

Wpływ składu oraz technologii wykonania konstrukcyjnych betonów lekkich na ich przepuszczalność

Dr inż. Lucyna Domagała, dr inż. Tomasz Tracz,
Katedra Materiałów Budowlanych i Ochrony Budowli, Politechnika Krakowska

1. Wprowadzenie

Przepuszczalność betonu jest jednym z najbardziej mierzalnych wskaźników szczelności jego struktury, a w konsekwencji jego trwałości. W przeciwieństwie do badań wodoprzepuszczalności, przepuszczalności jonów chlorowych czy nasiąkliwości, badanie przepuszczalności dla gazu uwzględnia nie tylko wpływ struktury porów otwartych relatywnie dużych rozmiarów, umożliwiających wnikanie cieczy, ale również znacznie mniejszych, rzędu kilku nm. W szczególności oznaczenie przepuszczalności dla gazu może okazać się przydatne do oceny podatności betonu na karbonatyzację, zdeterminowaną wnikaniem ditlenku węgla w strukturę betonu.

Ogólnie do podstawowych czynników determinujących przepuszczalność betonów należy zaliczyć: szczelność matrycy cementowej, jej udział w betonie oraz stopień zawilgocenia betonu [1, 2, 3]. W przypadku jednak przepuszczalności gazu betonów lekkich znaczenie ma również mikrostruktura zastosowanego kruszywa. O ile w badaniach nasiąkliwości, przepuszczalności wody, jonów chlorowych czy mrozoodporności, struktura porowatości kruszyw lekkich okazuje się mieć wtórne znaczenie wobec mikrostruktury matrycy cementowej [4, 5], o tyle w badaniach przepuszczalności gazu, ze względu na rozmiar jego cząsteczek, kruszywo porowate ewidentnie bierze udział w transporcie tego medium. W efekcie przy podobnym stopniu zawilgocenia i identycznym składzie objętościowym betony lekkie z reguły charakteryzują się wyższą przepuszczalnością gazu. Należy jednak zaznaczyć, że przykładów badań podejmujących ten problem w dostępnej literaturze jest niewiele. Ilościowe porównywanie nielicznych wyników publikowanych badań jest natomiast trudne wobec braku odpowiednich norm do oznaczania tej właściwości i związanych z tym różnych procedur badawczych. Badania Lydona [6] prowadzone dla betonów z kruszywem wapiennym i lekkim ze spiekanych popiołów lotnych potwierdzają wyższą przepuszczalność gazu dla betonów lekkich w danych warunkach wysychania. Wskazują również na bardziej istotny wpływ warunków wysychania betonów lekkich na ich przepuszczalność w porównaniu z betonami zwykłymi. Sugiyama

i in. [7] wykazali natomiast, że próbki betonów lekkich i zwykłych wysychające w powietrzu charakteryzowała podobna przepuszczalność gazu, chociaż niewątpliwie szczelność badanych betonów lekkich była mniejsza, co można wnioskować z wyników oznaczonych w stanie suchym. Betony lekkie znacznie wolniej wysychające w powietrzu cechuje z reguły wyższa wilgotność, która z kolei obniża zdolność gazu do penetracji struktury betonu. Należy zaznaczyć, że w obu cytowanych powyżej badaniach [6, 7] kruszywo było nawilżane w wodzie bezpośrednio przed wykonaniem mieszanki betonowej. Taki zabieg znacząco ogranicza mechanizm absorpcyjny kruszywa, a w konsekwencji eliminuje efekt absorpcyjnego doszczelnienia kruszywa i matrycy.

2. Opis badań własnych

Celem zrealizowanych badań własnych była ocena przepuszczalności gazu przez konstrukcyjne betony lekkie z kruszywem popiołoporytowym przy uwzględnieniu nie tylko wpływu ich składu, ale i technologii wykonania. Badania przeprowadzono na 8 seriach betonów lekkich różniących się pod względem składu wartością nominalnego wskaźnika wodno-cementowego (0,6; 0,5; 0,4 i 0,3). Jako kruszywo lekkie zastosowano popiołoporyt Pollytag 6/12 mm. Pozostałe składniki wykonanych betonów lekkich to: cement CEM I 42,5R, piasek naturalny, woda wodociągowa oraz plastyfikator i/lub superplastyfikator. Wszystkie betony charakteryzował stały nominalny udział objętościowy kruszywa lekkiego i zaprawy cementowej w betonie, wynoszące odpowiednio: 44% i 56%. Technologia wykonania badanych betonów lekkich uwzględniała możliwość zastosowania kruszywa w stanie wstępnego nasycenia wodą ($w = 23\%$) lub nawilżonego na 24 h przed mieszaniem składników betonu do wilgotności 17%. W wyniku absorpcji części wody zarobowej przez kruszywo nie w pełni nasycone, rzeczywisty wskaźnik wodno-cementowy w tych betonach był niższy niż nominalny, a udział objętościowy zarówno kruszywa lekkiego, jak i zaprawy cementowej, większy niż zakładany. Pośrednim dowodem takiej zmiany składu są nie tylko różnice w gęstościach

