



DARIUSZ ZAŁOCHA¹⁾
JANUSZ KASPERKIEWICZ²⁾

ZASTOSOWANIE ILOŚCIOWEJ ANALIZY OBRAZU DO OCENY STRUKTURY PORÓW W BETONIE NAPOWIETRZANYM

STRESZCZENIE. W artykule omówiono zastosowanie automatycznej analizy obrazu do oceny struktury porów w betonie napowietrzonym. Opisano dotychczasowy sposób postępowania według uznawanej w szeregu krajów normy ASTM C457, której procedury porównano z postępowaniem według nowej normy polskiej - PN EN 480-11. Zgodnie z tym dokumentem dopuszcza się ocenę struktury porów powietrznych za pomocą systemu automatycznej analizy obrazu. Zamieszczono opis elementów systemu i omówiono technikę przygotowywania próbek betonowych do badań zautomatyzowanych: tę opisaną w normie oraz technikę własną, stosowaną w laboratorium IPPT PAN. Poruszono problem wpływu sposobu przygotowania powierzchni próbki na jakość uzyskiwanych wyników. Przedstawiono także przykładowe wyniki pomiarów uzyskane za pomocą opisanego analizatora obrazu i własnego oprogramowania. Podano zestawienie porównawcze wyników uzyskanych na tych samych zglądach betonu w laboratorium IPPT PAN oraz w renomowanych laboratoriach zagranicznych.

1. WSTĘP

Celem pracy jest przedstawienie zagadnień związanych z zabezpieczaniem betonu przed działaniem niskich temperatur. Potrzeba poprawy stanu wiedzy w tym zakresie dotyczy w szczególności dostępnych obecnie metod kontroli jakości napowietrzenia betonu konstrukcyjnego. Opracowanie poświęcone jest jednej z takich metod, opartej na zastosowaniu systemu automatycznej analizy obrazu.

¹⁾ mgr inż. - Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa

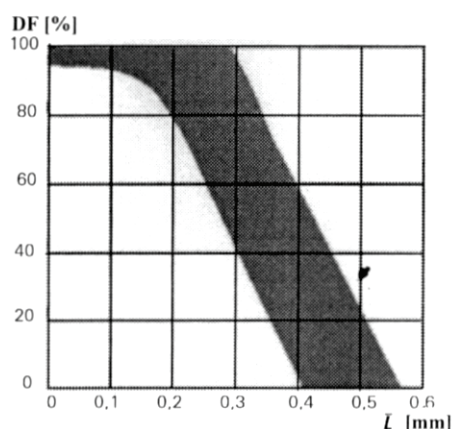
²⁾ prof. dr hab. inż. - Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa

W związku z planowaną budową autostrad w Polsce, w tym również dróg z nawierzchniami betonowymi, jest oczywiste, że nawierzchnie takie będą wykonywane w technologii betonu napowietrzonego. Aby efekt napowietrzenia był zgodny z oczekiwaniami niezbędna jest kontrola uzyskanego materiału; przedstawione w artykule oprzyrządowanie jest narzędziem do takiej kontroli.

Niszczące działanie mrozu na stwardniały beton związane jest ze zwiększaniem się objętości wody w niskich temperaturach, co przy ograniczonej możliwości jej migracji powoduje występowanie znacznych naprężeń rozciągających, a w efekcie - rozsadzanie mikrostruktury materiału. Powtarzające się cykle zamrażania i odmrażania mają efekt kumulacyjny. Proces degradacji betonu zachodzi głównie w stwardniałym zaczynie cementowym. Odporność na działanie mrozu zależy od licznych cech betonu, na przykład od wytrzymałości stwardniałego zaczynu cementowego, stopnia nasycenia betonu wodą, mikrostruktury porów zaczynu cementowego, i in. [1]. Możliwość przedostania się nadmiaru wody, w wyniku ciśnienia wywieranego przez tworzący się lód, do gęsto rozmieszczonych porów powietrznych powoduje, iż zniszczenie nie nastąpi w ogóle lub zostanie opóźnione [2]. Stanowi to podstawę techniki napowietrzania betonu. Jeżeli wymagana jest odporność betonu na działanie niskich temperatur to Polska Norma PN-88/B-06250 nakazuje stosowanie domieszek napowietrzających [3]. Efektywność zabiegu napowietrzenia zależy jednak nie od całkowitej zawartości porów powietrznych, ale przede wszystkim od ich wielkości i rozmieszczenia w stwardniałym zaczynie cementowym. Oceny rozmieszczenia porów, czyli tak zwanej struktury porów, dokonuje się głównie na podstawie dwóch parametrów: wskaźnika rozmieszczenia porów \bar{L} [mm] (nazywanego również współczynnikiem rozstawu porów) oraz powierzchni właściwej porów α [mm⁻¹]. Przyjmuje się, że w dobrze zabezpieczonym betonie wskaźnik rozmieszczenia porów powinien być mniejszy niż 0,20 mm, a powierzchnia właściwa porów powinna kształtować się na poziomie 16-24 mm⁻¹ (powierzchnia właściwa w betonach napowietrzonych niekiedy sięgać może nawet 32 mm⁻¹)[1].

