

Jednorodność wyników badania przepuszczalności betonu wysokowartościowego metodą RILEM-Cembureau

Homogeneity of permeability test results of high-performance concrete

1. Wprowadzenie

Przepuszczalność betonu dla mediów ciekłych i gazowych jest jedną z właściwości pozwalających na oszacowanie potencjalnej trwałości materiału. W sposób pośredni określa ona bowiem stopień dostępności porowatej struktury betonu dla mediów pochodzących ze środowiska. Dotychczas najczęściej badano przepuszczalność betonów przy przepływie wody. W przypadku betonów wysokowartościowych (BWW) badanie takie nie jest możliwe. Betony te są bowiem praktycznie wodoszczelne (2). Konieczne jest więc stosowanie mediów gazowych, dla których pozostają one przepuszczalne.

Badania przepuszczalności przy przepływie gazów są ostatnio dosyć popularne (1, 3-8, 10-12), zwłaszcza w przypadku badań porównawczych, mających na przykład ocenić wpływ różnych czynników materiałowych i technologicznych na tę cechę. Najczęściej stosowaną laboratoryjną metodą oceny przepuszczalności jest metoda RILEM-Cembureau (9, 15). Tą właśnie metodę stosowano w prezentowanych badaniach (19).

Przedmiotem referatu jest statystyczna analiza jednorodności wyników badań przepuszczalności prowadzonych laboratoryjną metodą RILEM-Cembureau, w której stosowane były próbki walcowe średnicy 150 mm i grubości 50 mm wycinane z większych próbek o średnicy 150 mm i wysokości 300 mm. Badaniom poddano dziewięćdziesięciodniowy beton wysokowartościowy z cementu portlandzkiego z dodatkiem pyłu krzemionkowego oraz z kruszywa bazaltowego. Przedstawiona analiza dotyczy przede wszystkim wpływu usytuowania próbek 150/50 mm w próbce wyjściowej 150/300 mm na wartość określanej przepuszczalności i jej jednorodność.

2. Krótki opis stosowanej metody RILEM-Cembureau

Metoda ta, zalecana przez RILEM (15), służy do określania przepuszczalności (k) przy przepływie gazu (najczęściej w badaniach stosuje się tlen, azot lub powietrze). W badaniach własnych stosowano azot. Badania prowadzi się w urządzeniu, którego widok

1. Introduction

The permeability of concrete to gaseous and liquid media is one of the properties that make it possible to assess potential durability of a material. The permeability determines indirectly the degree of accessibility of media from the environment to the porous structure of concrete. So far, water has usually been used to assess the permeability of concrete. In case of the high-performance concrete, determination of the permeability by means of water is not possible. Such concrete is practically watertight (2). Therefore, it is necessary to use gases.

Determination of permeability of concrete using gases has become more and more popular recently (1, 3-8, 10-12), especially the studies concerning comparative tests whose aim is to assess the influence of material and technological factors on the permeability. The most popular laboratory method of determining the permeability is the RILEM-Cembureau method (9, 15). This method was used in our studies (19).

The paper describes the statistical analysis of the homogeneity of the permeability test results obtained according to the RILEM-Cembureau method. This method recommends the use of cylindrical samples that are 150 mm in diameter with thickness of 50 mm and are cut from bigger cylindrical specimens with dimensions 150/300 mm. High-performance concrete (ninety days old) with addition of silica fume and basalt aggregate was studied. The main aim of the analysis was the determination of the influence of a location of the 150/50 mm samples in the initial cylindrical specimens on the value of the measured permeability and its homogeneity.

2. Short description of the RILEM-Cembureau method

The method (15) is used for measuring the permeability (k) to a steady flow of a gas (oxygen, nitrogen or air) using the apparatus shown in Figure 1. In our studies nitrogen was used. More details concerning the description of the apparatus can be found in the papers (17, 18).

i poszczególne elementy przedstawiono na rysunku 1. Szczegółowy opis urządzenia znaleźć można między innymi w pracach (17-18).

Jak już wspomniano, zgodnie z zaleceniami RILEM (15) do badań należy stosować próbki walcowe o średnicy 150 mm i grubości 50 mm. Wymiary te zapewniają ich reprezentatywność przy stosowanym kruszywie o maksymalnym ziarnie 16 mm. Najczęściej próbki te są wycinane z wcześniej wykonanych walców 150/300 mm. Mogą one być także wycinane z istniejącej konstrukcji. Aby wyniki pomiaru przepuszczalności były miarodajne, próbki powinny znajdować się w określonym stanie wilgotnościowym. Według zaleceń (15) należy je przed badaniem wysuszyć do stałej masy w temperaturze 105°C, a następnie przechowywać w pomieszczeniu o temperaturze 20±1°C i wilgotności względnej powietrza 75±2%, aż do uzyskania równowagowej dla tych warunków wilgotności betonu w próbkach. Zalecenia (9) dopuszczają także ocenę przepuszczalności na próbkach tylko wysuszonych.

Przepuszczalność (k) określa się według wzoru:

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

w którym:

$Q = V/t$ – określone doświadczalnie natężenie przepływu, m³/s,

P – stosowana wielkość ciśnienia (absolutnego), Pa,

P_a – ciśnienie atmosferyczne (1 bar = 10⁵ Pa),

A – powierzchnia przekroju próbki, m²,

L – grubość próbki, m,

η – lepkość dynamiczna gazu, (Pa×s).

