

Tomasz TRACZ*
Politechnika Krakowska

OCENA PRZYDATNOŚCI BADAŃ WODOSZCZELNOŚCI I GAZOPRZEPUSZCZALNOŚCI BETONÓW WYSOKOWARTOŚCIOWYCH

Streszczenie. W referacie przedstawiono i porównano wyniki badań wodoszczelności i przepuszczalności azotu w czterech betonach wysokowartościowych, których skład zróżnicowany był wartością wskaźnika wodno-spoiwowego oraz obecnością lub brakiem dodatku pyłu krzemionkowego. Porównanie wyników wskazuje jednoznacznie, iż badanie wodoszczelności nie pozwala na właściwe rozróżnienie analizowanych betonów pod względem tej cechy. Przy stosowaniu w badaniach medium gazowego uzyskano wyniki, które w sposób logiczny i wyraźny umożliwiają zidentyfikowanie stopnia dostępności porowatej struktury analizowanych betonów.

EVALUATION OF THE USEFULNESS OF TESTS ON THE WATER AND GAS PERMEABILITY OF HIGH PERFORMANCE CONCRETE

Summary. The paper presents and discusses the results of research on the water and nitrogen permeability of four types of high performance concrete. The composition of the concretes analysed varied in water/binder ratio and in addition of silica fume. A comparison of the experimental results indicates that the test of water permeability does not allow one to distinguish the concretes properly with regard to this property. But the results obtained by using a gaseous medium for the investigations allow one, by contrast, to identify the degree of accessibility of the porous structures of the concretes analysed in a distinct and logical manner.

1. Wprowadzenie

Dostępność porowatej struktury mineralnych materiałów budowlanych, w tym także betonów cementowych, dla środowiskowych mediów ciekłych i gazowych jest cechą determinującą ich trwałość [1]. Jedną z miar tej dostępności jest tzw. przepuszczalność, którą określać można na drodze pomiaru wielkości charakteryzujących przepływ cieczy lub gazu. Najpopularniejszym sposobem oceny przepuszczalności betonów zwykłych jest określenie tzw. stopnia wodoszczelności, którego definicja oraz przebieg badania podany jest w normie

* Opiekun naukowy: Prof. dr hab. inż. Jacek Śliwiński

PN-88/B-06250 "Beton zwykły". Jednak już w przypadku betonów zwykłych wyższych klas, a przede wszystkim betonów wysokowartościowych, które wysokie wartości cech mechanicznych zawdzięczają w ogólności zredukowanej porowatości całkowitej oraz przesunięciu rozkładu porów w kierunku mniejszych średnic, pomiar stopnia wodoszczelności natrafia na spore problemy. Wynikają one z tego, że porowata struktura jest w bardzo niewielkim stopniu dostępna dla medium tak gęstego i lepkiego, jakim jest woda. Rozróżnienie wodoprzepuszczalności betonów na przykład klas B50 i B100, mimo że obiektywnie powinna ona być różna, staje się więc niemożliwe. Z problemem takim zetknął się zespół Politechniki Krakowskiej podczas badań, mających na celu ocenę wpływu rodzaju cementu na przesiąkliwość betonu wodą [2].

Z powyższych powodów, na przykład w publikacji [3] pojawia się stwierdzenie, że jedynym sposobem oceny dostępności porowatej struktury dla mediów zewnętrznych, a więc i oceny potencjalnej trwałości betonów wysokowartościowych, jest pomiar ich przepuszczalności dla gazów.

W celu zweryfikowania tego poglądu badaniom wodoszczelności i przepuszczalności azotu poddano cztery różne betony. Porównanie otrzymanych wyników było podstawą do sformułowania wniosków podanych na końcu referatu.

2. Charakterystyka badanych betonów oraz warunków wykonania i pielęgnacji ciał próbnych

Badania obejmowały betony wykonane z cementu CEM I 32,5 o rzeczywistej wytrzymałości na ściskanie 46,5 MPa i kruszywa żwirowego o maksymalnym ziarnie 16 mm. Skład betonów zróżnicowany był wartością wskaźnika wodno-spoiwowego w/s oraz brakiem lub obecnością pyłu krzemionkowego, dodawanego jako zamiennik 10% masy cementu.

