

(81) 岩石の透気性と高温下における透水係数に関する実験的研究

榊熊谷組（埼玉大学研究生） 正会員 ○伊藤 洋
埼玉大学工学部 正会員 佐藤 邦明
榊熊谷組 正会員 清水 昭男

1. はじめに

最近、岩盤地下空間を利用して石油を地下貯蔵したり、放射性廃棄物を地層処分しようという動きが活発になってきている。こういった中で、新たな技術的課題として①石油ガスの漏気防止・気密性、②核廃棄物の残留崩壊熱による伝熱とその高温伝熱帯における透水・物質拡散、などといったものが取りあげられ、これらの現象解明が待たれている。本研究は、こういった新しい現象の内、岩盤内の透気性および熱付加状態における透水性に注目し、大型の円筒岩石試料を用いた室内実験を行ってその基本的性質を吟味することにより今後の研究の足掛りにしようとしたものである。また、岩石内の透気については圧縮性流体としての取り扱いを行って理論的検討も加えた。

2. 実験装置と方法

本研究に用いられた実験装置は、図-1に示したような各部とシステムをもち、機能別に大別すると②岩石収納装置、⑤エアーコンプレッサ、⑥水圧ポンプ、⑦加熱装置、⑩温度調節装置、⑫循環ポンプ、⑬温度自動記録装置、とからなっている。図中、各部は①岩石試料（5種類、直径0.38m、高さ0.115mの円筒形状であり、直径0.05mの中心孔がある。また、上下面は約4mm厚さの樹脂で被覆）、②岩石収納装置（鋼鉄製で中空構造になっている）、③加熱オイル循環部、④断熱材、⑤エアーコンプレッサ（最大圧力490kPa：ゲージ圧力）、⑥水圧ポンプ（最大圧力1.96MPa：ゲージ圧力）、⑦加熱装置（最高150℃まで可能）、⑧エンジンオイル加熱槽（ステンレス製）、⑨ヒーター、⑩温度調節装置（精度±1℃）、⑪サーミスタ針、⑫循環ポンプ（耐熱性）、⑬圧力計（最大1.96MPa：ゲージ圧）、⑭メスシリンダー、⑮ビューレット、⑯温度自動記録装置、⑰熱電対（T型）、⑱電源、である。

実験手順はつぎのようである。まず、⑰熱電対を取り付け自然乾燥状態にある①岩石試料を②岩石収納装置にセットし、上蓋を載せて十分緊締する。この状態で⑤エアーコンプレッサにより中心孔に所定圧力 p_0 （98～490kPa：ゲージ圧）の圧縮空気を送り、数分経過した後に、⑭メスシリンダーを用いて透気量を計る。つぎに、⑥水圧ポンプにより所定水圧力 p_0 （880kPa：ゲージ圧）を作用させ、試料中の空気が残留していないことを確かめてから⑮ビューレットによって注入および浸透流量を測定する。ここで、試料は飽和状態になっているので②収納装置内の水を直ちに抜いて再び透気試験を行う。つぎに、熱付加状態（110℃）における透水試験を行うため②収納装置全体を④断熱材で全体を覆い、⑦加熱装置により⑧エンジンオイルを加熱して所定の温度（約120℃）に調節する。ここまで準備が整うと⑫循環ポンプを作動させて②収納装置全体および①岩石試料を約110℃になるまで加熱し、再び透水試験を行う。ただし、この場合は浸透水は沸騰しているので注入量のみを測ることになる。

