

Dariusz ZAŁOCHA*

Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN

POMIAR PARAMETRÓW STRUKTURY PORÓW W BETONIE NAPOWIETRZONYM Z UWZGLĘDNIENIEM KSZTAŁTU PUSTKI POWIETRZNEJ

Streszczenie. W referacie przedstawiono problemy wynikające ze specyfiki przygotowania próbek betonowych do badań zautomatyzowanych struktury porów za pomocą analizatora obrazu. Zaproponowano sposób odpowiedniej filtracji mierzonych obiektów z uwzględnieniem ich kształtu. Zastosowano metody uczenia maszynowego.

MEASUREMENT OF PARAMETERS OF AIR-VOIDS STRUCTURE IN AIR ENTRAINED CONCRETE ALLOWING FOR VOID SHAPE

Summary. In the paper described are problems following from specific concrete sample preparation to automatic measurements of air-voids structure with the help of image analysis. Special filtration of measured object is proposed. Machine learning systems were used.

1. Wstęp

Podstawą stosowania zabiegu napowietrzania betonu jest ograniczenie niszczącego działania mrozu na stwardniały beton. Związane jest ono ze zwiększaniem się objętości wody w niskich temperaturach, co przy ograniczonej możliwości jej migracji powoduje występowanie znacznych naprężeń rozciągających, a w efekcie - rozsadzanie struktury materiału. Możliwość przedostania się nadmiaru wody do odpowiednio gęsto rozmieszczonych porów powietrznych powoduje, iż zniszczenie nie nastąpi w ogóle lub zostanie opóźnione. Efektywność zabiegu napowietrzania zależy nie od całkowitej zawartości porów powietrznych, ale przede wszystkim od ich wielkości i rozmieszczenia w stwardniałym zaczynie cementowym. Oceny sposobu rozmieszczenia porów, czyli tzw. struktury napowietrzania, dokonuje się głównie na podstawie wartości dwóch parametrów: wskaźnika rozmieszczenia porów \bar{L}

*Opiekun naukowy: Prof. dr hab. inż. Janusz Kasperkiewicz

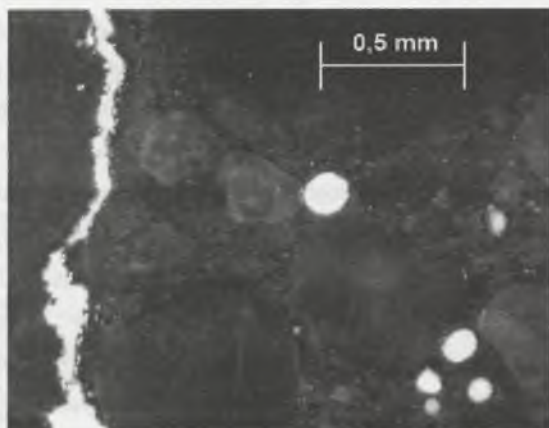
[mm] (ang. *spacing factor*) oraz powierzchni właściwej porów α [mm⁻¹] (ang. *specific surface*). W celu wyznaczenia parametrów \bar{L} i α stosowano dotychczas zalecenia amerykańskiej normy ASTM C457 [1], obecnie w Polsce wprowadzono polską normę PN EN 480-11, [2]. Według Polskiej Normy pomiaru parametrów struktury porów dokonywać można metodami automatycznymi, w tym np. za pomocą systemu automatycznej analizy obrazu. Opis systemu użytego w badaniach własnych i poprawność jego działania przedstawiona została w kilku publikacjach [3], [4], [5]. W pracach tych zwracano szczególną uwagę na dokładność procesu przygotowania próbek betonowych jako elementu procedury, mającego znaczny wpływ na jakość uzyskanych wyników. Innej kwestii związanej bezpośrednio ze sposobem prowadzenia analizy poświęcone jest niniejsze opracowanie.

