

## ZASTOSOWANIE STEREOLOGII DO OCENY POROWATOŚCI BETONU

Janusz KONKOL<sup>\*</sup>, Grzegorz PROKOPSKI<sup>\*\*</sup>

Politechnika Rzeszowska, Zakład Inżynierii Materiałowej i Technologii Budownictwa  
Al. Powstańców Warszawy 6, 35-959 Rzeszów,  
e-mail: <sup>\*</sup>jk7@prz.edu.pl, <sup>\*\*</sup>grzeprak@prz.edu.pl

**Słowa kluczowe:** W artykule przedstawiono metodę oceny porowatości betonu z użyciem parametrów stereologicznych. Metoda ta umożliwia identyfikację zarówno porowatości całkowitej, jak i liczności oraz kształtu porów.

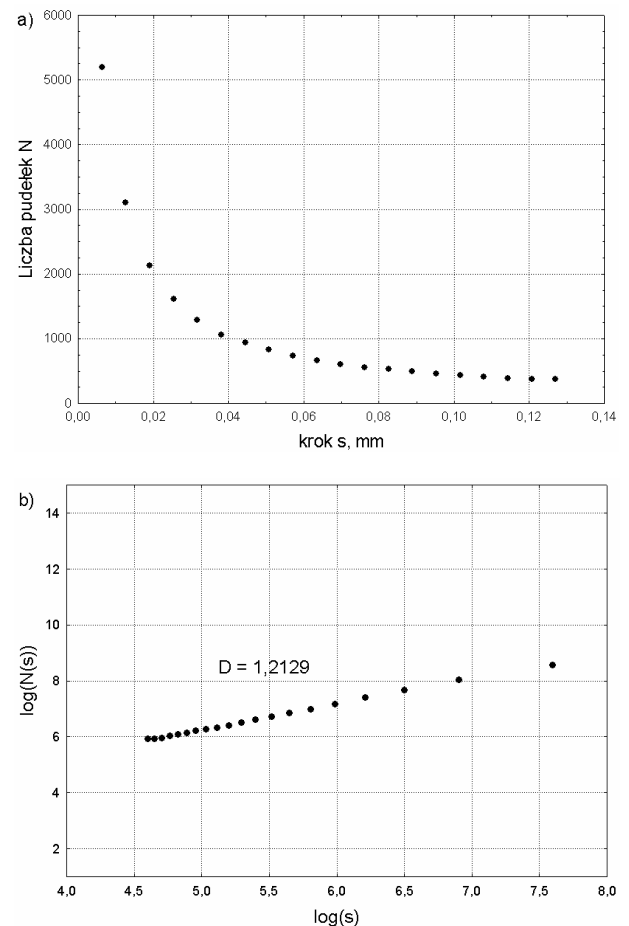
**Słowa kluczowe:** beton, porowatość, stereologia, geometria fraktalna.

### 1. WSTĘP

Pory w strukturze betonu mogą powstawać podczas produkcji mieszanki betonowej lub w wyniku reakcji hydratacji, a ich wpływ na cechy mechaniczne i fizyczne betonu jest niepodważalny. Stosowane są różne metody wyznaczania zawartości powietrza w betonie, zarówno w mieszance betonowej i stwardniałym betonie. Niektóre z metod oceny porowatości umożliwiają określenie całkowitej porowatości, a także ocenę wielkości porów, ich kształtu i sposobu rozmieszczenia [1, 3].

Do metod umożliwiających ocenę porowatości stwardniałego betonu zalicza się: metodę porozymetrii rtęciowej MIP (*mercury intrusion porosimeter*) [3], metodę pomiarów stereologicznych, przy zastosowaniu analizatora obrazu oraz metodę z użyciem galu (*Ga intrusion method*) [8]. Jedynie jednak w przypadku metody pomiarów stereologicznych, przy zastosowaniu analizy obrazu, można ocenić rzeczywistą wielkość porów, ich rozmieszczenie w betonie oraz kształt. Parametrem dobrze charakteryzującym strukturę porów jest wymiar fraktalny, zdefiniowany przez Mandelbrota [5]. Wymiar fraktalny umożliwia wszechstronne badania porowatości: analizę rozkładu, liczby, wielkości i kształtu porów. Jedną z metod określania wymiaru fraktalnego  $D$  jest metoda pudełkowa, w której analizowany obszar pokrywa się kwadratami o boku  $s$ , a następnie zlicza się kwadraty, przez które przechodzą krawędzie porów. Obliczenia powtarza się kilkakrotnie zmieniając długość boku kwadratu  $s$  (rys. 1a). Wymiar fraktalny określa się na podstawie nachylenia prostej na wykresie bilogarytmicznym zależności logarytmu

liczby pudełek  $N$  ( $\log N(s)$ ), zliczonych przy danym kroku  $s$  od logarytmu wymiaru pudełka  $\log(s)$  – rys. 1b.



