

Agnieszka MOLENDOWSKA*
Politechnika Świętokrzyska

WPLYW ILOŚCI POWIETRZA W BETONIE NA CHARAKTERYSTYKĘ STRUKTURY PORÓW POWIETRZNYCH

Streszczenie. W przypadku betonów narażonych na działanie wilgoci i mrozu norma PN EN 206-1 zaleca stosowanie napowietrzania mieszanki betonowej. Technologia betonów mrozoodpornych stawia jednak wiele trudności, ponieważ rozmaite czynniki wpływają na ilość i jakość pęcherzyków powietrza w betonie. Podstawowym wymaganiem jest uzyskanie stabilnego systemu pęcherzyków powietrza w świeżym betonie.

W referacie przedstawiono wyniki badań struktury porów powietrznych kilkunastu serii betonów, różniących się stopniem napowietrzania, stosunkiem W/C i rodzajem cementu. Celem badań było wyznaczenie parametrów opisujących strukturę porów powietrznych i określenie minimalnej zawartości powietrza A_{300} (w postaci pęcherzyków $< 300 \mu\text{m}$), pozwalającej uzyskać odpowiedni rozstaw pęcherzyków powietrza.

INFLUENCE OF AIR CONTENT IN CONCRETE ON CHARACTERISTIC OF AIR-PORES STRUCTURE

Summary. In case of concretes exposed to moisture and frost action PN-EN 206-1 standard advise to use air-entrained concretes. Technology of air-entrained concretes makes a lot of difficulties because of many factors influence on quantity and quality of air-pores in concrete. The fundamental requirement is to get the stable system of air-pors in fresh concrete.

The paper presents the results of petrographic examinations of air-pores structure in several concretes series with different air content, W/C ratio and kind of cement. The aim was to estimate the relations between total air-content (A), content of micropores (A_{300}) and spacing factor (\bar{L}).

* Opiekun naukowy: Dr hab. inż. Jerzy Wawrzeńczyk, prof. Politechniki Świętokrzyskiej.

1. Wstęp

W normie PN-EN 206-1 [3] uwzględniono wpływ intensywności oddziaływania różnych warunków zewnętrznych na beton, definiując klasy środowiska. Zależnie od warunków dostępu wilgoci, stosowania lub nie środków rozmrażających oraz rodzaju konstrukcji, wprowadzono cztery klasy środowiska XF1–XF4, dotyczące mrozoodporności betonu. Praktyka wykazała, że w przypadku betonowych konstrukcji drogowych, mostowych i hydrotechnicznych stosowanie napowietrzenia jest niezbędne.

Dla łagodzenia skutków przemiany fazowej wody w porach kapilarnych podstawowe znaczenie ma rozmieszczenie porów powietrznych i ich odległości między sobą. Jeżeli odległość od miejsca krystalizacji lodu do najbliższego pęcherzyka powietrznego jest zbyt duża, to występuje ryzyko nadmiernego wzrostu ciśnień hydraulicznych. Natomiast zbyt małe odległości oznaczają nadmiar powietrza w betonie, co powoduje niepotrzebną utratę wytrzymałości. Problem optymalizacji napowietrzenia polega więc nie tylko na wytworzeniu porów o odpowiedniej wielkości, ale także ich ilości, przy zachowaniu ściśle określonej odległości między nimi [5] [6].

Proces napowietrzania jest uzależniony od oddziaływania wielu czynników: materiałowych, technologicznych i technicznych. Zasadnicze znaczenie mają czynniki materiałowe: rodzaj cementu, uziarnienie kruszywa, obecność dodatków i domieszek. Skład mineralny i uziarnienie cementu, zawartość alkaliów mogą w istotny sposób wpływać na poziom i jakość napowietrzania mieszanki betonowej. Zamiana rodzaju cementu może znacznie obniżyć mrozoodporność betonu. Osiągnięcie prawidłowych relacji wymaga uwzględnienia rodzaju cementu i jego kompatybilności z domieszkami chemicznymi [2].

