

MONOGRAFIE TECHNOLOGII BETONU

X KONFERENCJA

DNI

BETONU

TRADYCJA I NOWOCZESNOŚĆ

Wista • 8-10 października 2018

TOM 2

Mariusz Dąbrowski
Michał A. Glinicki
Aneta Antolik
Kinga Dziedzic

Zastosowanie sekwencyjnej metody ciśnieniowej do oceny jakości napowietrzenia mieszanki betonowej na budowie dróg ekspresowych

APPLICATION OF THE SEQUENTIAL PRESSURE METHOD FOR AN ASSESSMENT OF AIR-ENTRAINMENT OF CONCRETE MIX ON THE EXPRESSWAY CONSTRUCTION SITE

Streszczenie

Przedmiotem referatu jest przydatność zmodyfikowanej metody ciśnieniowej do wyznaczenia charakterystyki porów w napowietrzonym mieszance betonowej w warunkach polowych na miejscu budowy nawierzchni drogowej. Metoda polegająca na stopniowym zwiększaniu ciśnienia na mieszankę, w określonej sekwencji, pozwala wyznaczyć parametr zwany liczbą SAM. Zgodnie z oczekiwaniem wynalazców metoda powinna być skorelowana ze wskaźnikiem rozmieszczenia porów w betonie. Przeprowadzone badania doświadczalne obejmowały rozpoznanie w warunkach laboratoryjnych powtarzalności metody oraz pomiary napowietrzenia mieszanki na dolną i górną warstwę betonu w nawierzchni odcinków dróg ekspresowych. Na próbkach stwardniałego betonu wyznaczono wskaźnik rozmieszczenia porów, zgodnie z PN-EN 480-11 i przeanalizowano zgodność charakterystyki napowietrzenia betonu stwardniałego z charakterystyką napowietrzenia mieszanki na podstawie liczby SAM. Wykonanie pomiarów w warunkach budowy dwuwarstwowej nawierzchni drogi ekspresowej nie nastęczało kłopotów technicznych. Jednakże w wielu przypadkach stwierdzono niewystarczającą korelację charakterystyki porów w mieszance i w betonie stwardniałym. Przeanalizowano czynniki wpływające na zaobserwowane niezgodności.

dr inż. Mariusz Dąbrowski – Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa
prof. dr hab. inż. Michał A. Glinicki – Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa
mgr inż. Aneta Antolik – Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa
mgr inż. Kinga Dziedzic – Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa

Abstract

The subject of the paper is the usefulness of a modified pressure method to determine the pore characteristics of air-entrained concrete mixtures on the construction site of the road pavements. The method, which consists of a gradually increasing pressure on the mixture in a specific sequence, allows to determine a parameter called the SAM number. According to the expectation of the inventors, the method should be correlated with the spacing factor in concrete. Experimental research included the recognition in laboratory conditions of repeatability of the method and measurements of air voids characteristics of the concrete mixture on the lower and upper layer of concrete expressways road pavement. On the hardened concrete samples, the air voids characterization was determined in accordance with PN-EN 480-11. The compatibility of air voids distribution of hardened concrete with the characteristics of the concrete mixture based on the SAM number was analyzed. Performing measurements on the construction site of the expressway did not cause technical problems. However, in many cases, the air voids characteristics in the concrete mixture and in hardened concrete have not been sufficiently correlated. The factors influencing observed incompatibilities were analyzed.