Rys. 1. Przykładowe wykres zależności:  
a) liczby pudełek  $N$  od kroku  $s$ , b)  $\log(N(s))$  od  $\log(s)$ .  
Fig. 1. Examples of the graphs of dependence of:  
a) the number of boxes  $N$  on the step  $s$ , b)  $\log N(s)$  on  $\log(s)$ .

Wymiar fraktalny stosuje się do opisu stopnia skomplikowania zarysowań powierzchni materiałów cementowych [2], charakteryzowania powierzchni przełomów materiałów cementowych [7], oceny wymiaru fraktalnego ziaren kruszywa oraz w analizie porów występujących w zaczynie.

## 2. OKREŚLANIE POROWATOŚCI MATERIAŁÓW NA PODSTAWIE ANALIZY PŁASKICH PRZEKROJÓW

Metody stereologiczne określania charakterystyk porów powietrznych, na podstawie analizy płaskich przekrojów, mogą stanowić uzupełnienie analizy porowatości w odniesieniu do metod porozymetrii rtęciowej czy metod sorpcji azotu i pary wodnej. Metody porozymetrii i sorpcji pozwalają na określenie charakterystyk porów o niewielkich rozmiarach. Wydaje się uzasadnione wykorzystanie metod stereologicznych w celu otrzymanie pełnego obrazu porów w danym materiale.

Zastosowanie znanych zależności stereologicznych umożliwia ocenę parametrów przestrzennej struktury porów na podstawie analizy dokonywanej na płaskich przekrojach. Obliczenia przeprowadza się metodami: punktową, liniową (PN-EN 480-11) lub palnometryczną. Do najczęściej używanych parametrów stereologicznych należą:

- całkowita zawartość powietrza  $A$ , określona jako suma powierzchni przekrojów porów na płaskiej próbce betonu odniesiona do powierzchni próbki  $A_Z$ . Najczęściej wartość ta podawana jest w procentach.
- średnia cięciwa pora  $\bar{l}$ , obliczona jako stosunek sumy długości cięciw do długości wszystkich siecznych (linii pomiarowych w metodzie liniowej).
- powierzchnia właściwa porów  $\alpha$ , opisaną zależnością

$$\alpha = \frac{4}{\bar{l}}, \quad (1)$$

- liczność względna porów  $N_A$ , określona jako stosunek liczby porów  $N$  na badanym płaskim obrazie próbki do powierzchni tego obrazu  $A_Z$ .
- współczynnik rozstawu porów  $\bar{L}$  zdefiniowany przez Powersa [6], jako przeciętna odległość dowolnego punktu w zaczynie od krawędzi najbliższej położonego pęcherzyka powietrza. Jest to parametr pozwalający na powiązanie struktury porowatości betonu napowietrzonego z jego mrozoodpornością.

Oprócz parametrów stereologicznych do określania charakterystyk porów może być stosowny wymiar fraktalny  $D$ , określony metodą pudełkową.

Istotnymi zagadnieniami podczas dokonywania stereologicznej bądź fraktalnej analizy porów w betonie jest: sposób przygotowania próbki, sposób uzyskania obrazu

komputerowego o odpowiedniej rozdzielczości oraz komputerowa analiza obrazu.

## 3. PRZEPROWADZONE BADANIA

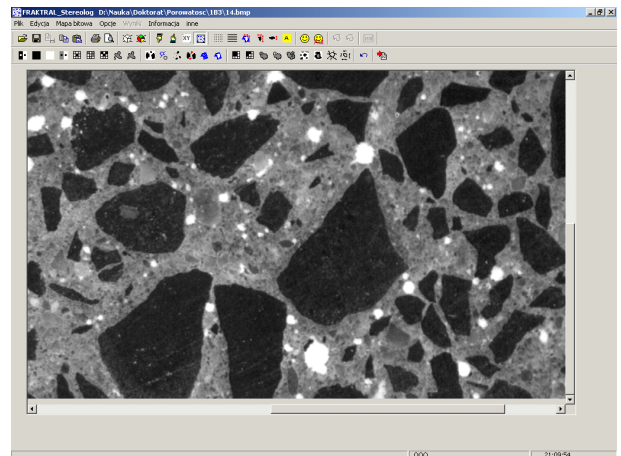
Wykonano dwie mieszanki betonowe, o stałym stosunku cementu do piasku (1:1,76), piasku do gysu bazaltowego (1:1,8) i dwóch stosunkach wodno-cementowych (0,44 i 0,58).

