

22-24 maja 2002 (In Polish). 7. Polański Z.: *Planowanie doświadczeń w technice*. PWN, Warszawa, 1984 (In Polish). 8. Shah S. P.: *Determination of fracture parameters (K_{Ic}^S and $CTOD_c$) of plain concrete using three-point tests. RILEM Draft Recommendations, Materials and Structures, Paris, 23, pp. 457-460, 1990 (In English). 9. Kryszicki W., Bartos J., Dyczka W., Królikowska K., Wasilewski M.: *Rachunek prawdopodobieństwa i statystyka matematyczna w zadaniach. Cz. II. Statystyka Matematyczna*. PWN, Warszawa 1999 (In Polish).*

Konkol J., Prokopski G.

Politechnika Rzeszowska,
Zakład Inżynierii Materiałowej i Technologii Budownictwa
Polska, 35-959, Rzeszów, Al. Powstańców Warszawy 6.
E-mail: jk7@prz.edu.pl, grzepruk@prz.edu.pl

ANALIZA KORELACJI MIĘDZY PARAMETRAMI MORFOLOGII POWIERZCHNI PRZEŁOMÓW BETONÓW

© Konkol J., Prokopski G., 2007

In article the results of investigations of fracture surfaces of concrete has been shown. Determined the profile lines development factor R_L and the fracture surfaces development factor R_S , versus composition of concretes as well as the dependence between fractal dimension D and parameters R_L and R_S . The existence statistical correlation between fractal dimension D and these parameters has been shown too. With growth the both fractographical parameters (R_L and R_S) enlarged oneself also the value of fractal dimension.

Wprowadzenie. Fraktografia ilościowa to nauka zajmująca się opisem i analizą powierzchni przełomów. Sam termin fraktografia (fraktologia) wprowadził dopiero w 1944 roku C. A. Zapffe [1].

Początkowo badania fraktograficzne prowadzone były z wykorzystaniem mikroskopii optycznej. Wprowadzenie transmisyjnej mikroskopii elektronowej, a później w 1965 roku skaningowej mikroskopii elektronowej spowodowało zwiększenie możliwości uzyskiwania dużych powiększeń, a w efekcie przeprowadzanie bardziej szczegółowej analizy. Głównym celem stosowania fraktografii ilościowej jest opis zjawisk i charakterystyki powierzchni przełomów za pomocą rzeczywistych pól powierzchni, długości, liczności, współczynników kształtu, stopni orientacji oraz rozkładów tych wielkości.

Podstawę ilościowej analizy powierzchni przełomów stanowią rzuty tych powierzchni na główną płaszczyznę pęknięcia lub na płaszczyzny do niej równoległe. Często analizę powierzchni przeprowadza się również na przekrojach, prostopadłych do głównej płaszczyzny pęknięcia, zwanych popularnie profilami lub pionowymi przecięciami.

Miarą stopnia rozwinięcia powierzchni przełomu jest rzeczywiste pole powierzchni przełomu S . Uniezależniając parametr S od rozmiarów analizowanej próbki wygodniej jest posługiwać się, tzw. współczynnikiem rozwinięcia pola powierzchni przełomu R_S . Odnosząc obliczoną wartość rzeczywistego pola powierzchni przełomu S do jego rzutu A' otrzymuje się wartość współczynnika rozwinięcia pola powierzchni przełomu:

$$R_S = \frac{S}{A'} \quad (1)$$

gdzie S - rzeczywiste pole powierzchni przełomu; A' - pole powierzchni rzutu przełomu na płaszczyznę odniesienia.

Jedną z metod analizy powierzchni przełomów jest metoda pionowych przecięć. Ilość informacji odnośnie przestrzennej struktury przełomu w przypadku analizy linii profilowych jest

znacznie mniejsza, niż gdy analizie poddawana jest cała powierzchnia przełomu. Zastosowanie tej metody, mimo pracochłonności przygotowania profili, jest podyktowane łatwiejszą interpretacją i możliwością zastosowania metod automatycznych [2].

Parametrem charakteryzującym linię profilową jest współczynnik rozwinięcia linii profilu R_L . Pojęcie to wprowadzili Pickens i Gurland [3]:

$$R_L = \frac{L}{L'} \quad (2)$$

gdzie L - długość linii profilowej; L' - długość rzutu linii profilowej na linię odniesienia.

