

Cyprian Pełczyński
Tomasz Nowacki
Paweł Łukowski
Piotr Woyciechowski
Jerzy Jaworski

Ocena przydatności metody AVA do kontroli napowietrzenia mieszanki betonowej z uwzględnieniem wpływu jakościowych zmian składu

EVALUATION OF USEFULNESS OF AVA METHOD FOR THE CONTROL
OF AIR-ENTRAINING OF CONCRETE MIX WITH VARIOUS QUALITATIVE
COMPOSITION

Streszczenie

Destrukcja mrozowa stanowi jeden z najpoważniejszych problemów związanych z trwałością betonu. Skuteczne zabezpieczenie betonu można osiągnąć przez napowietrzenie mieszanki betonowej. W niniejszym artykule przedstawiono wyniki pierwszego etapu prac badawczych, prowadzonych wspólnie przez Stachema Polska i Politechnikę Warszawską, których celem jest ocena możliwości wykorzystania metody AVA do kontroli napowietrzenia mieszanki betonowej oraz prognozowania mrozoodporności betonu. Stwierdzono, że w odniesieniu do mieszanek betonowych o dużej ciekłości wyniki uzyskane metodą AVA są mniej wiarygodne niż uzyskane metodą ciśnieniową. Ponadto, określono wpływ rodzaju cementu i uziarnienia piasku na mierzony rozkład porów w mieszance betonowej.

Abstract

Frost destruction is one of the most important problems connected with concrete durability. The effective protection of concrete can be achieved by air-entraining of the concrete mix. Stachema Polska and Warsaw University of Technology are carrying out the common

mgr inż. Cyprian Pełczyński – Stachema Polska

mgr Tomasz Nowacki – Stachema Polska

dr hab. inż. Paweł Łukowski, prof. PW – Politechnika Warszawska

dr hab. inż. Piotr Woyciechowski, prof. PW – Politechnika Warszawska

mgr inż. Jerzy Jaworski – Politechnika Warszawska

investigation on the possibility of using the AVA method for controlling the air-entraining of the control mix and forecasting the concrete frost resistance. The results of the first stage of the investigation are presented in this paper. It has been found that for the concrete mixes with the higher fluidity, the results obtained using AVA method are less reliable than those obtained from the pressure method. Also, the influence of the type of cement and sand on the distribution of pores measured in the concrete mix was determined.

1. Wprowadzenie

W klimacie Polski, w którym każdej zimy notuje się ponad sto przejść temperatury przez zero stopni Celsjusza [1], destrukcja mrozowa stanowi jeden z najpoważniejszych problemów związanych z trwałością betonu [2].

Woda zamarzając zwiększa swoją objętość o ok. 9%. Tworzący się wewnątrz betonu lód wypiera ciekłą wodę w kierunku coraz mniejszych pustek powietrznych, co powoduje wzrost ciśnienia hydraulicznego. Powstałe naprężenia prowadzą do odkształceń, które pogłębiają się po ponownym zamarznięciu; cykle zamrażania i odmrażania betonu dają niszczący efekt kumulacyjny [3, 4]. Szczególne zagrożenie dla nawierzchni betonowych stanowią środki odladzające, którymi są zazwyczaj chlorek sodu, NaCl, lub chlorek wapnia, CaCl₂. Sole te przyspieszają się do przyspieszonej destrukcji mrozowej betonu, przejawiającej się zwłaszcza w złuszczeniu powierzchniowym.

Warunkiem koniecznym nadania betonowi mrozoodporności w niesprzyjających warunkach klimatycznych i środowiskowych, tj. w klasach ekspozycji XF2, XF3, XF4 według normy PN-EN 206 [5] (tabela 1), jest zapewnienie odpowiedniej szczelności i wytrzymałości mechanicznej materiału. Osiąga się to przez właściwe zaprojektowanie składu i pielęgnację betonu, zgodnie z zaleceniami PN-EN 206. Jednak nie zawsze takie działanie jest wystarczające. Skuteczne zabezpieczenie betonu przed działaniem mrozu stanowi napowietrzenie mieszanki betonowej, co wymaga zastosowania domieszek napowietrzających.

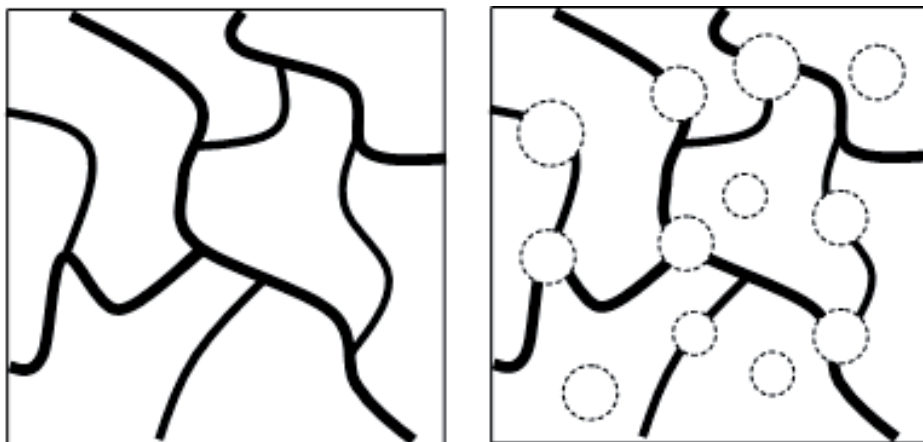
Tabela 1. Klasy ekspozycji betonu związane z narażeniem na mróz wg PN-EN 206