Tabl. 1. Skład mieszanek betonowych.  
Table 1. Composition of concrete mixes.

Seria betonu (W/C)	Ilość składników w kg na 1 m <sup>3</sup> betonu			
	Cement	Piasek	Grys bazaltowy	Woda
0,44	396,1	698,4	1260,6	174,0
0,58	375,1	661,3	1193,7	217,8

Obrazy poddawane analizie stereologicznej i fraktalnej wydzielono z powierzchni próbek betonowych, z badań odporności na pęknięcie według I modelu pęknięcia (rozciąganie przy zginaniu), zgodnie z wytycznymi projektu zaleceń RILEM [4]. Z powierzchni próbki o wymiarach 8×15 cm wybierano, z uwagi na eliminacji błędów wynikających z „efektu ściany”, obszar o wielkości 6,48×12,67 cm.

Obraz powierzchni betonu uzyskiwano skanując, przy rozdzielczości skanera 400 dpi., odpowiednio przygotowane zgłady (rys. 2).



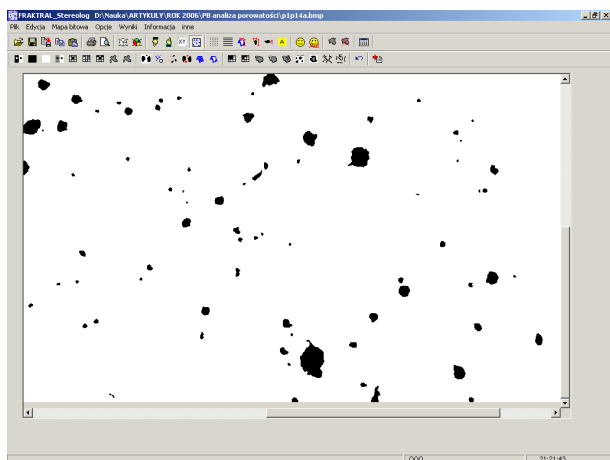
Rys. 2. Rzeczywisty obraz powierzchni próbki (W/C = 0,44).  
Fig. 2. The actual image of the surface of specimen (W/C = 0,44).

Wyboru rozdzielczości skanowania dokonano na podstawie przeprowadzonych badań wstępnych z zakresu od 100 do 1200 dpi. W przypadku porów przyjęto, że pory powietrzne stanowią piksele o skali szarości od 210 do 255.

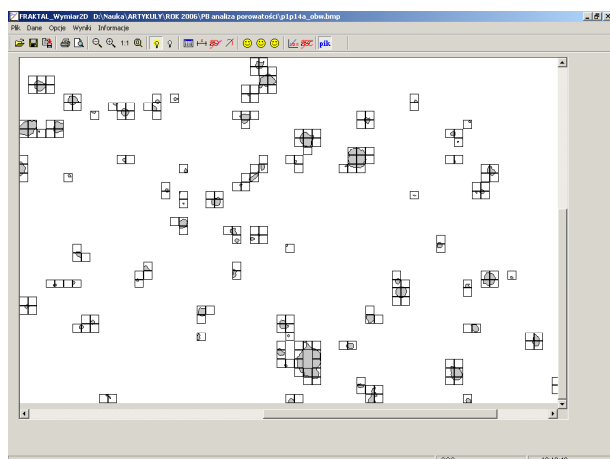
Dokładność w przypadku analizy dokonywanej na próbkach betonowych przy zastosowaniu programu komputerowego *FRAKTAL\_Stereolog* i skanera (rozdzielczość obrazu 400 dpi.) wynosiła 6,36  $\mu\text{m}$  (wielkość odpowiadająca 1 pikselowi).

