

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](mailto: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 nierówności powierzchni zglądu.

Niejednorodność struktury w postaci porowatości betonu (wielkość porów, ich rozkład, liczebność i kształt) ma istotny wpływ na właściwości betonu. Badając betony z dużą zawartością popiołów lotnych Jiang i Guan [12] podali, że znaczący wpływ na wytrzymałość na ściskanie mają tylko pory o promieniu powyżej 100 nm, zaś na wytrzymałość na rozciąganie wszystkie pory.

Istnieje wiele publikacji potwierdzających istnienie zależności między porowatością, a właściwościami betonów, w tym wytrzymałością na ściskanie, odpornością na pękanie. Zwiększenie udziału porów powietrznych powoduje spadek tych cech wytrzymałościowych.

Między innymi badania nad wpływem porowatości na wartość krytycznego współczynnika intensywności naprężeń  $K_{Ic}$  przeprowadzili Naus i Lott [13]. Dowiedli oni, że wzrost porowatości od 2 do 8% powoduje spadek wartości  $K_{Ic}$  o około 23,4%.

**Cel i zakres badań.** Celem badań jest ocena porowatości całkowitej betonu, w tym metodami stereologicznymi, oraz określenie jej wpływu na cechy wytrzymałościowe betonów wykonanych na kruszywie żwirowym.

Badaniom poddano 4 mieszanki betonowej z kruszywa żwirowego o zróżnicowanym stosunku wodno-cementowym W/C wynoszącym: 0,45; 0,50; 0,55 i 0,60. Przyjęto stałą proporcję cementu do kruszywa drobnego i grubego. Do wykonania betonów użyto cementu portlandzkiego CEM I 32.5R z cementowni Ożarów, żwiru otoczkowego do 16 mm z Gniewczyny i piasku płukanego z miejscowości Strzegocice.

Podstawową recepturę mieszanki betonowej wykonano przy założeniu stosunku wodno-cementowego W/C = 0,45 i punktu piaskowego 34%. Pozostałe receptury o stosunku wodno-cementowym W/C równym 0,50; 0,55 i 0,60 powstały przez dodanie wody (tabl. 1).

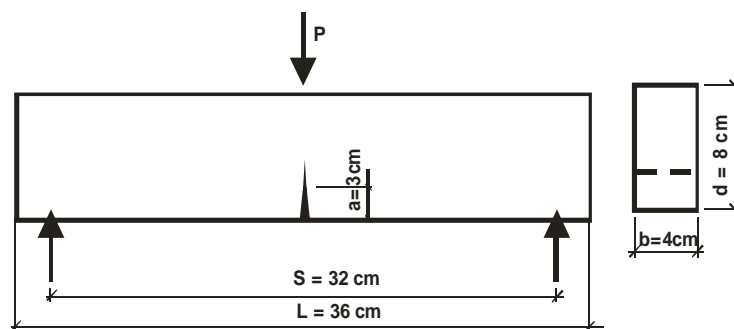
W celu zrealizowania powyższych celów przeprowadzono następujące badania: konsystencji mieszanki betonowej, wytrzymałości na ściskanie, odporności na pękanie oraz badania stereologiczne.

Tabela 1

Zestawienie składników mieszanki betonowej poszczególnych serii

W/C	Składniki mieszanki betonowej			
	Cement	Piasek	Żwir	Woda
[-]	[kg]	[kg]	[kg]	[dm <sup>3</sup> ]
0,45	418,2	560,9	1232,9	188,2
0,50				209,1
0,55				230,0
0,60				250,9

**Badania betonów.** Przeprowadzono badania cech fizycznych i mechanicznych betonów. Badanie konsystencji mieszanki betonowej przeprowadzono metodą Vebe (tabl. 2). Badania wytrzymałościowe przeprowadzono po 28 dniach dojrzewania. Do badania wytrzymałości na ściskanie użyto próbek sześciennych o boku 10 cm, do badania odporności na pękanie według I modelu beleczki ze szczeliną pierwotną o długości 3 cm w środku rozpiętości i wymiarach 4×8×36 cm (rys. 1), natomiast do badania odporności na pękanie według II modelu użyto kostek o boku 15 cm z dwiema szczelinami pierwotnymi o długości 6 cm każda.



