

岩石透気特性と高圧ガス貯蔵における岩盤気密性について

鈴木 健一郎 桑原 徹
平間 邦興

Air Permeability of Rocks and Air Tightness of Unlined Gas-storage Rock Caverns

Kenichirou Suzuki Tohru Kuwahara
Kunioki Hiram

Abstract

Air tightness is required to design the compressed air- or gas-storage rock caverns. In this study, air permeabilities of rocks were estimated by means of an air permeability test and air tightness of the storage cavern was estimated by means of a 2-D two-phase seepage FEM analysis. It was concluded that ① The intrinsic permeabilities of rocks can be describe by their permeabilities to air without considering the gas pressure difference, ② The intrinsic permeabilities were exponentially reduced as the degree of water saturation increased, ③ Air tightness of the compressed air storage caverns is maintained and water inflow to the cavern is controlled by keeping a head of water.

概 要

岩盤内に高圧で空気やガスを貯蔵する場合、岩盤の気密性評価が必要となる。この研究は、岩石の透気特性を実験的に評価し、水封方式による岩盤の気密性を解析的に検討したものである。その結果、以下の知見が得られた。① 岩石の透気特性は固有透過係数により表現すると圧力によらず評価できる。② 固有透過係数は水飽和度に対して指数関数的に減少する。③ 高圧縮ガスの貯蔵空洞では、同程度の地下水位を空洞天端で保持することで気密性が保たれ、湧水量も制御できる。

1. はじめに

近年、ピーク電力需要への対応およびエネルギーの安定供給などの要請を背景として、圧縮空気-ガスタービン発電や圧縮ガスの岩盤内貯蔵などのエネルギー貯蔵技術が注目されている。これらのシステムは地下深部に大空洞を構築し、高圧縮の空気やガスを貯蔵するものであり、岩盤の気密性評価は空洞の安定性評価と並ぶシステム設計上の課題となる。岩盤の気密構造はライニングによるものと水封によるものの2者に大別できる。ライニング方式は不透気材料により透気を許さない構造で、水封方式は自然水封または人工水封により貯蔵空洞内への地下水流を利用して漏気を抑える構造である。水封方式における気密性は従来空洞天端の割れ目の鉛直動水勾配で議論されてきた¹⁾。単一の割れ目が対象となる岩盤はまれで、多孔質媒体として解析的に評価する場合を考えると、気体と液体の二相を同時に扱える二相流解析を実施する必要がある。この時、岩盤の透水性や透気性は岩盤の水飽和度（以下、水飽和度を飽和度と略する）に依存することが知られているが、特に岩盤の透気性に関するデータは非常に少ない。この研究では、飽和度の異なる岩石試料の透気（空気）試験を実施して岩石の透気特

性に関する検討を行った。また、その結果を用いた二相流解析を実施し、仮想岩盤内空洞での空気の貯蔵性能について検討した。

2. 実験試料および実験方法

実験に用いた試料は泥岩および凝灰岩である。両者の間隙率および透水係数を表-1に示す。表中、固有透過係数 K は透水係数 k と次式の関係にあることから、 10°C の水の粘性係数 (dynamic viscosity) $\mu=1.307\times 10^{-3}$ (kg/m/sec)、水の密度 $\rho=999.7$ (kg/m³)、重力加速度 9.8 (m/sec²) として求めた。

$$K=k/(g\nu)=k/(\rho g/\mu) \quad \dots\dots\dots(1)$$

間隙率は泥岩が凝灰岩の3倍、透水係数および固有透過係数はおよそ1/7となっている。岩石の透気係数を把握する場合は水の様に非圧縮性を仮定できないため、坂口ら²⁾の方法により算出した。すなわち透過係数 K は

表-1 試料の物性一覧

	有効間隙率(%)	透水係数(cm/sec)	固有透過係数(m ²)
泥岩	32.4	8.74×10^{-9}	1.20×10^{-17}
凝灰岩	10.2	5.51×10^{-8}	7.34×10^{-17}