2. Przygotowanie próbek

Norma PN – EN 480-11 podaje przykładowo jeden ze sposobów przygotowania próbek do badań zautomatyzowanych. Opis technologii wykonywania zglądów jest jednak dość ogólnikowy i bezkrytyczne stosowanie go może prowadzić do uszkodzenia szlifowanej powierzchni. W omawianych tu eksperymentach badano próbki 100×100×20 mm. Próbką stwardniałego betonu poddawana jest najpierw wielokrotnemu szlifowaniu coraz drobniejszymi proszkami szlifierskimi (SiC), o gradacjach 320, 600 i 1200. Przeprowadzana następnie jest optyczna kontrola jakości wyszlifowanej powierzchni, w przypadku stwierdzenia występowania uszkodzeń na krawędzi porów szlifowanie proszkiem o gradacji 1200 jest ponawiane aż do skutku. Jeśli jest to konieczne, stosuje się wzmacnianie powierzchni za pomocą specjalnego kleju. Na zakończenie powierzchnia próbki malowana jest wodoodpornym niebieskim markerem, a pory wypełniane pastą cynkową na ciepło, z późniejszym usunięciem jej nadmiaru. Po tej operacji zgląd betonowy z porami wypełnionymi kontrastującym białym pigmentem gotowy jest do pomiaru. Podczas całego procesu nieodzowne jest delikatne obchodzenia się z próbką w celu uniknięcia przypadkowych uszkodzeń szlifowanej powierzchni, takich jak uszkodzenie krawędzi pora, wykruszenie drobnych ziaren kruszywa lub wykruszenie fragmentów zaczynu, które powodują zafałszowanie wyników pomiaru [6], [7].

Niestety, pomimo prawidłowej obróbki na powierzchni zglądu pojawiają się czasami obiekty wypełnione pastą cynkową, a nie będące porami pochodzącymi od napowietrzenia. Są to np. raki, rysy lub pory w kruszywie (rys. 1). W przypadku tradycyjnego sposobu przygotowa-

nia próbek obiekty takie należy wykryć przed wykonywaniem pomiaru i następnie ręcznie zamalować, co jest procesem bardzo pracochłonnym i nie zawsze dającym dobre rezultaty.



Rys. 1. Obraz próbki betonowej z widoczną rysą i porami pochodzącymi od napowietrzenia

Fig. 1. Picture of concrete sample with crack and entrained air-voids

3. Kształt pustki powietrznej

Zgodnie z definicją zawartą w Polskiej Normie PN EN 480-11, por powietrzny to „przeźroczliwa otoczona zaczynem cementowym, wypełniona powietrzem lub innym gazem wprowadzonym przed związaniem zaczynu”. Definicja ta nie odnosi się do porów o wymiarach submikroskopowych zwanych porami żelowymi. Jednocześnie norma ogranicza zakres pomiaru cięciw przechodzących przez pory do przedziału od 5 μm do 4 mm [2]. Norma ASTM C 457 zawiera podobną definicję, jednocześnie podając informację, iż uwzględniane w analizie pory mające wpływ na mrozoodporność charakteryzują się średnicą większą niż 2 μm [1]. Definicje te obejmują zarówno pory wprowadzone przypadkowo (*entrapped air voids*) do betonu, jak i pory pochodzące od napowietrzenia (*entrained air voids*). Takie rozróżnienie można znaleźć w normie ASTM C 125 [8]. Dokument podaje, że pory powietrzne przypadkowo schwytane do betonu charakteryzują się średnicą powyżej 1 mm oraz nieregularnym kształtem, natomiast typowa średnica porów od napowietrzenia mieści się w przedziale 10-1000 μm , a kształtem zbliżone są do sferycznego [8]. Definicje te jednak nie są wystarczające do bezpośredniego zastosowania w pomiarach struktury porów.