Wartość parametrów R_L i R_S ściśle zależy od powiększenia i rozdzielczości badanej linii profilowej lub powierzchni, jak również od natury powierzchni przełomu i orientacji płaszczyzny cięcia.

Miarą stopnia skomplikowania powierzchni przełomu jest również wymiar fraktalny D [4]. Prowadzone w ostatnich latach badania dowodzą przydatności geometrii fraktalnej do opisu powierzchni przełomów betonów i zapraw [5].

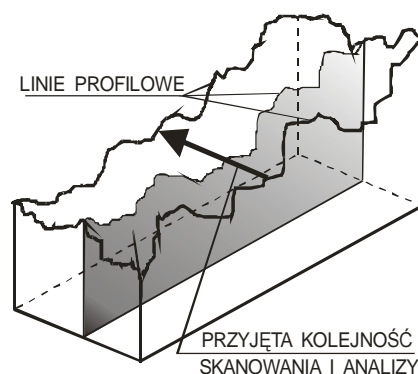
Związek współczynnika rozwinięcia linii profilowej R_L z wymiarem fraktalnym D przedstawiono, m. in. w pracy [6]:

$$\log R_L = (D - 1) \log M + C, \quad (4)$$

gdzie $M = d_{\max}/d_0$; C - stała; d_{\max} , d_0 - odpowiednio maksymalna i minimalna średnica ziarna kruszywa w stosie okruszowym.

Badania fraktalne i fraktograficzne powierzchni przełomów betonowych. Badania fraktalne i fraktograficzne przeprowadzono na specjalnie przygotowanych replikach gipsowych wykonanych na przełomach betonowych belek użytych w badaniu odporności na pękanie. Próbki do badania wykonano z betonów na kruszywie bazaltowym i żwirowym o zróżnicowanym składzie. Skład betonu zdeterminowany był przez dwie zmienne: stosunek wodno-cementowy i proporcja kruszywa grubego do drobnego. Łącznie wykonano po 10 serii obu betonów.

Preparatyka próbek polegała na wykonaniu replik przełomów betonowych z gipsu białego, a następnie wylaniu, na tak przygotowane repliki, gipsu barwionego. Próbki cięto, wzdłuż dłuższego boku, na 10 pasków o grubości 5 mm, uzyskując w ten sposób, dla każdego przełomu po 20 linii profilowych (rys. 1). Takie przyjęcie kierunku cięcia miało na celu uzyskanie linii profilowych zgodnych w przybliżeniu z kierunkiem rozwijania się pęknięcia. Pocięte próbki poddano skanowaniu przy rozdzielczości 600 dpi., a współrzędne linii profilowych uzyskano stosując program komputerowy FRAKTAL_Digit¹ (rys. 2) Obliczenia wymiaru fraktalnego D , określonego metodami cięciwy i pudełkową oraz współczynników R_L i R_S przeprowadzono przy zastosowaniu programu komputerowego FRAKTAL_Wymiar2D². Uzyskane wyniki obliczeń wraz z odchyleniem standardowym wartości średniej, zamieszczono w tablicach 1 i 2. Wytluszczone wartości ekstremalne.



Rys. 1. Kierunek skanowania powierzchni przełomu

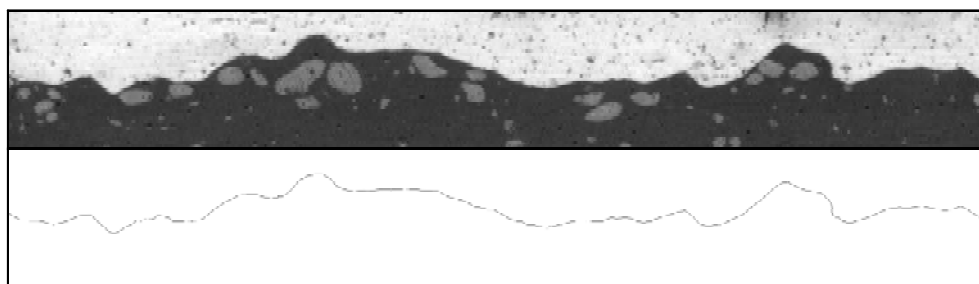
¹ Konkol J.: FRAKTAL_Digit, program komputerowy,