W celu wyznaczenia parametrów \bar{L} i α stosowano dotychczas powszechnie, chociaż nie w Polsce, zalecenia amerykańskiej normy ASTM C457, [4]. Parametry struktury porów określano metodami stereologicznymi, posługując się metodą trawersową (ang. *linear traverse method*) lub zmodyfikowaną metodą punktową (ang. *modified point-count method*). Według wymienionego dokumentu do wyznaczenia charakterystyk porów powietrznych konieczne było zastosowanie ręcznego lub półautomatycznego urządzenia zliczającego. Podczas pomiaru pod okulem mikroskopu w kontrolowany sposób przesuwa się odpowiednio przygotowany zgląd, to znaczy przecięta i wypolerowana powierzchnia próbki betonowej. W metodzie trawersowej odwzorowanie struktury materiału następuje wzdłuż układu wirtualnych linii ciągłych, a w zmodyfikowanej metodzie punktowej - w podobnie wirtualnych punktach, równomiernie rozmieszczonych na powierzchni obserwacji.

Zaproponowane oryginalnie przez Powersa [5] wzory matematyczne pozwalają określić wielkości wskaźnika rozmieszczenia porów \bar{L} , którego związek z mrozo-



Rys.1. Orientacyjny obszar wartości wskaźnika trwałości DF , uzyskiwanych w przypadku badania betonów o rozmaitej wartości wskaźnika rozmieszczenia porów, \bar{L} [1]

Fig.1. Range of durability factor values DF for concretes of various spacing factors \bar{L} [1]

pornością betonu był przedmiotem licznych badań. Typowe wyniki charakteryzuje wykres na rysunku 1, wg [1].

Mrozoodporność oceniana jest tu za pośrednictwem tzw. wskaźnika trwałości DF , (DF - *Durability Factor*), który określa się według wzoru:

$$DF = \frac{(\text{liczba cykli} \times \text{procent resztkowej wartości modułu sprężystości})}{300}$$

podczas prób prowadzonych do 300 cykli zamrażania i odmrażania, ewentualnie do chwili, gdy wartość powyższego ilorazu zmaleje do 60% wartości początkowej, zależnie od tego, który warunek zostanie spełniony wcześniej [1].

Jak widać na rysunku 1, w krytycznym obszarze zachowania się betonu, przy wartościach \bar{L} w granicach 0,2 – 0,5 mm, różnica wartości tego współczynnika rzędu zaledwie 0,1 mm może przesądzać o efektywności lub niedostateczności zabiegu napowietrzania. Aby zabezpieczyć się przed nazbyt optymistycznym prognozowaniem mrozoodporności zaleca się dążyć do uzyskania wartości \bar{L} na poziomie 0,20 mm lub poniżej.

Wykonanie pomiarów wymaga bardzo wysokiej precyzji prac laboratoryjnych. Przykładowo, przy wykorzystaniu tego samego egzemplarza urządzenia, uzyskane w Kanadzie przez czterech różnych operatorów, realizujących pomiar na tej samej próbce, średnie rozrzuty wartości \bar{L} wyniosły 10%. W przypadku operatorów posiadających mniejszą praktykę rozrzuty mogą sięgać nawet 50%, [6]. Wpływ operatora na jakość uzyskanych wyników można wyeliminować poprzez pełną automatyzację procesu zliczania, stosując na przykład komputerowy analizator obrazu. Tego rodzaju analiza obrazu jest coraz powszechniej stosowana w rozmaitych badaniach materiałów inżynierskich, [7], [8], [9].