4. Opis badań

Celem omawianych tu badań było znalezienie reguły, wykorzystującej parametry kształtu, umożliwiającej automatyczne usuwanie z obrazu binarnego, otrzymanego podczas pracy systemu do oceny struktury porów powietrznych, obiektów nie będących porami, a wypełnionych pastą cynkową w czasie procesów przygotowania próbek. Do wygenerowania odpowiednich reguł zastosowano programy uczenia maszynowego AQ i See5. Na podstawie ocen eksperta przygotowano bazę danych złożoną z 2504 rekordów, w tym 186 rekordów odpowiadających obiektom jednoznacznie nie będących porami, 1776 rekordów odpowiadających porom, a pozostałe 542 obiekty oznaczono znakiem „?” ze względu na brak pewności, czy są to pory pochodzące od napowietrzenia. Bazę tę utworzono w wyniku analizy z pomocą programu Image Pro Plus dwóch zdjęć (oznaczonych 1_pc, 2_pc) poprawnie napowietrzonego betonu „AD” oraz jednego zdjęcia próbki betonu niewłaściwie napowietrzonego „2_ik”. Termin „zdjęcie” odpowiada tu standardowemu przebiegowi trawersy stosowanemu podczas pomiaru struktury porów przy powiększeniu 30x [3]. W bazie danych zamieszczono numer identyfikacyjny zdjęcia oraz parametry opisujące charakterystyki kształtu obiektów. Wszystkie parametry uzyskiwane są automatycznie za pomocą programu Image Pro Plus. Parametrami tymi są:

- *Area* –pole powierzchni obiektu, A
- *Aspect* –stosunek największej do najmniejszej osi elipsy będącej odpowiednikiem obiektu, tzn. posiadającej to samo pole powierzchni i moment bezwładności, A_s
- *Area/Box* –współczynnik określający stosunek pola powierzchni obiektu do pola powierzchni prostokąta opisanego na obiekcie, A_B
- *Box X/Y* –współczynnik między szerokością i wysokością prostokąta opisanego na obiekcie, X_Y
- *Radius Ratio* –współczynnik opisujący stosunek maksymalnej odległości ze środka ciężkości obiektu do jego granicy do minimalnej odległości ze środka ciężkości obiektu do jego granicy, R_R
- *Roundness* –współczynnik „kolistości” zdefiniowany jako $obwód^2/4\pi Area$, R_o
- *Per-Area* –współczynnik opisujący stosunek pola powierzchni obiektu do całkowitego pola powierzchni obrazu lub AOI (Area of Interest), P_A
- *Size(width)* –szerokość obiektu, W

- *Fractal Dim.* – wymiar fraktalny obiektu, zdefiniowany w systemie Image Pro Plus, F_D .

W celu ujednolicenia bazy danych tak, aby ograniczyć liczbę miejsc znaczących po przecinku, wartości rzeczywiste zmierzone za pomocą programu Image Pro Plus przemnożono przez odpowiednio dobraną stałą dla każdego z parametrów (tabela 1). Ułatwia to pracę systemom uczenia maszynowego.

Tabela 1

Zestawienie wartości mnożników parametrów otrzymanych z Image Pro Plus

Nazwa parametru	Oznaczenie zmiennej	Mnożnik wartości w bazie danych w stosunku do danych z analizy obrazu
Area	A	10^6
Aspect	As	100
Area/Box	A B	1000
Box X/Y	X Y	1000
Radius Ratio	R R	1000
Roundness	Ro	1000
Per-Area	P A	10^7
Size(width)	W	1000
Fractal Dim	F D	1000

Dodatkowo do bazy danych wprowadzono informację, czy obiekt składa się z porów sklejonych ze sobą (zmienna Sk), a jeśli tak, to z ilu oraz zmienną T_N określającą, czy jest to por czy nie, wreszcie zmienną uwag U, określającą ewentualne błędy w impregnacji lub rodzaj pustki powietrznej, jeżeli uznano, że nie jest ona porem. Znak „?” w bazie danych w kolumnie Sk, U jest tylko wypełnieniem bazy, gdyż informacja, która może występować w tym miejscu danego rekordu, jest oczywista; np. gdy element nie jest porem, nie można mówić o liczbie porów sklejonych ze sobą. Fragment bazy danych zaprezentowano w tabeli 2, natomiast w tabeli 3 przedstawiono zakresy zmienności parametrów w bazie danych.