1. Wprowadzenie

Stosowanie betonu w warunkach silnego nasycenia wodą ze środkami odladzającymi lub wodą morską w środowisku cyklicznego oddziaływania mrozu wymaga stosowania domieszek napowietrzających i ograniczenia stosunku woda-cement. Ograniczenia recepturowe mieszanki betonowej, zwłaszcza dotyczące zawartości cementu i właściwości kruszyw, wskazane są w PN-EN 206. W celu zapewnienia odpowiedniej trwałości betonu w środowisku XF4 zaleca się odpowiednie napowietrzenie mieszanki, aby uzyskać równomiernie rozmieszczone pęcherzyki powietrza, najlepiej o średnicach mniejszych od 300 μm . Napowietrzenie mieszanki betonowej kontroluje się w warunkach budowy jedynie pomiarem zawartości powietrza metodą ciśnieniową. Wyznaczenie charakterystyki porów w betonie, zgodnie z PN-EN 480-11 pozwala zweryfikować rozkład i wielkość pęcherzyków powietrza, ale odbywa się na próbkach stwardniałego betonu, więc nie pozwala na bieżące korekty receptury na budowie. Zmiany zapylenia kruszywa, zróżnicowanie uziarnienia drobnych frakcji oraz inne zmienne technologiczne powodują zróżnicowanie zarówno zawartości powietrza w mieszance, jak też rozkładu wielkości pęcherzyków powietrza, [1], [2]. Dlatego pożądana jest metoda bieżącej kontroli rozkładu wielkości porów w mieszance betonowej, zwłaszcza możliwa do zastosowania w miejscu budowy nawierzchni betonowych. W takim przypadku, przy zastosowaniu metody układania ślizgowego za pomocą wysokowydajnych maszyn i urządzeń, na dziennej działce roboczej można ułożyć nawet 2500 m^3 betonu. Niedostatki kontroli jakości napowietrzenia mogą być zatem brzemienne w skutkach.

Ley, Frazier i Tabb [3] zaproponowali modyfikację znanego aparatu ciśnieniowego do pomiaru zawartości powietrza (zgodnego z ASTM C231 typ B, a także z PN-EN 12350-7). Opracowali sekwencyjną metodę ciśnieniową i urządzenie o nazwie „Super Air Meter” (SAM). Modyfikacja polegała m.in. na założeniu cyfrowego ciśnieniomierza, wzmocnieniu konstrukcji urządzenia, aby dostosować je do większego ciśnienia oraz opracowanie specyficznej sekwencji wywierania ciśnienia na mieszankę. Podstawą do oceny dystrybucji pęcherzyków powietrza w mieszance, zgodnie z koncepcją autorów [3] jest charakterystyczne zachowanie pęcherzyków powietrza różniących się wielkością przy zwiększaniu ciśnienia wywieranego na mieszankę betonową. Pęcherzyki powietrza o dużych średnicach przy zwiększaniu ciśnienia zmniejszają swoją objętość, natomiast mniejsze pęcherzyki, charakterystyczne w przypadku betonu właściwie napowietrzonego, ulegają rozpuszczeniu. Pomiary udokumentowane w [4] stwierdzają występowanie zależności tzw. liczby SAM ze wskaźnikiem rozmieszczenia porów (\bar{L}) wyznaczanym z modelu Powersa, zgodnie z normą ASTM C457. Liczba SAM jest określona różnicą ciśnienia w cylindrze pomiarowym przy drugiej i pierwszej sekwencji wzrostu ciśnienia, wyrażoną w jednostkach psi. Ponieważ to ciśnienie nie ma sensu fizycznego, podzielono je przez stałą, równą 1 psi, uzyskując w rezultacie bezwymiarowy iloraz, nazywany ostatecznie liczbą SAM. Badania zostały wykonane dla serii mieszanek betonowych o konsystencji od plastycznej do ciekłej, z jednym rodzajem kruszywa. Szersze badania przeprowadzone przez dwa niezależne zespoły w warunkach laboratoryjnych i na placu budowy [5] pozwoliły na wyznaczenie korelacji między liczbą SAM i wskaźnikiem rozmieszczenia porów oraz wskaźnikiem trwałości wyznaczonym w bezpośrednim badaniu mrozoodporności objętościowej metodą ASTM C666. Zależności nie są jednoznaczne i wymagają weryfikacji w odniesieniu do szerszej grupy mieszanek betonowych.

Celem badań przedstawionych w referacie jest sprawdzenie przydatności omówionej, zmodyfikowanej metody ciśnieniowej do pośredniego wyznaczenia charakterystyki porów w napowietrzanej mieszance betonowej w warunkach polowych. Zakres badań obejmuje mieszanki wytwarzane w warunkach przemysłowych na dolną i na górną warstwę betonu w dwuwarstwowej nawierzchni drogowej. Wstępne badania przeprowadzono na mieszankach wykonanych w laboratorium IPPT PAN.