Rys. 1. Schemat próbki do badania według I modelu pękania

Wyniki badań wytrzymałościowych i konsystencji zestawiono w tablicy 2. W przypadku badań wytrzymałościowych wyniki podano wraz z odchyleniem standardowym wartości średniej S.

Tabela 2

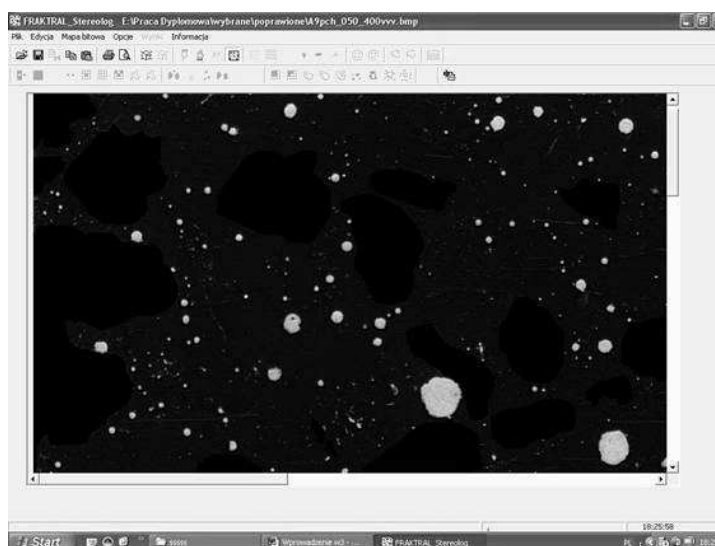
**Zestawienie wyników badań wytrzymałościowych i konsystencji**

W/C	$f_c \pm S$ [MPa]	$K_{Ic} \pm S$ [MPam <sup>0,5</sup> ]	$K_{IIc} \pm S$ [MPam <sup>0,5</sup> ]	Konsystencja oznaczenie, czas [s]
0,45	45,5±1,2 (N = 6)	0,543±0,020 (N = 4)	5,01±0,29 (N = 4)	V3 (10 s)
0,50	34,9±1,8 (N = 4)	0,572±0,031 (N = 5)	4,21±0,11 (N = 4)	V3 (7 s)
0,55	23,7±0,6 (N = 8)	0,506±0,025 (N = 5)	4,28±0,19 (N = 3)	V4 (4 s)
0,60	19,0±0,5 (N = 8)	0,466±0,019 (N = 5)	2,64±0,25 (N = 3)	V4 (3 s)

N – liczba próbek

Przeprowadzono również statystyczną analizę wyników badań polegającą na sprawdzeniu występowania błędów grubych (testem Dixona), wpływu zmiennej niezależnej na przyjęte zmienne zależne oraz sprawdzeniu jednorodności wariancji testem Bartletta. W wyniku przeprowadzonej analizy pozostawiono wszystkie wyniki badań, wykazano istotny wpływ zmiennej niezależnej na cechy wytrzymałościowe betonu oraz stwierdzono jednorodność wariancji przy poziomie istotności 0,05.