Tabela 2

Przykład kilku rekordów z przygotowanej bazy danych

Lp.	Nr Z	A	As	A B	X Y	R R	Ro	P A	W	F D	Sk	U	T N
725	2 ik	68.57	100.00	1000.00	1000.00	7.47	1000.00	5.52	5.52	0.00	?	K	N
726	2 ik	76.19	163.30	833.33	1333.33	10.08	1000.00	6.13	6.35	0.00	?	K	N
727	2 ik	30.47	100.00	1000.00	1000.00	5.20	1000.00	2.45	2.76	0.00	?	K	N
728	2 ik	30.47	100.00	1000.00	1000.00	5.20	1000.00	2.45	2.76	0.00	?	K	N
729	1 pc	1356.33	109.08	741.67	937.50	1384.77	1057.14	109.10	39.55	1063.00	?	Z	T
730	1 pc	1310.61	199.71	651.52	1833.33	5662.39	2685.26	105.50	30.33	1232.79	?	Z	T
731	1 pc	6751.17	101.51	668.17	1147.06	1304.67	1341.78	543.40	95.98	1088.31	?	?	T
732	1 pc	1112.49	108.05	802.20	928.57	1247.49	1000.00	89.50	34.18	1063.07	?	?	T
733	1 pc	3916.59	109.34	706.04	1076.92	1351.08	1094.58	315.20	69.58	1047.37	?	?	T

Tabela 3

Przedziały zmienności parametrów w bazie danych

Lp.	Zmienna	Oznaczenie	Wartości	
			od	do
1	Numer zdjęcia	Nr Z	1 pc, 2 pc, 2 ik	
2	Area	A	15.23	2160000.00
3	Aspect	As	100.00	930.27
4	Area/Box	A B	253.76	1000.00
5	Box X/Y	X Y	238.10	9583.33
6	Radius Ratio	R R	5.20	124589.43
7	Roundness	Ro	1000.00	5037.34
8	Per-Area	P A	1.23	173858.10
9	Size(width)	W	0.00	1231.40
10	Fractal Dim	F D	0.00	1319.80
11	Liczba porów sklejonych ze sobą	Sk	1,2,3,4,5	
12	Uwagi	U	Z, K, R, Od, Ob, W	
13	Por tak lub nie	T N	T, N, ?	

5. Generowanie reguł opisujących kształt pustki powietrznej

Główny nacisk położono na znalezienie reguły opisującej obiektu na pewno nie będące porami (oznaczenie w bazie danych N). Poprawność wygenerowanej reguły sprawdzano za pomocą arkusza Excel stosując filtrację rekordów bazy danych. W tabelach 4 i 5 zestawiono przykłady reguł wygenerowanych przez programy AQ i See5. Symbole C, N, T, ? oznaczają odpowiednio całkowitą liczbę obiektów, liczbę obiektów nie będących porami, liczbę porów oraz liczbę obiektów niezidentyfikowanych wykrywanych przez daną regułę. Poprawność reguły zdefiniowano jako stosunek ilości rekordów odpowiadających obiektom nie będących

porami (N) do całkowitej ilości wykrywanych rekordów (C). Reguły podane są w postaci koniunkcji przedziałów wartości danych parametrów.

