

(3) 水蒸気拡散法による透水性評価試験について

(株)熊谷組 正会員 伊藤 洋
" 正会員 ○ 前村 辰二
" 正会員 坂口 雄彦

A study on the permeability test by means of water vapour diffusion method

Yo ITO, Kumagai Gumi Co., Ltd.
Shinji MAEMURA, Kumagai Gumi Co., Ltd.
Takehiko SAKAGUCHI, Kumagai Gumi Co., Ltd.

Abstract

In order to apply the water vapour diffusion method to the permeability test in rocks, the experiments were carried out by using the one-cell cup for water vapour diffusion test of rock specimens in a laboratory.

This paper presents some experimental results and how to determine the coefficients of water vapour diffusion. The utility of apparatus proposed in this study was confirmed by the experimental results. The hydraulic parameters of water vapour diffusion were compared with permeability coefficient of water by some experiments.

1. はじめに

岩石や土の室内透水試験は、飽和供試体内に一定の動水勾配を強制的に与えて浸出量を測定する定圧法（定水位法）が最も普及している¹⁾が、この方法では自ずと限界があり、難透水性媒体の場合には、浸透流量が極めて微量となり測定が困難となる。また、こういった低透水性の岩石を対象とした透水試験として、トランジェント・パルス法²⁾やフローポンプ法³⁾などが提案・実施されている。これらの方法はいずれも優れた方法であるが、特殊で高度な試験装置が必要であり、試験方法も単純ではない。

本研究では、主に低透水性の岩石供試体を対象にした透水性評価法として、建築材料の透湿性評価⁴⁾に用いられている水蒸気拡散法を応用した簡便試験法を適用し、岩石及び砂などの数種の試料を用いた実験を試みた。本試験法が、岩石の透水性評価試験として適用できる足掛りを得たと思われたのでここに報告する。

2. 試験方法の概要

本試験は、図-1にその概要を示したように水を水蒸気の状態にして供試体内を通過させ、その透過抵抗性を測定しようとするものである⁵⁾。本試験方法では、単純な容器と乾燥炉のみで試験が可能である。

(1) 試験装置と供試体

試験装置は、図-1に示したように薄い円柱状の岩石供試体を挟むことのできる単純容器（以後カップと称す）のみである。カップは、錆等の不純物の発生・混入を避けるためアルミ製とした。また、供試体との接触面には、耐熱性ゴムパッキンを取り付け供試体と密着させて、側面からの水蒸気の漏洩を防いでいる。供試体は、直径 $d=10\text{cm}$ で厚さ $l=1.5\sim 2.2\text{cm}$ 程度に成形する。ここで、透過対象となる有効面積 A は、ゴムパッキンの内径をとり、 $A=60.82\text{ cm}^2$ ($d'=8.8\text{cm}$)とする。ただし、珪砂については特殊なメッシュ皿を用いたので $A=63.62\text{ cm}^2$ ($d'=9.0\text{cm}$)とする。