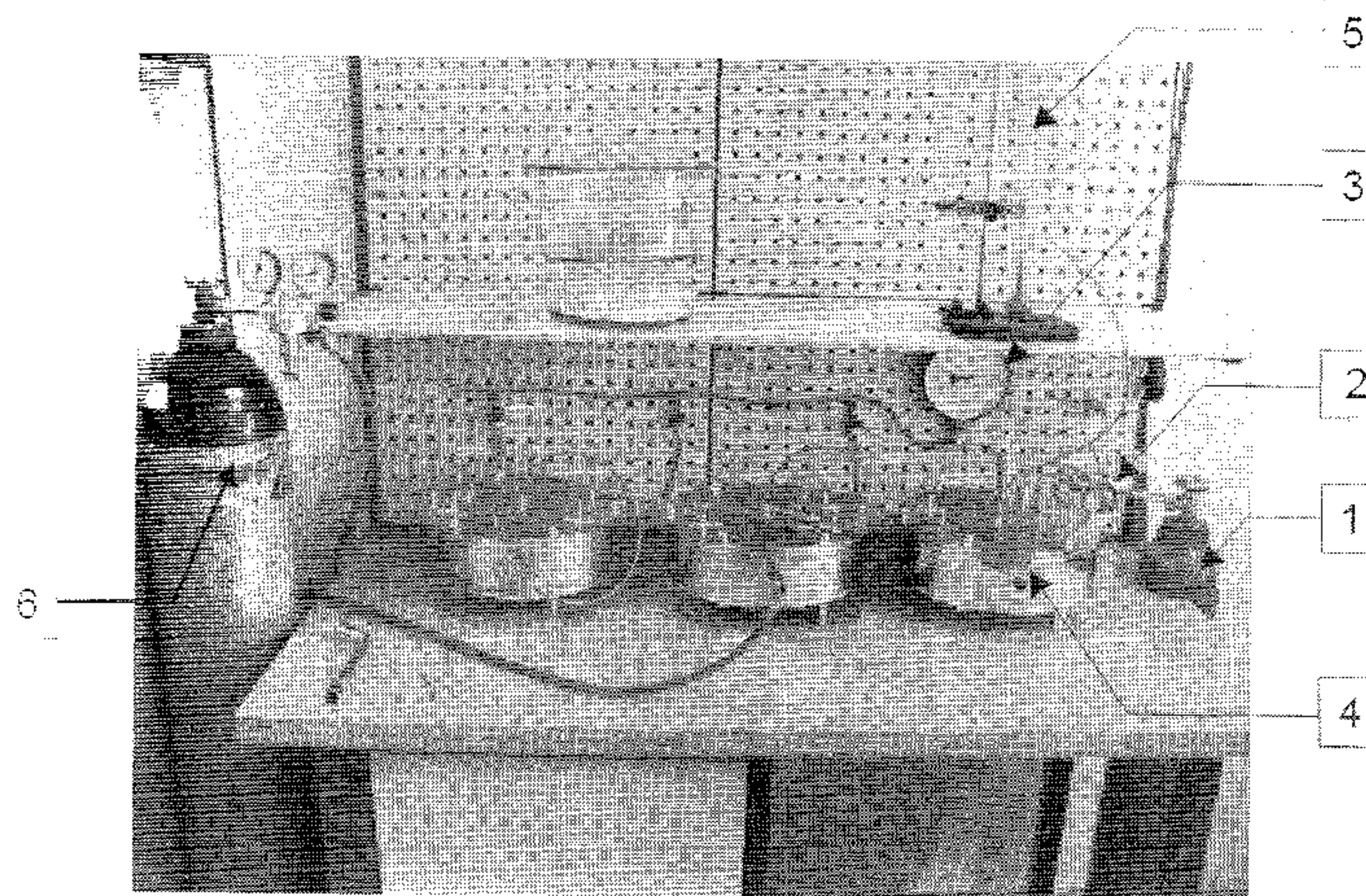
Należy dodać, że według zaleceń RILEM badanie przepuszczalności wystarczy prowadzić na trzech próbkach. Dla każdej z nich *przepuszczalność* (k) określa się trzykrotnie przy trzech różnych wartościach ciśnienia $P = 0,15; 0,20; 0,30$ MPa (w wartościach absolutnych odpowiednio 0,05; 0,10; 0,20 MPa). Ostateczny wynik to średnia ze średnich wyników obejmujących badania trzech próbek.

W prezentowanych badaniach jako medium gazowe stosowano azot o lepkości w temperaturze 20°C $\eta_{N_2} = 1,76 \cdot 10^{-5}$ Pa·s.

3. Charakterystyka badanego materiału i próbek

Przeprowadzone badania dotyczyły betonu o składzie i charakterystyce podanej w tablicy 1.

Do badań wykonano serię wyjściowych próbek walcowych o średnicy 150 mm i wysokości 300 mm. Próbki te formowano w jedno-



Rys. 1. Widok urządzenia RILEM-Cembureau do badania przepuszczalności betonu przy przepływie gazu

1 – butla z azotem, 2 – dwustopniowy reduktor membranowy, 3 – manometr precyzyjny, 4 – komora do mocowania i uszczelnienia bocznej powierzchni próbki, 5 – rurka kalibrowana do pomiaru objętości przepływającego gazu, 6 – butla ze sprężonym gazem do pneumatycznego uszczelniania poboczniczy próbek

Fig. 1. Scheme of the apparatus for testing the permeability (RILEM-Cembureau method)

1 – gas cylinder with nitrogen, 2 – two-stage membrane pressure reducer, 3 – precision manometer, 4 – chamber for testing the sample, 5 – bubble meters for measuring gas flow rates, 6 – gas cylinder for pneumatic sealing side surface of sample

According to the RILEM requirements (3), the cylindrical specimens used are 150 mm in diameter with thickness of 50 mm and maximum dimension of aggregate used is 16 mm in diameter. Samples are most often cut from initial cylinders that are 150 mm in diameter with height of 300 mm. They can also be cut from a concrete structure. The samples should be kept under appropriate conditions to ensure reliable results. According to RILEM requirements, the specimens should be dried to the constant mass at 105°C before the permeability is measured and then stored in a room at 20±1°C and RH 75±2% until the equilibrium humidity is achieved. The permeability can also be measured using dried samples (9).

