kruszywem w mieszance betonowej



Rys. 4. Wykres procentowej zawartości powietrza w poszczególnych klasach średnic porów w betonie nr 2, *A*=5,12%



Rys. 5. Wykres procentowej zawartości powietrza w poszczególnych klasach średnic porów w betonie nr 4, *A* = 1,51%

Przeprowadzono również analizę rozkładu wielkości porów na podstawie zmierzonych wielkości cięciw. Wykresy na rys. 4 i 5 pokazują tendencje zmian rozkładu wielkości porów w betonie o najlepszych parametrach napowietrzenia – nr 2 oraz najgorszych – nr 4. Jak pokazano na wykresie (rys. 5), przeważająca część porów w stwardniałym betonie nr 4 ma średnice w granicach od 0,50 mm do 1,5 mm. W betonie nr 2 większość porów również mieści się w przedziale ok. 1 mm, jednak zawartość powietrza jest to znacząco większa, ok. 1%, w odróżnieniu od 0,4% w betonie nr 4.

5. Wnioski

Zastosowanie metody automatycznej analizy obrazu pozwoliło na dokładną ocenę mikrostruktury napowietrzenia czterech różnych betonów nawierzchniowych. Z przepro-

wadzonych badań wynika, że uzyskanie żądanych parametrów mikrostruktury porów powietrznych w betonach nawierzchniowych z uwagi na ich trwałość mrozową nie jest zabiegiem łatwym do wykonania. Pomimo zastosowania środków napowietrzających, które spełniały wymagania normowe, w większości przypadków nie uzyskano właściwej struktury porów. Jedynie beton oznaczony numerem 2 spełnił wymaganie wg [14, 15] $\bar{L} \leq 0{,}20$ mm. Porównanie rozkładu wielkości porów w betonie pozwala jednoznacznie odróżnić struktury porów powietrznych – rys. 4 i 5. Można przewidywać, że 3 z 4 betonów nie wykażą odporności na cykliczne zamrażanie przy zastosowaniu środków do odladzania, co w konsekwencji spowoduje konieczność szybkiej naprawy danej części nawierzchni lotniskowej z uwagi na względy bezpieczeństwa.

Norma dotycząca wykonywania lotniskowych nawierzchni z betonu cementowego, [4] ogranicza dobór składników mieszanki betonowej do rodzaju cementu CEM I 42,5 (lub cement drogowy klasy nie niższej niż 42,5) oraz do jednego rodzaju kruszywa grubego – grysu granitowego, maks. wymiar ziarna 32 mm. Dlatego też należy wziąć pod uwagę zagadnienie kompatybilności domieszek upłynniających oraz napowietrzających z cementem sprawdzane na składach roboczych podczas próby technologicznej. Także z uwagi na klasę środowiska XF4, badanie odporności betonu nawierzchniowego na powierzchniowe łuszczenie jest zalecane z powodu określenia jego trwałości mrozowej w obecności soli odladzających bądź roztworów wykorzystywanych do stosowanych do odladzania nawierzchni lotniskowych, takich jak np. octan sodu, mrówczan sodu czy mocznik.

Literatura

[1] Nita P.: Budowa i utrzymanie nawierzchni lotniskowych. Wyd. Komunikacji i Łączności Warszawa 1999.

[2] Wang K., Nelsen D.E., Nixon W.A.: Damaging effects of deicing chemicals on concrete materials, Cement and Concrete Composites, Vol. 28, 2, February, 2006, s. 173-188.

[3] Kowalska D., Grabowski P.: Środki odladzające stosowane na lotniskach z uwzględnieniem ich wpływu na środowisko, IV Konferencja „Dni Betonu – Tradycja i Nowoczesność", Wisła, 9-11 października 2006.

[4] PN-V-83002:1999 Lotniskowe nawierzchnie z betonu cementowego. Wymagania ogólne i metody badań.

[5] Powers T.C.: The air requirement of frost-resistant concrete. Highway Research Board, Proceedings of the Annual Meeting 29, 1949, 184-211.

[6] Jóźwiak-Niedźwiedzka D.: Zapobieganie łuszczeniu powierzchni betonowych przy użyciu nawilżonego kruszywa lekkiego. Cz. I – stan wiedzy, Drogi i Mosty, 2/2006, s. 37-54.

[7] PN-88/B-06250 Beton zwykły.

[8] PN-EN 206-1 Beton. Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.

[9] Katalog Typowych Konstrukcji Nawierzchni Sztywnych. GDDP. Opr. IBDiM, Warszawa 2001.

[10] Advisory Circular: Standards for specifying construction of airports: AC 150/5370-10B Federal Aviation Administration. U.S., 2005.

[11] ASTM C231-08, Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method.

[12] PN-EN 480-11:2000, Domieszki do betonu, zaprawy i zaczynu. Metody badań. Oznaczanie charakterystyki porów powietrznych w stwardniałym betonie, PKN, Warszawa 2000.

[13] ASTM C457, Standard Test Method for Microscopical Determination of Parameters of the Air-Void System in Hardened,1991, s. 229-241.

[14] Report IPRF-01-G-002-1: Best practices for airport portland cement concrete pavement construction (rigid airport pavement). Innovative Pavement Research Foundation. 2003 (http://ntlsearch.bts.gov/tris/record/tris/00960830.html).

[15] Ogólne Specyfikacje Techniczne. D-05.03.04, Nawierzchnia betonowa. Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad, Warszawa 2003.

[16] Brandt A.M. et al., Metody diagnozowania betonów i betonów wysokowartościowych na podstawie badań strukturalnych, IPPT PAN, NATO Scientific Affair Division, Warszawa 2003, p. 218.