2. Opis badań doświadczalnych

2.1. Mieszanki betonowe

Mieszanki betonowe na górną (GWN) i dolną (DWN) warstwę nawierzchni drogi ekspresowej zostały wykonane zgodnie z rozwiązaniami materiałowymi wykonawców. Zastosowano następujące materiały:

- cement CEM I 42,5N – NA, zawartość 375 i 420 kg/m³ odpowiednio w przypadku DWN i GWN,
- kruszywo drobne – piasek Borowce, kruszywo grube do 22 mm – gabro Słupiec (DWN),
- kruszywo drobne – piasek Borowce, kruszywo grube do 8 mm – gabro Braszowice (GWN),
- woda w ilości odpowiadającej $w/c = 0,39$ i $0,35$,
- domieszki napowietrzająca i uplastyczniająca.

Skład i właściwości betonu spełniały założone wymagania zgodnie z Katalogiem [6].

2.2. Metody badawcze

Badania podstawowych właściwości mieszanki betonowej wykonano zgodnie z procedurami przedstawionymi w dokumentach normalizacyjnych:

- PN-EN 12350-7:2011 – zawartość powietrza w mieszance,
- PN-EN 12350-2:2011 – konsystencja metodą opadu stożka,
- PN-EN 12350-6:2011 – gęstość objętościowa.

Zasadniczym pomiarem programu badawczego było wyznaczenie liczby SAM za pomocą sekwencyjnej metody ciśnieniowej. Procedura wykonania oznaczenia była zgodna z AASHTO TP 118-17. Sposób przeprowadzenia badań zilustrowano na fotografiach 1 i 2. Badania odbywały się przed maszyną rozkładającą beton, stanowiącą początek zestawu do układania nawierzchni dwuwarstwowej z eksponowanym kruszywem metodą ślizgową. Umożliwiło to szybki dostęp do przywiezionej mieszanki betonowej w zaplanowanych terminach badań. Pomiar dobywał się przy dużym natężeniu hałasu, a urządzenie pomiarowe nie było specjalnie izolowane od drgań występujących w otoczeniu układarki.

Mieszanka była dostarczana na miejsce budowy samochodami, z których pobierano próbkę do pojemnika. Zagęszczanie mieszanki betonowej w komorze dolnej aparatu SAM przeprowadzono za pomocą wibratora wgłębnego o przekroju kwadratowym 25 mm, w dwóch warstwach, nie dotykając wibratorem ścian komory aparatu. Procedura zagęszczania polegała na 3 sekundowym wibrowaniu przy wkładaniu wibratora w mieszankę betonową i 3 sekundowym w trakcie jego wyjmowania. Pomiar liczby SAM trwał nie więcej niż 15 minut.

Z dostarczonej mieszanki formowano też próbki sześciennie o boku 100 mm, zagęszczając je na stole wibracyjnym i przechowując później w warunkach normowych wysokiej wilgotności i temperatury około 20°C. Po stwardnieniu próbki zostały wykorzystane do wyznaczenia wytrzymałości na ściskanie, zgodnie z normą PN-EN 12390-3:2011 na trzech próbkach oraz do wyznaczenia charakterystyki porów powietrznych, zgodnie z PN-EN 480-11:2008 na dwóch próbkach. Procedurę pomiaru charakterystyki porów za pomocą mikroskopowego systemu analizy obrazu opisano wcześniej w [7], [8]. Całkowita długość linii trawersowej na dwóch zglądach betonowych wynosiła 2414 mm.

a)



b)



Fot. 1. Widok polowego stanowiska badawczego do wyznaczenia charakterystyki napowietrzenia mieszanki betonowej na miejscu budowy drogi ekspresowej a) zagęszczanie mieszanki, b) pomiar aparatem SAM



Fot. 2. Sposób prowadzenia pomiaru liczby SAM w warunkach polowych na miejscu budowy drogi ekspresowej