Na wybranych próbkach do badań odporności na pękanie według II modelu przeprowadzono badania stereologiczne mające na celu określenie porowatości betonu. Próbki do badań po przecięciu wyszlifowano i tak przygotowaną powierzchnię pokryto czarną farbą w sprayu. Analizę stereologiczną zeskanowanych przy rozdzielczości 400 dpi. obrazów przeprowadzono przy wykorzystaniu programu komputerowego *FRAKTAL\_Stereolog*<sup>1)</sup> (rys. 2). W przypadku analizy porów jako optymalny ze względu na eliminację szumów wybrano zakres skali szarości dla porów powietrznych od 100 do 255 (0 – kolor czarny, 255 – kolor biały). Analizowane były również inne zakresy skali szarości, lecz przy wybranym zakresie wszystkie pory były widoczne, a ich krawędzie były regularne, bez dodatkowych zakłóceń. Badaniu poddano po dwie powierzchnie (próbki 1 i 2), dla każdej serii betonów. Łącznie badaniu poddano 8 powierzchni o wymiarach 14×14 cm każda. Zmniejszenie wymiarów obrazu miało na celu eliminację błędów wynikających z „efektu ściany”. Na każdej z próbek wydzielono od 11 do 16 obszarów o powierzchni 14 cm<sup>2</sup> każdy.



Rys. 2. Widok powierzchni próbki wraz z miejscami występowania porów powietrznych

<sup>1)</sup> Konkol J.: *FRAKTAL\_Stereolog. Program komputerowy*, Rzeszów 2002.

Wyniki badań stereologicznych wraz z odchyleniami standardowymi zestawiono w tabeli 3 i 4. Obliczenia przeprowadzono z podziałem obrazu próbki na mniejsze obszary (tabela 3) oraz na całych obrazach (tabela 4). Określono licznosc względną porów  $N_A$ , objętość względną porów  $V_V$  oraz średnią cięciwę  $l_s$ . Wykazano również istotny wpływ zmiennej niezależnej (stosunku wodno-cementowego W/C) na parametry stereologiczne, przy poziomie istotności 0,05.

Tabela 3

Zestawienie wyników badań stereologicznych obrazów o powierzchni około 14 cm<sup>2</sup>

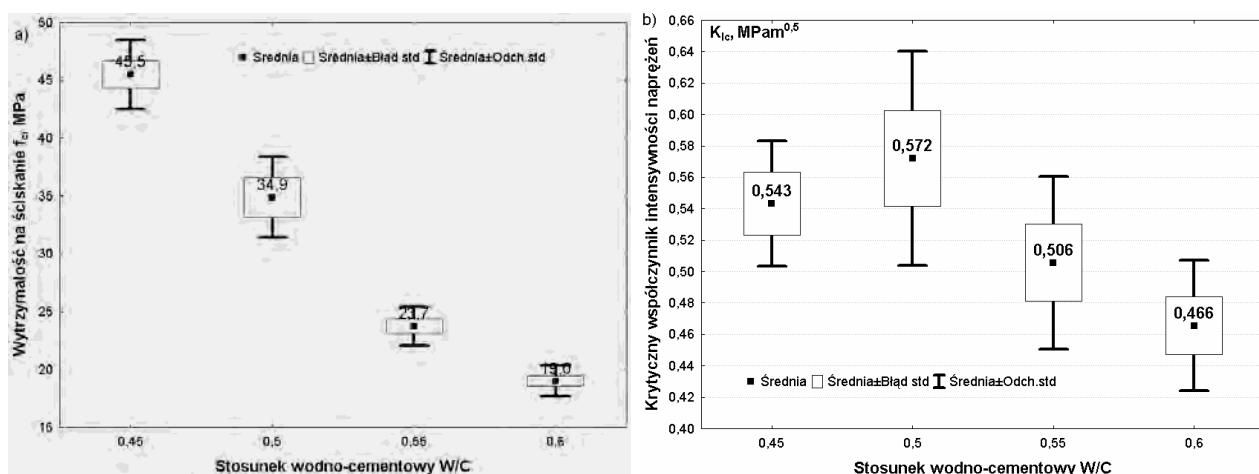
W/C	Wyniki dla próbki 1			Wyniki dla próbki 2		
	$N_A \pm S$	$V_V \pm S$	$l_s \pm S$	$N_A \pm S$	$V_V \pm S$	$l_s \pm S$
[-]	[1/cm <sup>2</sup> ]	[%]	[cm]	[1/cm <sup>2</sup> ]	[%]	[cm]
0,45	15,72±0,16	4,97±0,13	0,074±0,002	16,17±0,14	4,92±0,09	0,072±0,001
0,50	13,49±0,22	2,28±0,04	0,054±0,001	12,72±0,12	2,23±0,05	0,051±0,001
0,55	12,87±0,23	2,13±0,07	0,056±0,001	13,40±0,23	3,15±0,05	0,066±0,001
0,60	12,63±0,18	2,37±0,05	0,057±0,001	12,48±0,14	2,73±0,05	0,064±0,001