² Konkol J.: FRAKTAL_Wymiar2D, program komputerowy

Table 1

Wyniki badań wymiaru fraktalnego profili betonu bazaltowego i żwirowego

Nr serii	Beton bazaltowy				Beton żwirowy		
	Zmienna		Wymiar fraktalny		Zmienna	Wymiar fraktalny	
	W/C	K _G /K _D	D _C ± S	D _{BC} ± S	K _G /K _D	D _C ± S	D _{BC} ± S
[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	
1	0,44	1,81	1,0241±0,0008	1,0643±0,0018	1,79	1,0236±0,0010	1,0618±0,0014
2	0,58	2,80	1,0240±0,0007	1,0641±0,0013	3,21	1,0253±0,0010	1,0672±0,0012
3	0,41	2,30	1,0216±0,0008	1,0602±0,0010	2,50	1,0248±0,0011	1,0595±0,0012
4	0,61	2,30	1,0235±0,0009	1,0619±0,0013	2,50	1,0274±0,0011	1,0645±0,0015
5	0,51	1,60	1,0238±0,0010	1,0630±0,0017	1,50	1,0281±0,0013	1,0641±0,0016
6	0,51	3,00	1,0240±0,0010	1,0681±0,0018	3,50	1,0292±0,0010	1,0668±0,0019
7	0,51	2,30	1,0227±0,0008	1,0639±0,0017	2,50	1,0275±0,0011	1,0663±0,0016
8	0,44	2,80	1,0227±0,0006	1,0646±0,0013	3,21	1,0286±0,0012	1,0670±0,0014
9	0,58	1,81	1,0253±0,0010	1,0715±0,0015	1,79	1,0267±0,0011	1,0672±0,0018
10	0,51	2,30	1,0227±0,0007	1,0624±0,0013	2,50	1,0272±0,0010	1,0612±0,0016



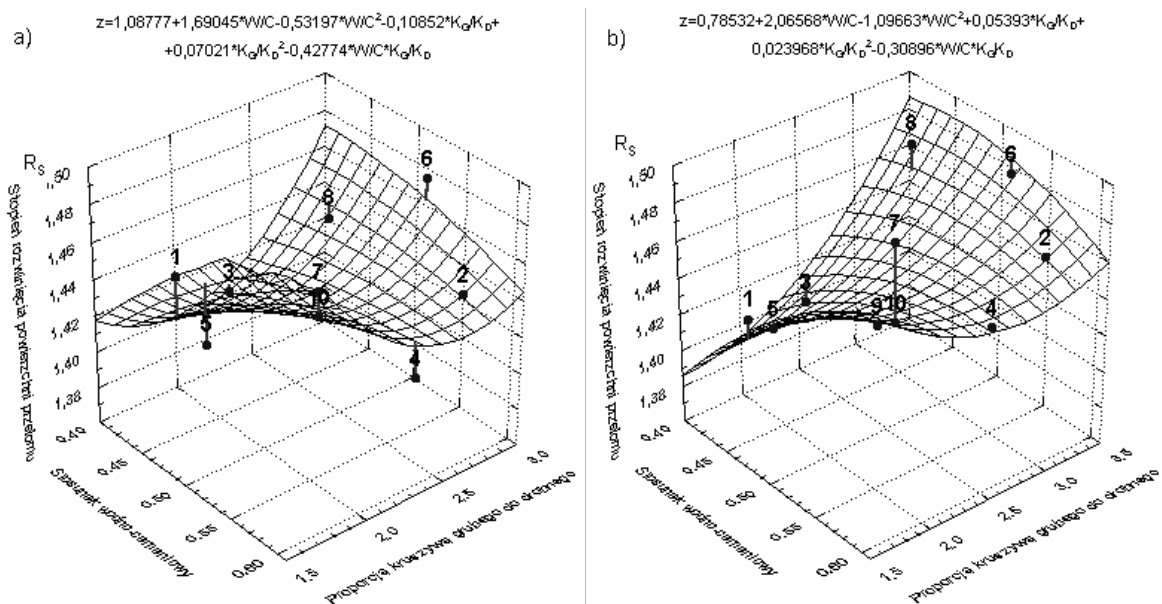
Rys. 2. Zeskanowany profil przetłomu przy rozdzielczości 600 dpi. (u góry) oraz wynik digitalizacji (u dołu)