3. Wyniki badań i dyskusja

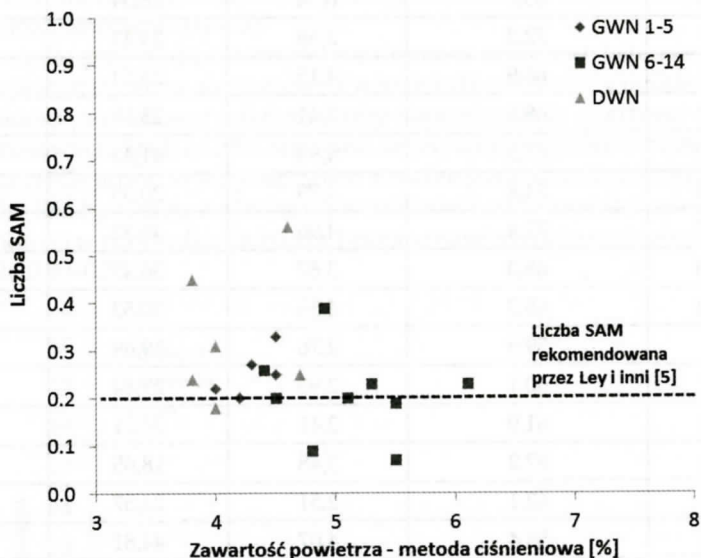
W tabeli 1 przedstawiono wyniki badań mieszanek betonowych dostarczonych do budowy nawierzchni drogi ekspresowej. W pierwszej kolejności wykonano pomiary mieszanki betonowej przeznaczonej na GWN w pięciu terminach od pobrania betonu: zaraz po dostawie z wytwórni betonu (GWN1) i następnie co 20 minut (GWN2-GWN5), czyli po czasie odpowiadającym badaniu aparatem SAM wraz z czyszczeniem. Po czterdziestu minutach od dostawy stwierdzono znaczną redukcję urabialności mieszanki, uniemożliwiającą prawidłowe zagęszczenie betonu, zgodnie z zakładaną procedurą. Dlatego wibrowanie mieszanki w przypadku betonu GWN3-GWN5 przedłużano, aż do prawidłowego zagęszczenia.

Tabela 1. Właściwości mieszanki betonowej na górną (GWN) i dolną (DWN) warstwę nawierzchni

Oznaczenie		Opad stożka [mm]	Gęstość [kg/m ³]	Zawartość powietrza metodą ciśnieniową [%]	Zawartość powietrza – SAM [%]	Liczba SAM
GWN	1	30	2420	4,5	3,9	0,33
	2	20	2420	4,5	4,0	0,25
	3	0	2410	4,3	3,9	0,27
	4	0	2410	4,2	3,5	0,20
	5	0	2410	4,0	3,6	0,22
GWN-6		20	2420	5,5	7,1	0,19
GWN-7		10	2410	4,9	4,5	0,39
GWN-8		10	2420	4,8	4,4	0,09
GWN-9		20	2420	5,1	4,9	0,20
GWN-10		10	2420	5,5	5,4	0,07
GWN-11		20	2410	5,3	5,0	0,23
GWN-12		20	2410	6,1	6,6	0,23
GWN-13		20	2410	4,5	4,0	0,20
GWN-14		20	2420	4,4	4,1	0,26
DWN-1		20	2460	4,0	3,9	0,31
DWN-2		10	2460	3,8	3,7	0,45
DWN-3		10	2450	4,0	3,8	0,18
DWN-4		20	2450	3,8	3,8	0,24
DWN-5		10	2460	4,6	4,4	0,56
DWN-6		10	2460	4,7	4,3	0,25

Wydłużenie wibrowania spowodowało zmniejszanie zawartości powietrza i liczby SAM z każdym kolejnym pomiarem. Na podstawie powyższych obserwacji dla pozostałych oznaczeń liczby SAM założono wykonywanie badania zaraz po dostawie mieszanki betonowej na plac budowy. Wyznaczona w pomiarach sekwencyjną metodą ciśnieniową

liczba SAM mieściła się w granicach od 0,07 do 0,39 w przypadku GWN i od 0,18 do 0,56 w przypadku DWN. Odnosząc liczbę SAM do pomiaru zawartości powietrza metodą ciśnieniową stwierdzono osiągnięcie wartości granicznej rekomendowanej liczby SAM po przekroczeniu około 5% zawartości powietrza w mieszance w przypadku betonu GWN (rys. 1).