岩石試料は本邦5ヶ所より採取され自然乾燥状態にある岩石5種類（花崗石、白河、江持および大谷の凝灰

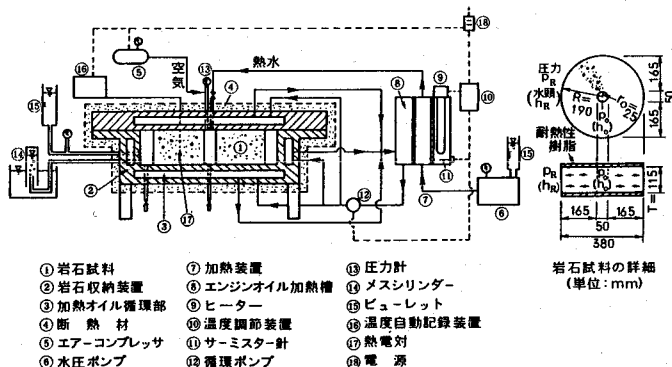
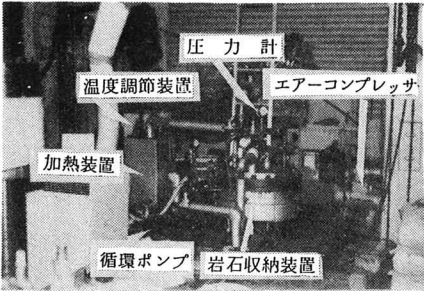


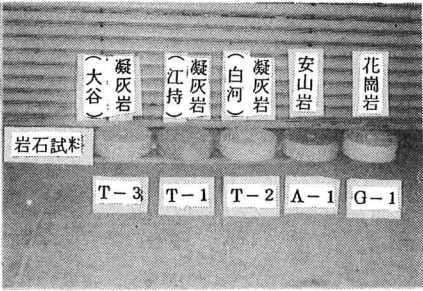
図-1 実験装置の概要

岩、安山岩）が用いられた。岩石試料の比重，吸水率，空隙率については同じ現地より同時に採取された円柱供試体（直径0.1 m，高さ0.2 m）のその平均値で代表させた（後述表－1 参照）。

写真－1には実験装置の全景を，写真－2は用いた岩石試料を示している。



写真－1 実験装置の全景



写真－2 岩石試料の外観

3. 実験結果と考察

実験結果を基に岩石の透気性，および熱付加状態における透水性の基本的性質とそれらの諸関係について検討を行うこととする。また，透気性の検討においては地下水のごとき非圧縮性流体とは異なって圧縮性流体としての取り扱いが不可欠となるため，まずそれに係る基礎式を提示しておくことにする。

1) 気体浸透流の基礎式

気体の浸透流が水のそれと異なる点は，上述したようにその圧縮性にある。まず，流体質量の保存法則を定式化した連続方程式を本実験の評価に適用することを考えて円筒座標系（ r, θ ）で表せば，次のように書ける。

$$1/r \cdot \partial (\rho_a v_r r) / \partial r + 1/r \cdot \partial (\rho_a v_\theta) / \partial \theta + \lambda \partial \rho_a / \partial t = 0 \quad \cdots \cdots \cdots (1)$$

ここに， ρ_a ：気体の密度， v_r, v_θ ：各々 r, θ 方向の流速， λ ：空隙率， t ：時間である。
つぎに，運動方程式は水の場合と同様にダルシー法則に従うとすれば，

$$v_r = -Kg / \mu_a \cdot \partial p / \partial r, \quad v_\theta = -Kg / \mu_a \cdot 1/r \cdot \partial p / \partial \theta \quad \cdots \cdots \cdots (2)$$

と表すことができる。ここに， K ：固有浸透係数， g ：重力加速度， μ_a ：気体の粘性係数， p ：質量絶対圧力である。

さらに，気体の密度 ρ_a と圧力 p の関係（状態方程式）は，

$$\rho_a = 1/\beta \cdot p^{1/n}, \quad n = c_p / c_v \quad \cdots \cdots \cdots (3)$$

とする。ここに， β ：定数， c_p ：定圧比熱， c_v ：定積比熱であって，空気の場合に断熱状態にあれば $n = 1.40$ ，等温状態で $n = 1.0$ ととる。

基礎方程式は式(1)～(3)を整理しまとめることにより最終的に次のように書くことができる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 p}{\partial \theta^2} - \frac{\lambda \mu_a}{Kg \beta (1+n)} \left(\beta \frac{1+n}{n} \right)^{\frac{1}{1+n}} p^{-\frac{1}{1+n}} \frac{\partial p}{\partial t} &= 0, \\ P &= n / \{ \beta (1+n) \} \cdot p^{1+1/n} \end{aligned} \right\} \quad \cdots \cdots \cdots (4)$$