Tabela 4

Zestawienie wyników badań stereologicznych całych obrazów próbek

W/C	Wyniki dla próbki 1			Wyniki dla próbki 2		
	$N_A$	$V_V$	$l_s$	$N_A$	$V_V$	$l_s$
[-]	[1/cm <sup>2</sup> ]	[%]	[cm]	[1/cm <sup>2</sup> ]	[%]	[cm]
0,45	15,75	4,85	0,072	14,89	4,51	0,070
0,50	13,27	2,41	0,055	12,42	2,66	0,055
0,55	12,69	2,30	0,059	13,23	3,17	0,065
0,60	12,57	2,42	0,059	12,72	2,95	0,067

**Analiza wyników badań.** Na podstawie przeprowadzonych badań wytrzymałości na ściskanie (tabela 2, rys. 3a) stwierdzono, że wytrzymałość betonu na ściskanie maleje w miarę zwiększania się stosunku wodno-cementowego W/C. Podobną zależność uzyskano w przypadku krytycznego współczynnika intensywności naprężeń  $K_{IIC}$  (tabela 2) oraz  $K_{IC}$ , jednak tylko w zakresie zmienności W/C od 0,5 do 0,6 (rys. 3b). W przypadku betonu o W/C = 0,45 na skutek zwiększonej porowatości obserwowano spadek wartości  $K_{IC}$  (tabela 2). Zwiększenie porowatości tego betonu potwierdzają wyniki badań stereologicznych (tabela 3 i 4).

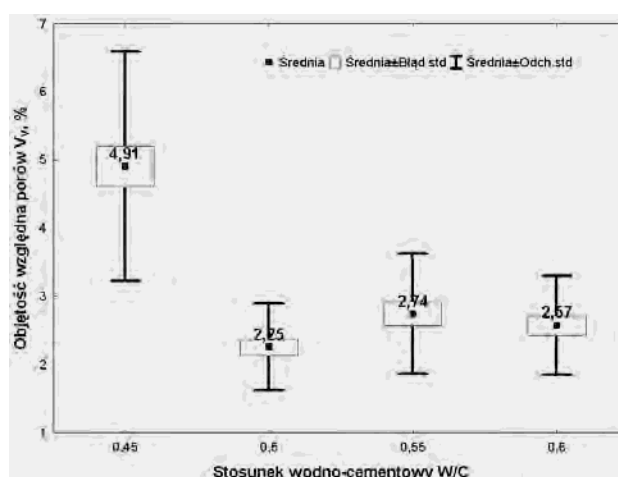


Rys. 3. Wyniki badań: a) wytrzymałości na ściskanie, b) odporności na pęknięcie według I modelu

## Porównanie wyników badań stereologicznych przeprowadzonych dwoma sposobami

W/C	Wyniki I sposób – cały obraz próbki			Wyniki I sposób – podział obrazu próbki		
	$N_A$	$V_V$	$l_s$	$N_A$	$V_V$	$l_s$
[-]	[1/cm <sup>2</sup> ]	[%]	[cm]	[1/cm <sup>2</sup> ]	[%]	[cm]
0,45	15,32	4,68	0,071	15,37	4,91	0,074
0,50	12,85	2,54	0,055	13,00	2,25	0,052
0,55	12,96	2,74	0,062	13,08	2,74	0,062
0,60	12,65	2,69	0,063	12,75	2,67	0,060