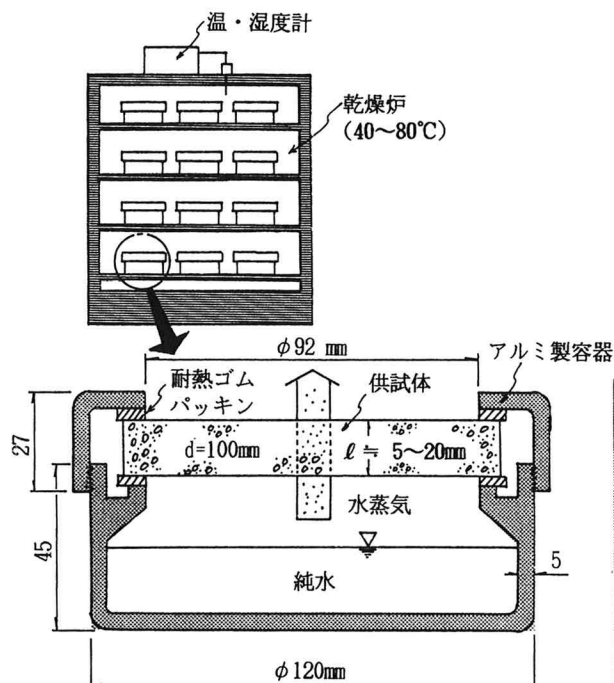


図-1 水蒸気拡散試験装置の概略

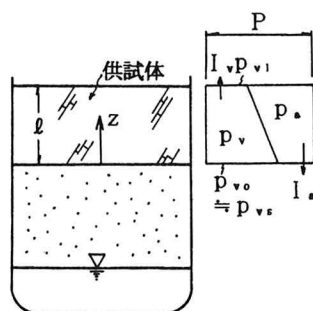


図-2 水蒸気拡散の概念モデル

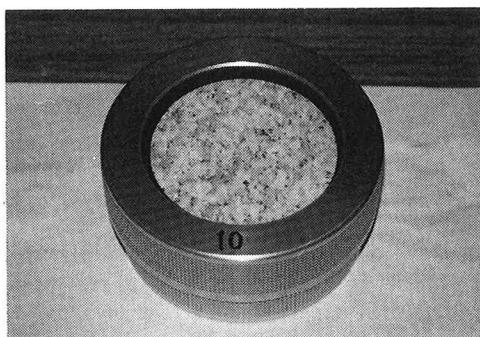


写真-1 カップのセット状況

(2) 試験方法および試験ケース

まず、カップ内に純水（市販のイオン交換水）を 150cm³程度入れ、予め乾燥状態にした供試体を置いて上蓋をねじ込んで固定する。ここで、カップ全体の重量を電子天秤により測定する。つぎに、このカップを所定の温度に設定した乾燥炉内に設置する。乾燥炉内の温度は、 $T=49.1^{\circ}\text{C}$ (322.25 K) と 79.7°C (352.85 K) に設定した。このときの相対湿度は、それぞれ $H=8.9, 8.7\%$ である。一方、カップ内は小閉空間で加温状態にあるから十分な水分が蒸発していると考えられ、 $H=100\%$ とする。この状態で経時的にカップを取り出して、全体重量を測定する。減少重量が、カップ内の純水が水蒸気として供試体内を透過した量（重量）である。

試験は、表-1（後述）に示したように花崗岩、珪砂、コンクリート、ポーラスなコンクリートを用い、乾燥炉内温度を変えて合計10ケースについて行う。

3. 水蒸気拡散に係わる水理パラメータの算定式

水蒸気拡散を評価するに当たっては、透水係数に対応するような水理パラメータを試験結果より算定する必要がある。そこで、ここでは以下の仮定を設けて、3つの水理パラメータの算出を行う。

仮定条件：①供試体内は毛管水等の液相水分量が少なく、水分の移動は気相水分（水蒸気）で生じるものとする。②系は等温・定常状態とする。③水蒸気および乾燥空気は理想気体とする。④湿り空気的全圧（系の総圧）を P (Pa)、乾燥空気の分圧を p_a (Pa)、水蒸気分圧を p_v (Pa) とすると、 $P = p_a + p_v$ であり、湿り空気全圧は一定であるとする（ $\nabla P=0$; ダルトンの法則、図-2 参照）。

(1) 湿気伝導率による評価^{5), 6)}

水蒸気の透過輸送は、試験容器内外の水蒸気分圧勾配に比例すると考えると、単位時間・単位面積当たりの気相水分（水蒸気）マスフラックス密度 J_v (kg/m² s) は、湿気伝導率 λ (kg/m s Pa) を用いて以下のよう表せる。

$$J_v = \frac{m_v}{A} = -\lambda \nabla p_v = \lambda \frac{p_{v0} - p_{v1}}{\ell} \quad (1)$$

ここに、 m_v ：単位時間当たりの気相水分マスフラックス密度(kg/s)、 A ：供試体の透過面積 (m^2)、 ℓ ：供試体の厚さ(m)であり、添字 0は供試体下面($z=0$)、1は供試体上面($z=\ell$)での分圧値を示している。ここで、水蒸気分圧 p_v は、相対湿度 $H(\%)$ の定義から、 $p_v = H p_{vs} / 100$ (2) となる。 p_{vs} ：飽和水蒸気圧(Pa)であり、本実験では $p_{vs}=11,805 \text{ Pa}(322.25\text{K})$ 、 $46,811 \text{ Pa}(352.85\text{K})$ とする⁷⁾。