W badaniach mrozoodporności betonu stosuje się metody bezpośrednie i pośrednie. Badania z zastosowaniem metod bezpośrednich polegają na cyklicznym zamrażaniu i rozmrażaniu próbek betonowych oraz ocenie skutków niszczącego działania mrozu. Prowadzenie takich badań jest kosztowne i długotrwałe.

Zastosowanie metody pośredniej, opartej na koncepcji krytycznego rozstawu pęcherzyków powietrza, pozwala na ograniczenie lub nawet wyeliminowanie potrzeby badań bezpośrednich mrozoodporności. Ocena ta oparta jest przede wszystkim na wynikach badań mikroskopowych, według metody punktowej lub metody zliczania cięciw, ujętych w normach ASTM C 457 i PN-EN 480-11. „Ręczne” prowadzenie pomiarów jest bardzo żmudne i długotrwałe, stąd też coraz powszechniej stosowane są metody wykorzystujące

automatyczną analizę obrazu. Firmowe zestawy tego typu są jednak bardzo drogie, dlatego też w analizie automatycznej stosowane są tańsze rozwiązania, w których cyfrowy obraz próbki uzyskiwany jest za pomocą aparatu cyfrowego lub skanera [7].

Uznaje się, że wskaźnikiem, który najlepiej określa jakość napowietrzenia jest współczynnik przestrzennej dystrybucji porów powietrznych \bar{L} . Z fizycznego punktu widzenia \bar{L} oznacza uśrednioną największą odległość od dowolnego punktu wewnątrz stwardniałego zaczynu cementowego do najbliższej położonego pęcherzyka powietrznego [5].

Zazwyczaj w napowietrzanej mieszance betonowej występują pory o zróżnicowanych wymiarach. Znajdują się tam zarówno pory o pożądanym wymiarach 10 – 100 μm , jak i pory dużo większe, przekraczające 1 mm, które nie mają istotnego wpływu na poprawę mrozoodporności, a powodują znaczne obniżenie wytrzymałości (1% powietrza to spadek wytrzymałości o 5%). Parametrem określającym granicę pomiędzy porami użytecznymi a nieużytecznymi jest zawartość mikroporów A_{300} , czyli zawartość powietrza w porach powietrznych o średnicy mniejszej od 300 μm . Wartość tego parametru uzyskuje się podczas obliczania rozkładu porów powietrznych.

Zapewnienie mrozoodporności betonu w różnych warunkach eksploatacyjnych wg ACI wymaga spełnienia następujących warunków [1]:

- warunki trudne $\bar{L} \leq 0,20$ mm, $W/C \leq 0,45$,
- warunków umiarkowane $\bar{L} \leq 0,25$ mm, $W/C \leq 0,50$.

2. Badania własne

2.1. Opis badań

Przedmiotem badań było 5 serii betonów różniących się stosunkiem W/C, rodzajem cementu i stopniem napowietrzenia. Celem badań było wyznaczenie parametrów, opisujących strukturę porów powietrznych w populacji tak zróżnicowanych betonów napowietrzanych i nienapowietrzanych.

Do wykonania betonów użyto następujących składników:

- kruszywo grube – bazalt frakcji 4-8, 8-16 mm,
- piasek naturalny 0-2 mm,
- cement CEM I 42,5N, CEM I 42,5R, CEM II/A-S 42,5R, CEM III/A 32,5N.

Oznaczenie zawartości powietrza i struktury porów powietrznych wykonano metodą zliczania cięciw, z wykorzystaniem automatycznej analizy obrazu, wg PN-EN 480-11 [4].

Do wykonania badań konieczne było przygotowanie próbek – zglądów. Z kostek sześciennych o boku 150 mm wycięto próbki o wymiarach około 20x100x120 mm. Badane powierzchnie wyszlifowano na mokro, z użyciem proszków szlifierskich. Aby uzyskać konieczny w automatycznej analizie obrazu kontrast, powierzchnia zglądu została zabarwiona na czarno, a wszystkie pory zostały wypełnione mialkim białym proszkiem – tlenkiem cynku. Jakość wypełnienia porów kontrolowano pod mikroskopem stereoskopowym, przy powiększeniu 50-100x. Badania prowadzono na jednej próbce, pobranej z każdego betonu. Cyfrowy obraz próbki uzyskiwano przez jej skanowanie, przy rozdzielczości 4800 dpi. Automatyczną analizę obrazu przeprowadzono z wykorzystaniem programu SigmaScan Pro. W badaniach stosowano metodę zliczania cięciw, zgodnie z PN-EN 480-11. Na całej powierzchni próbki rozmieszczono 28 linii pomiarowych, oddalonych od siebie co 4 mm.