Tabela 4

Przykład reguł wygenerowanych przez program AQ

Lp.	Reguła	Ilość rekordów spełniających regułę				Poprawność reguły [%]
		C	N	T	?	
1	[A=83.81..921.99] [As>126.64] [R_R>2391.77] [W>3.42] [F_D<1228.28]	243	40	142	61	16.5
2	[A=1847.80..9905.78] [As>150.24] [R_R>2795.76] [W>32.70] [F_D<1110.11]	23	9	13	1	39.1

Tabela 5

Przykład reguł wygenerowanych przez program See

Lp.	Reguła	Ilość rekordów spełniających regułę				Poprawność reguły [%]
		C	N	T	?	
1	Nr_Z = 2_pc; A > 76.19; As > 201.87; Ro <= 1037.78; W <= 5.86	8	4	1	3	50.0
2	Nr_Z = 2_pc; A <= 9433.35 X_Y <= 1291.67; R_R > 2823.96; R_R <= 3206.43 Ro > 1256.5; Ro <= 2614.84	7	6	1	0	85.7

Reguły wykrywane przez zastosowane programy nie pozwalają za pomocą prostej filtracji usunąć wszystkich obiektów nie będących porami bez jednoczesnego usunięcia znacznej ilości porów. Analiza wyników pozwala jednak na ustalenie przybliżonej reguły usuwającej z obrazu głównie zarysowania powierzchni, obiekty, które najłatwiej wykryć stosując jako podstawę współczynniki kształtu ze względu na dużą różnicę między szerokością a długością. Analizując bazę danych za pomocą dostępnych opcji filtracji, w arkuszu kalkulacyjnym regułę tę ustalono na: R_R>3700, Ro>3500, W<200.

6. Zastosowanie filtracji obiektów w badaniach struktury porów

W badaniach struktury porów po analizie uzyskanych wyników zastosowano odrzucenie podczas pomiaru obiektów charakteryzujących się szerokością $W < 0.2$ mm, współczynnikiem

„kolistości” $R_o > 3.5$ i współczynnikiem kształtu $R_R > 3.5$. Wartości tych parametrów odpowiadają ustalonej regule w bazie danych. W celu potwierdzenia zasadności stosowania przyjętej filtracji przeprowadzono badania struktury porów na próbkach betonowych z uwzględnieniem kształtu obiektów. Wykonano również pomiar z ingerencją operatora, polegający na manualnym usunięciu obiektów błędnych z badanych obrazów. Wynik tego pomiaru jest rezultatem, do którego należy dążyć podczas pomiarów automatycznych. Zestawienie wyników pomiaru podano w tabeli 6.

Tabela 6

Wyniki pomiarów parametrów struktury porów z zastosowaniem filtracji obiektów

Numer próbki		„BIV lc”	„BVII mb”	„AD pc”
Pomiar bez filtracji obiektów	A [%]	3.05	1.89	6.01
	\bar{L} [mm]	0.136	0.160	0.106
	α [mm ⁻¹]	45.6	47.7	38.6
Pomiar manualny	A [%]	2.83	1.69	5.94
	\bar{L} [mm]	0.153	0.197	0.115
	α [mm ⁻¹]	41.7	40.8	36.1
Pomiar z zastosowaniem filtracji obiektów	A [%]	3.00	1.84	5.91
	\bar{L} [mm]	0.139	0.171	0.111
	α [mm ⁻¹]	44.7	45.3	37.5

Sprawdzono, iż podczas pomiaru zdjęć próbki „BIV lc” z zastosowaniem filtracji program odrzucił 197 obiektów, w tym tylko 10 obiektów będących porami.

7. Wnioski

W przypadku próbki prawidłowo spreparowanej i wykonanej z materiałów wysokiej jakości wpływ filtracji na wielkości mierzone jest niewielki (tabela 6 próbka „AD pc”). W przypadku gdy na powierzchni próbki znajduje się duża liczba uszkodzeń, wpływ ten znacznie rośnie (tabela 6 próbka „BVII mb”).

Parametry obiektów będące uszkodzeniami w zaczynie cementowym czy porami w krużywie są zbyt zbliżone do porów o nieregularnym kształcie lub porów połączonych ze sobą, aby można było je szybko i prosto odfiltrować z obrazu. Wykorzystanie w tym przypadku algorytmu rozdziału sklejonych cząstek wydłuża znacznie proces obróbki obrazu i prowadzi do powstawania nowych błędnych obiektów na obrazie.