Klasa ekspozycji	Opis środowiska	Przykłady
Agresywne oddziaływanie cyklicznego zamrażania/rozmarzania		
XF1	Umiarkowanie nasycone wodą bez środków odladzających	Pionowe powierzchnie betonowe narażone na deszcz i zamarzanie
XF2	Umiarkowanie nasycone wodą ze środkami odladzającymi	Pionowe powierzchnie betonowe konstrukcji drogowych narażone na zamarzanie i działanie środków odladzających z powietrza
XF3	Silnie nasycone wodą bez środków odladzających	Poziome powierzchnie betonowe narażone na deszcz i zamarzanie
XF4	Silne nasycone wodą ze środkami odladzającymi lub wodą morską	Jezdnie dróg i mostów narażone na działanie środków odladzających Powierzchnie betonowe narażone na bezpośrednie działanie środków odladzających i zamarzanie Strefy rozbryzgu w budowlach morskich narażone na zamarzanie

Zgodnie z definicją normową wg PN-EN 934-2 [6], domieszka napowietrzająca to środek umożliwiający wprowadzenie do mieszanki betonowej pewnej liczby drobnych, równomiernie rozmieszczonych pęcherzyków powietrza, które pozostają w betonie stwardniałym (rys. 1).

Liczba wprowadzonych pęcherzyków wynosi zazwyczaj ok. 10⁹ w metrze sześciennym mieszanki betonowej. W odróżnieniu od porów powstających w mieszance betonowej

w sposób niezamierzony, podczas mieszania i/lub odparowania wody zarobowej, pęcherzyki powstające z napowietrzenia mają niewielkie średnice (20–250 μm). Równomiernie rozłożone i ustabilizowane przez otoczenie cienką warstewką zaczynu cementowego (mineralizacja), pęcherzyki te w stwardniałym tworzywie pełnią rolę komór kompensujących naprężenia powstające na skutek zamarzania wody [7]. Ponadto, mikropęcherzyki przerywają ciągłość kapilar, tym samym utrudniając kapilarny i osmotyczny transport wody w materiale. W wyniku napowietrzenia następuje zatem zmiana struktury betonu, skutkująca poprawą mrozoodporności i zmniejszeniem nasiąkliwości materiału.



Rys. 1. Poglądowe przedstawienie zmiany struktury betonu po napowietrzeniu [8]

2. Wymagania dotyczące napowietrzenia mieszanki betonowej i metody ich sprawdzania

W normie PN-EN 934-2 sformułowano wymagania dotyczące skutecznego napowietrzenia betonu przez domieszki. Zgodnie z tymi wymaganiami, objętościowa zawartość powietrza w mieszance napowietrzanej powinna wynosić od 4 do 6% i powinna być o co najmniej 2,5% większa niż w mieszance kontrolnej (nienapowietrzanej) o tej samej konsystencji. Wskaźnik rozmieszczenia porów powietrznych \bar{L} (największa odległość od dowolnego punktu wewnątrz stwardniałego zaczynu cementowego do najbliższej pustki powietrznej lub krawędzi betonu) powinien wynosić nie więcej niż 0,200 mm. Wytrzymałość na ściskanie betonu napowietrzonego po 28 dniach nie powinna być mniejsza niż 75% wytrzymałości betonu niemodyfikowanego.

Również norma PN-EN 206 zaleca 4% jako minimalną zawartość powietrza w warunkach narażenia betonu na działanie mrozu. Zawartość porów powietrznych, niezbędna do nadania betonowi mrozoodporności (tabela 2), zależy jednak od różnych czynników, zarówno dotyczących materiału (współczynnik w/c , rodzaj kruszywa, maksymalny wymiar ziaren kruszywa), jak i warunków zewnętrznych (szybkość chłodzenia, minimalna temperatura).

Tabela 2. Wymagane zawartości powietrza w mieszance betonowej (beton konstrukcyjny) według Ogólnych Specyfikacji Technicznych Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad (na podst. [9])

Maksymalny wymiar ziarna kruszywa, mm	Etap, na którym wykonywane są badania		Tolerancja pomiaru, %
	Wymagana zawartość powietrza przy projektowaniu składu mieszanki betonowej, %	Wymagana zawartość powietrza przy zatwierdzaniu składu, próbie technologicznej, kontroli jakości robót, %	
16,0	4,5–6,0	4,5–6,5	-0,5 / +1,0
22,4	4,0–5,5	4,0–6,0	
31,5	4,0–5,5	4,0–6,0	

Mimo rozwoju technik badawczych, służących charakteryzowaniu mikrostruktury betonu, obecnie możliwy jest jedynie przybliżony opis rozkładu porów w rzeczywistym betonie [10]. Rozkład i strukturę porów w stwardniałym betonie najczęściej określa się stosując metodę wg PN-EN 480-11 [11], która pozwala oszacować całkowitą zawartość porów w betonie, A , ich powierzchnię właściwą, α , udział porów o rozmiarach poniżej 300 μm , A_{300} , statystyczny rozkład wielkości pustek powietrznych oraz współczynnik rozmieszczenia porów, \bar{L} . Na etapie wytwarzania betonu, który ma spełniać wymagania odnośnie do mrozoodporności, konieczna jest kontrola napowietrzenia mieszanki betonowej. W tym przypadku najczęściej stosowana jest metoda ciśnieniowa wg PN-EN 12350-7 [12]. Stosunkowo nowym sposobem charakteryzowania napowietrzenia mieszanki betonowej jest metoda AVA (od angielskiej nazwy urządzenia pomiarowego *Air Void Analyzer*) [10]. W metodzie AVA wykorzystuje się prawo Stokesa, określające siłę oporu ciała o kształcie kuli poruszającego się w cieczy lub gazie; wielkość pęcherzyków powietrza można określić obserwując ich prędkość poruszania się w cieczy o znanej lepkości – duże pęcherzyki powietrza poruszają się szybciej niż małe.