Stosowano pył krzemionkowy Silimic z Huty Łaziska. Jako domieszkę upłynniającą używano superplastyfikatora na bazie sulfonowych żywic naftalenowo-malaminowych Addiment FM 6.

Próbki sześciennie 150x150x150 mm formowano przez wibrowanie w formach stalowych. Po zagęszczeniu pozostawiono je przez 24 godziny w formach pod przykryciem. Po rozformowywaniu umieszczono je w komorze zapewniającej wilgotność względną powietrza około 98 % i temperaturę około +20°C. W takich warunkach próbki dojrzewały przez 90 dni. Następnie przez okres około 2 lat próbki przechowywane były w warunkach laboratoryjnych.

Tabela 1

Charakterystyka badanych betonów

Betonu	Skład [kg/m ³]						w/s	R _{c 28} (R _{c 90}) [MPa]
	CEM I 32,5	Pył krzem.	Piasek 0/2 mm	Zwir 2/16 mm	Woda	Super- plast.		
0,3/0	485	---	605	1225	145	11,5	0,3	80,5 (88,0)
0,3/10	440	44,0				12,0		87,2 (93,0)
0,4/0	425	---			170	4,2	0,4	59,8 (64,7)
0,4/10	382	38,2				5,0		68,8 (77,5)

3. Stosowane metody badań

3.1. Wodoszczelność

3.1.1. Ogólna charakterystyka metody

Badanie wodoszczelności przeprowadzono zgodnie z ogólnie znanymi wymaganiami podanymi w pkt. 6.6. normy PN-88/B-06250 „Beton zwykły”. W badaniu tym woda wnika przez jedną z powierzchni bocznych próbki. Powierzchnie próbki równoległe do kierunku przepływu wody zostały pokryte szczelną powłoką z żywicy epoksydowej.

Jedynym odstępstwem od zaleceń wspomnianej normy był fakt, iż przed uszczelnieniem boków i badaniem próbki były suszone do stałej masy w temperaturze +105°C. Zabieg ten wykonano w celu ujednoczenia warunków badania wodoszczelności i przepuszczalności gazu (patrz pkt. 3.2.2). Każdy z czterech badanych betonów reprezentowany był przez serię składającą się z 6 kostek typu B.

3.1.2. Przebieg badania

Badanie przepuszczalności wodą przeprowadzono na stanowisku badawczym, które umożliwiało badanie sześciu próbek jednocześnie. Każdą serię poddano takiemu samemu cyklowi obciążenia wodą pod ciśnieniem. Cykl rozpoczynano od ciśnienia 0,2 MPa działającego przez pierwszą dobę, po czym co kolejną dobę ciśnienie zwiększano o 0,2 MPa. Badanie zakończono po upływie 10 dni, przy ciśnieniu maksymalnym 2,0 MPa. Następnie próbki rozłupywano w celu określenia głębokości penetracji wody i fotografowano

powierzchnie przełomu. Wobec braku skrośnego przecieku jako miarę wodoszczelności przyjęto średnią wartość maksymalnej głębokości penetracji wody.

3.2. Przepuszczalność dla gazu

3.2.1. Ogólna charakterystyka metody

Metoda stosowana w prezentowanych badaniach jest bardzo zbliżona do zalecanej przez RILEM metody Cembureau [4]. Służy ona do określania tzw. *przepuszczalności* (k), która jest stałą materiałową niezależną od rodzaju medium. Przepuszczalność wyraża się w m^2 , a oblicza z zależności (1):

$$k = \frac{2QP_a\eta L}{A(P^2 - P_a^2)}, \quad (1)$$

w której:

$Q = V/t$ – określone doświadczalnie natężenie przepływu [m^3/s],

P – stosowana wielkość ciśnienia (absolutnego) [Pa],

P_a – ciśnienie atmosferyczne ($1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$),

A – powierzchnia przekroju próbki [m^2],

η – lepkość dynamiczna gazu [$Pa \cdot s$],

L – grubość próbki [m].