The permeability (k) is described by the following equation:

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

where:

$Q = V/t$ – the measured gas flow intensity [m³/s],

P – pressure (absolute) [Pa],

P_a – atmospheric pressure [1 bar = 10⁵ Pa],

A – cross-section area of the sample [m²],

L – thickness of the sample [m],

h – dynamic viscosity of the gas [Pa×s],

The permeability should be measured using three samples of the same material (15). The mean value of the permeability was calculated as the arithmetic mean of three measurements at three different pressures: 0.15, 0.20, 0.30 MPa (absolute pressures 0.05, 0.10 and 0.20 MPa). The final result is the mean of measurements embracing three samples. Nitrogen was used as the inert gas. Its viscosity h at 20°C was 1.76·10⁻⁵ Pa·s.

3. Materials and specimens

The composition of concretes tested and their basic properties are summarised in Table 1.

The prepared initial specimens were 150 mm in diameter with height of 300 mm. They were formed using plastic moulds. When moulds were filled, concrete mix was compacted on a vibration table according to Polish Standard PN-EN 12390-2 [14]. The procedure was always performed under the same conditions. After 24 hours the samples were taken out of the moulds and then

Tablica 1

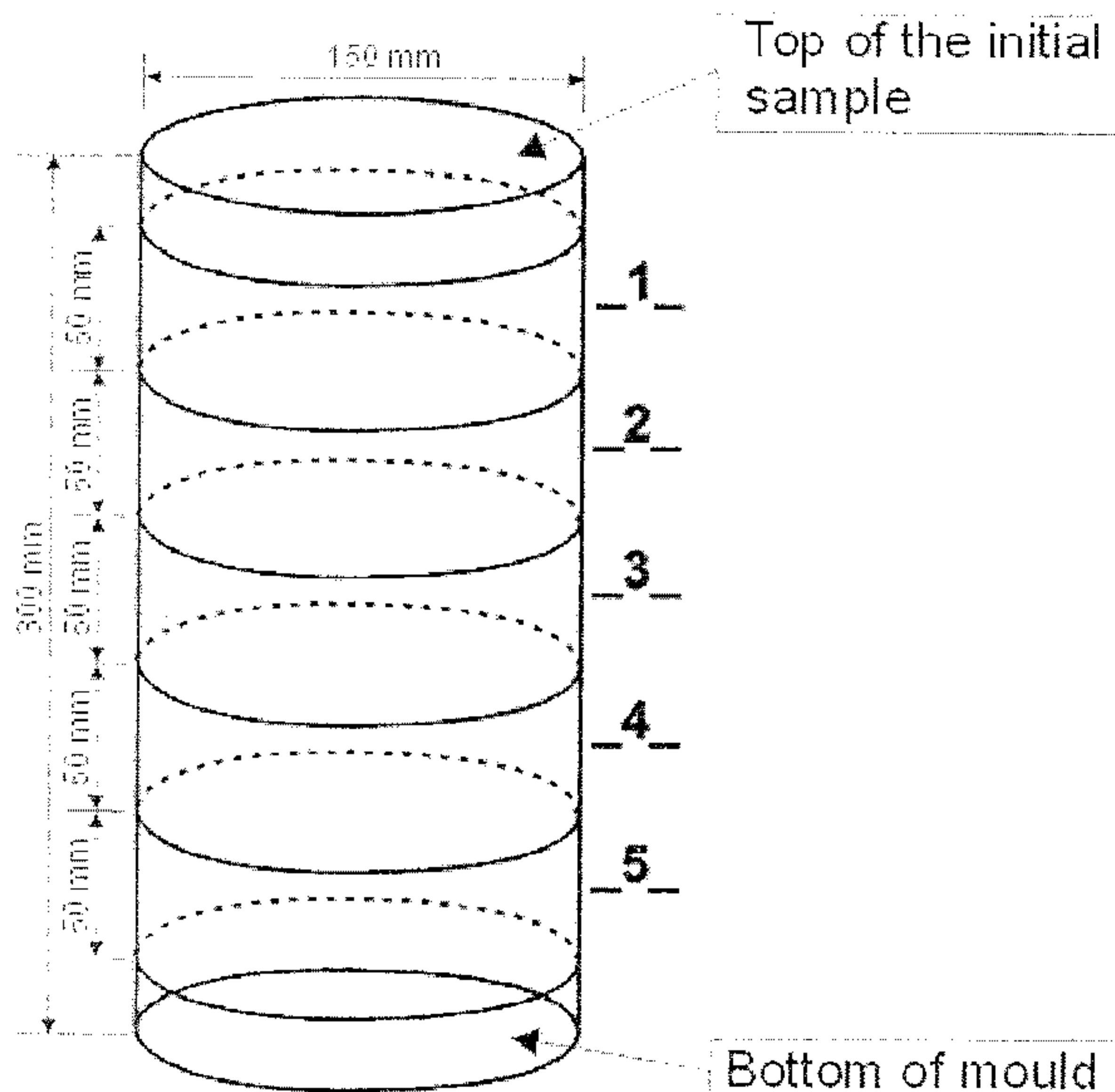
CHARAKTERYSTYKA MIESZANKI I BETONU STWARDNIAŁEGO

| Składnik | Zawartość, kg/m ³ |
|--|------------------------------|
| Cement CEM II/A-D 42,5 (cement CEM I 42,5 z 10% dodatkiem pyłu krzemionkowego Silimic; rzeczywista wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach dojrzewania 61,8 MPa) | 450 |
| Woda | 135 |
| Piasek 0/2 mm | 627 |
| Grys bazaltowy 2/4 mm | 732 |
| Grys bazaltowy 4/16 mm | 732 |
| Superplastyfikator | 6,14 |
| Właściwości mieszanki betonowej | |
| Opad stożka, mm | 120 |
| Zawartość powietrza, % vol. | 1,20 |
| w/c | 0,30 |
| Zawartość zaczynu, dm ³ /m ³ | 286 |
| Zawartość zaprawy, dm ³ /m ³ | 501 |
| Właściwości betonu stwardniałego | |
| Wytrzymałość na ściskanie, MPa: | |
| - po 2 dniach $f_{c2, cube}$ | 23,9 |
| - po 7 dniach $f_{c7, cube}$ | 78,2 |
| - po 28 dniach $f_{c28, cube}$ | 105,2 |
| - po 90 dniach $f_{c90, cube}$ | 116,9 |
| Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu, MPa: | |
| - po 28 dniach $f_{t28, cube}$ | 6,0 |
| - po 90 dniach $f_{t90, cube}$ | 6,2 |
| Nasiąkliwość po 28 dniach, % m. | 2,5 |

częściowych formach plastikowych. Wypełnianie formy oraz zagęszczanie mieszanki betonowej na stole wibracyjnym odbywało się za każdym razem w identycznych warunkach zalecanych przez PN-EN 12390-2 (14). Próbkę rozformowywano po 24 godzinach. Następnie, w czasie pierwszych 14 dni przechowywano je w warunkach wilgotnych przy wilgotności względnej RH > 90% i temperaturze T = 20±2°C oraz dalej w warunkach laboratoryjnych przy średniej wilgotności względnej RH ≈ 65% i średniej temperaturze T ≈ 20°C. Walce pocięto uzyskując próbki o wymiarach 150/50 mm według schematu pokazanego na rysunku 2.