Na podstawie wyników badań stereologicznych i wykresów (tabela 5) stwierdzono, że liczność względna przekrojów  $N_A$ , objętość względnej  $V_V$  (rys. 4)) oraz średnia cięciwa  $l_s$  są największe w przypadku betonu o stosunku wodno-cementowym W/C wynoszącym 0,45. Duża porowatość tego betonu oraz największe rozrzuty wyników (zwłaszcza  $V_V$  i  $l_s$ ) spowodowane są występowaniem większej liczby porów (tabela. 5, największa wartość  $N_A$ ), w tym porów o dużych rozmiarach (tabela 5, największa wartość  $l_s$ ). Przyczyną występowania dużych porów było utrudnione zagęszczaniu mieszanki betonowej.



Rys. 4. Wyniki badań objętości względnej porów  $V_V$ .

Najmniejszą porowatość uzyskano w przypadku betonu o W/C = 0,5 (tabela 5, rys. 4). Jednocześnie stwierdzono, że liczność porów przypadająca na 1 cm<sup>2</sup> powierzchni jest porównywalna z betonami o niższym stosunku wodno-cementowym (tabela 5, wartość  $N_A$ ), jednak średnice porów są w przypadku tego betonu najmniejsze (tabela 5, najmniejsza wartość średniej cięciwy  $l_s$ ). Uzyskanie najmniejszych wartości parametrów  $V_V$ ,  $N_A$  i  $l_s$  dla betonu o W/C = 0,50 może być spowodowane stosunkowo dobrym zagęszczeniem mieszanki betonowej i brakiem dużych porów. Ze względu na minimalizację porowatości powietrznej oraz wielkość porów stosunek wodno-cementowy W/C = 0,5 należy zatem uznać za optymalny.

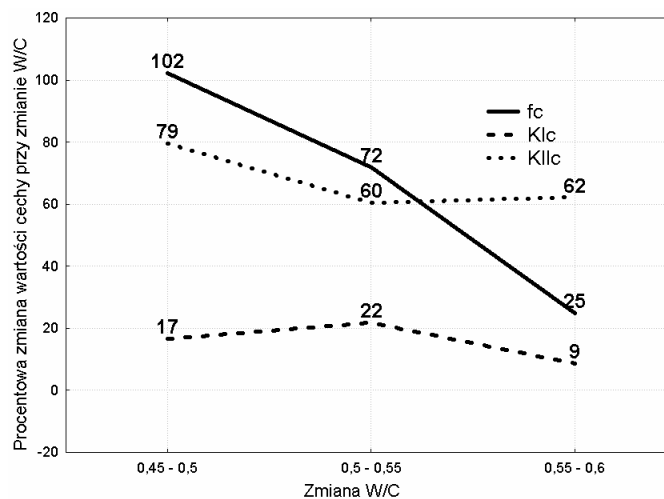
Przyjęcie dwóch sposobów obliczania parametrów stereologicznych umożliwiło dokonanie analizy porównawczej. Wybór pierwszego sposobu podejścia do wyznaczania tych parametrów, polegający na podziale obrazu na kilkanaście mniejszych pól, pozwolił na określenie parametrów wraz z odchyleniem standardowym średniej. Na podstawie uzyskanych wyników (tabela 5) stwierdzono większy rozrzut wartości średniej w przypadku betonu o W/C = 0,45 niż w przypadku pozostałych betonów. Powodem większych rozrzutów wyników, w przypadku tego betonu, było występowanie na niektórych z wybranych obrazów dużych porów strukturalnych. Powstawały one na skutek trudności zagęszczania mieszanki betonowej. Jednocześnie dodatkowy czynnik (duże pory strukturalne) spowodował nie uzyskanie jednorodności wariancji w przypadku parametrów  $V_V$  i  $l_s$ . Uzyskanie jednorodności wariancji jest możliwe

jedynie w przypadku pomijania dużych porów w analizie porowatości. Takie rozwiązanie jednak znacząco zaniżałoby ostateczny wynik porowatości i prowadziło do dużych błędów.