ここで，本実験の場合に軸対称回転体であり，かつ等温状態であることを考慮すると式(4)はやや簡単になって次のように書ける。

$$1/r \cdot \partial (r \partial p^2 / \partial r) / \partial r - 2 \lambda \mu_a / (Kg) \cdot \partial p / \partial t = 0 \quad \cdots \cdots \cdots (5)$$

結局，式(5)が本実験の場合の空気浸透の基礎式となる。一方，この実験は定常状態で実施されているので式(5)の左辺第二項を0，つまり定常流の式として解き，水理定数 K の算定式として整理すると結果的につぎのようになる。

$$K = Q_a \mu_a P_a \ell_n (R/r_o) / \{ \pi g T (p_o^2 - p_R^2) \} \quad \cdots \cdots \cdots (6)$$

ここに、 Q_a : 大気圧 ($1 \text{ atm} = 1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$) 下における気体の透気体積、 T : 試料の厚さ、 P_a : 大気圧、 P_o, P_R : 各々 $r = r_o$, および R における気体の絶対質量圧力である。

他方、水の場合の基礎式およびその定常解は周知のように各々つぎのように書ける。

$$1/r \cdot \partial(r \partial h / \partial r) / \partial r - S_o / k \cdot \partial h / \partial t = 0, \dots\dots\dots (7)$$

$$k = K \rho_w g / \mu_w = Q_w \ell_n(R / r_o) / \{2 \pi T (h_o - h_R)\} \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 Q_w : 流量、 h : ビエゾ水頭、 S_o : 比貯留係数、 k : 透水係数、 ρ_w : 水の密度、 μ_w : 水の粘性係数、 h_o, h_R : 各々 $r = r_o$, および R におけるビエゾ水頭である。

以上、空気浸透における基礎式を中心に示したが、本実験における水理定数である固有浸透係数 K , および透水係数 k はいずれも流量と設定圧力がわかると式(6), (8)より求めることができる。

(2) 結果と考察

5種類の岩石について、上述した手順で透気（自然乾燥，飽和）および透水（常温，熱付加）試験を行った。表-1は、岩石試料の比重，吸水率，空隙率，透気係数，透水係数などをまとめて示したものである。

まず、図-2は大気圧下における透気量 Q_a と圧力差 $(P_o - P_R)g$ の関係であり、自然乾燥状態での Q_a （図中白抜丸）と飽和でのそれ（黒丸）を同時に示している。全体に Q_a は注入圧力が大きくなるにつれて増大するが、図中点線で示した線形式 $Q_a = \alpha \cdot A (P_o - P_R)$ 、（ α : 定数、 A : 断面積）と比べると圧力差が増大するに伴って差が生まれ、非線形の傾向を呈することが認められる。これは、定常理論解の式(6)のもつ非線形性がある程度実験的にも確認されたものと考えられる。また、飽和での

表-1 岩石物性と実験結果

岩石名	試料No	見かけの比重 (t/t_m)	吸水率 (%)	空隙率 (%)	固有浸透係数 K_a (m^2)		透気係数 k_a (m^2/s)		透水係数 k_w (m/s)		固有浸透係数 K (ダレイの単位)
					自然乾燥	飽和	自然乾燥	飽和	常温 (20℃)	熱付加 (110℃)	
花崗岩	G-1	2.637	0.0498	0.131	5.62×10^{-14}	1.09×10^{-13}	8.00×10^{-10}	1.60×10^{-9}	7.30×10^{-8}	1.00×10^{-7}	7.49×10^{-8}
凝灰岩 (柱状)	T-1	2.525	7.90	17.8	1.64×10^{-14}	5.46×10^{-14}	2.20×10^{-10}	9.06×10^{-9}	8.43×10^{-8}	—	8.62×10^{-8}
凝灰岩 (柱状)	T-2	2.594	8.12	18.6	3.35×10^{-15}	3.14×10^{-14}	3.99×10^{-10}	4.53×10^{-9}	1.59×10^{-7}	1.60×10^{-7}	1.63×10^{-7}
凝灰岩 (太谷)	T-3	2.504	13.25	27.7	1.57×10^{-15}	2.43×10^{-14}	2.05×10^{-10}	4.29×10^{-9}	1.48×10^{-7}	—	1.52×10^{-7}
安山岩 (駒込)	A-1	2.783	0.749	2.06	3.41×10^{-14}	8.34×10^{-14}	6.21×10^{-10}	1.36×10^{-9}	6.70×10^{-8}	3.80×10^{-7}	6.85×10^{-7}