Na wprowadzonym do komputera obrazie próbki dokonano następnie wydzielenia potencjalnych miejsc występowania porów stosując operacje morfologiczne i punktowe. Dokonano również eliminacji szumów przeprowadzając operację rekonstrukcji z jednokrotną erozją.

Zastosowana procedura umożliwiała wykrywanie porów o wielkości od 6 pik<sup>2</sup> (0,0242 mm<sup>2</sup>). Przykładowy obraz porów uzyskany w przypadku próbki betonowej z rys. 2 pokazano na rys. 3.



Rys. 3. Obraz porów ( $W/C = 0,44$ ).  
Fig. 3. The image of pores ( $W/C = 0,44$ ).



Rys. 4. Widoczne krawędzie porów oraz siatka kwadratów pokrywająca je.  
Fig. 4. Visible edges of pores with the grid of squares covering them.

Całkowitą zawartość powietrza  $A$  (tabl. 2) określono metodami stereologicznymi, przy użyciu programu komputerowego *FRAKTAL\_Stereolog*.

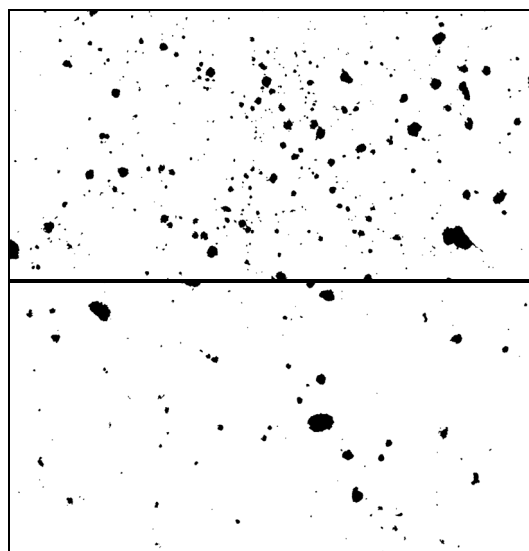
Wykorzystując możliwości programu komputerowego *FRAKTAL\_Stereolog* w celu określenia wymiaru fraktalnego dokonano wyodrębnienia krawędzi porów. Wymiar fraktalny  $D$  określono na podstawie nachylenia prostej zależności  $\log N(s)$  od  $\log(s)$ , gdzie krok  $s$  zmieniał się od 1 do 20 pik, to jest od 0,064 do 1,272 mm. Dla każdego kroku  $s$ , obraz powierzchni próbki pokrywano siatką kwadratów o boku równym temu krokowi, a następnie dokonywano zliczenia kwadratów, w których znajdowały się krawędzie porów. Przykładowy obraz powierzchni próbki pokrytej siatką kwadratów pokazano na rys. 4.

Wyniki analizy stereologicznej i fraktalnej zamieszczono w tabl. 2.

Tabela 2. Wyniki analizy stereologicznej i fraktalnej.  
Table 2. Results of the stereological and fractal analyses.

Lp.	$W/C$	Całkowita zawartość porów $A$ , % $\pm$ odchylenie standardowe wartości średniej	Wymiar fraktalny $D_{BC}$ % $\pm$ odchylenie standardowe wartości średniej
1	0,44	3,90 $\pm$ 0,27	1,3583 $\pm$ 0,0113
2	0,58	1,83 $\pm$ 0,14	1,2285 $\pm$ 0,0117

Przeprowadzony test statystyczny równości średnich wykazał, że wartości średnie całkowitej zawartości powietrza i wymiaru fraktalnego są statystycznie różne przy przyjętym poziomie istotności 0,05.



Rys. 5. Obraz porów ( $W/C = 0,44$  na górze,  $W/C = 0,58$  na dole).  
Fig. 5. The image of pores ( $W/C = 0,44$  at the top,  $W/C = 0,58$  at the bottom).