3. Cel badań i założenia programu badawczego

3.1. Założenia

Właściwe ukształtowanie struktury porów jest możliwe dzięki stosowaniu domieszek napowietrzających, ale na napowietrzenie mieszanki betonowej mogą też wpływać inne czynniki, takie jak rodzaj kruszywa (kruszywo łamane jest dogodniejsze niż otoczkowe [1]) i jego uziarnienie (łatwiejsze jest napowietrzanie betonów o drobniejszym kruszywie i wyższym punkcie piaskowym). Istotne jest zwłaszcza uziarnienie drobnych frakcji kruszywa; frakcje od 0,25 mm do 1 mm ułatwiają napowietrzenie, natomiast pyły (poniżej 0,125 mm) – utrudniają, duża zawartość pyłów powoduje zatem konieczność zwiększenia ilości domieszki.

Program badawczy, realizowany przez zespół badawczy złożony z pracowników Politechniki Warszawskiej i Stachema Polska, ma na celu ocenę możliwości wykorzystania metody AVA do kontroli napowietrzenia mieszanki betonowej oraz prognozowania mrozoodporności betonu. W niniejszym artykule przedstawiono przebieg i wyniki pierwszego etapu badań, którego przedmiotem były mieszanki betonowe. Badane mieszanki były napowietrzane za pomocą domieszki napowietrzającej, a różniły się ze względu na

rodzaj cementu, rodzaj piasku i konsystencję, którą regulowano za pomocą domieszki upłynniającej (lub jej braku) przy stałym współczynniku woda/cement.

3.2. Materiały i metody badawcze

Badaniu poddano osiem mieszanek betonowych (tabela 3). Zastosowano:

- dwa rodzaje cementu: CEM I 42,5R oraz CEM I 42,5N-SR3/NA,
- dwa rodzaje piasku (0/2 mm): A i B, o różnym udziale poszczególnych frakcji (rys. 2 i 3),
- grys granitowy (2/8 i 8/16 mm),
- domieszki: upłynniająca PCE, uplastyczniająca i napowietrzająca, dostarczone przez Stachema Polska.

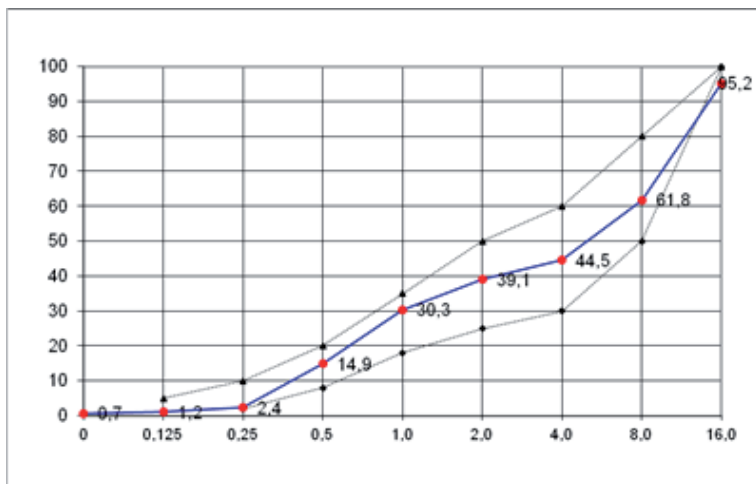
Badano następujące cechy:

- konsystencję mieszanek metodą opadu stożka wg PN-EN 12350-2 [13] po 5, 30 i 60 min od wymieszania składników,
- zawartość powietrza metodą ciśnieniową po 5 i 60 min,
- zawartość powietrza, powierzchnię właściwą porów, zawartość porów o rozmiarach < 300 μm, współczynnik rozmieszczenia porów metodą AVA po 5 i 60 min.

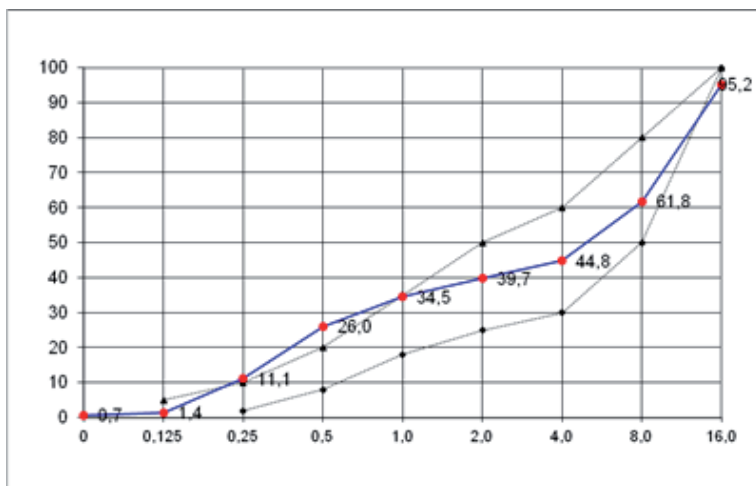
Mieszanki betonowe do badań przygotowywano i przechowywano w pomieszczeniu laboratoryjnym o kontrolowanej temperaturze 21-23°C i wilgotności względnej 60±10%. Ciecz pomiarowa była przed badaniem przechowywana przez 12 h w pomieszczeniu laboratoryjnym. W trakcie pomiarów unikano wszelkich zakłócających wpływów zewnętrznych, w tym zwłaszcza wibracji, w pomieszczeniu laboratoryjnym i w jego bezpośrednim pobliżu. Mieszanki przechowywane w celu pomiarów zmian napowietrzenia w czasie, podlegały delikatnemu przemieszaniu dla utrzymania jednorodności konsystencji.