Uzyskane w ten sposób próbki suszono do stałej masy w temperaturze 105°C. Stałą masę uzyskiwano po około 20 dniach suszenia. Po ochłodzeniu próbek do temperatury około 20°C określano ich przepuszczalność. Podczas chłodzenia próbki przechowywane były w eksykatorze. Każda z próbek poddana została badaniu przepuszczalności przy trzech podanych wyżej wartościach ciśnienia gazu. Średnia z trzech wyników charakteryzowała przepuszczalność danej próbki.

Badania objęły łącznie 75 próbek 150/50 mm wyciętych z piętnastu walców 150/300 mm. Liczba próbek 150/50 mm o identycznym poło-



Rys. 2. Schemat cięcia i położenie próbek 150/50 mm w walcowej próbce wyjściowej 150/300 mm

Fig. 2. Scheme of cutting and designation of the location of 150/50 mm samples in the initial 150/300 mm specimen

Table 1

THE PROPERTIES OF CONCRETE MIXTURES AND HARDENED CONCRETE

| Composition | Content, kg/m ³ |
|--|----------------------------|
| Cement CEM II/A-D 42.5 (cement CEM I 42.5 with 10% addition of silica fume Silimic; real compressive strength after 28 days 61.8 MPa) | 450 |
| Water | 135 |
| Sand 0/2 mm | 627 |
| Basalt gravel 2/4 mm | 732 |
| Basalt gravel 4/16 mm | 732 |
| Superplasticizer | 6.14 |
| Characteristics of concrete mixture | |
| Slump, mm | 120 |
| Air content, % vol. | 1.20 |
| Water/cement ratio | 0.30 |
| Quantity of cement paste, dm ³ /m ³ | 286 |
| Quantity of mortar, dm ³ /m ³ | 501 |
| Characteristics of hardened concrete | |
| Compressive strength, MPa, after: | |
| - 1 days $f_{c1, cube}$ | 23.9 |
| - 7 days $f_{c7, cube}$ | 78.2 |
| - 28 days $f_{c28, cube}$ | 105.2 |
| - 90 days $f_{c90, cube}$ | 116.9 |
| Tensile splitting strength, MPa, after: | |
| - 28 days $f_{t28, cube}$ | 6.0 |
| - 90 days $f_{t90, cube}$ | 6.2 |
| Water absorption after 28 days, % m. | 2.55 |

samples were stored for 14 days under the following conditions: RH > 90%, T = 20±20C and then under laboratory conditions at T " 20±20C and RH " 65%. Then cylindrical samples 150/50 mm were cut as shown in Figure 2.

The obtained samples were dried to constant mass at 105oC. Constant mass was achieved after about 20 days of drying. When the samples were cooled down, the permeability was measured. While cooling down, the samples were kept in a desiccator. Each

of the specimens was tested at three different pressures. The mean value of the permeability was calculated as the arithmetic mean of the measurements at three different absolute pressures (P).