Szczegółowy przebieg rozumowania prowadzącego do sformułowania powyższej zależności, dla którego podstawą jest równanie Darcy'ego, przedstawiono w pracy [5]. W badaniach stosowano azot, którego lepkość dynamiczna w temperaturze $+20^\circ\text{C}$ wynosi $1,76 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot s$. Należy wspomnieć, że gaz ten jest najczęściej stosowany w tego typu badaniach, gdyż posiada charakterystykę bardzo podobną do powietrza (podobna masa cząsteczkowa oraz średnia droga swobodna).

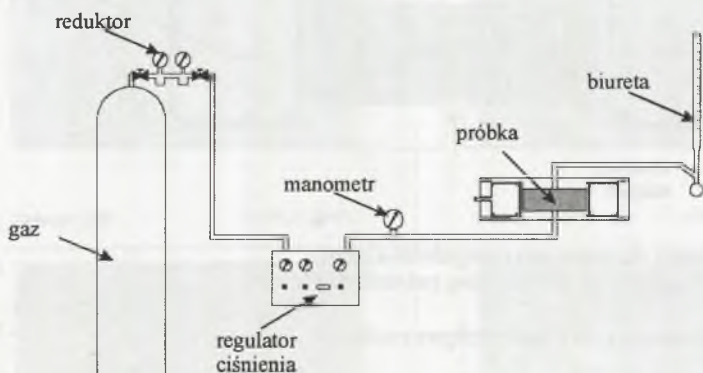
3.2.2. Ciała próbne i ich przygotowanie

Badania przeprowadzono na próbkach walcowych o średnicy 100 mm i wysokości 50 mm, które wycinano ze standardowych kostek o wymiarach $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}$. Kostki te były wykonywane i dojrzewały w warunkach opisanych w pkt. 2. Ponieważ stan wilgotnościowy betonu bardzo silnie wpływa na wynik pomiaru przepuszczalności [6], bardzo ważny jest proces ich kondycjonowania przed badaniem. W metodzie Cembureau [7] wymagane jest

wysuszenie próbek do stałej masy w temperaturze $+105^{\circ}\text{C}$, a następnie przechowywanie ich w komorze o stałej wilgotności względnej powietrza równej 75% i stałej temperaturze $+20^{\circ}\text{C}$ aż do uzyskania równowagowej dla tych warunków wilgotności. Dopuszczalne jest także badanie próbek poddanych tylko suszeniu. W takim właśnie suchym stanie badano próbki analizowanych betonów. W celu zapewnienia identycznego stanu wilgotnościowego próbek ich suszenie było konieczne także przed badaniem wodoszczelności.

3.2.3. Aparatura badawcza

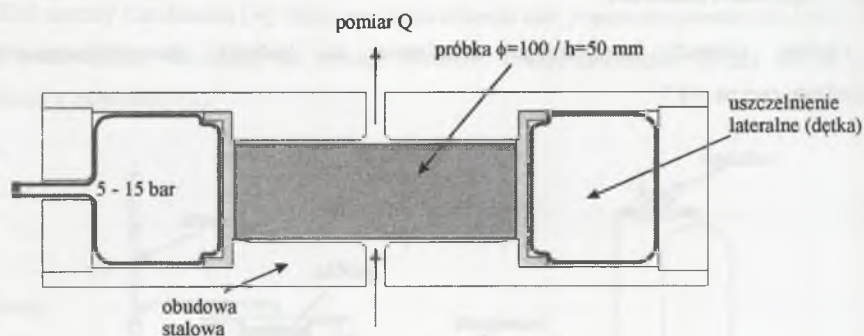
Ogólny schemat kompletnego urządzenia do badania gazoprzepuszczalności przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Schemat urządzenia do badania gazoprzepuszczalności
Fig. 1. Schematic diagram of the gas permeability apparatus

Jednym z najważniejszych elementów urządzenia jest specjalna komora, w której mocuje się i uszczelnia próbkę (rys. 2). Komora ta musi zapewnić, aby przepływ gazu odbywał się wyłącznie przez próbkę i przez całą powierzchnię jej przekroju. Kolejnymi składnikami są butla gazowa z reduktorem oraz precyzyjny regulator ciśnienia "wejściowego". Regulator ten powinien umożliwiać utrzymanie założonego ciśnienia (według zaleceń RILEM: 0,15; 0,20 i 0,30 MPa) przez co najmniej 30 minut.