W poprawnie zaprojektowanym betonie kruszywo powinno być mrozoodporne, a matryca napowietrzona. Pośrednio wynikać będzie stąd przybliżona reguła, że im mniejsza jest maksymalna średnica ziaren kruszywa grubego tym większa jest nie-

zbędna zawartość powietrza w mieszance, gwarantująca prawidłowe napowietrzenie. Na przykład w niezbyt surowych warunkach zalecana zawartość powietrza w betonie z ziarnami kruszywa o maksymalnej średnicy 9,5 mm wynosi 6%, natomiast w betonie z kruszywem do 37,5 mm – zaledwie 4,5%, [1]. Warunek tak określony jest jednak tylko konieczny a nie dostateczny. Wprowadzanie powietrza w sposób niewłaściwy spowoduje jedynie obniżenie wytrzymałości stwardniałego betonu; przeciętny spadek wytrzymałości na ściskanie wynosi 5,5% na 1% obecnego w mieszance powietrza, [1]. Warunkiem dostatecznym natomiast jest takie wprowadzenie powietrza, aby jego pęcherzyki były drobne i rozmieszczone dostatecznie gęsto, co będzie sygnalizowane m.in. przez odpowiednio niską wartość współczynnika \bar{L} .

2. OPIS PROCEDURY WG PN EN 480-11

Dotychczas brak było polskiego odpowiednika normy ASTM C 457, [4]. Luka ta została zapelniona poprzez ustanowienie przez Polski Komitet Normalizacyjny europejskiego odpowiednika normy ASTM, w postaci normy EN 480-11, [10]. Według procedury zamieszczonej w tym dokumencie, struktura porów powietrznych określana jest również metodami stereologicznymi i wymaga podania pięciu parametrów. Są to:

- całkowita zawartość powietrza A ,
- powierzchnia właściwa porów powietrznych α ,
- wskaźnik rozmieszczenia porów powietrznych \bar{L}
- tablica rozkładu wielkości porów powietrznych,
- zawartość mikroporów o średnicy poniżej 0,3 mm A_{300} .

Według [10] stosować należy metodę trawersową, natomiast nie jest przewidywane zastosowanie zmodyfikowanej metody punktowej wzmiankowanej w ASTM C 457 [4].

Całkowita długość linii trawersowej na pojedynczej próbce stwardniałego betonu powinna wynosić przynajmniej 1200 mm, niezależnie od wielkości ziaren kruszywa. Badaniu należy poddać minimum dwie próbki tego samego materiału. Zalecany jest układ linii trawersowych w postaci 4 linii odległych od siebie o około 6 mm przy dolnej i górnej krawędzi próbki, oraz pozostałych linii rozmieszczonych w środkowej strefie próbki, również w odległości około 6 mm od siebie. Pomiarowi długości i zliczaniu podlegają przecięcia linii trawersowej z porami powietrznymi, czyli wyznaczone w ten sposób cięciwy porów. W następstwie pomiarów poszczególne cięciwy klasyfikowane są do odpowiednich klas długości. Ocena rozkładu wielkości porów dokonywana jest z zastosowaniem analizy statystycznej.

Wskaźnik rozmieszczenia porów \bar{L} obliczany jest za pomocą wzorów identycznych jak w normie ASTM C 457 [4], jakkolwiek przyjęte są odmienne oznaczenia:

$$\bar{L} = \frac{P \cdot T_{\text{tot}}}{400N} \quad \text{gdym} \quad R \leq 4,342$$

$$\bar{L} = \frac{3}{\alpha} \left[1,4 (1 + R)^{1/3} - 1 \right] \quad \text{gdym} \quad R > 4,342$$

$$\alpha = \frac{4 \cdot N}{T_a}, \quad A = \frac{T_a \cdot 100}{T_{\text{tot}}}, \quad R = \frac{P}{A}$$

Poszczególne symbole oznaczają tu:

- R – stosunek zaczynu/powietrze;
- P – udział objętościowy zaczynu cementowego w betonie w [%]; norma zaleca określać ją na podstawie składu mieszanki;
- T_{tot} – całkowita długość linii trawersowej;
- T_a – sumaryczna długość cięciw w porach powietrznych;
- A – całkowita zawartość powietrza w [%];
- N – liczba zarejestrowanych cięciw.

Norma PN – EN 480-11 dopuszcza do stosowania w opisywanych badaniach dowolną aparaturę pod warunkiem wykazania, że uzyska się „zadowalające wyniki”. Taką aparaturą może być system automatycznej analizy obrazu.