Table 2

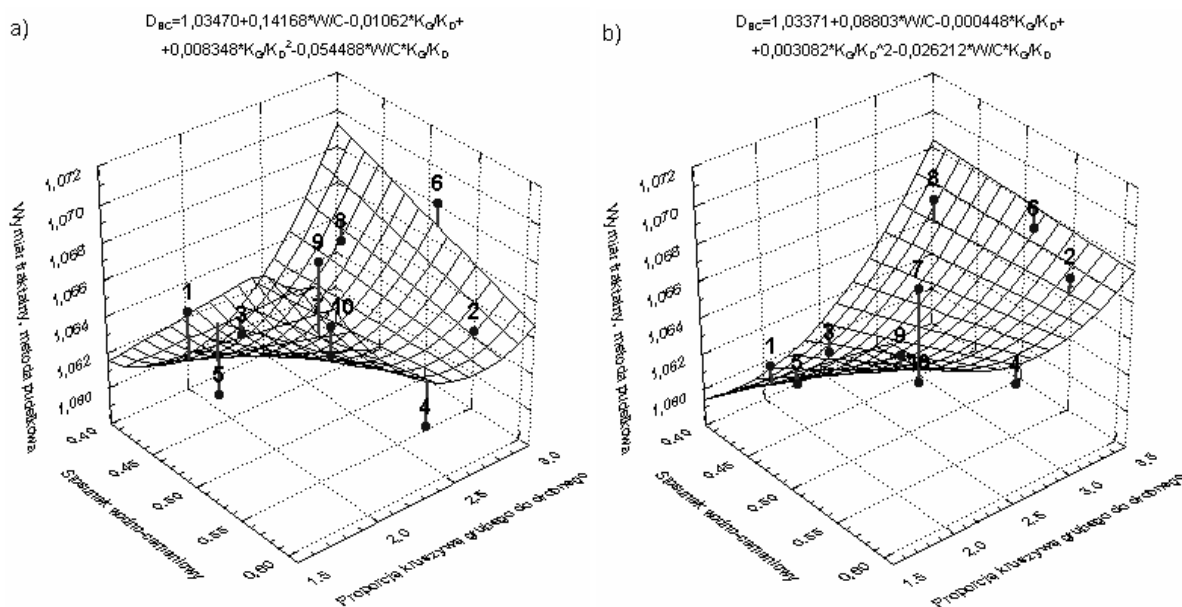
Zestawienie wyników badań fraktograficznych profili

Seria betonu	Beton bazaltowy				Beton żwirowy			
	W/C	K _G /K _D	R _L	R _S	W/C	K _G /K _D	R _L	R _S
1	0,44	1,81	1,246±0,009	1,442±0,016	0,44	1,79	1,241±0,008	1,422±0,012
2	0,58	2,80	1,248±0,007	1,441±0,012	0,58	3,21	1,262±0,007	1,461±0,012
3	0,41	2,30	1,229±0,006	1,406±0,010	0,41	2,50	1,227±0,007	1,401±0,011
4	0,61	2,30	1,244±0,007	1,426±0,011	0,61	2,50	1,257±0,009	1,453±0,013
5	0,51	1,60	1,251±0,010	1,437±0,016	0,51	1,50	1,258±0,010	1,449±0,015
6	0,51	3,00	1,267±0,012	1,474±0,019	0,51	3,50	1,273±0,012	1,476±0,019
7	0,51	2,30	1,250±0,009	1,439±0,015	0,51	2,50	1,268±0,009	1,466±0,014
8	0,44	2,80	1,248±0,007	1,439±0,011	0,44	3,21	1,275±0,008	1,479±0,013
9	0,58	1,81	1,290±0,010	1,505±0,015	0,58	1,79	1,270±0,010	1,465±0,016
10	0,51	2,30	1,240±0,007	1,425±0,011	0,51	2,50	1,241±0,008	1,423±0,013

Przykładowe wykresy uzyskanych powierzchni rozwiązań wybranych parametrów (R_S i D_{BC}) w zależności od zmiennych w planie badań pokazano na rysunkach 3 i 4.