Pomiar objętości gazu przepływającego przez próbkę odbywa się za pomocą kalibrowanych rurek (biuret) różnej objętości, wyposażonych w pompkę umożliwiającą wytworzenie w niej wskaźnika w postaci bańki mydlanej. Zgodnie z zaleceniami [4] objętość rurki była tak dobierana, aby pojedynczy pomiar objętości przepływającego gazu trwał od około 20 do około 60 s. Po wstępnych próbach w badaniach betonów opisanych w pkt. 2 zastosowano rurki kalibrowane o objętości 5 i 10 ml. Pomiar czasu przepływu określonej objętości azotu wykonywano z dokładnością $\pm 0,1$ s.



Rys.2. Schemat komory do mocowania i uszczelniania próbki
Fig. 2. Schematic diagram of the cell for fixing and sealing specimens

3.2.4. Przebieg badania i określenie przepuszczalności

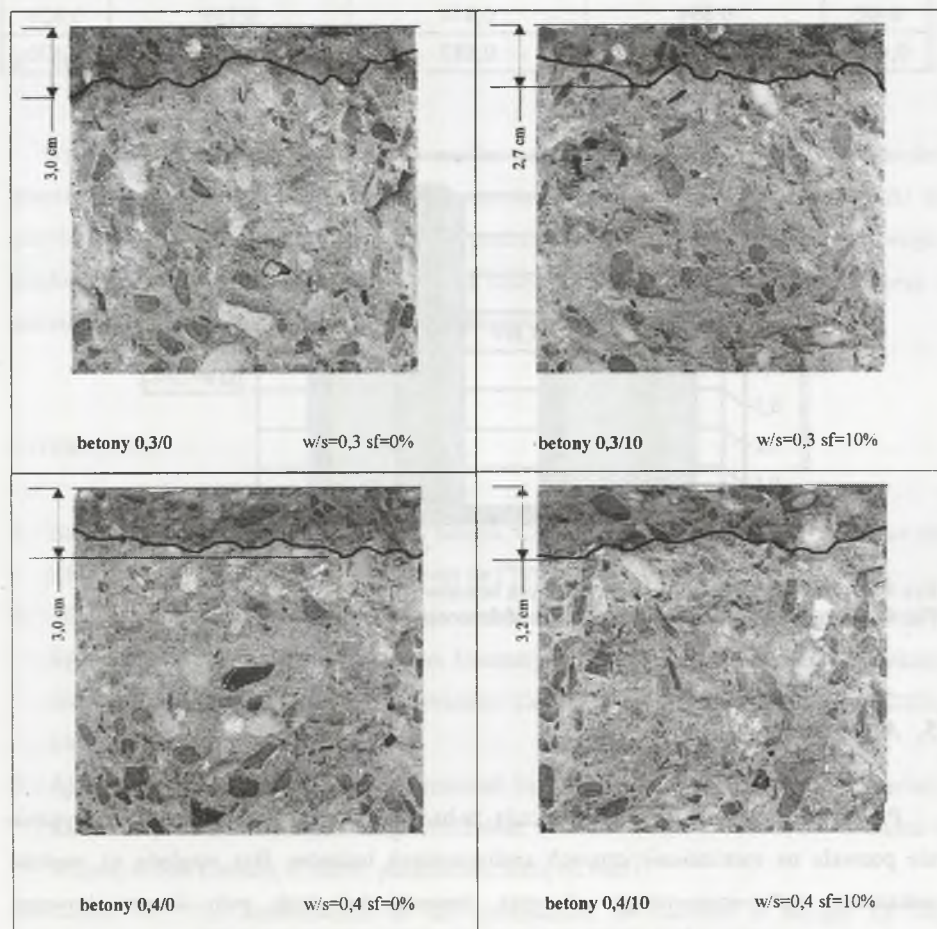
Po zainstalowaniu próbki i regulacji wybranej wielkości ciśnienia absolutnego 0,15; 0,20; 0,30 MPa (w wartościach nadciśnienia odpowiednio 0,05; 0,10; 0,20 MPa) pozostawiano je na 30 minut pod działaniem gazu przy stałym ciśnieniu. Zabieg ten miał na celu stabilizację prędkości przepływu. Następnie dokonywano wstępnych pomiarów objętości gazu przepływającej w przyjętym czasie. Po stwierdzeniu, iż kolejne pomiary objętości gazu, dokonywane w odstępach 5 do 15 minut, nie różnią się więcej niż $\pm 3\%$, wykonywano trzy bezpośrednio po sobie następujące pomiary czasu przepływu określonej objętości gazu.