Drugi sposób postępowania wybrano zgodnie z normą [1]. Pozwala on na analizę porowatości na podstawie jednego obrazu (tabela 5). Uzyskane wyniki zawarte w tabeli 5 potwierdzają dużą zgodność obu metod. Przeprowadzony test równości średnich potwierdził statystyczną zgodność wyników z obu metod. Na rys. 5 przedstawiono wyniki analizy porównawczej objętości względnej porów dla betonu o W/C = 0,45 (parametr  $V_V$  wynosi w przypadku I metody 4,68, a w przypadku II wynosi 4,91). Analizę przeprowadzono w programie STATISTICA. Uzyskana wartość  $p = 0,852$  jest większa od założonego poziomu istotności wynoszącego 0,05, należy więc przyjąć hipotezę o równości średnich.

Tabela przekrojów statystyk opisowych (zwr dane) N=33 (Zmienne zależne nie zawierają BD)					Analiza wariancji (zwr dane) Zaznaczone efekty są istotne z $p < ,05000$								
gupa2	VV_sred Średnie	VV_sred N	VV_sred Odch. std	VV_sred Bł. std	Zmienna	SS Efekt	df Efekt	MS Efekt	SS Błąd	df Błąd	MS Błąd	F	p
1	4,907097	31	1,679776	0,301697	VV_sred	0,096895	1	0,096895	84,70724	31	2,732492	0,035460	0,851862
2	4,680000	2	0,240416	0,170000									

Rys. 5. Wyniki analiza równości średnich



Rys. 6. Procentowy przyrost wartości parametrów wytrzymałościowych w zależności od zmiany stosunku wodno-cementowego

Zmiana stosunku wodno-cementowego w kierunku mniejszych wartości powinna powodować zwiększanie wartości wszystkich parametrów wytrzymałościowych. Pojawienie się jednak dodatkowego czynnika, jakim jest duża porowatość betonu o W/C = 0,45 w znacznym stopniu wpłynęła na spadek odporności na pęknięcie według I modelu pęknięcia realizowany jako rozciąganie przy zginaniu. Duże pory znacznie osłabiły przekrój pracujący poddany rozciąganiu, co skutkowało spadkiem wartości  $K_{lc}$  (rys. 6 oraz rys 3b).

Wpływ wzrostu porowatości zauważalny jest również w przypadku wytrzymałości na ściskanie, której wzrost jest mniej dynamiczny przy zmianie stosunku wodno-cementowego z 0,5 na 0,45 (wzrost o 30%), niż w przypadku zmiany W/C z 0,55 na 0,5 (wzrost o 47%). W przypadku parametru  $K_{IIc}$  nie obserwowano wyraźnych zmian na skutek wzrostu porowatości.

**Podsumowanie.** Określenia porowatości betonów dokonano metodami stereologicznymi, których zaletą jest możliwość przeprowadzania analizy na rzeczywistych obrazach struktury betonu. Zastosowana preparatyka próbek z betonu zwirowego umożliwiła jednoznaczną identyfikację porów. Naniesienie na wypolerowaną powierzchnię czarnej farby uniemożliwiło przyjmowanie jako pory jasnych ziaren kruszywa zwirowego lub ziaren piasku. Zastosowanie natomiast do uzyskania obrazu komputerowego

skanera umożliwia przeprowadzenia obliczeń bez konieczności używania analizatorów obrazu. Na podstawie badań wstępnych stwierdzono, że wystarczającą rozdzielczością skanowania jest rozdzielczość 400 dpi. (1 piksel odpowiada 0,06 mm),

Na podstawie porównania wyników stereologicznej analizy porowatości na całych obrazach o powierzchni  $196 \text{ cm}^2$  i kilkunastu wydzielonych z tych obrazów obszarach o powierzchni  $14 \text{ cm}^2$  wykazano dużą zgodność wyników. Uzyskany rezultat statystycznej analizy wariancji potwierdza możliwość dokonywania analizy stereologicznej porowatości na pojedynczych obrazach o stosunkowo dużych rozmiarach, co najmniej  $196 \text{ cm}^2$ .