The total number of samples 150/50 mm was 75 and they were cut from 15 cylinders 150/300 mm. A number of specimens 150/50 mm, which had the same location in the initial specimens (location 1, 2, 3, 4, 5 in Fig. 2), was 15 for each time.

4. Results and discussion

Figure 3 shows the general characteristics of homogeneity (minimum, maximum and mean values) of the test results of the permeability (k) for series designated 1, 2, 3, 4, 5, cutting from different places of the initial specimen (Fig-

żeniu w walcach wyjściowych 150/300 mm (położenie _1_, _2_, _3_, _4_ i _5_ na rysunku 2) wynosiła za każdym razem 15 sztuk.

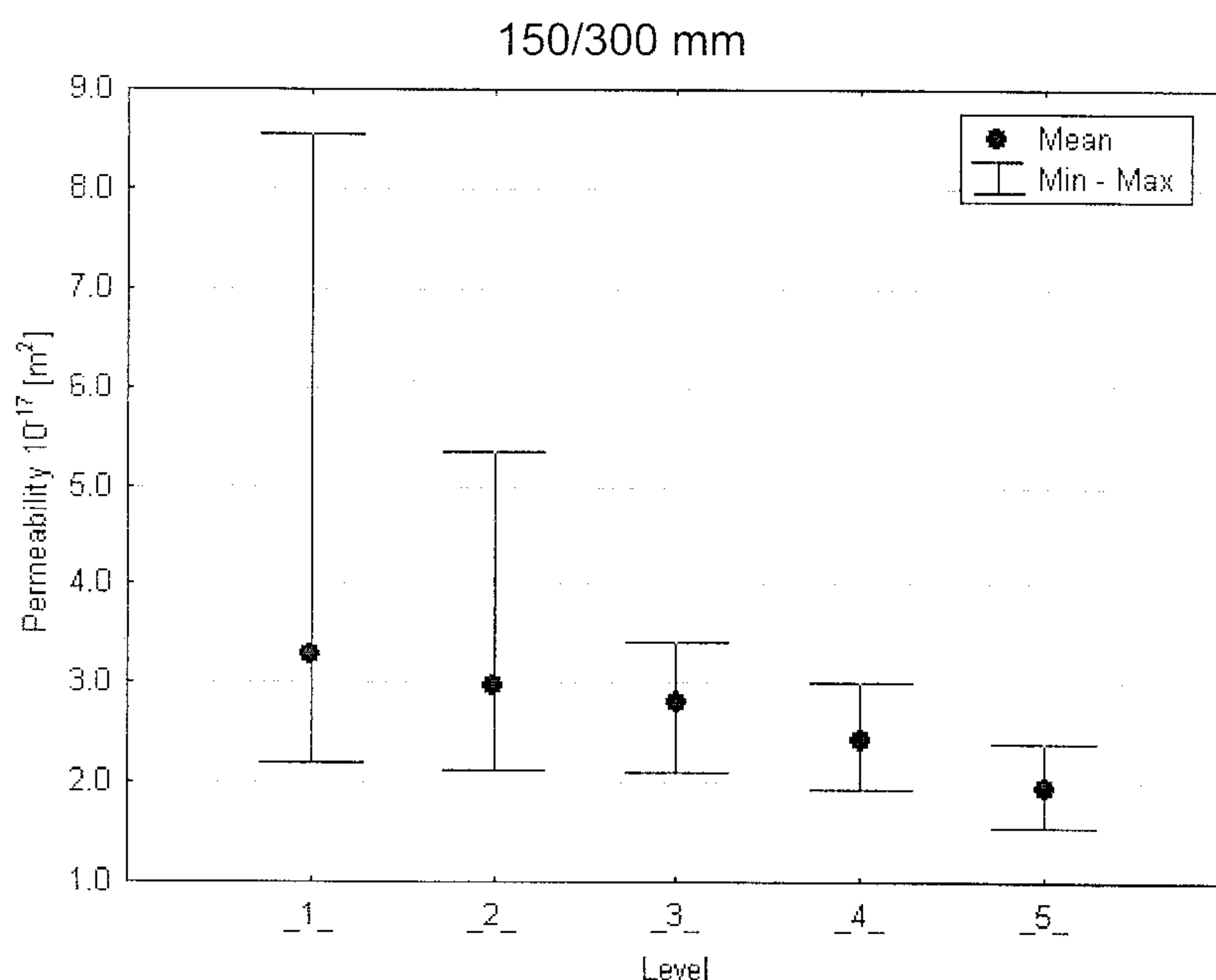
4. Wyniki badań i ich analiza

Na rysunku 3 przedstawiono ogólną charakterystykę jednorodności (wartości średnie, minimalne i maksymalne) zbiorów wartości przepuszczalności (k) dla serii próbek złożonej z piętnastu sztuk pochodzących z różnych miejsc walców wyjściowych (rys. 2). W tabelicy 2 zamieszczono wartości parametrów statystycznych charakteryzujących poszczególne populacje wyników.