Tabela 3. Składy badanych mieszanek betonowych

Składnik	Nr mieszanki betonowej							
	1	2	3	4	5	6	7	8
	Zawartość, kg/m ³							
CEM I 42,5R	390	390	–	–	390	390	–	–
CEM I 42,5N-SR3/NA	–	–	390	390	–	–	390	390
Piasek A (0–2 mm)	650	–	650	–	650	–	650	–
Piasek B (0–2 mm)	–	650	–	650	–	650	–	650
Grys granitowy (2–8 mm)	445	445	445	445	445	445	445	445
Grys granitowy (8–16 mm)	645	645	645	645	645	645	645	645
Plastyfikator	0,78	0,78	0,78	0,78	1,37	1,37	1,37	1,37
Superplastyfikator	2,73	2,73	1,56	1,95	–	–	–	–
Domieszka napowietrzająca	0,86	0,78	0,39	0,51	0,39	0,35	0,31	0,31
Woda	168	168	168	168	168	168	168	168
w/c	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43
Projekt. zaw. powietrza, %	5	5	5	5	5	5	5	5
Projekt. gęstość, kg/m ³	2299	2299	2299	2299	2298	2298	2298	2298



Rys. 2. Krzywa uziarnienia kruszywa do mieszanki zaprojektowanej z użyciem piasku A



Rys. 3. Krzywa uziarnienia kruszywa do mieszanki zaprojektowanej z użyciem piasku B

4. Wyniki badań i ich dyskusja

Badane mieszanki betonowe osiągnęły założone klasy konsystencji według PN-EN 206, tj. S2 w przypadku mieszanek gęstszych, zawierających domieszkę uplastyczniającą, oraz S4 w przypadku mieszanek o dużej ciekłości, zawierających zarówno domieszkę uplastyczniającą, jak i upłynniającą. Mimo spadku ciekłości z upływem czasu, po 1 h mieszanki utrzymały pierwotne klasy konsystencji (tabela 4).

Tabela 4. Wyniki badań konsystencji mieszanek betonowych metodą opadu stożka

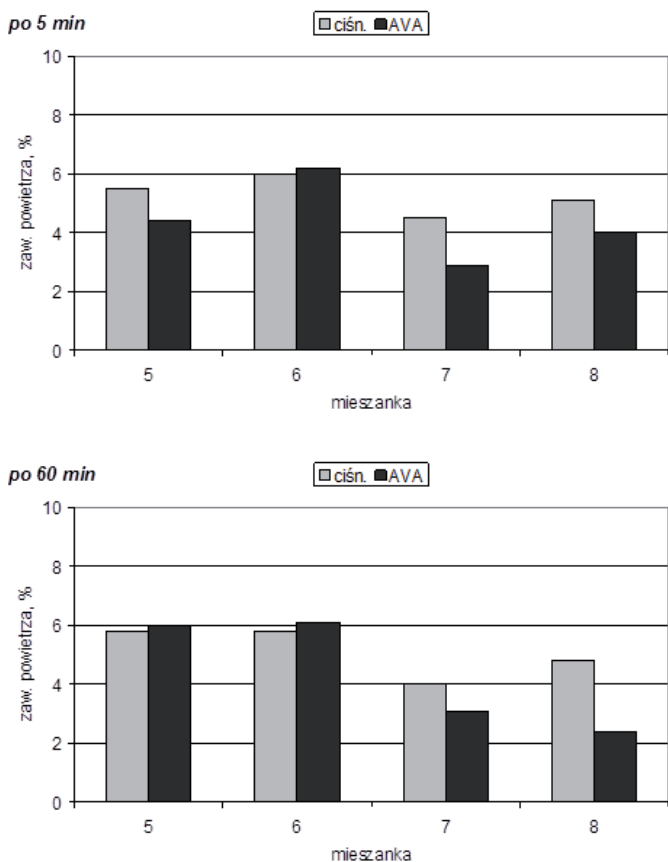
Czas badania (od wymieszania składników)	Nr mieszanki betonowej wg tabeli 3							
	1	2	3	4	5	6	7	8
	Opad stożka, mm							
5	210	200	200	200	90	90	80	90
30	185	180	175	180	70	70	65	80
60	170	160	160	165	50	55	50	65
klasa konsystencji wg PN-EN 206	S4	S4	S4	S4	S2	S2	S2	S2

W trakcie badań oznaczono parametry charakteryzujące strukturę porów w mieszankach betonowych, tj. całkowitą zawartość porów metodą ciśnieniową i metodą AVA oraz udział porów o średnicach mniejszych niż 0,300 mm, powierzchnię właściwą porów i współczynnik rozmieszczenia porów metodą AVA (tabela 5).