Rys. 3. Zależność współczynnika rozwinięcia powierzchni przelomu R_S od W/C i K_C/K_D
a) beton bazaltowy, b) beton żwirowy



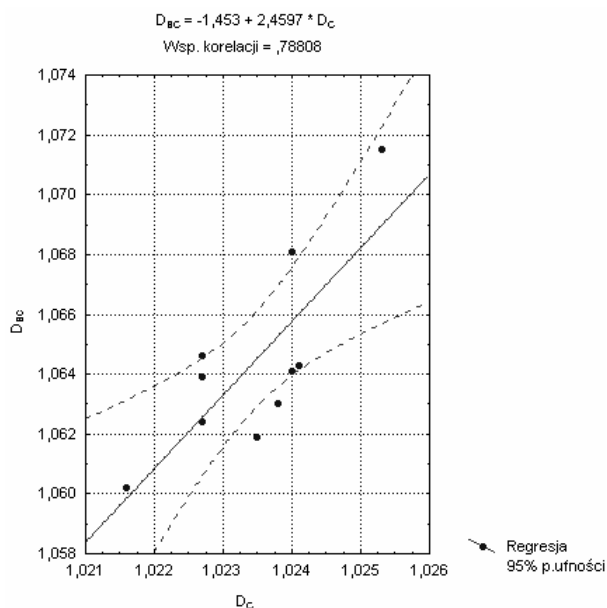
Rys. 4. Zależność wymiaru fraktalnego D_{BC} , określonego metodą pudełkową, od W/C i K_C/K_D
a) beton bazaltowy, b) beton żwirowy

Analiza korelacji między parametrami morfologii powierzchni. Analiza korelacji między wymiarami fraktalnymi wykazała istotną korelację między wymiarem fraktalnym D_C , określonym metodą cięciwy, a wymiarem fraktalnym D_{BC} , określonym metodą pudełkową, jedynie w przypadku betonu bazaltowego (rys. 5).

Zwiększeniu wartości wymiaru fraktalnego D_{BC} towarzyszyło równoczesne zwiększenie wymiaru fraktalnego D_C (równanie (5)).

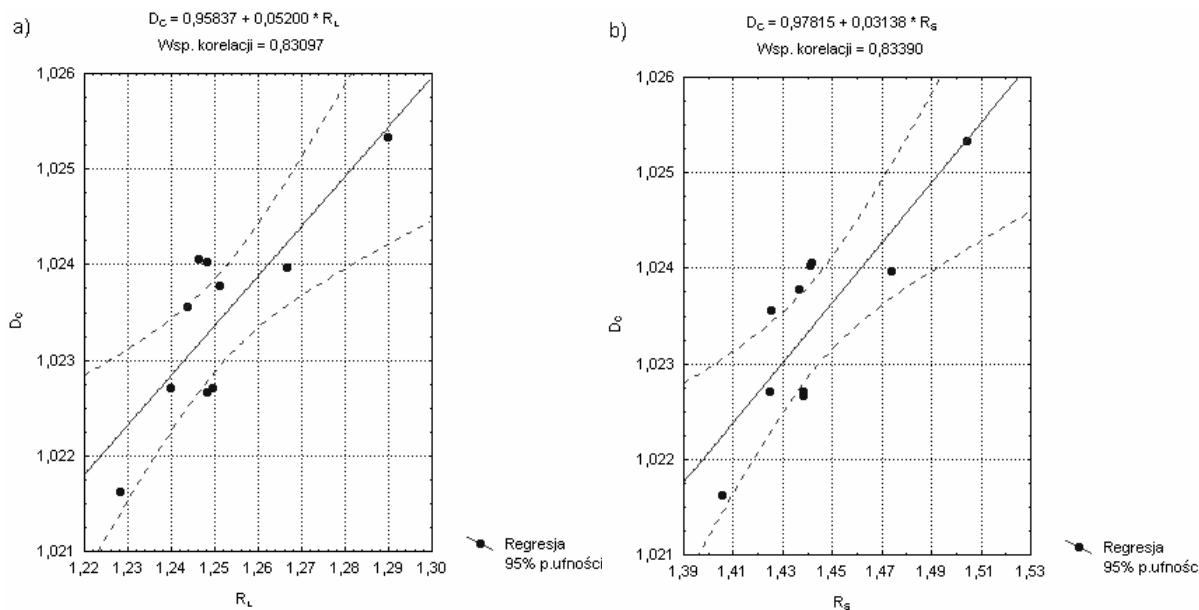
$$D_{BC} = -1,453 + 2,4597 \cdot D_C \quad (5)$$