Już z wykresu na rysunku 3, a także z wartości podanych w tabelicy 2 widać, że jednorodność wyników istotnie zależy od położenia próbek 150/50 mm w próbce wyjściowej 150/300 mm. Widać także, że generalnie z im niższej części próbki wyjściowej pochodzi próbka do badania przepuszczalności, tym wartość tej cechy jest mniejsza. Średnia przepuszczalność próbek wyciętych w górnej części walców wyjściowych (seria _1_) jest blisko dwa razy większa od przepuszczalności określonej na próbkach z dolnej części walców (seria _5_). Współczynnik zmienności wyników badania próbek pochodzących z górnej części walców wyjściowych jest bardzo duży i przekracza 40% dla serii oznaczonej _1_. Pomimo obniżania się wartości przepuszczalności w coraz to niższych poziomach umiejscowienia próbek, ich jednorodność jest praktycznie stała. Współczynnik zmienności dla serii _3_, _4_ i _5_ jest podobny i wynosi około 13%. W przypadku przepuszczalności, która w dużym stopniu zależy od jakości i ilości porów zawartych w betonie, wartość tę ozna-

ure 2). Table 2 shows the values of statistical parameters characterising the test results.

Figure 3 and Table 2 show that homogeneity of results depends strongly on the location of the samples 150/50 mm in the initial specimens 150/300 mm. It can be seen that the lower part of the initial specimen, the lower value of the permeability of the cut sample. Mean value of the permeability of the samples from the upper part of the initial specimen (series _1_) is nearly two times higher than the value of the permeability samples from the bottom part of the specimen (series _5_). Variation coefficient of the test results of the samples from the upper part of the initial specimen is very high (above 40% for series _1_). In spite of decreasing the permeability value of the samples cut in the lower levels of the initial specimen, the homogeneity of the test results is nearly constant. Variation coefficient of _3_, _4_ and _5_ series is similar (about 13%). Since permeability strongly depends on quality and quantity of pores in concrete, this value of variation coefficient seems to be relatively low and homogeneity good.



Rys. 3. Ogólna charakterystyka jednorodności wyników pomiarów przepuszczalności określonej na próbkach pochodzących z różnych poziomów próbki wyjściowej

Fig. 3. General characteristics of homogeneity of permeability of samples located on different levels in initial specimen

In order to describe the population distribution of the test results using Gaussian distribution, test of goodness of fit was done. Shapiro-Wilk's test (13, 16) was applied, which is used for a number of samples n from 3 to 50. The results of the analysis are given in Table 3.

It can be seen that a distribution of the results obtained for the samples from the upper levels (1 and 2) of the initial specimen cannot be described by Gaussian distribution. This distribution can be applied for the description of other population of the test results. Figure 4 shows normal distributions of the population of the test results. A broken line shows distributions of

Tablica 2 / Table 2

PARAMETRY STATYSTYCZNE WYNIKÓW BADAŃ PRZEPUSZCZALNOŚCI SERII PRÓBEK POCHODZĄCYCH Z RÓŻNYCH POZIOMÓW PRÓBKI WYJŚCIOWEJ

STATISTICAL PARAMETERS OF PERMEABILITY TEST RESULTS OF SAMPLES FROM DIFFERENT LEVELS OF INITIAL SPECIMEN

| Poziom Level | Średnia Mean E-17 m ² | Rozstęp Range E-17 m ² | Odchylenie standardowe Standard deviation E-17 m ² | Skośność Skewness | Kurioza Kurtosis | Wskaźnik zmienności Variation coefficient % |
|--------------|----------------------------------|-----------------------------------|---|-------------------|------------------|---|
| _1_ | 3,72 | 6,36 | 1,67 | 1,97 | 4,348 | 44,7 |
| _2_ | 3,11 | 3,32 | 0,73 | 2,13 | 6,499 | 23,5 |
| _3_ | 2,75 | 1,31 | 0,39 | -0,27 | -0,231 | 13,1 |
| _4_ | 2,39 | 1,06 | 0,33 | 0,21 | -1,121 | 13,8 |
| _5_ | 1,92 | 0,85 | 0,26 | 0,05 | -0,878 | 13,6 |

należy za stosunkowo małą, a jednorodność za dobrą.

W celu opisanie populacji wyników rozkładem normalnym, należało wcześniej przeprowadzić odpowiedni test zgodności. W pracy zastosowano test normalności Shapiro-Wilka (13, 16) przeznaczony dla małego zbioru prób o liczebności $3 \leq n \leq 50$. Wyniki testu dla poszczególnych serii wyników zestawiono w tabelicy 3.

Jak widać, rozkłady wyników badań próbek pochodzących z górnych poziomów _1_ i _2_ próbki walca wyjściowego hipotetycznie nie mogą być opisane rozkładem normalnym. Rozkład taki może być natomiast zastosowany do opisu pozostałych populacji wyników. Na rysunku 4 pokazano rozkłady normalne gęstości prawdopodobieństwa dla poszczególnych populacji wyników, linią przerywaną zaznaczając rozkłady wyników serii _1_ i _2_.

5. Wnioski

Przeprowadzone badania, ich wyniki oraz dokonana analiza pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

- Przy ocenie przepuszczalności metodą RILEM-Cembureau, badanej na próbkach wycinanych z większych walców, bardzo duże znaczenie ma położenie próbek w walcu wyjściowym. Położenie to ma wyraźny wpływ na ocenianą przepuszczalność. Generalnie, z im niższej części próbki wyjściowej pochodzą próbki, tym ich przepuszczalność jest mniejsza, a jednorodność wyników większa.
- Stwierdzone zróżnicowanie wartości przepuszczalności, a także i jej jednorodności, związane jest zapewne ze zróżnicowaniem stopnia zagęszczenia betonu a w konsekwencji jakościowym i ilościowym zróżnicowaniem struktury jego porowatości na wysokości wyjściowej próbki walcowej 150/300 mm.
- W świetle zaobserwowanego zróżnicowania jednorodności wyników pomiaru przepuszczalności (wskaźnik zmienności wynosi 44% w przypadku wyników badań próbek pochodzących z górnej części walca 150/300 mm i 13% z dolnej) podawana w zaleceniach RILEM-Cembureau (15) jako wystarczająca liczba trzech próbek, wydaje się zbyt mała dla miarodajnego określenia tej cechy.
- Z punktu widzenia jednorodności wyników badań przepuszczalności, w badaniach o charakterze porównawczym należałoby zalecać stosowanie próbek pochodzących z dolnych poziomów _3_, _4_ i _5_ walca wyjściowego.