Tabela 5. Wyniki badań struktury porów w mieszankach betonowych

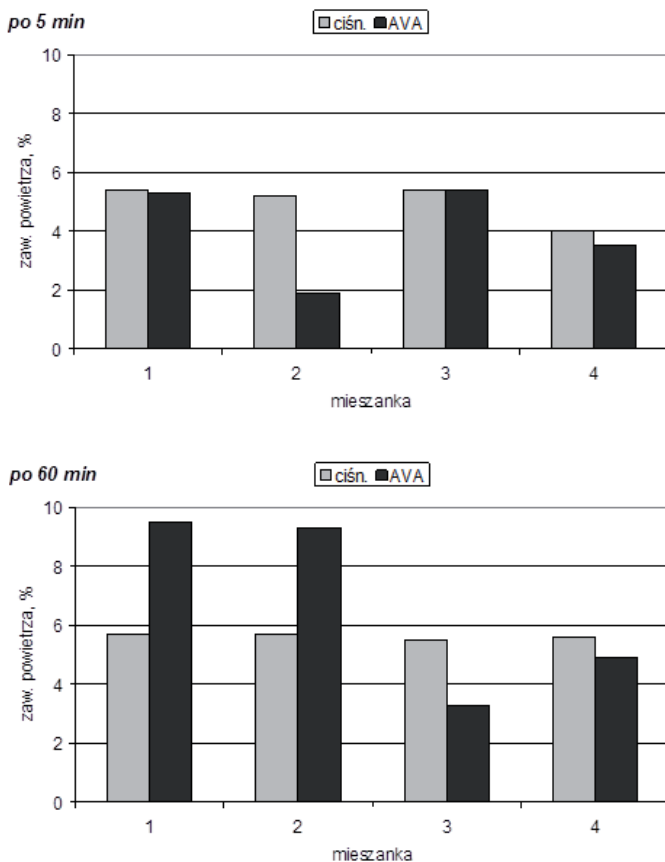
Parametr	Nr mieszanki betonowej wg tabeli 3							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Metoda ciśnieniowa wg PN-EN 12350-7								
Zawartość powietrza (A) po 5 min, %	5,4	5,0	5,4	4,0	5,5	6,0	4,5	5,1
Zawartość powietrza (A) po 60 min, %	5,7	5,5	5,5	5,6	5,8	5,8	4,0	4,8
Metoda AVA								
Zawartość powietrza (A) po 5 min, %	5,3	1,9	5,4	3,5	4,4	6,2	2,9	4,0
Zawartość powietrza (A) po 60 min, %	9,5	9,3	3,3	4,9	6,0	6,1	3,1	2,4
Zawartość porów < 300 μm (A_{300}) po 5 min, %	0,6	0,1	1,1	0,4	2,0	2,2	0,8	1,0
Zawartość porów < 300 μm (A_{300}) po 60 min, %	2,7	2,2	1,2	1,2	2,3	2,7	0,8	0,6
Powierzchnia właściwa porów (α) po 5 min, mm^{-1}	9,7	8,0	13,8	9,8	15,8	22,3	16,5	15,3
Powierzchnia właściwa porów (α) po 60 min, mm^{-1}	18,5	17,0	6,7	15,1	22,9	25,3	15,8	15,4
Współczynnik rozmieszczenia porów (\bar{L}) po 5 min, mm	0,488	0,953	0,346	0,600	0,204	0,204	0,382	0,350
Współczynnik rozmieszczenia porów (\bar{L}) po 60 min, mm	0,167	0,183	0,362	0,326	0,199	0,178	0,383	0,435

Porównanie wyników badań całkowitej zawartości powietrza w mieszankach betonowych o różnej konsystencji (S2 i S4) metodą ciśnieniową i metodą AVA przedstawiono na rysunkach 4 i 5.



Rys. 4. Zawartość powietrza zmierzona metodą ciśnieniową i metodą AVA w mieszankach betonowych o konsystencji S2 po 5 i 60 min od wymieszania składników

Tylko w niektórych przypadkach wyniki pomiarów zawartości powietrza metodą ciśnieniową i metodą AVA są zbliżone; dotyczy to mieszanek „5” i „6” (konsystencja S2) po 5 i 60 min oraz mieszanek „1” i „3” (konsystencja S4), ale tylko po 5 min. W pozostałych przypadkach wyniki są istotnie rozbieżne. W odniesieniu do pomiarów zawartości powietrza w mieszankach o dużej ciekłości (konsystencja S4), rozbieżności te są często drastyczne, np. w przypadku mieszanki „2” po 5 min oraz mieszanek „1”, „2” i „3” po 60 min. Niestabilność wyników oznaczeń metodą AVA w czasie – np. w mieszance „2” zmierzono < 2% zawartości powietrza po 5 min i > 9% po 60 min – może wskazywać, że metoda ta nie jest odpowiednia dla mieszanek o dużej ciekłości. Taki wniosek jest zgodny z niektórymi danymi literaturowymi, gdzie wskazuje się, że metoda AVA została opracowana z przeznaczeniem do gęstych mieszanek betonowych, stosowanych zwłaszcza w drogownictwie [14].

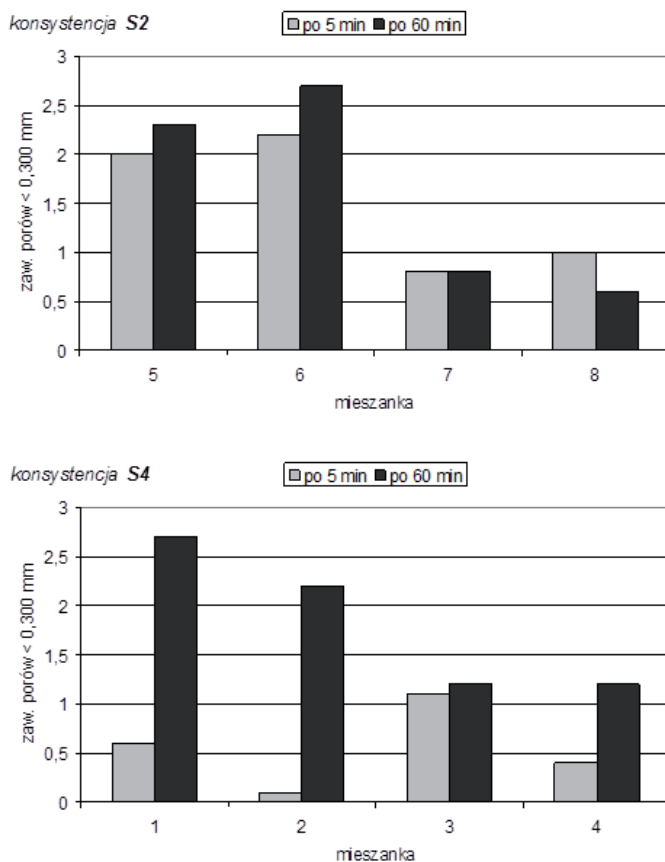


Rys. 5. Zawartość powietrza zmierzona metodą ciśnieniową i metodą AVA w mieszankach betonowych o konsystencji S4 po 5 i 60 min od wymieszania składników