Dane uzyskane w wyniku automatycznej analizy obrazu pozwoliły na obliczenie zawartości powietrza (A), zawartości mikroporów (A_{300}), powierzchni właściwej systemu porów powietrznych (α) oraz współczynnika przestrzennej dystrybucji porów (\bar{L}).

Do obliczeń potrzebne były następujące dane:

T_{tot} – całkowita długość linii pomiarowej [mm],

T_a – całkowita długość linii pomiarowej, przechodzącej przez pory powietrzne [mm],

P – udział objętościowy zaczynu, obliczony na podstawie składu mieszanki,

N – całkowita liczba mierzonych cięciw.

Obliczenia wykonano wg następujących wzorów:

$$A = \frac{T_a \cdot 100}{T_{tot}} \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{4 \cdot N}{T_a} \quad (2)$$

$$R = \frac{P}{A}, \quad (3)$$

gdzie:

A – całkowita zawartość powietrza [%],

α – powierzchnia właściwa porów powietrznych [mm^{-1}],

R – stosunek zaczynu : powietrze

Jeżeli $P/A > 4,342$, to:

$$\bar{L} = \frac{3}{\alpha} [1,4(1+R)^{1/3} - 1] \quad (4)$$

Jeżeli $P/A \leq 4,342$, to:

$$\bar{L} = \frac{P \cdot T_{\text{tot}}}{400 \cdot N} \quad (5)$$

2.2. Wyniki badań i ich analiza

Badania przeprowadzono na 5 seriach betonów różniących się rodzajem cementu, stosunkiem W/C i zawartością powietrza. Składy badanych betonów przedstawiono w tab. 1.

Tabela 1

Podstawowe informacje o składach mieszanek betonowych

Seria	Nr	Rodzaj cementu	Cement [kg/m ³]	Stosunek W/C	Zawartość powietrza A [%]	P/A
A	1	CEM I 42,5N	381	0,42	2,30*	12,336
	2		368	0,42	6,10	4,492
B	1	CEM I 42,5N	354	0,48	2,40*	11,869
	2		354	0,48	4,80	5,934
	3		350	0,48	8,80	3,200
C	1	CEM I 42,5R	377	0,43	2,00*	14,226
	2		374	0,43	6,50	4,342
	3		373	0,43	10,00	2,815
D	1	CEM II/A-S 42,5R	385	0,43	1,30*	22,413
	2		383	0,43	4,80	6,039
	3		390	0,43	7,00	4,216
E	1	CEM III/A 32,5N	384	0,43	5,20	5,645
	2		375	0,43	10,10	2,838

* - betony nienapowietrzane.

W efekcie przeprowadzonych badań jakości napowietrzenia dla betonów serii A, B, C, D, E, wykonanych metodą automatyczną, uzyskano wyniki zestawione w tab. 2.

Tabela 2

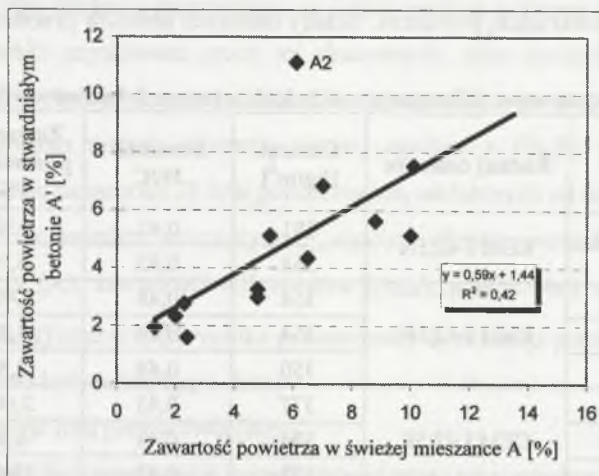
Zestawienie wyników badań uzyskanych z automatycznej analizy obrazu

