

II-75

岩石の透気・透水に関する基礎研究

埼玉大学工学部 ○佐藤 邦明
(有) セイザン 黄 致誠

はじめに

石油や液化ガスの岩盤タンク備蓄は欧米をはじめ諸外国では今世紀半ば以降多くの実績があり、わが国でも最近実用化されつつある¹⁾。また、圧縮空気エネルギーシステム(CAES)も実用実験が進められている。これらの技術を支える燃料や圧縮空気の岩盤タンクへの貯蔵・格納方式は水封システム(Water Seal System)である。つまり岩盤タンク周辺における地下水圧により漏気・漏液を防止しようとする方式である。

この水封方式の気密性については、①岩盤タンク壁からガス(空気)が表面張力に打ち勝って浸透(漏気)するか否か(つまり $P_g < P_c$: P_g : ガス圧力、 P_c : 表面張力圧力; 漏気表面張力バリアー)、②岩盤中へ侵入したガスが移動するか否か(漏気したガスの蓄積とガスの浮力が駆動力となり $P_g + P_c + P_b < P_w$ 、 P_g : 空腔内ガス圧力、 P_b : ガスの浮力換算圧力、 P_w : 水圧; 透気地山バリアー)の2者が要となる²⁾。本論は、これらの2つの水封機能を岩石の室内透気と透水試験によって実験的に明かにしようとしたものである。

キーワード: 岩石、透気、室内実験、水封機能、岩盤タンク

1. 実験装置と実験ケース

実験装置は透気載荷圧力が $0 \sim 80 \text{ kgf/cm}^2$ (透水の場合、載荷水圧: $0 \sim 8 \text{ kgf/cm}^2$) と大きく、空気の圧縮性が大きいと特殊に設計されたものであり、図-1に示すように実験中の安全性に十分配慮した構造となっている。主要部分は、①岩石試料格納水圧容器(高さ: 200mm、直径: 106mm、肉厚: 10mmのステンレス製)、②岩石試料(長さ: 0.15m、直径: 0.05m)、③空気圧力計(最小圧力目盛: 0.1 kgf/cm^2 、最大圧力: 100 kgf/cm^2)、④圧力・温度表示盤(デジタル表示: 1/100 精度)、⑤空気流量計($0 \sim 10 \text{ cm}^3/\text{min}$ 、及び $100 \text{ cm}^3/\text{min}$ の2段切り替え)、⑥岩石試料側圧加圧システム(空気コンプレッサー: 最大 8 kgf/cm^2 及び増圧機)からなる。実験装置の全景は写真-1の通り。

実験手順は以下のようである。

まず、岩石試料の周囲にゴムスリーブをはめ、格納水圧容器に設定し、ボルト留めする。ついで、コンプレッサーを始動させ貯水タンクに貯水し、水圧容器内の圧力を上げ、岩石試料の周囲を加圧する。この状態で空気ポンペを開放し、調圧弁を調整して所定の透気圧力を設定する。この空気は空気流量計を経て岩石試料の上端から載荷されて透気試験が行われる。すべての透気試験について設定圧力は0、10、20、… 80 kgf/cm^2 と増圧しながら試験された。一方、透水試験は図-1の右下に示された装置のように、上述した空気の代わりに蒸留水を浸透させ、その浸透流量をビューレフト管で計量するものである。水圧は0、1、2、… 8 kgf/cm^2 と与えた。

実験ケースと実験に用いた岩石試料の物性は表-1のようである。

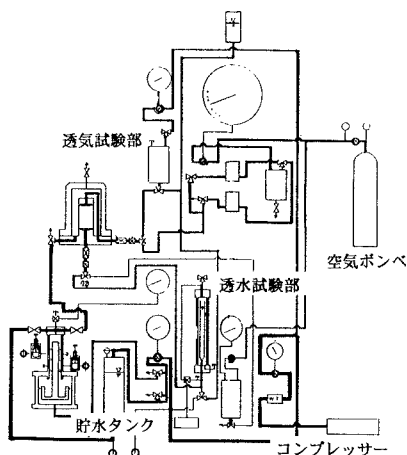


図-1 実験装置とシステム

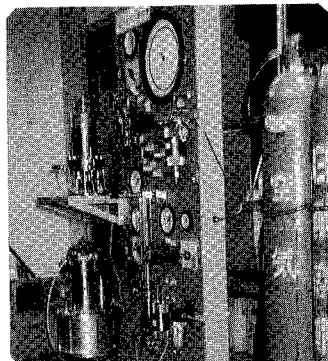


写真-1 実験装置の全景

すべての実験は、実験中の温度・湿度の変化を防止するため、温度 $23^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ 、相対湿度40～50%の恒温・恒湿室で行われた。なお、乾燥岩石の透気実験も初期飽和岩石のそれも圧力レベルを順次増加させつつ進めた。