Rys. 1. Zależność Liczby SAM od zawartości powietrza mierzonej konwencjonalną metodą ciśnieniową betonu z budowy drogi ekspresowej

Próbki betonu pobrane na budowie i przechowywane w warunkach normowych przez 28 dni wykazały wytrzymałość na ściskanie od 63,7 do 74,8 MPa i od 57,2 do 62,1 MPa odpowiednio w przypadku warstwy górnej i dolnej (tabela 2). Charakterystyka porów jest znacząco zróżnicowana pomimo faktu, że badane były jedynie dwa rodzaje betonu przy założeniu jednorodności dostarczanych mieszanek betonowych podczas ślizgowego wykonywania nawierzchni dwuwarstwowej. Wskaźnik rozmieszczenia porów w stwardniałym betonie wykazywał względnie mniejszy rozrzut wyników niż pomiary sekwencyjną metodą ciśnieniową.

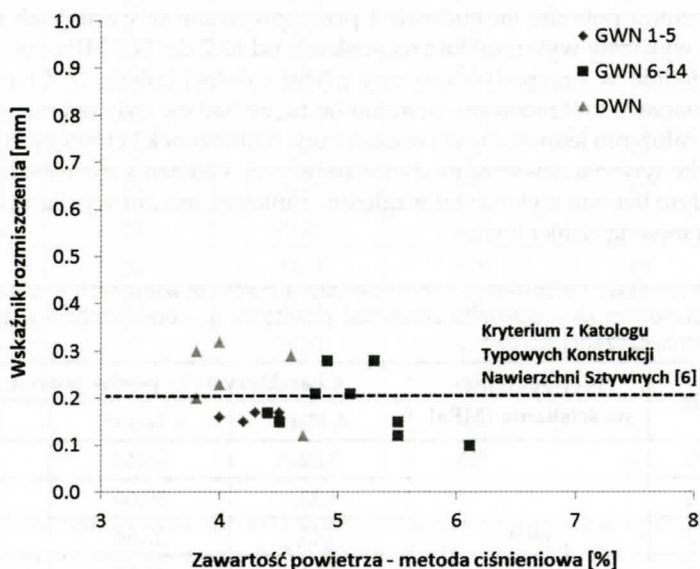
Tabela 2. Wytrzymałość na ściskanie i charakterystyka porów powietrznych w stwardniałym betonie nawierzchniowym (A – całkowita zawartość powietrza, α – powierzchnia właściwa porów, \bar{L} wskaźnik rozmieszczenia porów)

Oznaczenie		Wytrzymałość na ściskanie [MPa]	Charakterystyka porów powietrznych		
			A [%]	α [mm ⁻¹]	\bar{L} [mm]
GWN	1	69,9	3,52	38,43	0,17
	2		3,33	39,66	0,16
	3		3,45	37,54	0,17
	4		3,06	41,19	0,15
	5		3,21	39,73	0,16

Tabela 2. Cd. Wytrzymałość na ściskanie i charakterystyka porów powietrznych w stwardniałym betonie nawierzchniowym (A – całkowita zawartość powietrza, α – powierzchnia właściwa porów, \bar{L} wskaźnik rozmieszczenia porów)