(2) 水蒸気拡散係数による評価⁸⁾

上述の評価法は簡便であるが、実際にはカップ内の空間は閉塞小空間である。しかも、ダルトンの法則から容器内の全圧は一定である。つまり、図-2に示したように空気フラックスは、下向き拡散成分と上向きの流動成分(対流)が釣り合う必要がある。したがって、水蒸気上方への移動は、濃度勾配による拡散に加えこの対流による輸送も生じることとなる。

まず、乾燥空気下方への拡散量 I_a ($\text{kg}/\text{m}^2 \text{ s}$)は、フィックの法則により以下のように書ける。

$$I_a = -D \partial C_a / \partial z = -D/R_a T \cdot d p_a / dz \quad (3)$$

ここに、 D ：供試体内のガス拡散係数 (m^2/s)、 C_a ：単位体積当たりの乾燥空気質量濃度 (kg/m^3)、 T ：絶対温度(K)、 z ：座標、 R_a ：乾燥空気ガス常数 ($\text{Pa m}^3/\text{kg K}$)； $R_a = R/M_a = 287.15$ 、 R ：一般ガス常数 ($8,316.96 \text{ Pa m}^3/\text{kmol K}$)、 M_a ：乾燥空気の見かけの分子量 ($28.964 \text{ kg}/\text{kmol}$)である。

式(3)によって表された空気拡散量 J_a は、上方への対流による移動と釣り合っているとすれば、

$$J_a = I_a + \rho_a v = 0 \quad (4)$$

となる。

ここに、 J_a ：単位時間・単位面積当たりの乾燥空気マスフラックス密度 ($\text{kg}/\text{m}^2 \text{ s}$)、 ρ_a ：乾燥空気密度 (kg/m^3)、 v ：対流による上向きの移動速度 (m/s)である。

式(4)に式(3)を代入し、 ρ_a を理想気体の状態方程式によって分圧表示にすると、 v は以下のように表せる。

$$v = D/p_a \cdot d p_a / dz \quad (5)$$

水蒸気上方への拡散量 I_v は、式(3)と同様にして、

$$I_v = -D/R_v T \cdot d p_v / dz \quad (6)$$

となる。

ここに、 R_v ：水蒸気ガス常数 ($\text{Pa m}^3/\text{kg K}$)； $R_v = R/M_v = 461.64$ 、 M_v ：水蒸気分子量 ($=18.016 \text{ kg}/\text{kmol}$)である。

これより、水蒸気マスフラックス密度 J_v は、拡散量と対流による総和となる。

$$J_v = I_v + \rho_v v = -D/R_v T \cdot d p_v / dz + p_v / R_v T \cdot D/p_a \cdot d p_a / dz \quad (7)$$

ここに、 ρ_v ：水蒸気密度 (kg/m^3)である。

ここで、ダルトンの法則より、

$$d p_a / dz = -d p_v / dz \quad (8)$$

となる。式(8)を式(7)に代入して整理すると、

$$J_v = -D/R_v T \cdot P / (P - p_v) \cdot d p_v / dz \quad (9)$$

となり、式(9)を $z=0 \sim \ell$ で積分すると、

$$J_v = \frac{D P}{R_v T \ell} \ln \frac{P - p_{v1}}{P - p_{v0}} \quad (10)$$

となる。

(3) 水蒸気の物質伝達率による評価⁹⁾

基本的な考え方は、上述の(2)と同じである。

ここでは、伝熱においてニュートンの冷却則により熱伝達率を定義すると同様に、水蒸気の濃度差に比例して水蒸気が輸送されるとし、その比例定数を物質伝達率 h (m/s) と定義すると以下のように書ける。

$$J_v = h (C_{v1} - C_{v0}) = \frac{h}{R_v T} (p_{v0} - p_{v1}) \quad \text{----- (11)}$$

式(11)と式(10)を対応させると、水蒸気伝達率 h は、以下のように書ける。

$$h = \frac{DP}{\ell (p_{v0} - p_{v1})} \ell n \frac{P - p_{v1}}{P - p_{v0}} \quad \text{----- (12)}$$