Seria	Nr	T _n [mm]	A' [%]	A ₃₀₀ [%]	A ₃₀₀ /A' [%]	N	α [mm ⁻¹]	\bar{L} [mm]
A	1	60,99	2,76	0,13	5	127	8,33	0,77
	2	246,01	11,12	1,60	14	702	11,41	0,24
B	1	35,07	1,59	0,31	20	96	10,95	0,75
	2	65,94	2,98	0,44	15	199	12,07	0,51
	3	124,66	5,63	1,43	25	505	16,20	0,28
C	1	51,25	2,32	0,47	20	166	12,96	0,54
	2	95,81	4,33	0,55	13	248	10,35	0,50

cd. tabeli 2

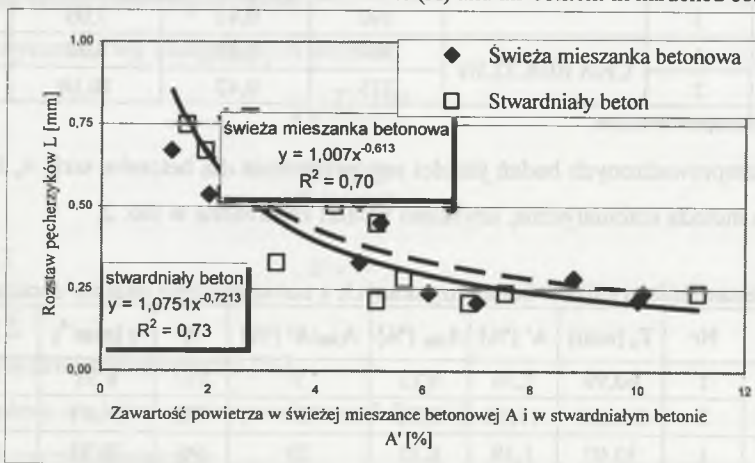
C	3	113,39	5,13	2,53	49	639	22,54	0,21
D	1	42,75	1,93	0,30	15	121	11,32	0,67
	2	72,05	3,26	0,57	17	328	18,21	0,33
	3	151,61	6,85	2,32	34	788	20,79	0,21
E	1	113,37	5,12	0,47	9	309	10,90	0,45
	2	166,53	7,53	2,23	30	700	16,81	0,24

Na rysunku 1 przedstawiono zależność pomiędzy ilością powietrza, wyznaczoną metodą ciśnieniową (A) a zawartością powietrza, wyznaczoną metodą petrograficzną (A').



Rys. 1. Zależność pomiędzy zawartością powietrza w świeżej mieszance betonowej (A) a w stwardniałym betonie (A')

Fig. 1. Relation between air-content in fresh concrete (A) and air-content in hardened concrete (A')

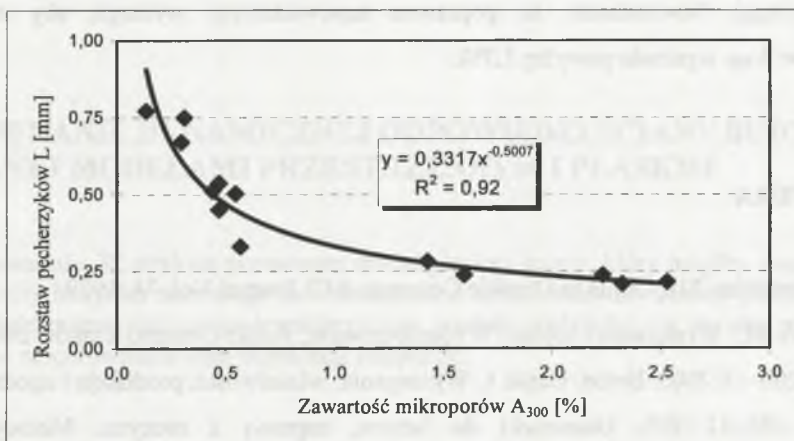


Rys. 2. Zależność pomiędzy rozstawem pęcherzyków powietrza (\bar{L}) a zawartością powietrza w stwardniałym betonie (A') i w świeżej mieszance betonowej (A)

Fig. 2. Relation between spacing factor (\bar{L}) and air content in hardened concrete (A') and air content in fresh concrete (A)

Zależności pomiędzy rozstawem pęcherzyków powietrza (\bar{L}) a ilością powietrza w stwardniałym betonie i w świeżej mieszance betonowej przedstawiono na rysunku 2.