Oznaczenie	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]	Charakterystyka porów powietrznych		
		A [%]	α [mm ²]	\bar{L} [mm]
GWN-6	63,7	6,54	28,54	0,15
GWN-7	72,2	2,58	23,43	0,28
GWN-8	68,9	4,15	25,14	0,21
GWN-9	68,5	3,41	28,15	0,21
GWN-10	65,3	4,99	41,43	0,12
GWN-11	74,8	3,79	20,35	0,28
GWN-12	72,4	4,96	49,32	0,10
GWN-13	68,0	3,67	36,43	0,15
GWN-14	65,3	4,56	30,53	0,17
DWN-1	59,9	2,76	19,69	0,32
DWN-2	60,1	2,93	29,84	0,20
DWN-3	61,9	3,41	24,71	0,23
DWN-4	57,2	3,48	18,65	0,30
DWN-5	62,1	2,51	22,57	0,29
DWN-6	58,4	4,07	44,81	0,12

Zbliżoną charakterystykę porów powietrznych zaobserwowano na zglądach wykonanych z betonu GWN, pobranego z jednej dostawy w odstępach dwudziestominutowych.

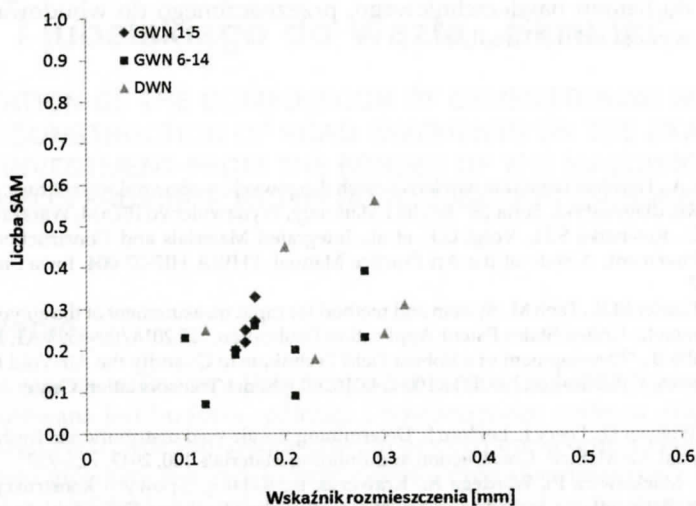


Rys. 2. Zależność wskaźnika rozmieszczenia porów od zawartości powietrza mierzonej konwencjonalną metodą ciśnieniową

Świadczy to o dobrej powtarzalności pomiarów charakterystyki porów w stwardniałym betonie i powtarzalnym pobieraniu próbek do analizy. Zaobserwowano, że zawartość powietrza w mieszance wyznaczona metodą ciśnieniową wynosiła od 3,8% do 5,3%, natomiast wskaźnik rozmieszczenia porów mieścił się w granicach od 0,10 mm do 0,33 mm (rys. 2).

W porównaniu do betonów wykonanych w laboratorium pomiary sekwencyjną metodą ciśnieniową na placu budowy wykazują niejednoznaczną korelację liczby SAM i wskaźnika rozmieszczenia (rys. 3).

Wydaje się, że przy małej zawartości powietrza w mieszance betonowej sekwencja ciśnień jest niewystarczająca aby zapewnić odpowiedź układu w zakresie rekomendowanym, pomimo prawidłowej mikrostruktury napowietrzenia mierzonej następnie na zglądach betonowych. Stąd, aż 35% fałszywie negatywnych wyników pomiaru sekwencyjną metodą ciśnieniową. Wydaje się zatem zasadne stwierdzenie, że rekomendowana wartość liczby SAM powinna zmieniać się w zależności od zawartości powietrza w mieszance betonowej i w przypadku badanych betonów nawierzchniowych powinna wynosić między około 0,30–0,35.



Rys. 3. Korelacja między liczbą SAM i wskaźnikiem rozmieszczenia porów w betonie

Próbie zastosowania SAM do weryfikacji dystrybucji porów powietrznych w betonach przeznaczonych na nawierzchnie betonowe wykonała Tanesi i inni [9]. Potwierdzono przydatność metody w przypadku mieszanek betonowych o małym opadzie stożka (do 75 mm). Podobnie jak w badaniach Ley i inni, zależność liczby SAM od wskaźnika rozmieszczenia porów była zadowalająca w przypadku mieszanek betonowych o zawartości powietrza przekraczającej 5%. Jednakże w przypadku betonu o niewielkiej zawartości powietrza wyniki pomiarów liczby SAM nie dają jednoznacznego wskazania o rozkładzie wielkości porów powietrza w mieszance betonowej. Można w tym przypadku uzyskać wynik fałszywie negatywny, co z punktu widzenia trwałości betonu w nawierzchni nie neguje zasadności oceny dystrybucji powietrza metodą SAM.