4. 試験結果と考察

表-1には、試験結果より得られた湿気伝導率、拡散係数、物質伝達率および定圧（定水位）透水試験結果より得られた透水係数をまとめて示してある。それぞれの評価係数に注目すると、湿気伝導率 λ は $10^{-12} \sim 10^{-11}$ (kg/m s Pa)、拡散係数 D は $10^{-7} \sim 10^{-8}$ (m²/s)、物質伝達率 h は $10^{-5} \sim 10^{-3}$ (m/s) のオーダーとなっている。ここで、花崗岩の透水係数 k は、通常の方法では測定が困難であったため、圧力差 $\Delta p = 2.94$ MPa (30 kgf/cm²) の高圧で強制浸透させて得られた値と、別の透気試験より換算した値を示した¹⁰⁾。他方、コンクリート供試体については、高圧浸透によっても漏水量の測定は困難であった。定圧法は、低透水係数の測定には基本的に適していないことが改めて確認された。加えて、高圧での試験であることによる装置の接触面などからの漏水や供試体内の微細クラック（水みち）の拡大による漏水などの可能性も考えられ、ダルシ一則に整合した結果を得ることには問題が多いことが示唆された。

図-3は、代表的なカップ内水の減少量の経時変化を示したものである。G-1-80（花崗岩）は、初期勾配は若干大きい、その後はほぼ一定増加となっている。S-80（珪砂）は、急激に減少量は増加しているが、線型関係にある。P-50（ポラスコンクリート）は、その中間程度の値となっている。また、G-1-80とG-1-50を比較すると、当然ながら蒸気圧差の小さい後者の方が減少量は小さくなっているが、表-1中の両者の λ 、 D 、 h は

表-1 試験ケースと結果

供試体名	実験 ケース	温 度 T (K)	湿度 H (%)	供試体の 厚さ ℓ (m)	気相水分マス フラックス密度 J_v (kg/m ² s)	透水係数 k (m/s)	湿気伝導率 λ (kg/m s Pa)	拡散係数 D (m ² /s)	物質伝達率 h (m/s)
花 崗 岩	G-1-80	352.85 (79.7 ℃)	8.7	0.0153	3.805×10^{-6}	$3.6^{*1)} \times 10^{-9}$ } 8.9 $\times 10^{-12}^{*2)}$	1.36×10^{-12}	1.62×10^{-7}	1.45×10^{-5}
	G-2-80			0.0151	4.440×10^{-6}		1.57×10^{-12}	1.86×10^{-7}	1.69×10^{-5}
	G-3-80			0.0152	4.641×10^{-6}		1.65×10^{-12}	1.96×10^{-7}	1.77×10^{-5}
	G-1-50	322.25 (49.1 ℃)	8.9	0.0153	1.308×10^{-6}	$\times 10^{-12}^{*2)}$	1.86×10^{-12}	2.59×10^{-7}	1.81×10^{-5}
	G-2-50			0.0151	1.421×10^{-6}		2.00×10^{-12}	2.78×10^{-7}	1.97×10^{-5}
	G-3-50			0.0152	1.327×10^{-6}		1.88×10^{-12}	2.61×10^{-7}	1.84×10^{-5}
珪 砂	S-80	352.85	8.6	0.0053	2.979×10^{-4}	$1.7/10^{-4}$	3.69×10^{-11}	4.38×10^{-6}	1.13×10^{-3}
コンクリート	C-80	352.85	8.7	0.0220	7.786×10^{-6}	— ^{*3)}	4.01×10^{-12}	4.76×10^{-7}	2.97×10^{-5}
	C-50	322.25	8.9		1.819×10^{-6}		3.72×10^{-12}	5.18×10^{-7}	2.52×10^{-5}
ポラスコンクリート	P-50	322.25	8.9	0.0236	4.624×10^{-6}	$3.5/10^{-8}$	1.01×10^{-11}	1.41×10^{-6}	6.40×10^{-5}