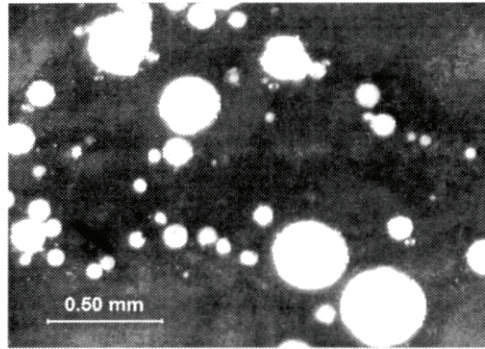
Do pomiarów automatycznych stosuje się również systemy bez analizatora obrazu. Wymienić tu można eksperymentalne na razie zastosowanie profilomierza laserowego [11] i urządzenie wykorzystujące miernik natężenia światła odbitego od powierzchni próbki, używane w laboratorium DBT (Dansk Beton Teknik) w Danii. To drugie rozwiązanie oparte jest na spostrzeżeniu, że światło odbite na próbce od białego wypełnienia pastą kontrastującą jest wyraźnie silniejsze od światła odbijanego przez ciemniejsze tło pozostałej części próbki. Umożliwia to rozróżnienie sygnału a system automatycznie klasyfikuje i zlicza impulsy odbierane z przesuwającej się powierzchni próbki.

3. PRZYGOTOWANIE POWIERZCHNI PRÓBEK

Norma PN – EN 480-11 wyszczególnia, chociaż dość ogólnikowo, sprzęt i procedurę przygotowywania próbek do badań zautomatyzowanych, to znaczy realizowanych na próbkach o porach powietrznych wypełnionych środkiem kontrastującym. Norma zaleca badanie próbek o wymiarach 100x150x20 mm, (szerokość x wysokość x grubość). Wycięta próbka stwardniałego betonu poddawana jest najpierw wielokrotnemu szlifowaniu, przy zastosowaniu coraz drobniejszych proszków szlifierskich, a

Rys.2. Fragment powiększenia zglądu betonowego przygotowanego do pomiaru.

Fig.2. A magnified detail of concrete surface prepared for measurements.



następnie barwiona celem łatwiejszego wyodrębnienia z powierzchni zglądu porów. Według [10] przygotowanie powierzchni polega na zamalowaniu jej tuszem, wysuszeniu, a następnie wypełnieniu wgłębień pastą cynkową i oziębieniu. Na zakończenie procesu próbkę pokrywa się proszkiem gipsowym lekko wprasowywanym w pastę wypełniającą pory, poczym nadmiar pasty usuwany jest za pomocą szpachelki.

W eksperymentach realizowanych w IPPT PAN według własnej procedury, stosowano próbki o wymiarach 100x100x20 mm, szlifowane proszkami karborundu (SiC) o gradacjach 320, 600 i 1200. Po uzyskaniu wymaganej jakości powierzchni barwiono ją wodoodpornym markerem, a wypełnianie porów pastą cynkową wykonywano na ciepło (rys.2).

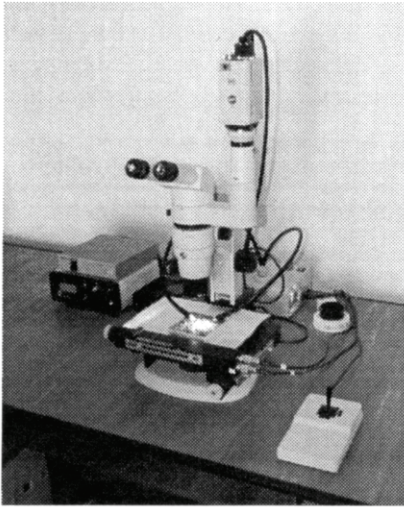
W niektórych laboratoriach podejmowano również próby badania zglądów bez kontrastowania powierzchni, stosując jedynie odpowiednie (ukośne) oświetlenie próbki. Przy takim postępowaniu istotny staje się problem rozróżnienia zaciemnionych fragmentów porów od ciemnego kruszywa, jak również poprawnej identyfikacji ziaren kwarcu, o wysokiej przezroczystości [8], [12].

Najważniejsze i najtrudniejsze w badaniach omawianego typu jest uzyskanie odpowiedniej jakości zglądu, pozbawionego wad takich jak uszkodzenie krawędzi pora, wykruszenie drobnych ziaren kruszywa, lub wykruszenie fragmentów zaczynu, które powodują zafałszowanie wyników pomiaru [13].