Zgodnie z zaleceniami [4] badanie wykonywano na trzech próbkach z każdej serii betonu. Dla każdej z próbek *przepuszczalność* (k) określano trzykrotnie, stosując trzy różne wartości ciśnienia (P). Następnie określano wartość średnią (k) dla każdej próbki. Ostateczny wynik - to średnia ze średnich wyników uzyskanych podczas badania trzech próbek.

4. Wyniki badań

4.1. Wodoszczelność

Wyniki badań wodoszczelności ilustruje rys. 3, na którym przedstawiono przełomy próbek badanych betonów po zakończeniu obciążania wodą pod ciśnieniem.



Rys.3. Widok przełomów próbek badanych betonów po badaniu wodoszczelności
Fig. 3. View of fractures in the concretes analysed taken after the water permeability test

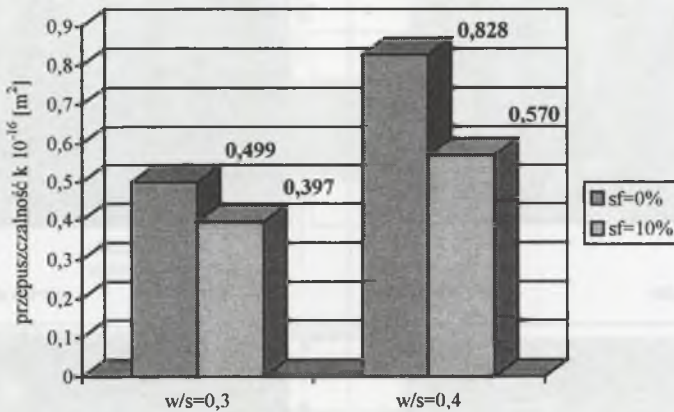
4.2. Przepuszczalność gazu

Wyniki pomiarów w postaci średnich wartości *przepuszczalności* (k) badanych betonów przedstawiono w tabeli 3, a ich porównanie na rys. 4.

Tabela 3

Wyniki przeprowadzonych pomiarów przepuszczalności betonu dla azotu

Beton	Przepuszczalność $k \cdot 10^{-16}$ [m ²] przy ciśnieniu wynoszącym:			średnia
	0,15 [MPa]	0,20 [MPa]	0,30 [MPa]	
0,3/0	0,551	0,507	0,439	0,499
0,3/10	0,435	0,389	0,366	0,397
0,4/0	0,894	0,850	0,739	0,828
0,4/10	0,611	0,587	0,511	0,570



Rys.4. Porównanie przepuszczalności badanych betonów

Fig. 4. Comparison of the water permeability of the concretes examined

5. Analiza wyników

Przedstawione na rys. 3 wyniki wskazują, że badanie przepuszczalności wody praktycznie nie pozwala na rozróżnienie czterech analizowanych betonów. Bez względu na wartość wskaźnika wodno-spoiwowego w/s oraz obecność lub brak pyłu krzemionkowego, zarejestrowane maksymalne głębokości penetracji wody są niewielkie i bardzo podobne. Przy badaniu przepuszczalności z zastosowaniem medium gazowego zarówno wpływ wartości w/s, jak i dodatku pyłu krzemionkowego jest wyraźnie widoczny.