Współczynnik korelacji, dla wszystkich 24 wyników, wyniósł 0,525, zaś dla wartości średnich $R = 0,788$. Pozostałe korelacje okazały się nieistotne na poziomie istotności 0,05. W przypadku betonu żwirowego nie obserwowano zgodności metod.



Rys. 5. Wykres korelacji między wymiarami fraktalnymi D_{BC} i D_C (beton bazaltowy)

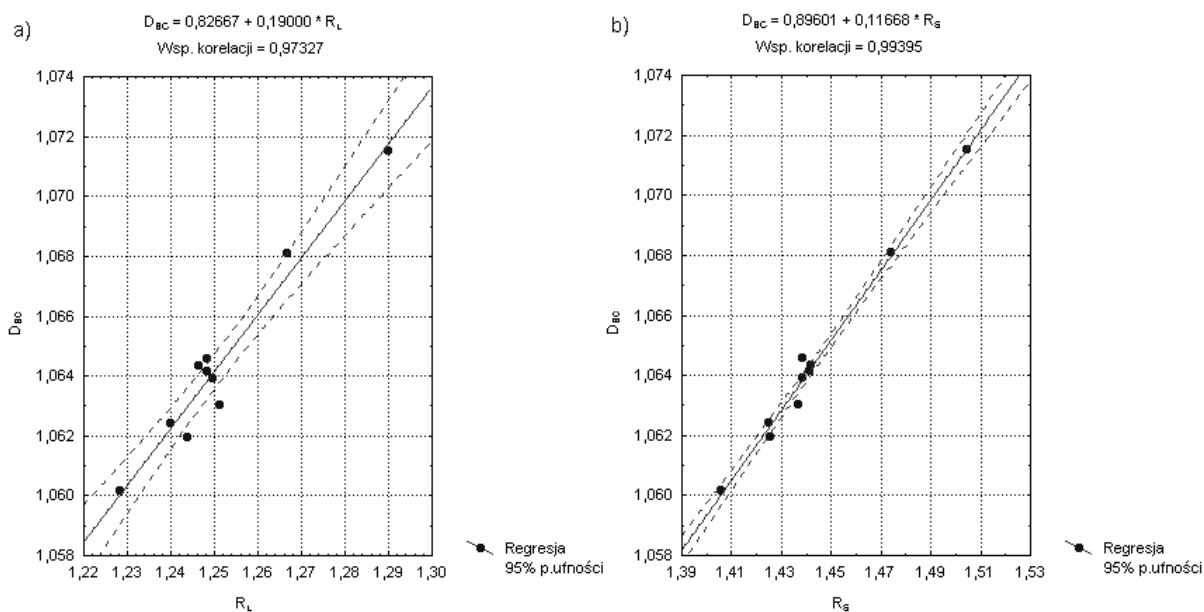
Analiza zależności wymiaru fraktalnego D natomiast od współczynnika rozwinięcia linii profilowej R_L i współczynnika rozwinięcia powierzchni przełomu R_S obu betonów, wykazała istnienie istotnej korelacji między R_L i R_S , a wymiarami fraktalnymi określonymi metodą cięciwy D_C (rys. 6) i metodą pudełkową D_{BC} (rys. 7 i 8). Wzrost wartości R_L czy R_S odpowiada wzrostowi wartości wymiaru fraktalnego, określonego obu metodami.