Porównawczą ocenę jakości zglądów przeznaczonych do badań stereologicznych, wykonanych w kilku różnych ośrodkach w kraju, w tym również zglądów przygotowanych według wzmiankowanej tu procedury, przeprowadzono w pracy [14]. Wnioski wypływające z tej oceny jednoznacznie kwalifikują próbki wykonywane w laboratorium IPPT PAN do zglądów o bardzo wysokiej jakości.

4. OPIS SYSTEMU DO AUTOMATYCZNEJ ANALIZY OBRAZU

W laboratorium IPPT PAN do wyznaczania parametrów struktury porów powietrznych zastosowano analizator obrazu Image Pro Plus 4.1, z dodatkowym modułem Scope Pro, współpracujący z mikroskopem stereoskopowym Nikon SMZ800, ka-



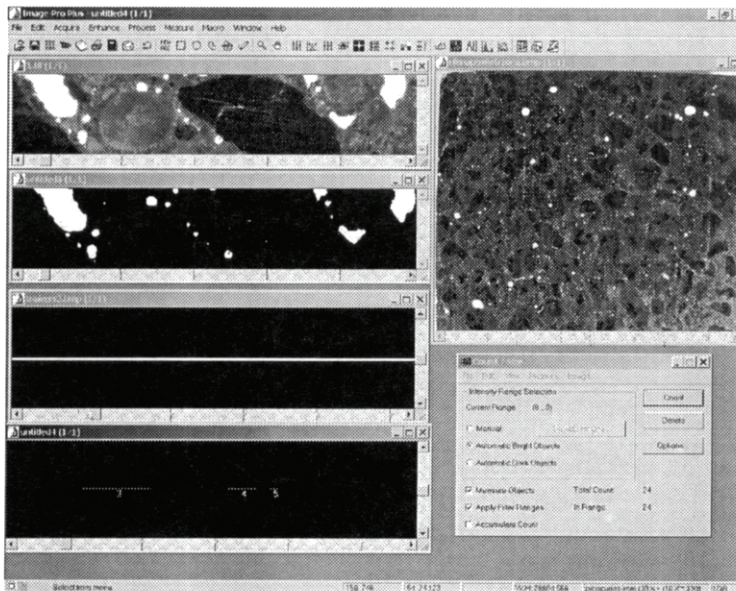
Rys.3. Stanowisko badawcze do analizy obrazu

Fig.3. Image analysis stand

merą Sony DXC950P i stolikiem skaningowym Marzhauser SCAN 150x150 (rys.3). Stosowany mikroskop pozwala na uzyskiwanie powiększenia od 10x do 63x, a kamera 3CCD zamontowana na mikroskopie umożliwia zarejestrowanie obrazu kolorowego 24 bitowego, lub w 8 bitowej skali szarości, o rozdzielczości 768x576 pikseli, w siatce prostokątnej. Przy powiększeniu 30x oznacza to, że każdy punkt obrazu reprezentuje rzeczywisty obszar o wymiarze około 2,76 μm .

Wysokiej jakości stolik skaningowy pozwala na ustalenie położenia próbki z dokładnością do 0,1 μm , przy czym zakres przesuwu stolika wynosi 150x150 mm. Równoległość linii przesuwu stolika i światłoczułej matrycy kamery uzyskuje się przez przeprowadzenie, przewidzianej

w instrukcji obsługi, specjalnej procedury dopasowywania, wymagającej obracania kamery w złączu.



Rys.4. Wygląd okna programu Image Pro Plus z przetwarzanymi obrazami

Fig.4. Window of the Image Pro Plus software at various stages of image processing

Działanie systemu oparte jest na realizacji specjalnego programu opracowanego w IPPT PAN. Aplikacja zawierająca sekwencje komend sterujących została napisana z pomocą dostępnego w Image Pro Plus języka programowania zbliżonego do Visual Basic (rys.4).

Zasada działania polega na odpowiednim uchwyceniu (zarejestrowaniu) obrazu z kamery i takim jego przetworzeniu, aby w efekcie końcowym uzyskać obraz wcześniej omawianych cięciw, czyli przecięć linii trawersowej z porami powietrznymi. Pomiar na tak uzyskanym obrazie realizowany jest automatycznie. Efektem końcowym jest wygenerowanie w arkuszu kalkulacyjnym Excel tablicy wyników pomiaru, wyświetlanej w wyniku uruchomienia specjalnej makrokomendy Excela.