Na podstawie analizy stereologicznej stwierdzono znaczny, w stosunku do pozostałych betonów, wzrost porowatości betonu o stosunku wodno-cementowym 0,45, jak również wzrost liczebności porów i ich średnic. Jednocześnie wykazano, że betonem o najmniejszej porowatości jest beton o  $W/C = 0,5$ . Zdecydowany wzrost porowatości betonu o  $W/C = 0,45$  wpłynął na obniżenie wartości cech wytrzymałościowych, zwłaszcza na spadek krytycznego współczynnika intensywności naprężeń  $K_{Ic}$ .

1. PN-EN 480-11 *Domieszki do betonów, zapraw i zaczynu. Metody badań. Oznaczenie charakterystyki porów powietrznych w stwardniałym betonie*. PKN, 2000 (In Polish). 2. ASTM C 457 - 98 *Standard Test Method for Microscopical Determination of Parameters of the Air-Void System in Hardened Concrete*, pp. 228-241, 1998 (In English). 3. Aligizaki K.K., Cady P.C.: *Air content size distribution of air voids in hardened cement pastes using the section-analysis method*. *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, pp. 273-280, 1999 (In English). 4. Załocha D.: *Image analysis as a tool for estimation of air-void characteristics in hardened concrete: example of application and accuracy studies*. A.M.A.S. – Workshop – SIAIC'02. *Structural Image Analysis in Investigation of Concrete*. Conference Warsaw (edited by Kasperkiewicz J., Brandt A. M.), October 21-23, 2002, pp. 239-257 (In English). 5. Elsen J.: *Automated air void analysis on hardened concrete. Results of a European intercomparison testing program*. *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, pp. 1027-1031, 2001 (In English). 6. Konkol J., Kulpiński J., Prokopski G.: *Zastosowanie analizy obrazu do określania porowatości betonu na próbkach utwardzonych*. *Inżynieria Materiałowa*, z. 6, s. 737-742, 2002 (In Polish). 7. Konkol J.: *Zastosowanie analizy struktury do oceny właściwości betonów*. *Rozprawa Doktorska*. Rzeszów 2004, niepublikowana (In Polish). 8. Kasperkiewicz J., Załocha D.: *Automatyczna analiza obrazów w ocenie napowietrzenia betonu*. XLVI Konferencja Naukowa KILiW i KN PZITB, Wrocław-Krynica 2000, pp. 199-206 (In Polish). 9. Konkol J., Prokopski G.: *Zastosowanie metoda analizy obrazu do oceny struktury porów w materiałach budowlanych*. I Międzynarodowa Konferencja Energii Słonecznej i Budownictwa Ekologicznego „Energia Odnawialna. Innowacyjne idee i technologie dla budownictwa”, Solina, 17-20 maja 2006. W: *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej*, z. 40, nr 229, s. 271-276 (In Polish). 10. Konkol J., Prokopski G.: *Analysis of the fracture surface morphology of concrete by the method of vertical section*. *Computers and Concrete*, Vol. 1, No. 4, 2004, pp. 389-400 (In English). 11. Młynarczyk M., Zajac B.: *Metoda oceny porowatości powierzchni betonu za pomocą profilomierza laserowego*. *Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN*, t. 2, nr 3-4, s. 423-430, 2000 (In Polish). 12. Jiang L., Guan Y.: *Pore structure and its effect on strength of high-volume fly ash paste*. *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, pp. 631-633, 1999 (In English). 13. *Fracture Mechanics of Concrete*, edited by F. H. Wittman, chapter 5.1, *Fracture mechanics parameters of hardened cement paste, aggregates and interfaces*, by S. Ziegeldorf, Elsevier Science Publishers B. V., pp. 371-409, 1983 (In English).