4. Wnioski

Przeprowadzone badania mieszanki betonowej i betonu przeznaczanego na nawierzchnię drogową pozwalają na sformułowanie podanych niżej wniosków:

1. Wykonanie pomiarów w warunkach budowy nawierzchni drogi ekspresowej metodą ślizgową nie nastęczało kłopotów pomimo hałasu i drgań wywołanych pracą układarki.
2. Wyniki pomiaru zawartości powietrza aparatem SAM były nieco większe, do 15%, niż wyniki pomiaru za pomocą konwencjonalnej metody ciśnieniowej.
3. Pomiary sekwencyjną metodą ciśnieniową i wskaźnika rozmieszczenia porów wykonane w ramach przeprowadzonych badań wykazują właściwą dystrybucję porów powietrznych w stwardniałym betonie po osiągnięciu min. 5% zawartości powietrza w mieszance betonowej.
4. Korelacja liczby SAM i wskaźnika rozmieszczenia porów była zadowalająca i wystarczająca do oceny rozkładu porów powietrza w mieszance betonowej, gdy zawartość powietrza przekraczała 5%.
5. Rekomendowany na podstawie przeprowadzonych badań zakres liczby SAM w odniesieniu do betonu nawierzchniowego, przeznaczanego do wbudowania metodą ślizgową, wynosi od 0,30 do 0,35.

Literatura

- [1] Glinicki M.A., Trwałość betonu w nawierzchniach drogowych: wpływ mikrostruktury, projektowanie materiałowe, diagnostyka. Seria „S” Studia i Materiały, Wydawnictwo IBDiM, Warszawa 2011, 286 s.
- [2] Taylor P.C., Kosmatka S.H., Voigt G.F. et al., Integrated Materials and Construction Practices for Concrete Pavement: A State of the Art Practice Manual, FHWA HIF-07-004, Iowa State University, Ames 2007
- [3] Ley M.T., Frazier M.R., Tabb M., System and method for rapid measurement of the air void distribution of fresh concrete, United States Patent Application Publication, US 2014/0096593 A1, 2014
- [4] Ley T., Tabb B., “Development of a Robust Field Technique to Quantify the Air-Void Distribution in Fresh Concrete,” Publication No. DTRT06-G-0016, Oklahoma Transportation Center, Stillwater, OK, 2013
- [5] Ley M.T., Welchel D., Peery J., LeFlore J., Determining the air-void distribution in fresh concrete with the Sequential Air Method, Construction and Building Materials 150, 2017, 723–737
- [6] Szydło A., Mackiewicz P., Wardęga R., Krawczyk B., Katalog typowych konstrukcji nawierzchni sztywnych, Załącznik do zarządzenia Nr 30 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 16.06.2014
- [7] Załocha D., Kasperkiewicz J., Zastosowanie ilościowej analizy obrazu do oceny struktury porów w betonie napowietrzanym, Roads and Bridges-Drogi i Mosty, 1, 2, 2002, 107-118; <http://rabdim.pl/index.php/rb/article/view/v1n2p107>
- [8] Glinicki A.M., Glinicki M.A., Mikulicki I., Ocena napowietrzenia betonów w nawierzchniach jezdni i parkingów, Roads and Bridges-Drogi i Mosty, 3, 1, 2004, 5-23; <http://rabdim.pl/index.php/rb/article/view/v3n1p5/228>
- [9] Tanesi J., Kim H., Beyene M., Ardani A., Super Air Meter for Assessing Air-Void, System of Fresh Concrete, Advances in Civil Engineering Materials, doi:10.1520/ACEM20150009, 5, 2, 2016, 22-37