Dokładny opis algorytmu podano w pracy [15]. Czas pomiaru obejmującego analizę porów wzdłuż 1200 mm linii trawersowej wynosi przy zastosowaniu tego systemu około 40 min.

Opisany tu system, ze względu na swoje bogate możliwości jest wykorzystywany również do wielu innego typu badań, takich jak analiza defektów, ocena mikro-zarysowań czy ocena uziarnienia.

Do badania struktury porów przy użyciu tego samego analizatora obrazu można użyć także mniej wyrafinowanego sprzętu optycznego. Na przykład kamerę wideo z mikroskopem można zastąpić cyfrowym aparatem fotograficznym z odpowiednim układem optycznym, ewentualnie użyć skanera o odpowiedniej rozdzielczości, tracąc bardzo niewiele na jakości pozyskiwanych obrazów [16].

5. PRZYKŁADOWE WYNIKI

Istotnym według [10] elementem prezentacji uzyskiwanych wyników jest tabela rozkładu wielkości porów, zestawiana w sposób automatyczny. Przykład takiej tabeli pokazano w tablicy 1. Istotnym elementem tabeli jest rozdzielenie zaobserwowanych długości cięciw na klasy zdefiniowane z dokładnością do 5 μm w kolumnie numer 2. Liczby cięciw w odpowiednich klasach podawane są w kolumnie numer 3.

Do określenia rozkładu porów powietrznych konieczne jest obliczenie liczby porów znajdujących się w objętości 1 mm^3 betonu (kolumna numer 7). W tym celu w kolumnie numer 5 podano wartość udziału porów z cięciwą o określonej długości w ogólnej liczbie przeciętych porów. Wartość tego udziału jest stała i określono ją na podstawie równania wynikającego ze statystycznej oceny zbioru porów:

$$\frac{\pi \cdot (5 + l_{\max} - l_{\min}) (l_{\max} + l_{\min})}{4 \cdot 10^6}$$

gdzie l_{\max} i l_{\min} oznaczają maksymalną i minimalną długość cięciwy w każdej klasie.

Tablica 1. Tablica rozkładu porów powietrznych
Table 1. Air voids distribution table

Oznaczenie rozkładu porów powietrznych

		mm			1192.62						
		mm			1192.62						
Kolumna	Przedmiot	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Jednostki	Granice klasy	Liczba cięć zarejestrowanych w klasie		Częstość występowania cięć	Udział porów zliczonych	Potencjalna liczba cięć	Liczba porów w klasie	Objętość pojedynczego pora	Zawartość powietrza	Skumulowana zawartość powietrza	
	μm			mm^{-1}	mm^2	mm^{-3}	mm^{-3}	mm^3	%	%	
1	0 do 10	25		0.02096	0.0001178	177.94793	113.894	5.24E-07	0.006	0.01	
2	15 do 20	21		0.01761	0.0002749	64.05349	44.644	4.19E-06	0.019	0.02	
3	25 do 30	10		0.00838	0.0004320	19.40951	-0.521	1.41E-05	-0.001	0.02	
4	35 do 40	14		0.01174	0.0005890	19.93017	1.949	3.35E-05	0.007	0.03	
5	45 do 50	16		0.01342	0.0007461	17.98130	10.554	6.54E-05	0.069	0.10	
6	55 do 60	8		0.00671	0.0009032	7.42694	0.065	1.13E-04	0.001	0.10	
7	65 do 80	20		0.01677	0.0022780	7.36164	1.014	2.68E-04	0.027	0.13	
8	85 do 100	22		0.01845	0.0029060	6.34783	4.687	5.24E-04	0.246	0.37	
9	105 do 120	7		0.00587	0.0035340	1.66085	0.654	9.05E-04	0.059	0.43	
10	125 do 140	5		0.00419	0.0041630	1.00708	0.307	1.44E-03	0.044	0.48	
11	145 do 160	4		0.00335	0.0047910	0.70005	0.081	2.14E-03	0.017	0.49	
12	165 do 180	4		0.00335	0.0054190	0.61893	0.064	3.05E-03	0.020	0.51	
13	185 do 200	4		0.00335	0.0060476	0.55459	0.178	4.19E-03	0.074	0.59	
14	205 do 220	3		0.00252	0.0066760	0.37679	0.032	5.58E-03	0.018	0.61	
15	225 do 240	3		0.00252	0.0073040	0.34440	0.027	7.24E-03	0.020	0.63	
16	245 do 260	3		0.00252	0.0079330	0.31709	0.121	9.20E-03	0.112	0.74	
17	265 do 280	2		0.00168	0.0085610	0.19589	0.013	1.15E-02	0.015	0.75	
18	285 do 300	2		0.00168	0.0091890	0.18250	-0.013	1.41E-02	-0.018	0.73	
19	305 do 350	6		0.00503	0.0257200	0.19560	0.167	2.24E-02	0.375	1.11	
20	355 do 400	1		0.00084	0.0396500	0.02828	-0.022	3.35E-02	-0.073	1.04	
21	405 do 450	2		0.00168	0.0335800	0.04994	0.050	4.77E-02	0.238	1.27	
22	455 do 500	0		0.0	0.0375000	0.00000	-0.006	6.54E-02	-0.037	1.24	
23	505 do 1000	4		0.00335	0.5910000	0.00568	0.003	5.24E-01	0.163	0.40	
24	1005 do 1500	3		0.00252	0.9837000	0.00256	0.003	1.77E+00	0.453	1.85	
25	1505 do 2000	0		0.0	1.3760000	0.00000	0.000	4.19E+00	0.000	1.85	
26	2005 do 2500	0		0.0	1.7690000	0.00000	0.000	8.18E+00	0.000	1.85	
27	2505 do 3000	0		0.0	2.1620000	0.00000	0.000	1.41E+01	-0.430	1.42	
28	3005 do 4000	2		0.00168	5.5020000	0.00030	0.000	3.35E+01	0.000	1.42	