Filtrowanie obiektów za pomocą reguł uzyskanych za pomocą programów AQ i See5 powoduje usuwanie nadmiernej liczby porów pochodzących od napowietrzenia, co może prowadzić do błędnych pomiarów. Zastosowanie metod uczenia maszynowego nie przyniosło oczekiwanych rezultatów w postaci klarownej reguły opisującej obiekty nie będące porami w zaczynie. Jednakże programy AQ i See5 okazały się doskonałym narzędziem pomocniczym zawężającym obszar poszukiwań.

Zastosowanie przyjętej w badaniach prostej filtracji ze względu na kształt obiektu koryguje błędy pomiarowe wynikające z występowania rys i częściowo usuwa obiekty będące uszkodzeniami zaczynu cementowego.

System analizy obrazu, wykorzystywany przy automatycznej ocenie struktury napowietrzenia betonów, z powodu zastosowania omówionej filtracji jest narzędziem w znacznym stopniu niewrażliwym na błędy wynikające ze złej jakości dostarczonego do badań materiału.

LITERATURA

1. ASTM C 457-90: Standard Test Method for Microscopical Determination of Parameters of the Air-Void System in Hardened Concrete, Annual Book of ASTM Standards, 1991, 229-241.
2. PN – EN 480-11/2000: Domieszki do betonu, zaprawy i zaczynu. Metody badań. Oznaczanie charakterystyki porów powietrznych w stwardniałym betonie, PKN, 2000, 22 ss.
3. Załocha D., Kasperkiewicz J.: Automatyzacja wyznaczania charakterystyki napowietrzenia betonu w świetle normy PrPN-EN 480-11, Referaty XLVI Konf. KILiW PAN i KN PZITB, Krynica, IX 2001, 437-444.
4. Załocha D.: Metoda trawersowa a metoda punktowa w ocenie struktury porów betonu napowietrzonego, Referaty II Konferencji Naukowej Doktorantów Wydziałów Budownictwa, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, z. 93 (seria Budownictwo), Gliwice-Wiśła, XI 2001, 497-506.
5. Załocha D., Kasperkiewicz J.: Zastosowanie analizy obrazu do oceny mrozoodporności betonu, kwartalnik *Drogi i Mosty* (w druku).
6. Pleau R., Plante P., Gagne R., Pigeon M.: Practical Considerations Pertaining to the Microscopical Determination of Air-Void Characteristics of Hardened Concrete (ASTM C 457 Standard), Cement, Concrete and Aggregates, vol.12 no.2, 1990, 3-11.

7. Aksamit J., Bodziony J., Zając B.: Ocena jakości zgładów przeznaczonych do analizy stereologicznej układu pustek powietrznych w związonym betonie, *Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN*, tom 2 nr 3-4, Kraków 2000, 369-386.
8. ASTM C 125 – 88, Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates, *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 04.02 (Concrete and Aggregates), Section 4 (Construction), 1991, 63-64.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Leokadia Kucharska

Abstract

Air entrainment has an influence on frost resistance of concrete depending on the air-voids structure. Decisive parameters for efficient air entrainment are the spacing factor and the specific surface of the air-voids structure. Values of these two parameters, described in the American Standard ASTM C 457 and Polish Standard PN EN 480-11, can be obtained using modern image analysis systems.

In the paper discussed are some effects of specimen preparation for automatic measurement. In the consequence of voids filling by zinc paste formed are objects on sample image like cracks, air-voids inside coarse aggregate or paste damages. These objects produce errors during automatic measurements of air-voids structure.

To find some rules describing wrong objects measured were shape factors with the help of image analysis system and used were machine learning methods and data filtration.

Special filtration of measured object is proposed. Tested was influence of filtration on the results. It was found that elimination of some wrong objects like cracks and paste damages is possible.