Rys. 6. Zależność wymiaru fraktalnego D_C (metoda cięciwy, beton bazaltowy), od:
a) współczynnika rozwinięcia linii profilowej R_L , b) współczynnika rozwinięcia powierzchni przełomu R_S

W przypadku betonu bazaltowego otrzymano zależności postaci:

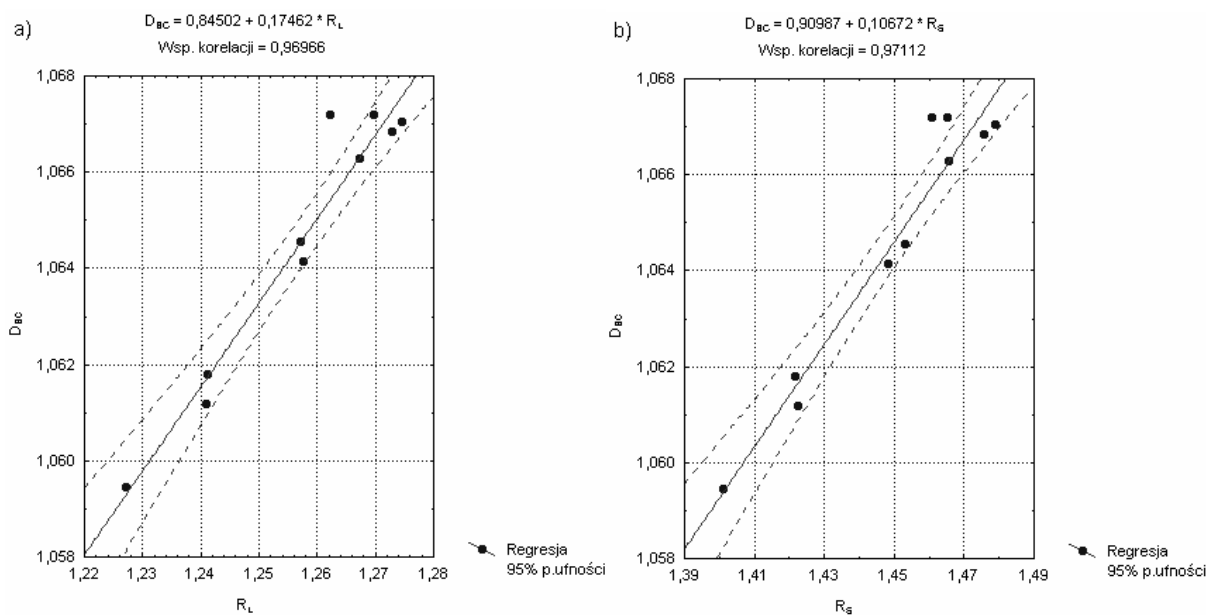
$$\begin{aligned}
 D_C &= 0,95837 + 0,0520 \cdot R_L && \text{przy } R = 0,831, \\
 D_C &= 0,97815 + 0,0314 \cdot R_S && \text{przy } R = 0,834, \\
 D_{BC} &= 0,82667 + 0,1900 \cdot R_L && \text{przy } R = 0,973, \\
 D_{BC} &= 0,89601 + 0,1167 \cdot R_S && \text{przy } R = 0,994.
 \end{aligned}
 \tag{6}$$



Rys. 7. Zależność wymiaru fraktalnego D_{BC} (metoda pudełkowa, beton bazaltowy) od: a) współczynnika rozwinięcia linii profilowej R_L , b) współczynnika rozwinięcia powierzchni przelomu R_S

W przypadku betonu żwirowego otrzymane zależności mają postać:

$$\begin{aligned}
 D_C &= 0,93006 + 0,0770 \cdot R_L && \text{przy } R = 0,686, \\
 D_C &= 0,95844 + 0,0472 \cdot R_S && \text{przy } R = 0,689, \\
 D_{BC} &= 0,84502 + 0,1746 \cdot R_L && \text{przy } R = 0,970, \\
 D_{BC} &= 0,91000 + 0,1067 \cdot R_S && \text{przy } R = 0,971.
 \end{aligned}
 \tag{7}$$



Rys. 8. Zależność wymiaru fraktalnego D_{BC} (metoda pudełkowa, beton żwirowy) od: a) współczynnika rozwinięcia linii profilowej R_L , b) współczynnika rozwinięcia powierzchni przelomu R_S .