* 1) : 定圧透水試験では測定精度以下。高加圧透水試験（水圧差2.94MPa）より得られた値である。

* 2) : 別の透気試験¹⁰⁾より換算した値である。

* 3) : 定圧透水試験では測定精度以下。高加圧透水試験でも測定精度以下。

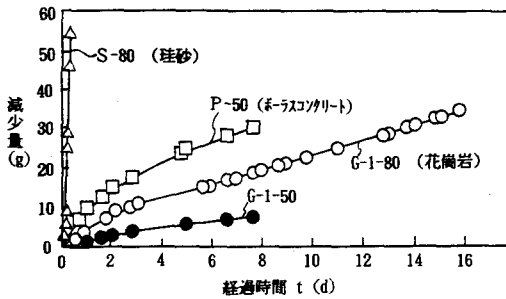


図-3 代表的なカップ内水の減少量
(水蒸気拡散量)の経時変化

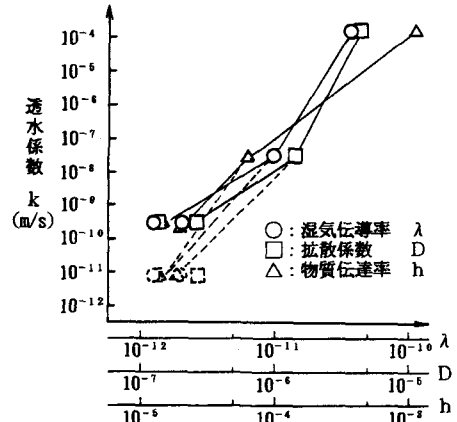


図-4 水蒸気拡散の評価係数と透水係数の関係

ほぼ同じ値となっており、本試験では温度レベルに因らず安定した評価が可能であることが示唆される。いずれの場合も、初期に拡散速度は若干大きくなる傾向があるが、その後の水蒸気透過量(カップ内水の減少量)は経時的にほぼ線型増加していることが認められる。

図-4は、評価係数 λ 、 D 、 h と透水係数 k の関係を示したものであるが、両者に比較的良好な相関が認められる。しかし、透水係数のオーダー幅が 10^8 程度に対し、水蒸気拡散の評価係数のそれは 10^2 程度と小さく、感度に関しては今後さらに検討が必要である。今回の試験における3つの評価係数の中では、物質伝達率 h との関係が最も相関性がよいと読み取れる。

5. むすび

本研究では、主に低透水性の岩石を対象とした透水性評価法として、水蒸気拡散法を応用した簡便試験法を適用し、数種類の供試体を用いた試験を試みた。今回の試験では、十分な数の試験データは得られなかったが、本試験方法が、少なくとも水蒸気拡散量に関しては、極低透水性媒体であっても十分な精度で測定可能であることが確認された。また、透水係数との関係においても、比較的良好な相関関係にあることが示唆された。本試験方法は、精度に検討の余地は残されているが、試験方法自体は従来の試験方法と比較して極めて簡便であり、特殊な試験装置等も不要でコスト的にも各段に安価である。また、深層岩盤空洞において透水係数が極めて小さくなるときの湧水量は、岩盤壁面からの蒸発量が支配的となるとされており¹¹⁾、こういったケースでは本試験法による評価が十分有用となろう。

今後データの蓄積を図ってさらに検討を進め、本試験方法を確立したいと考えている。

最後に本試験の実施に協力していただいた(株)熊谷組豊川技術部の松村哲夫氏にお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 土質工学会編：岩の調査と試験，土質工学会，pp.396~399，1989。
- 2) 例え、奥野哲夫・斉藤章：透水性の低い岩石の室内透水試験方法，土木学会第18回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.381~385，1986。
- 3) 例え、堂園俊多・江崎哲郎：難透水性岩石の新しい透水試験法，土木学会第46回年次学術講演会Ⅲ，pp.882~883，1991。
- 4) JIS Z 0208(防湿包装材料の透湿度試験方法)
- 5) Dhir, R.K. et al.: Membrane curing of concrete: water vapour permeability of curing membranes, Magazine of Concrete Res., 41, No.149, pp.221~228, 1989。
- 6) 中村泰人編：新建築学大系10(環境物理)，彰国社，pp.105~127。
- 7) 理科年表，丸善，p.388，p.481，1989。
- 8) 福原輝幸編：蒸発に伴う乾燥層の発達過程と蒸発量予測のための簡便解法，水工学論文集，第35巻，pp.9~14，1991.2。
- 9) ホーヰツ，J.R.(平田賢 監訳)：伝熱工学(下)，丸善，pp.426~436，1982。
- 10) Sato, K. et al.: Fundamental study of gas seepage in rocks, 7th ISRM Cong., pp.45~48, 1991。
- 11) 例え、渡辺邦夫編：通常換気条件下の湧水量と占める蒸発量の割合，土木学会第46回年次学術講演会Ⅲ，pp.900~901，1991。