Największą przepuszczalność ($0,828 \times 10^{-16}$ m²) wykazał beton o wyższym wskaźniku wodno-spoiwowym równym 0,40. Obniżenie wartości tego wskaźnika do 0,30 skutkuje około 40% obniżeniem przepuszczalności (do $0,499 \times 10^{-16}$ m²). W przypadku betonów o w/s = 0,30

dodatek pyłu krzemionkowego uszczelnia jego porowatą strukturę i w efekcie obniża przepuszczalność o ponad 20% (z $0,499 \times 10^{-16}$ do $0,397 \times 10^{-16} \text{ m}^2$). Przy większej wartości w/s efektywność dodatku pyłu krzemionkowego jest nieco większa, bowiem powoduje około 30% obniżenie przepuszczalności (z $0,828 \times 10^{-16}$ do $0,570 \times 10^{-16} \text{ m}^2$).

6. Wnioski

Wyniki przeprowadzonych badań i ich analiza wskazują, że sugestie o braku przydatności pomiaru wodoszczelności betonów wysokowartościowych są w pełni słuszne. Wyniki te potwierdziły równocześnie dużą przydatność pomiaru przepuszczalności medium gazowego. Cecha ta bardzo wyraźnie i w sposób wysoce czuły reaguje na zmienność składu, a więc i zmienność porowatej struktury betonów wysokowartościowych.

LITERATURA

1. Baron J., Ollivier J-P.: Durabilité des bétons, Collection de l'Association Technique de l'Industrie des Liants Hydrauliques, Press de l'ENPC, 1992.
2. Śliwiński J., Tracz T.: Wpływ rodzaju cementu na przesiąkliwość betonów, materiały Sympozjum Naukowo – Technicznego, Cementy w budownictwie, robotach wiertniczo-inżynierskich oraz hydrotechnice Górażdże Cement, AGH Kraków, Piła, maj 2001, 141-154.
3. Ajdukiewicz A.: Rozwój badań i zastosowań betonów wysokowartościowych, materiały Konferencji Beton na progu nowego millenium, Stowarzyszenie Producentów Cementu i Wapna, Polski Cement, Kraków, październik 2000, 413-431.
4. Kollek J.J.: The determination of the permeability of concrete to oxygen by the Cembureau method - a recommendation, Materials and Structures, vol.22, 1989, 25-30.
5. Śliwiński J., Tracz T.: Przepuszczalność betonów dla gazów – podstawy teoretyczne, metody oceny i wyniki badań, materiały Konferencji Dni Betonu, Stowarzyszenie Producentów Cementu i Wapna, Polski Cement, Szczyrk, październik 2002.
6. Abbas A., Carcasses M., Ollivier J-P.: Gas permeability of concrete in relation to its degree of saturation, Materials and Structures, vol.32, January-February 1999, 3-8.

7. RILEM Technical Recommendation: Tests for gas permeability of concrete, TC 116-PCD: Permeability of concrete as criterion of its durability, Materials and Structures, vol. 32, April 1999, 174-179.

Podziękowania

Referat został opracowany w ramach tematu L-1/193/DS/2002 realizowanego w Katedrze Materiałów Budowlanych i Ochrony Budowli Instytutu Materiałów i Konstrukcji Budowlanych Politechniki Krakowskiej.

Recenzent: Dr hab. inż. Adam Zybura, prof. Politechniki Śląskiej

Abstract

Accessibility of porous concrete structures to environmental gases and liquids is one of the essential factors that determine the durability of the material. An evaluation of the degree of accessibility can be based on water or gas permeability tests. In the case of plain concretes, a water permeability test is usually sufficient and its results allow one to distinguish with watertight structures, this test does not provide one with sufficient information. The results of investigations on both water and gas (nitrogen) permeability conducted on four types of high performance concretes are presented in the paper. Analysis of the results thoroughly confirms that tests of water permeability are not useful for this purpose, however the use of gas flow to test material permeability appears very valuable. There is a distinct relationship between differences in composition, and thus the porous structure of high performance concretes, and a material's permeability to gas.