Tabela 1. Składy, parametry i podstawowe właściwości wykonanych betonów lekkich

Ozn.	Parametry mieszanki betonowej		Składniki mieszanki betonowej, [kg/m ³]					Średnie wartości właściwości betonu po 90 dniach			
	wilgotność wstępna kr. [%]	W/C	C*	PI / Sp [% m.c.]*	K*	P*	W*	D _w ** [kg/m ³]	D _s ** [kg/m ³]	w** [%]	f _{cm, cube} [MPa]
1N	23	0,6	325	0,00/0,00	715	687	195	1670	1620	3,1	40,3
2N		0,5	365	0,35/0,00	715	687	182	1730	1680	3,4	51,8
3N		0,4	415	1,00/0,00	715	687	166	1780	1720	3,7	56,3
4N		0,3	482	0,00/2,50	715	687	145	1850	1770	4,6	58,5
1W	17	0,6	334	0,07/0,00	721	707	201	1720	1670	3,2	45,7
2W		0,5	375	0,00/1,50	717	705	187	1790	1720	3,9	56,7
3W		0,4	425	0,00/2,00	713	703	170	1830	1760	4,1	59,8
4W		0,3	494	0,00/3,00	712	704	149	1870	1800	4,3	63,9

* C – CEM I 42,5R, PI – plastyfikator, Sp – superplastyfikator, K – kruszywo popiołoporytowe w stanie wstępnego nawilżenia lub nasycenia, P – piasek naturalny, W – woda; ** D_w – gęstość oznaczona w stanie naturalnym, D_s – gęstość oznaczona w stanie suchym, w – wilgotność

mieszanek i betonów stwardniałych wykonanych na kruszywie o różnej wstępnej wilgotności, ale i różnice w ich wytrzymałościach. Składy wykonanych betonów, ich parametry oraz podstawowe właściwości podano w tabeli 1. Próbkki betonu dojrzewały przez 28 dni w warunkach normowych (RH > 95% i T = 20°C), po czym umożliwiono im swobodne wysychanie (RH ≈ 50% i T ≈ 20°C) do momentu badań w wieku 90 dni. Przyjęto, iż próbkki przechowywane w opisanych powyżej warunkach osiągnęły stan umownie zwany powietrzno-suchym i w takim stanie prowadzono badania przepuszczalności.

Średnia wytrzymałość na ściskanie, oznaczona w stanie powietrzno-suchym na pięciu próbkkach sześciennych o boku 150 mm, zawierała się w przedziale od 40,3 do 63,9 MPa. Tak wyraźne zróżnicowanie wytrzymałości badanych betonów lekkich zdeterminowane jest przede wszystkim zmienną wartością wskaźnika wodno-cementowego. Przy stałych proporcjach ilościowych kruszywa lekkiego i zaprawy cementowej, jego redukcja z 0,6 do 0,3 przyniosła wzrost wytrzymałości betonu lekkiego o 40 ÷ 45%. Obserwuje się również wpływ poziomu wstępnej wilgotności kruszywa. Dzięki jego ograniczeniu z 23 do 17% i związanej z nim zmianie składu, możliwy był wzrost wytrzymałości betonów lekkich średnio o 10%. Ze względu na gęstość oznaczoną w stanie suchym z zakresu 1620 do 1800 kg/m³, wszystkie wykonane betony lekkie można zaklasyfikować do klasy gęstości D1,8.

3. Wyniki badań przepuszczalności gazu i ich analiza

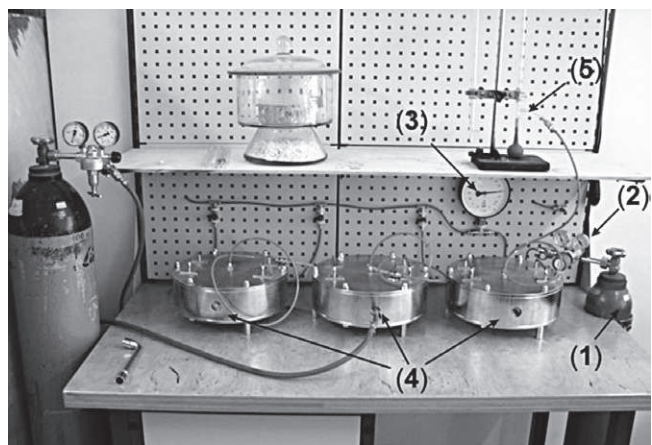
Badanie przepuszczalności prowadzono metodą RILEM-Cembureau w urządzeniu pokazanym na rysunku 1, w którym stosowanym medium był azot. Wartość przepuszczalności k określano z zależności [8]:

$$k = \frac{2 Q P_a (L)}{A (P^2 - P_a^2)}$$

gdzie:

$Q = V/t$ – natężenie przepływu [m³/s],

P – stosowane ciśnienie (absolutne) [Pa],



Rys. 1. Stanowisko do badania przepuszczalności betonu metodą RILEM-Cembureau; 1 – butla z azotem, 2 – reduktor, 3 – manometr precyzyjny, 4 – komory do mocowania i uszczelnienia próbek, 5 – rurka kalibrowana do pomiaru objętości przepływającego gazu

P_a – ciśnienie atmosferyczne [Pa],

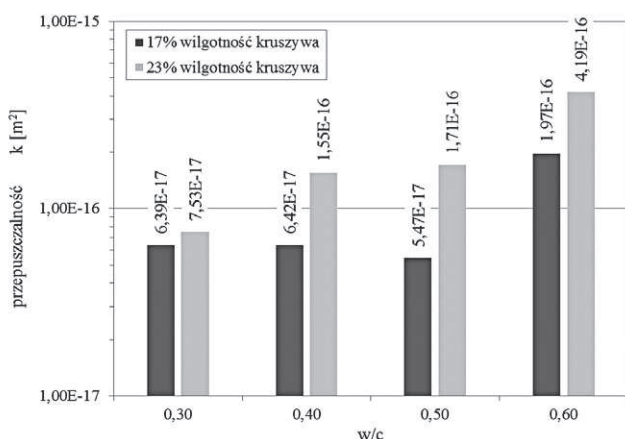
A – powierzchnia przekroju próbki [m²],

L – grubość próbki [m],

η – lepkość dynamiczna gazu [Pa·s].

Badania każdej serii betonów przeprowadzono na czterech próbkach w stanie powietrzno-suchym. Ich wilgotność wahała się od 3,1 do 4,6% i była tym większa im niższy był nominalny wskaźnik wodno-cementowy oraz im niższa była wstępna wilgotność kruszywa. Niższe wartości obu tych parametrów determinują bowiem większą szczelność matrycy cementowej w betonie lekkim. W rezultacie, odparowanie znacznych ilości wody, zakumulowanej w matrycy, a przede wszystkim w kruszywie porowatym, jest wolniejsze w przypadku betonów lekkich z matrycami bardziej szczelnymi.

Na rysunku 2 przedstawiono oznaczone średnie wartości współczynnika przepływu k dla wszystkich wykonanych ośmiu serii betonów lekkich. Wartości te zawierały się w przedziale od 5,47E-17 do 4,19E-16 m². Porównanie uzyskanych wyników z typowymi wynikami otrzymanymi dla betonów zwykłych o podobnych składach



Rys. 2. Wpływ w/c oraz wstępnej wilgotności kruszywa lekkiego na przepuszczalność k

objętościowych, zgodnie z przewidywaniami wskazuje, że betony lekkie wykazują wyższą przepuszczalność gazu. Uzyskanie ich porównywalnej szczelności jak dla betonów zwykłych wymagałoby zastosowania znacznie bardziej szczelnej matrycy cementowej, zapewniłoby odpowiednią redukcją poziomu wstępnej wilgotności i współczynnika w/c .

Generalnie współczynnik k betonów lekkich wykonanych na kruszywie wstępnie nasyconym do poziomu 23% był znacząco wyższy ($k = 7,53E-17 \div 4,19E-16 \text{ m}^2$) w stosunku do betonów z kruszywem o mniejszej wstępnej wilgotności, to jest 17% ($k = 5,47E-17 \div 1,97E-16 \text{ m}^2$). W przypadku betonów z kruszywem nasyconym do poziomu 23%, analogicznie jak dla betonów zwykłych, obserwuje się bezpośrednią zależność przepuszczalności od współczynnika wodno-cementowego. Redukcja w/c z 0,6 do 0,3 przyniosła obniżenie przepuszczalności betonu aż o 82%.