Niestabilność pomiarów wykonywanych metodą AVA znajduje swoje odzwierciedlenie także w wartościach innych parametrów, charakteryzujących strukturę porów w mieszance betonowej. Na rysunku 6 przedstawiono porównanie wyników oznaczeń zawartości porów o średnicach poniżej 300 μm (A_{300}), wykonanych po 5 i 60 min od wymieszania składników, w mieszankach betonowych o różnej konsystencji (S2 i S4). Podobne porównanie, dotyczące wyników oznaczeń współczynnika rozmieszczenia porów (\bar{L}), przedstawiono na rysunku 7.

W przypadku obu parametrów, ich mierzone wartości można uznać za względnie stabilne w czasie jedynie w odniesieniu do mieszanek betonowych o gęstszej konsystencji (S2). Wyniki oznaczeń w mieszankach o konsystencji bardziej ciekłej (S4) po upływie 1 h od wymieszania składników wykazują drastyczne zmiany; zmian tych nie da się wytłumaczyć zjawiskami zachodzącymi w mieszankach, jako że zmiany porowatości całkowitej, zmierzone metodą ciśnieniową, są nieznaczne (por. rysunek 5).

Mimo, iż powyższe porównania mogą stawiać pod znakiem zapytania rzeczywistą przydatność metody AVA do kontroli napowietrzenia mieszanek betonowych o dużej

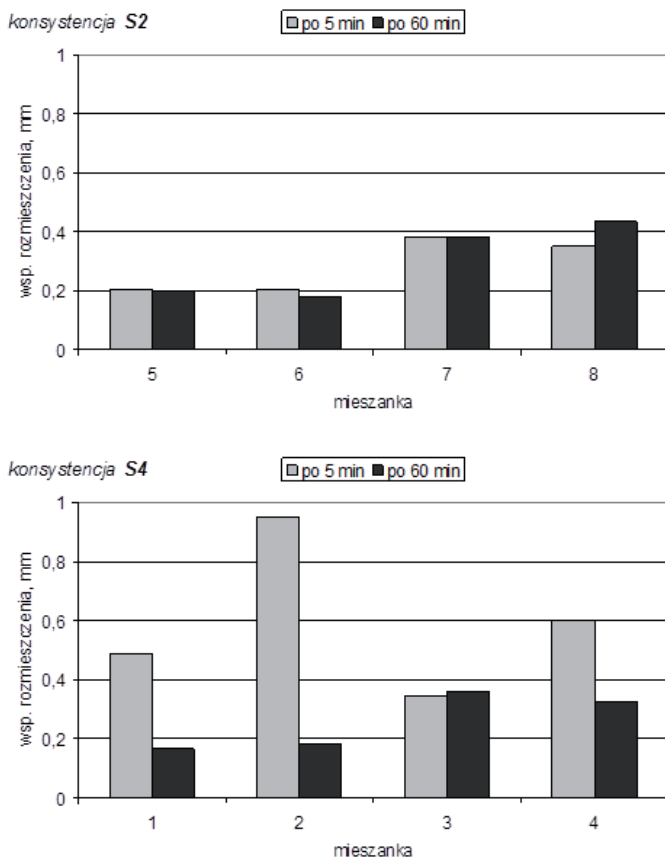


Rys. 6. Zawartość porów o średnicach mniejszych niż 0,300 mm zmierzona metodą AVA w mieszankach betonowych o konsystencji S2 i S4 po 5 i 60 min od wymieszania składników

ciekłości, uzyskane wyniki pozwalają na sformułowanie pewnych interesujących spostrzeżeń odnośnie do wpływu rodzaju cementu i piasku na stabilność struktury porów w mieszance betonowej. Na rysunku 8 przedstawiono porównanie współczynników rozmieszczenia porów (\bar{L}), wyznaczonych po 5 i 60 min od wymieszania składników w mieszankach zawierających różne rodzaje cementu.

Po 5 min od wymieszania składników, w żadnej mieszance wartość współczynnika rozmieszczenia nie spełniała wymagania $\bar{L} < 0,200$ mm. Po upływie 1 h wartości \bar{L} osiągnęły wymagany poziom w przypadku wszystkich mieszanek betonowych zawierających cement portlandzki CEM I 42,5R, podczas gdy w przypadku wszystkich mieszanek z cementem CEM I 42,5N-SR3/NA wartości te nadal zdecydowanie przekraczały 0,200 mm. Może to świadczyć o lepszej współpracy pierwszego z zastosowanych cementów z domieszką napowietrzającą.