Ponieważ dla każdego pora może być zarejestrowana cięciwa dowolnej długości, mniejszej niż jego średnica, wartości w kolumnie numer 6 odnoszą się do porów zarówno z danej klasy jak i z klas wyższych. Aby uzyskać liczbę porów o średnicy równej górnej granicy klasy, wartości w kolumnie numer 6 dotyczącej klasy wyższej odejmuje się od wartości dla danej klasy i podaje w kolumnie numer 7. W pewnych przypadkach oznaczać to może, iż uzyskiwane wartości w kolumnie numer 7 i w kolumnach obliczanych na jej podstawie, w tym także zawartość powietrza, mogą przyjmować wartości ujemne, co oczywiście nie ma sensu fizycznego. Spowodowane jest to przyjętym podziałem i zastosowaniem sztywnych granic tychże klas. Norma [10] zaleca w obliczeniach podawać także owe wartości ujemne, co nie wpływa w istotny sposób na rozkład skumulowany (kolumna nr 10).

Tablica 2. Porównanie wyników określania struktury porów w różnych laboratoriach

Table 2. Comparison of pore structure measurements obtained in different laboratories

Laboratorium (numer próbki)	Współczynnik rozmieszczenia porów \bar{L}	Powierzchnia właściwa α	Całkowita zawartość porów A	Zawartość porów o średnicy $<0,350$ mm	Zawartość porów o średnicy $<0,300$ mm
	mm	mm ⁻¹	%		
IPPT (1)	0,22	29	3,0	-	1,1
DBT (1)	0,21	27	3,3	1,7	-
IPPT (2)	0,12	33	6,5	-	2,9
DBT (2)	0,12	32	7,4	4,8	-

W celu wykazania zgodnie z zaleceniami normy [10], że dokładność pomiarów jest zadowalająca, badania próbek betonu z IPPT PAN wykonano kilkakrotnie w dwóch niezależnych renomowanych laboratoriach, między innymi także w laboratorium posiadającym certyfikat na tego typu badania. Przykłady z porównań wyników badania dwóch różnych próbek betonowych (próbki (1) i (2)) zestawiono w tablicy 2 (oznaczenia laboratoriów symbolami IPPT i DBT).

6. WNIOSKI

Przedstawiony system pomiarowy jest szybko i sprawnie działającym narzędziem do oceny struktury porów w stwardniałym betonie. Jego działanie zostało sprawdzone podczas licznych serii badań własnych, również na betonach towarowych. Przeprowadzone pomiary porównawcze na tym samym materiale w innym renomowanym

laboratorium wykazały, że uzyskane wyniki charakteryzują się dużą wiarygodnością. W świetle wprowadzania do stosowania normy PN EN 480-11 system jest gotowym narzędziem do zastosowań w praktyce.

Badania struktury porów w sposób automatyczny wymagają wysokiej precyzji wykonywania próbek betonowych. Uzyskanie zgładów o wysokiej jakości uwarunkowane jest posiadaniem przez laboratorium odpowiedniego sprzętu oraz odpowiednimi kwalifikacjami personelu.