W przypadku betonów wykonanych z kruszywa wstępnie nawilżonego do $w = 17\%$ nie obserwuje się tak jednoznacznej zależności pomiędzy przepuszczalnością a wartością współczynnika wodno-cementowego. Najbardziej efektywna (o 72%) okazała się redukcja w/c w zakresie od 0,6 do 0,5. Dalsze obniżenie w/c praktycznie nie przynosiło już spadku przepuszczalności gazu. Fakt ten częściowo tłumaczy wystarczająco szczelna struktura matrycy cementowej wokół ziaren kruszywa lekkiego, zapewniona redukcją w/c , która stanowi barierę nawet dla przepływu gazu. Dodatkowym czynnikiem ograniczającym przepuszczalność betonów lekkich dla gazu jest efekt doszczelnienia struktury samego kruszywa lekkiego, dzięki wnikaniu zaczynu cementowego w jego pory powierzchniowe.

Nie można również pominąć wpływu wilgoci zawartej w badanych próbkach, która również ogranicza przepływ gazu przez ich strukturę, prawdopodobnie zakłócając zależność pomiędzy przepuszczalnością betonów lekkich z kruszywem nie w pełni nasyconym a współczynnikiem w/c . Należy oczekiwać, że badania realizowane na betonach w stanie suchym wykażą wzrost wartości współczynnika k

w stosunku do oznaczonych w stanie powietrzno-suchym. Co prawda badania w stanie suchym są bardziej miarodajnym wskaźnikiem szczelności betonu, niemniej jednak beton lekki rzadko kiedy występuje w takim stanie w warunkach rzeczywistych. Zatem uzyskane wyniki badań na próbkach betonu nie całkiem wysuszonych w większym stopniu stanowią wskaźnik jego przepuszczalności w warunkach naturalnych niż wyniki badań realizowanych na próbkach w stanie suchym.

Uzyskane wyniki badań wskazują na brak bezpośredniej zależności między przepuszczalnością badanych betonów lekkich a ich wytrzymałością. Na przykład, betony 3N i 2W o porównywalnej wytrzymałości (odpowiednio 56,3 i 56,7 MPa) i porównywalnej wilgotności (odpowiednio 3,7 i 3,9%) wykazują zdecydowanie różne wartości współczynnika k (odpowiednio $1,55E-16$ i $5,47E-17 \text{ m}^2$).

4. Podsumowanie

Przeprowadzone badania przepuszczalności gazu oraz analiza uzyskanych wyników wskazują na możliwość wykonania betonów lekkich z kruszywem o znacznej porowatości (ok. 40%), charakteryzujących się relatywnie niską przepuszczalnością gazu. Warunkiem bardziej szczelnej mikrostruktury tych betonów był niższy współczynnik wodno-cementowy i ograniczona wilgotność wstępna kruszywa. W rezultacie, współczynnik przepuszczalności najbardziej szczelnych spośród badanych betonów lekkich był podobny jak dla niektórych betonów zwykłych, wykonanych jednakże na mniej szczelnych matrycach cementowych.

W ogólnym przypadku, przy porównywalnym składzie objętościowym, betony lekkie wykonane na kruszywie wstępnie nasyconym wykazywały znacząco wyższą przepuszczalność gazu w porównaniu z betonami wykonanymi na kruszywie o niższej wstępnej wilgotności. Wyższa szczelność betonów lekkich z kruszywem o mniejszej wstępnej wilgotności wiąże się przede wszystkim z efektem doszczelnienia mikrostruktury matrycy cementowej, dzięki redukcji współczynnika wodno-cementowego zaczynu w wyniku absorpcji wody przez kruszywo. Pewne znaczenie ma tu również efekt doszczelnienia powłoki ziaren kruszywa porowatego, spowodowany wnikaniem zaczynu w jego mikrostrukturę.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Abbas A., Carcasses M., Ollivier J.-P., Materials and Structures, Vol. 32, nr 2, 1999, 3–8
- [2] Romer M., Materials & Structures, Vol. 38, nr 5, 2005, 541–547
- [3] Tracz T., Śliwiński J., Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej nr 283. Budownictwo i Inżynieria Środowiska zeszyt 59 (3/12/III), 2012, 267–276
- [4] Domagała L., Cement-Wapno-Beton, 3/2010, s. 149–156
- [5] Domagała L., Materiały Budowlane, No 5, 2012, 62
- [6] Lydon F., Cement and Concrete Research, Vol. 25, No. 8, 1995, 1737
- [7] Sugiyama T., Bremner T., Tsuji Y., Cement and Concrete Research, Vol. 26, No. 5, 1996, 781
- [8] RILEM Technical Recommendation, Materials and Structures, Vol. 32, April 1999, 174–179