Na rysunku 9 przedstawiono porównanie współczynników rozmieszczenia porów (\bar{L}), wyznaczonych po 5 i 60 min od wymieszania składników w mieszankach zawierających



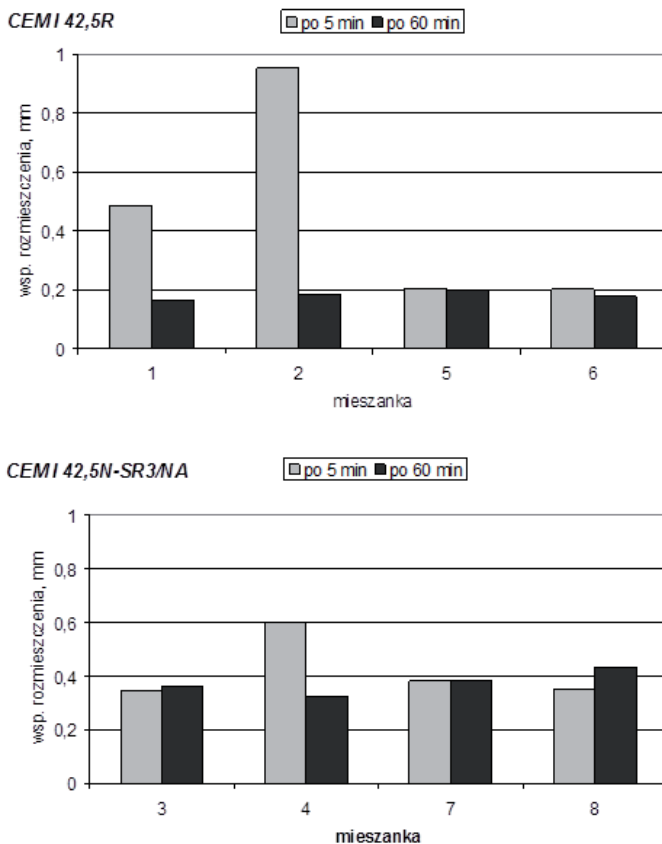
Rys. 7. Współczynniki rozmieszczenia porów zmierzone metodą AVA w mieszankach betonowych o konsystencji S2 i S4 po 5 i 60 min od wymieszania składników

różne rodzaje piasku. Można zauważyć, że większa zawartość frakcji pylastych w piasku sprzyja stabilizacji wartości \bar{L} w czasie.

Badania, których wyniki przedstawiono powyżej, dotyczyły przede wszystkim przydatności metody AVA do wyznaczania charakterystyki porów w mieszankach betonowych o różnej konsystencji i różnym składzie jakościowym.

Wątpliwości, dotyczące metody AVA, były podnoszone w literaturze [15, 16]. Wiarygodność i powtarzalność wyników oznaczeń tą metodą kwestionuje się głównie ze względu na [10, 14]:

- niepotwierdzoną przydatność metody AVA do badania mieszanek betonowych o dużej ciekłości – metoda została opracowana dla mieszanek gęstych,
- szczególną wrażliwość pomiarów na bodźce zewnętrzne, np. wibracje (nawet spowodowane przechodzeniem ludzi w pobliżu miejsca pomiaru), wahania temperatury wody używanej do pomiarów i temperatury otoczenia (powinna mieścić się w wąskim



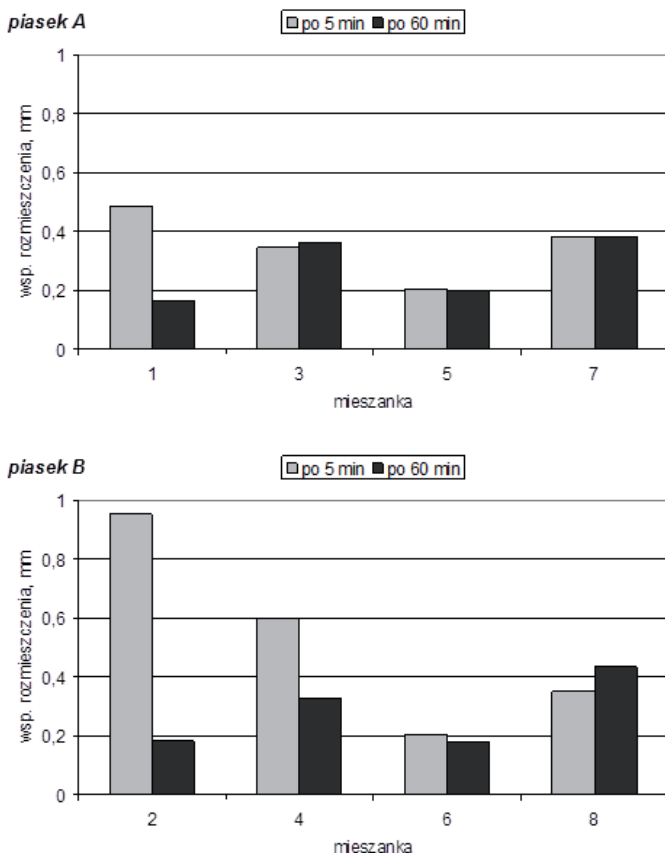
Rys. 8. Współczynniki rozmieszczenia porów zmierzone metodą AVA w mieszankach betonowych zawierających cementy CEM I 42,5R i CEM I 42,5N-SR3/NA po 5 i 60 min od wymieszania składników

przedziale 21–25°C), dokładność odpowietrzenia wody, przeciągi, itp.; w połączeniu z delikatnością aparatury pomiarowej powoduje to, że metoda AVA jest uważana za mało przydatną w warunkach placu budowy,

- małą objętość badanej próbki mieszanki betonowej – ok. 20 cm³, przy czym podczas jej pobierania istnieje możliwość wprowadzenia dodatkowego powietrza z zewnątrz.

Rzeczywiście, wyniki uzyskane w przypadku mieszanek o konsystencji S4, ze względu na szczególnie dużą zmienność w czasie mierzonej całkowitej zawartości powietrza (por. rysunki 4 i 5), zawartości porów o średnicach poniżej 300 μm (por. rysunek 6) oraz współczynnika rozmieszczenia porów (por. rysunek 7) mogą wskazywać, że metoda ta nie jest odpowiednia dla mieszanek o dużej ciekłości. Niemniej, może ona stanowić wartościowe uzupełnienie pomiaru zawartości powietrza w mieszance metodą ciśnieniową.