1) 透気係数は、気体の圧断性を無視し、水の場合の定常解の式(6)より求めたものである。
2) 固有浸透係数は、式(8)において20℃の値、 $\rho_w = 0.998 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, $\mu_w = 1.0 \times 10^{-3} \text{ kg/m} \cdot \text{s}$ を用いた。

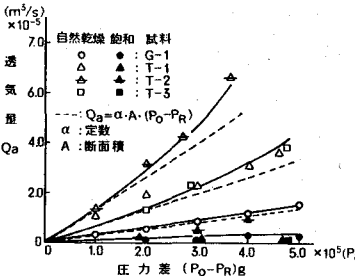


図-2 Q_a と $(P_o - P_R)g$ の関係

つぎに、図-4は透気試験から求めた固有浸透係数 K_a と透水からのそれ K_w の関係を示したものである。図中の白抜丸は自然での K_{an} ,黒丸は飽和での K_{as} である。自然乾燥状態での K_{an} をとると両者は $K_a / K_w \approx 1$ に近い値となるが、飽和での K_{as} であるとそれは1/10程度となっている。透気の場合の絶乾燥状態は透水の飽和状態に対応し、粘性流体の性質に依存しない固有浸透係数が概ね一致することも納得できる。図-5は参考までに空気の高圧縮性を無視し水の場合の式(8)より求めた透気係数 k_a と透水係数 k_w の関係を示したものであるが、 k_a は k_w に比べ約10倍から数百倍となっていることが判読できる。ちなみに、両流体の粘性係数の比は $\mu_w / \mu_a \approx 55$ 程度である。

ここで、透気の場合の非定常現象に目を転じG-1試料（花崗岩）の場合

を例にとって若干吟味しておく。実験においては早期に定常状態に達したので、ここでは基礎式を差分計算

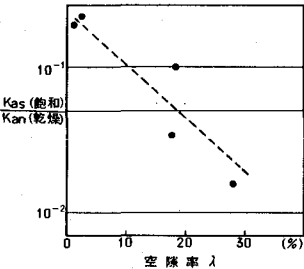


図-3 K_{as}/K_{an} と λ の関係

によって解いた。その結果として岩石内部の無次元圧力分布 $\eta (= (p - p_R) / (p_0 - p_R))$ の経時変化を示したのが図-6である。ここで、空気粘性係数は $\mu_a = 1.82 \times 10^{-5} \text{ kg/m}\cdot\text{s}$ とした。また、図中には比較のため透水の場合の基礎式(7)を比貯留係数 $S_0 = 4.8 \times 10^{-9} \text{ 1/m}$ として計算した結果を点線で同時に載せてある。圧力の上昇は透水も透気も急速に生じ、やがて定常分布に達

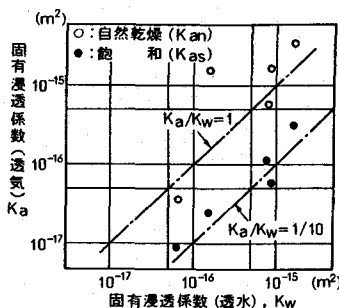


図-4 K_a と K_w の関係

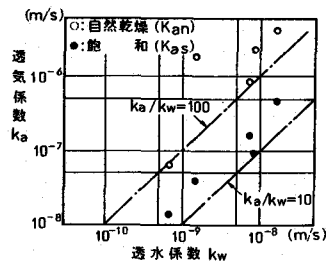


図-5 k_a と k_w の関係

している。この場合に透気係数 k_a が透水係数 k_w の約100倍であることを考えると、空気の圧縮性が圧力伝播に大きく寄与しその速度を大きく遅らせているものと判断できる。また、両者の η 分布形状を比較してみると、透水の場合は下にやや凸となるが、透気では特に注入中心孔付近でその上昇が早く全体にやや上に凸となる感じで推移している。定常圧力分布は各々式(6), (8)から求めたものであるが、透気の η 分布が透水のそれに比べて全体に大きく圧力こう配が同様の傾向をしている。