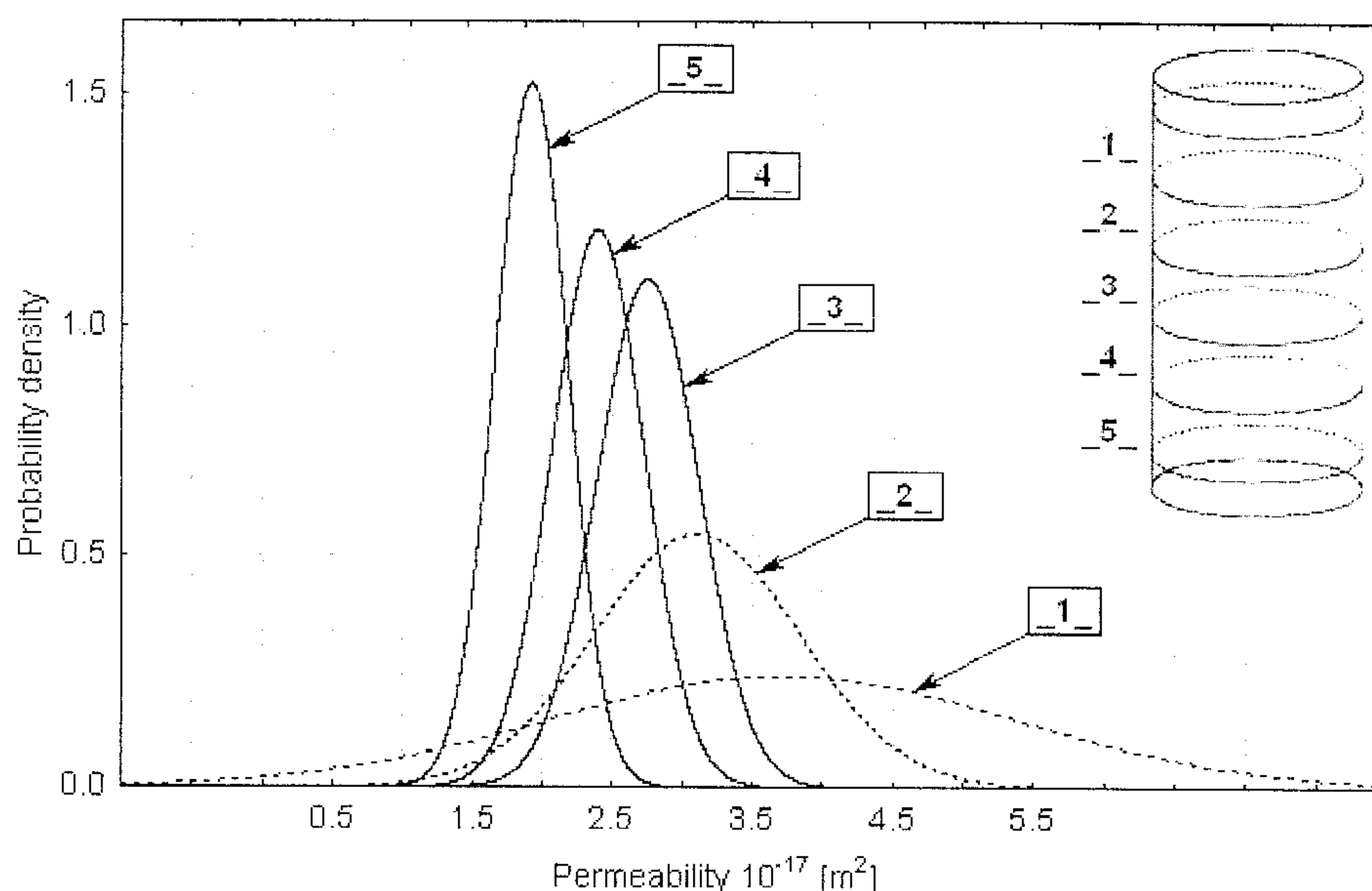
Na zakończenie podkreślić należy, że powyższe wnioski dotyczą betonu wysokowartościowego o konkretnym, podanym wcześniej

Tablica 3 / Table 3

WYNIKI TESTU ZGODNOŚCI SHAPIRO-WILKA

RESULTS OF SHAPIRO-WILK'S TEST OF GOODNESS OF FIT

| Poziom Designation of series of sample | Wyniki testu Shapiro-Wilka */ Results of Shapiro-Wilk's test */ | | |
|--|--|--|-----------------------|
| | Wartość testu Value of test W | Wartość krytyczna Critical value W_{α} (poziom ufności 0,05) W_{α} (level of confidence 0,05) | Wynik testu Result |
| <u>_1_</u> | 0,777 | 0,881 | Negatywny Negative |
| <u>_2_</u> | 0,793 | | |
| <u>_3_</u> | 0,975 | | Pozytywny Positive |
| <u>_4_</u> | 0,946 | | |
| <u>_5_</u> | 0,951 | | |
| */ Nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy że populacja wyników może zostać opisana rozkładem normalnym jeżeli $W \geq W_{\alpha}$ | | | |
| */ There are no grounds to reject a hypothesis that the population of the results can be described by normal distribution when $W \geq W_{\alpha}$ | | | |



Rys. 4. Rozkłady gęstości prawdopodobieństwa wyników przepuszczalności analizowanych populacji wyników opisanych rozkładem normalnym

Fig. 4. Homogeneity of test results of the permeability described by normal distribution

series _1_ and _2_.