Ograniczenie się w normie [10] jedynie do metody trawersowej, w porównaniu do normy amerykańskiej [4], która przewiduje stosowanie również metody punktowej powoduje, że wyniki uzyskiwane zgodnie z polską normą są bardziej jednoznaczne, [17].

BIBLIOGRAFIA

- [1] *Neville A.M.*: Właściwości betonu. Polski Cement, Kraków 2000
- [2] *Brandt A.M., Józwiak-Niedźwiecka D.*: Uszkodzenia powierzchni betonu spowodowane cyklicznym zamrażaniem i odmrażaniem. XLVI Konf. KILiW PAN i KN PZITB, Tom. 1, Krynica 2001
- [3] PN-88/B-06250 Beton zwykły. Wyd. Normalizacyjne, Warszawa 1989
- [4] ASTM C 457, Standard Test Method for Microscopical Determination of Parameters of the Air-Void System in Hardened Concrete., Annual Book of ASTM Standards 1991
- [5] *Powers T.C.*: The air requirement of frost-resistant concrete. Proceedings, Highway Research Board, vol. 29, 1949
- [6] *Pigeon M., Pleau R.*: La mesure des caractéristiques du réseau de bulles d'air contenues dans le béton durci par examen microscopique: influence de l'opérateur et précision statistique; Test quality for construction, materials and structures, Ed. M. Fickelson, Chapman and Hall, RILEM. London 1990
- [7] *Chermant J-L., Redon C., Dequiedt A-S., Coster M.*: Automatic image analysis and concrete, Brittle Matrix Composites 6. Woodhead Publ. Ltd, Cambridge and Warsaw 2000
- [8] *Ayuta K., Sakurai H., Tanabe K.*: Image analysis of air-void system in hardened concrete. Concrete library of JSCE, no. 19, June 1992
- [9] *Elsen J., Lens N., Aarre T., Quenard D., Smolej V.*: Determination of the w/c ratio of hardened cement paste and concrete samples on thin section using automated image analysis techniques. Cement and Concrete Research, vol. 25 no. 4, 1995
- [10] PN – EN 480-11; Domieszki do betonu, zaprawy i zaczynu. Metody badań. Oznaczanie charakterystyki porów powietrznych w stwardniałym betonie. PKN 2000

- [11] *Młynarczyk M., Zajac B.*: Metoda oceny porowatości powierzchni betonu za pomocą profilomierza laserowego. Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, tom 2 nr 3-4, Kraków 2000
- [12] *Młynarczyk M., Zajac B.*: Analiza struktury porów na powierzchni zglądów betonu przy użyciu metod morfologii matematycznej i analizy obrazów. Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, tom 2 nr 3-4, Kraków 2000
- [13] *Pleau R., Plante P., Gagne R., M. Pigeon*: 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
- [14] *Aksamit J., Bodziony J., B. Zajac*: Ocena jakości zglądów przeznaczonych do analizy stereologicznej układu pustek powietrznych w związonym betonie. Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, tom 2 nr 3-4, Kraków 2000,
- [15] *Załocha D., Kasperkiewicz J.*: Automatyzacja wyznaczania charakterystyki napowietrzenia betonu w świetle normy PrPN-EN 480-11, XLVI Konf. KILiW PAN i KN PZITB. Tom. 1, Krynica 2001
- [16] *Kasperkiewicz J., Załocha D.*: Automatyczna analiza obrazu w ocenie napowietrzenia betonu. XLVI Konf. KILiW PAN i KN PZITB, Krynica 2000
- [17] *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-Wisła 2001

IMAGE ANALYSIS IN EVALUATION OF AIR-VOIDS STRUCTURE IN AIR ENTRAINED CONCRETE

Abstract

The paper is dedicated to an application of image analysis in evaluation of air-voids structure in air-entrained concrete. A well-known procedure according to ASTM C457 is compared with the recommendations in the new Polish Standard PN EN 480-11. In accordance with the recent document, the air-void system can be evaluated also by means of appropriate image analysis system. A general description and some details of such system completed recently are given. A technique of concrete samples preparation for automatic measurements and effects of specimen preparation technique on the accuracy of results are also discussed. Some results obtained with the use of image analysis system are presented. Results obtained on selected specimens were compared with those obtained in two qualified European laboratories. Introduction of the presented technology is needed from the point of view of expected development of concrete road systems in Poland.