Na rysunku 3 przedstawiono zależność pomiędzy rozstawem pęcherzyków powietrza (\bar{L}) a zawartością porów powietrznych, o średnicy poniżej 300 μm (A_{300}).



Rys. 3. Zależność pomiędzy rozstawem pęcherzyków powietrza (\bar{L}) a zawartością mikroporów (A_{300}) w stwardniałym betonie

Fig. 3. Relation between spacing factor (\bar{L}) and content of micropores (A_{300}) in hardened concrete

Poprawne napowietrzenie betonu $\bar{L} \leq 0,25$ mm uzyskano dla betonów A2, C3, D3, E2, które mają zawartość powietrza w świeżej mieszance $A > 6\%$. Duża ilość powietrza pozwala na spełnienie warunku $\bar{L} \leq 0,25$ mm, ale obserwowany jest wzrost objętości dużych porów. Z analizy wykresów wynika, że jeżeli uwzględnimy tylko zawartość porów powietrznych o średnicy poniżej 300 μm (A_{300}) rozrzut wyników jest znacznie mniejszy (współczynnik korelacji $R^2 = 0,92$). Z rysunku 3 wynika, że uzyskanie $\bar{L} \leq 0,25$ mm wymaga $A_{300} > 1,7\%$.

W przypadku dużej zawartości powietrza szczególną staranność należy zachować przy przygotowywaniu zglądów, ponieważ rzutuje to na dokładność wyników. Świadczy o tym zbyt duża ilość powietrza (A'), uzyskana dla betonu serii A2 (rys. 1).

3. Uwagi końcowe

W referacie przedstawiono analizę zależności wartości wskaźnika rozstawu pęcherzyków powietrznych od całkowitej zawartości powietrza i zawartości mikroporów A_{300} . Wykazano, że decydujący wpływ na \bar{L} ma zawartość mikroporów A_{300} .

Analiza prezentowanych wyników pokazuje, że dla uzyskania poprawnego napowietrzenia ($\bar{L} \leq 0,25$ mm) wymagane jest wprowadzenie co najmniej 6% powietrza. Zbyt duża zawartość powietrza powoduje jednak, że pory się łączą i powstają duże pęcherze powietrza. Istotne jest więc wyznaczenie zawartości porów powietrznych o średnicy poniżej 300 μm (A_{300}). Stwierdzono, że poprawne napowietrzenie wymaga, aby zawartość mikroporów A_{300} wynosiła powyżej 1,7%.

LITERATURA

1. ACI Committee 201, Guide to Durable Concrete, ACI Journal Vol. 74, 1979.
2. Neville A. M.: Właściwości betonu. Wydanie czwarte, Polski Cement, Kraków 2000.
3. PN-EN 206 – 1:2003. Beton. Część 1. Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.
4. PN-EN 480–11:1998. Domieszki do betonu, zaprawy i zaczynu. Metody badań. Oznaczanie charakterystyki porów powietrznych w stwardniałym betonie.
5. Rusin Z.: Technologia betonów mrozoodpornych, Polski Cement, Kraków 2002.
6. Wawrzeńczyk J.: Diagnostyka mrozoodporności betonu cementowego. Politechnika Świętokrzyska, Kielce 2002.
7. Załocha D., Kasperkiewicz J.: Automatyzacja wyznaczania charakterystyki napowietrzenia w świetle normy PrPN-EN 480-11, XLVII Konferencja Naukowa KILiW PAN I KN PZITB, Tom 1, Opole – Krynica 2001.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Jacek Śliwiński