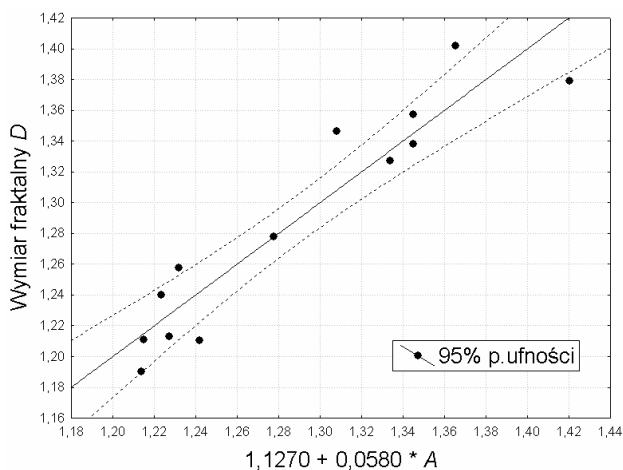
Uzyskane różnice w wynikach zarówno całkowitej zawartości powietrza jak również wymiaru fraktalnego potwierdzają obrazy porów w dwóch przykładowych próbkach o zróżnicowanym stosunku wodno-cementowym  $W/C$  (rys. 5). Uzyskanie większej całkowitej zawartości powietrza i wymiaru fraktalnego w próbce betonowej o  $W/C = 0,44$  w porównaniu do próbki o  $W/C = 0,58$  spowodowane jest większą liczebnością porów zarówno tych o niewielkich jak i większych rozmiarach oraz występowaniu porów o kształtach nieregularnych.

Dokonano analizy korelacji między wymiarem fraktalnym  $D$ , a całkowitą zawartością powietrza  $A$ . Otrzymano zależność postaci:

$$D = 1,1270 + 0,0580 \cdot A \quad (2)$$

Współczynnik korelacji przyjętego modelu regresji wyniósł  $R = 0,94$ , a uzyskaną zależność jest statystycznie istotna przy poziomie istotności 0,05.

Zależność wartości obserwowanych  $D$  względem przewidywanych, wraz z przedziałami ufności pokazano na rys. 6.



Rys. 6. Obserwowane wartości wymiaru fraktalnego względem przewidywanych.

Fig. 6. Fractal dimension values as observed against those predicted.

#### 4. PODSUMOWANIE

W artykule zaprezentowano zastosowanie nowego sposobu oceny zróżnicowania porowatości betonów, przy użyciu stereologii i wymiaru fraktalnego.

Analizę porowatości betonów przeprowadzono na płaskich przekrojach próbek betonowych, przy zastosowaniu analizy obrazu.

Przewagą metod stereologicznych nad innymi metodami określania morfologii porów w betonie jest sposób dokonywania pomiarów. Znormalizowanie pomiarów i ich

powszechność, zarówno w Europie (EN 480-11) i USA (ASTM C 457-98) oraz wykonywane według tych norm badania, potwierdzają dużą wiarygodność uzyskiwanych wyników.

Przedstawiony w artykule sposób opisu porów, za pomocą wymiaru fraktalnego, poszerza możliwości różnicowania porowatości betonów (także innych materiałów), z uwzględnieniem zarówno porowatości całkowitej, jak i liczebności oraz kształtu porów.

Uzyskane wyniki i korelacje wskazują na pełną przydatność zastosowanej metody do oceny zróżnicowania porowatości stwardniałego betonu.

#### APPLICATION OF STEREOLOGY FOR ESTIMATION OF PORES IN CONCRETE

**Summary:** The article present the application a new method of assessment of concrete porosity using the fractal dimension.

The method expands the possibilities of differentiating the porosities of concretes, while allowing for both the overall porosity and the number and shape of pores.

#### Literatura

- [1] ASTM C 457 - 98 Standard Test Method for Microscopical Determination of Parameters of the Air-Void System in Hardened Concrete.
- [2] Chiaia B., van Mier J. G. M., Vervuurt A.: *Crack growth mechanisms in four different concrete: Microscopic observations and fractal analysis*. Cement and Concrete Research 28(1) (1998).
- [3] Diamond S. *Mercury porosimetry. An inappropriate method for the measurement of pore size distributions in cement-based materials – review*. Cement and Concrete Research 30 (2000).
- [4] Fracture Mechanics Test Methods for Concrete. RILEM Report 89-FMT, edited by S. P. Shah and A. Carpinteri, Chapman and Hall 1991.
- [5] Mandelbrot B. B.: *Fractals. Form, chance and dimension*. Freeman, San Francisco 1977.
- [6] Powers T. C.: *The air requirement of frost-resistant concrete*. Proceedings, Highway Research Board 29 (1949) 184-202.
- [7] Prokopski G., Konkol J.: *The fractal analysis of the fracture surface of concretes made from different coarse aggregates*. Computers and Concrete 2(3) (2005).
- [8] Tanaka K., Kurumisawa K. *Development of technique for observing pores in hardened cement paste*. Cement and Concrete Research 32 (2002).