5. Conclusions

From the analysis of the test results the following conclusions can be drawn:

- The location of the cut samples in the initial cylinder has significant influence on measured permeability by RILEM-Cembureau method. On the whole, the permeability is lower and homogeneity of obtained results is higher if samples are cut in the bottom part of the initial specimen.
- The found results of permeability and the homogeneity of these results are linked with the different degree of concrete thickening and consequently with different porosity of cylinder depending of its height.

składzie. Można jednak sądzić, że pod względem jakościowym wnioski te można będzie także przenieść na inne rodzaje betonów cementowych.

Podziękowania

Badania stanowiące przedmiot artykułu zostały wykonane w ramach prac związanych z realizacją grantu promotorskiego Komitetu Badań Naukowych 5 T07E 081 25.

Literatura / References

1. A. Abbas, M. Carcasses, J.-P. Ollivier, Gas permeability of concrete in relation its degree of saturation, *Materials and Structures*, Vol. 32, 3-8 (1999).
2. A. Ajdukiewicz, Rozwój badań i zastosowań betonów wysokowartościowych, *Beton Na Progu Nowego Millenium*, Kraków 9-10 listopada 2000, Polski Cement, Kraków 2000, 413-431.
3. J. G. Cabrera, C. J. Lynsdale, A new gas permeameter for measuring the permeability of mortar and concrete, *Magazine of Concrete Research*, Vol. 40, No. 144, 177-182 (1998).
4. P. A. Claisse, E. Ganjian, T. A. Adham, A vacuum-air permeability test for in situ assessment of cover concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, 47-53 (2003).
5. H. Gräff, H. Grube, The influence of curing on the gas permeability of concrete with different compositions, *Proc. of the Rilem Seminar on the Durability of concrete structures under normal outdoor exposure*, Hannover, 1984, 80-87.
6. H. Grube, Permeability of concrete to oxygen, *Proc. of the Rilem Seminar on the Durability of concrete structures under normal outdoor exposure*, Hannover, 1984, 69-79.
7. D. L. Guth, P. Zia, Evaluation of new air permeability test device for concrete, *ACI Materials Journal*, Vol. 98, No. 1, 44-51 (2001).
8. N. Hearn, G. Lok, Measurement of permeability under uniaxial compression - A test Method, *ACI Materials Journal*, Vol. 95, No. 6, 691-694 (1998).
9. J. J. Kollek, The determination of the permeability of concrete to oxygen by the Cembureau method - a recommendation, *Materials and Structures*, Vol. 22, 228-230, (1989).
10. H. Loosveldet, Z. Lafhaj, F. Skoczylas, Experimental study of gas and liquid permeability of a mortar, *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, 1357-1363, (2003).
11. J. P. Monlouis-Bonnaire, J. Verdier, B. Perrin, Prediction of the relative permeability to gas flow of cement-based materials, *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, 737-744, (2004).

- c. On the basis of the results obtained it appears that the recommendation of RILEM-Cembureau concerning the permeability of concrete based on three samples is not enough and some extra information about the location of the samples in initial specimens should be given.
- d. In case of performing comparative tests of the permeability of different concretes, the samples from levels 3, 4 and 5 should be used.

These conclusions concern high-performance concrete, the composition of which was given in table 1, but it appears that, from the quality point of view, the conclusions can also concern other cement concretes.

Acknowledgements

The research reported in this paper was carried out in the Institute of Building Materials and Structures at Cracow University of Technology, as a part of project sponsored by State Committee for Scientific Research 5 T07E 081 25.

12. V. Picandet, A. Khelidj, G. Bastian, Effect of axial compressive damage on gas permeability of ordinary, *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, 1525-1532, (2001).
13. PN-83/N-01052.07 Statystyka matematyczna. Badania statystyczne. Badanie zgodności rozkładu właściwości populacji z rozkładem normalnym.
14. PN-EN 12390-2 "Badania betonu Część 2: Wykonywanie i pielęgnacja próbek do badań wytrzymałościowych".
15. 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.
16. M. Sobczyk, *Statystyka*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2002.
17. J. Śliwiński, T. Tracz, Przepuszczalność betonów dla gazów - podstawy teoretyczne, metody oceny i wyniki badań, *Dni Betonu - Tradycja i Nowoczesność*, 8-10 października 2002 Szczyrk, Polski Cement Kraków 2002, 327-341.
18. T. Tracz, Ocena przydatności badań wodoszczelności i gazoprzepuszczalności betonów wysokowartościowych, *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej*, nr 1559, zeszyt 95, 2002, 503-512.
19. T. Tracz, J. Śliwiński, Homogeneity of high performance concrete gas permeability test results, *Proc. Int. Conf. on Life cycle assessment, behaviour and properties of concrete and structures*, Brno University of Technology, Nov. 2004, 392-398.