Podsumowanie. Na podstawie przeprowadzonych analiz wykazano istnienie zależności między parametrami fraktograficznymi (współczynnikiem rozwinięcia powierzchni przelomu R_S , współczynnikiem rozwinięcia linii profilowej R_L), a wymiarem fraktalnym D , określony metodą cięciwy i pudełkową. Najlepszą korelację otrzymano w przypadku betonu żwirowego. Współczynnik korelacji wyniósł od 0,970 do 0,994 (równania 6 i 7).

1. Zapffe C.A., Clogg M., Jr.: *Fractography – a new tool for metallurgical research*. Transactions ASM, 1945, pp. 71-107 (In English). 2. Wojnar L.: *Fraktografia ilościowa. Podstawy i komputerowe wspomaganie badań*. Zeszyty Naukowe Politechniki Krakowskiej, nr 2, seria Mechanika, z. 72, Politechnika Krakowska, Kraków, 1990 (In Polish). 3. Pickens J. R., Gurland J.: *Metallographic characterization of fracture surface profiles on sectioning plans*. Proc. 4th International Congress for Stereology (Editor by Underwood, deWit and Moore), Gaithersburg, Maryland (NBS Special Publication 431), 1976, pp. 269-283 (In English). 4. Mandelbrot B. B.: *Fractals. Form, chance and dimension*. Freeman, San Francisco 1977 (In English). 5. Winslow D. N.: *The fractal nature of the surface of cement paste*. Cem.Concr.Res., Vol. 15, 1985, pp. 817-824 (In English). 6. Stroeven P.: *A stereological approach to roughness of fracture surfaces and tortuosity of transport paths in concrete*. Cement and Concrete Composites, Vol. 22, 2000, pp. 331-341 (In English).

Konkol J., Tomasik A.

Politechnika Rzeszowska,
Zakład Inżynierii Materiałowej i Technologii Budownictwa
Polska, 35-959, Rzeszów, Al. Powstańców Warszawy 6.
E-mail: jk7@prz.edu.pl

POROWATOŚĆ BETONU WYZNACZONA METODAMI STEREOLOGICZNYMI ORAZ JEJ WPŁYW NA WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE BETONU

© Konkol J., Tomasik A., 2007

In this article introduced results of experimental research of air void of concrete from use the parameters the stereological by the computer programme FRAKTAL_Stereolog. The subject of research was to examine the influence of water-cement ratio in concrete mixture on durability properties of natural gravel concrete in view of fracture mechanics too. Existence of relationship between the composition, the structure and properties of the tested concrete has been proved on the basis of the executed research.

Wprowadzenie. Jednym z najważniejszych czynników wpływających na właściwości betonu jest porowatość. Decydujący wpływ na wytrzymałość betonu mają pory powietrzne i strukturalne. Możliwość oceny tej porowatości daje stosowanie metod stereologicznych [1]. Zaletą pomiarów stereologicznych jest możliwość prowadzenie obserwacji na rzeczywistych obrazach wypolerowanej i specjalnie spreparowanej powierzchni betonu.

Tradycyjna metoda stereologiczna, używana do pomiarów parametrów opisujących układ i strukturę porów w betonie, opiera się na użyciu metody trawersu-liniowego PN-EN 480-11 [1] lub metody punktowej EN 480-11, ASTM C457 [2]. Badania porównawcze obu metod pokazują zarówno różnice w otrzymywanych wynikach [3, 4], jak i ich zgodność [5]. Obecnie dużym ułatwieniem w prowadzeniu pomiarów jest możliwość zastosowania odpowiedniego oprogramowania komputerowego [6 – 10].

Nadal jednak bardzo ważnym zagadnieniem pozostaje odpowiednia preparatyka próbek. Można wyróżnić różne sposoby przygotowywania płaskich przekrojów. Załocha i Kasperkiewicz [4, 8] do wypełniania pustek stosowali pastę cynkową, Konkol [7], Konkol i Prokopski [9, 10], Konkol i in [6] pustki powietrzne wypełniali gipsem, natomiast Młynarczyk i Zajac [11] przedstawili sposób uzyskania wiernego odwzorowania topografii powierzchni zglądu przy zastosowaniu profilometru laserowego. Uzyskane, przy użyciu tej metody informacje, pozwalają na analizę geometrii porów, ich głębokości, a także stopnia nierównomierności powierzchni zglądu.