2. 実験結果とその考察

図-2には一連の実験結果の中の2つの岩石について、載荷空気・水圧力 P と透気・透水流量 Q の関係がそれぞれ乾燥、（初期）飽和状態及び完全飽和の場合について示されている。

まず、乾燥の場合に注目すると、圧力が増すにつれ、透気流量が急激に増え、非線型的に増加している。これは空氣の圧縮性により、圧力が高いほど透気量は大気圧状態において、そのボリュームを増すためである。この傾向は初期飽和状態で透気する場合にも同様となっている。しかし、含水した場合には透気量が極端に小さく、かつ、ある圧力値、つまり、しきい値（threshold pressure）に達しなければ、透気が発生しないことが判る。この点は、岩盤タンクの水封方式による気密性を考える際、極めて大切な新しい知見であろう。また、しきい値が存在しないまでも、岩の透気が含水によって非常に抑制されることがはっきりした。

つぎに、乾燥、湿潤状態における透気性を量的に評価するため、下記の式で固有浸透係数 K を求めた。

$$K = \frac{2Q\mu_a}{A} P_a \frac{1}{P_o^2 - P_i^2} \quad (1)$$

ここに、 A ：試料断面積、 Q ：透気流量、 ℓ ：試料長さ、 μ_a ：空氣の粘性係数、 P_o ： $\ell = 0$ の圧力、 P_i ： $\ell = \ell$ の圧力、 P_a ：平均圧力（圧力分布は直線とならないため、積分平均値をとる）。

浸透流速 v はビンガム流の式を適用すると、

$$v = k_b \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{i_c}{i} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{i_c}{i} \right)^4 \right] i \quad (2)$$

ここに、 i_c ：始動動水勾配、 i ：動水勾配、 k_b ：浸透係数。岩石の透水の場合、 k_b は $10^{-11} \sim 10^{-9} \text{ m/s}$ で適用し得る。

実験的に得られた固有浸透係数 K の値が、試料ごとに表-1に示されている。

むすび

岩石の室内透気実験を通して、本研究で得られた結論は以下の通り。

- ① 圧力勾配の増加により透気量は空氣の圧縮性のため非線型的に増大する。つまり、透気量 Q は圧力の2乗に比例する。この性質は乾燥岩石のみならず飽和岩石にも成り立つ。
- ② 初期飽和岩石の透気量はしきい値の大きいものもあり、乾燥岩石のその5%～30%に減少する。
- ③ 固有浸透係数は、乾燥状態で $10^{-18} \sim 10^{-14} \text{ m}^2$ 、初期飽和状態で $10^{-18} \sim 10^{-16} \text{ m}^2$ であった。
- ④ 岩石の透水に始動動水勾配の存在が認められ、ビンガム流の式が適用し得ることが判った。

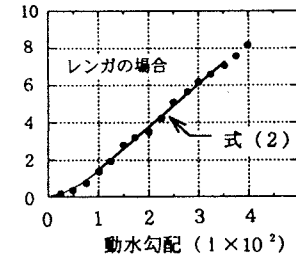
参考文献

- 1) 坂口雄彦、伊藤洋、佐藤邦明、清水昭男：岩石および開口割れ目における透気に関する基礎研究、土木学会論文集、No. 445/Ⅲ-18、PP. 17～25、1992.3
- 2) 佐藤邦明：地下水流動とその解析、土木学会・水理委員会、水工学シリーズ92-A-7、PP. A-7-1～A-7-20、1992.8

表-1 実験ケースと岩石の物性

Samples	Dried Effective porosity λ_d (%)	Dried Intrinsic Permeability K_d (10^{-18} m^2)	Wetted Effective porosity λ_w (%)	k_b (m/s)
Emochi Andesite	12.96	1.120	1.12	-
Shin Komatsu Andesite	3.54	6.184	1.45	3.1×10^{-11}
Izu Tuff	22.43	1.899	2.67	-
Shirakawa Tuff	21.30	69.000	9.79	1.33×10^{-11}
Teisen Granite	0.74	0.178	0.43	-
Inada Granite	0.67	0.127	0.21	-
Brick	26.80	18.61	3.20	1.14×10^{-9}

浸透流速 ($V \times 10^{-7} \text{ m/s}$)



流量 ($Q \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}$)

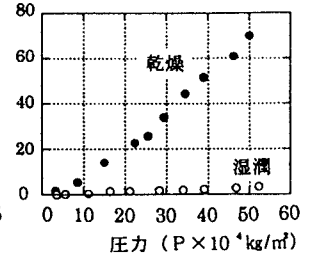


図-2 圧力・動水勾配と透気・透水量の関係