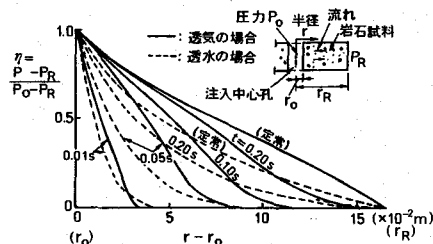


図-6 内部圧力分布 η の経時変化

つぎに、熱付加のある場合の透水性について見てみよう。この場合の透水についてはデータ数が少ないので有用な性質を導くのは難しいが、図-7に常温での透水係数 k_{wn} と熱付加状態(110℃)でのそれ k_{wh} の関係を示す。これからすると熱付加のある場合の k_{wh} は常温のそれ k_{wn} と同程度の値をもつことになる。しかし100℃を超える透水は、沸騰によって気泡が発生し蒸気流を伴った複雑な流れとなっているものと推定され、そのメカニズムは簡単ではない。

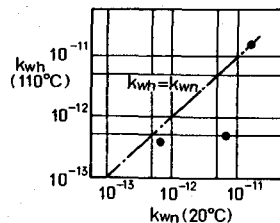


図-7 $k_{wn}(20^\circ\text{C})$ と $k_{wh}(110^\circ\text{C})$ の関係

4. むすび

近年、注目されている岩盤地下空洞を利用した石油地下貯蔵や放射性廃棄物処分において、新たな問題となっている岩盤での透気と高温下での透水に着目し、大型岩石試料を用いた室内実験を基にそれらの基本的性質を吟味した。また、透気現象については流体の圧縮性を考慮した基礎式を提示し、その理論的検討も加えた。その結果、透気量と圧力差の関係は非線形であり、圧力が大きくなると特にその傾向が顕著となることが認められた。また、自然乾燥状態岩石での固有浸透係数と透水のそれは概ね対応することも示唆された。飽和状態岩石での透気係数は、自然乾燥でのそれに比べてかなり小さくなるが、この傾向は空隙率の大きいものほど著しいことがわかった。つぎに、熱付加状態(110℃)の透水については十分な検討ができなかったが、本実験では、見かけ上その透水係数は常温の場合に比べて大きくは変化しない傾向にあることが認められた。しかし、この種の研究は緒についたばかりで今後の現象解明に期待される。最後に、本実験を行うに当たって助力していただいた熊谷組 坂口雄彦氏、および西山勝栄氏にお礼申し上げる。

参考文献

- 1) V.I. Aravin et al.: Theory of fluid flow in undeformable porous media, Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem, 1965.

(81) EXPERIMENTAL STUDY ON GAS SEEPAGE AND PERMEABILITY
WITH HEAT TRANSFER IN ROCKS

By Yo ITO*, Kuniaki SATO** and Teruo SHIMIZU***.

ABSTRACT

Until now, various types of underground caverns for the purpose of oil stock piling and underground disposal of radioactive nuclides have been constructed in rock ground. When we deal with the safety evaluations of caverns, it is one of the key subjects to find fundamental characteristics of the gas seepage phenomenon and the permeability with heat transfer in rocks.

From such points of view, this paper presents how to determine experimentally the intrinsic permeability coefficient of gas and permeability under high temperature of 110°C in rocks. Some characteristics of unsteady gas seepage in rock are numerically discussed by Finite Difference method. The hydraulic parameters of gas are compared with ones of water by some experiments.

The main conclusions by this study can be summarized as follows:

- (1) The intrinsic permeability obtained from experiments of gas flow is similar to that of water.
- (2) The relationships between pressure difference and flow rate of gas is not linear.
- (3) Distribution of pressure in the case of gas flow is affected by the gas compressibility.
- (4) The permeability of gas in saturated rock is less than that of dried rock.
- (5) The permeability of water under the temperature of 110°C is not so change as compared with that of normal temperature in this study.

* Dept., Nuclear Power Development (Research Member, Saitama University), Kumagai Gumi Co., Ltd.

** Faculty of Engineering, Saitama University.

***Dept., Nuclear Power Development, Kumagai Gumi Co., Ltd.