Odnosnie do wpływu poszczególnych składników mieszanki betonowej na wyznaczane metodą AVA parametry struktury porów, stwierdzono, że istotny jest rodzaj cementu oraz uziarnienie piasku.



Rys. 9. Współczynniki rozmieszczenia porów zmierzone metodą AVA w mieszankach betonowych zawierających cementy piasek A, o większej zawartości frakcji drobnych, i piasek B, o mniejszej zawartości frakcji drobnych, po 5 i 60 min od wymieszania składników

Wartości współczynnika rozmieszczenia porów (por. rysunek 8) po 5 min od wymieszania składników były za duże we wszystkich mieszankach; po 1 h wartości \bar{L} w mieszankach zawierających cement CEM I 42,5R osiągnęły wymagany poziom $\bar{L} < 0,200$ mm, podczas gdy w mieszankach z cementem CEM I 42,5N-SR3/NA nadal wyraźnie przekraczały 0,200 mm. Może to wskazywać na lepszą współpracę pierwszego z zastosowanych cementów z domieszką napowietrzającą. Z kolei porównanie współczynników rozmieszczenia porów w mieszankach zawierających różne rodzaje piasku (por. rysunek 9) wskazuje, że większa zawartość frakcji pylistych w piasku sprzyja stabilizacji wartości \bar{L} w czasie.

5. Podsumowanie

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki pierwszego etapu prac badawczych, prowadzonych wspólnie przez Stachema Polska i Politechnikę Warszawską. Badano

strukturę porów w mieszankach betonowych o składach zróżnicowanych ze względu na konsystencję, rodzaj cementu i rodzaj piasku, stosując metodę ciśnieniową wg PN-EN 12350-7 oraz metodę AVA.

Na podstawie uzyskanych wyników sformułowano następujące wnioski:

- w odniesieniu do mieszanek betonowych o dużej ciekłości wyniki uzyskane metodą AVA są mniej wiarygodne niż uzyskane metodą ciśnieniową, przede wszystkim ze względu na znaczną niestabilność w czasie,
- rodzaj cementu ma istotne znaczenie dla wartości mierzonych parametrów; w niniejszym badaniu zastosowanie cementu CEM I 42,5R pozwoliło na uzyskanie po 1 h współczynników rozmieszczenia porów, spełniających wymaganie $\bar{L} < 0,200$ mm, co okazało się niemożliwe w przypadku cementu CEM I 42,5N-SR3/NA,
- zastosowanie piasku o większej zawartości ziaren drobnych prowadzi do stabilizacji wartości \bar{L} w czasie.

W świetle powyższych stwierdzeń niezbędne jest kontynuowanie programu badawczego. Celem obecnie trwających badań jest dalsza weryfikacja wiarygodności metod określania struktury porów w mieszance betonowej, poprzez sprawdzenie rzeczywistej mrozoodporności stwardniałego betonu i odniesienie jej do prognozy formułowanej na podstawie wyników kontroli napowietrzenia mieszanki i charakterystyki porowatości stwardniałego betonu.

Literatura

- [1] Rusin Z.: *Technologia betonów mrozoodpornych*. Polski Cement, Kraków, 2002.
- [2] Czarnecki L., Emmons P.: *Naprawa i ochrona konstrukcji betonowych*. Polski Cement, Kraków, 2002.
- [3] Neville A.: *Właściwości betonu*. Polski Cement, Kraków, 2012
- [4] Powers T.: Resistance to weathering – freezing and thawing. ASTM Special Technica Publication No. 169, 1956, 182–187.
- [5] PN-EN 206 „Beton – Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność”
- [6] PN-EN 934-2 „Domieszki do betonu, zaprawy i zaczynu. Część 2: Domieszki do betonu - Definicje, wymagania, zgodność, oznakowanie i etykietowanie”
- [7] Mehta P., Monteiro P.: *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. McGraw-Hill, Nowy Jork, 2006
- [8] Łukowski P.: *Modyfikacja materiałowa betonu*. Stowarzyszenie Producentów Cementu – Polski Cement, Kraków, 2016
- [9] Deja J., Kijowski P.: *Infrastruktura komunikacyjna – doświadczenia i uwarunkowania formalne w świetle wymagań OST zamawiającego*. XV Konferencja „Reologia w Technologii Betonu”, Bronisławów, 2013 (CD).
- [10] Glinicki M.: *Trwałość betonu w nawierzchniach drogowych. Wpływ mikrostruktury, projektowanie materiałowe, diagnostyka*. Instytut Badawczy Dróg i Mostów – Studia i Materiały, zeszyt 66, Warszawa, 2011.
- [11] PN-EN 480-11 „Domieszki do betonu, zaprawy i zaczynu – Metody badań – Część 11: Oznaczenie charakterystyki porów powietrznych w stwardniałym betonie”
- [12] PN-EN 12350-7 „Badania mieszanki betonowej – Część 7: Badanie zawartości powietrza – Metody ciśnieniowe”
- [13] PN-EN 12350-2 „Badania mieszanki betonowej – Część 2: Badanie konsystencji metodą opadu stożka”
- [14] Jawański W.: *Struktura napowietrzenia mieszanki betonowej i betonu stwardniałego a jego rzeczywista mrozoodporność*. *Budownictwo Technologie Architektura* 4, 2015, 62–66
- [15] Grzesiak K., Gemel P.: *Mrozoodporność a jakość napowietrzenia – metoda badania struktury porów powietrznych w świeżej mieszance betonowej*. VIII Sympozjum Naukowo-Techniczne „Reologia w Technologii Betonu”, Gliwice, 2006, 31–41
- [16] Mohsen J., Stephen L., Zhiyong Z.: *Measuring spacing factor of the air voids system in fresh concrete*. Transportation Research Board Annual Meeting, Washington 2004 (CD)