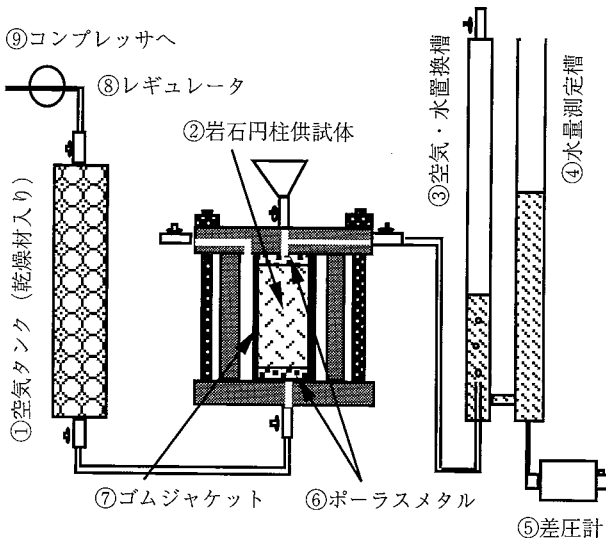


図-1 透気試験装置

$$K = \frac{2Q_n \mu_n p_n}{A} \frac{L}{p_0^2 - p_L^2} \dots\dots\dots(2)$$

より得られる。ここで、 Q_n は透過空気量、 μ_n は空気粘性係数、 p_n は大気圧、 P_0 、 P_L はそれぞれ $z = 0$ および L における境界圧力(ゲージ圧)、 L は試料の長さ、 A は試料の断面積である。

図-1に試験装置を示す。本装置は円柱状岩石試料中を一次元的に空気を透過させ、透過空気が排斥する同体積の水量を差圧計により計測することにより透過気体量の経時変化を調べるものである。拘束圧力は全て3.0 kgf/cm²とし、泥岩の場合は透気圧0.5, 1.0, 1.5 kgf/cm²の3種類で、その差を調べた。凝灰岩の場合は透気圧1.5 kgf/cm²一定とし、両岩について飽和度(Sr)の異なる状態における透過係数の変化を調べた。泥岩における飽和度の調整は、長期透水試験実施後を完全飽和状態として、大気中に放置することで試料の不飽和状態を作成した。透気試験実施後に重量を測定し、その飽和度を算出した。凝灰岩試料は乾燥-湿潤過程、湿潤-乾燥過程での履歴を調べた。乾燥-湿潤過程では飽和度の低い場合には霧吹きにより全表面から水を浸潤させ、飽和度が高い場合には所定の重量になるまでピーカー内で水浸させて飽和度を調整した。湿潤-乾燥過程は泥岩の方法に準じた。

3. 透気実験結果および考察

3.1 泥岩の透気特性

透気量と時間の関係はほぼ線形である。非圧縮性を仮定できる水の場合はDarcy則より動水勾配に透水量が比例するので、透水係数は透水圧と無関係に決定できる。しかし、透気係数の場合、透気圧により透気係数が異なるので、式(2)にしたがって透気係数を計算した。透気圧をパラメータとして、結果を飽和度に対してプロットしたのが図-2(a)である。図中の記号はそれぞれ、○が透気圧0.5 kgf/cm²、●が1.0 kgf/cm²、△が1.5 kgf/cm²である。図より同一飽和度での透気係数は透気

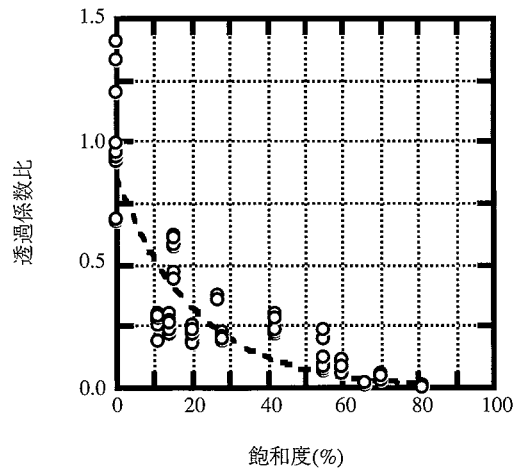
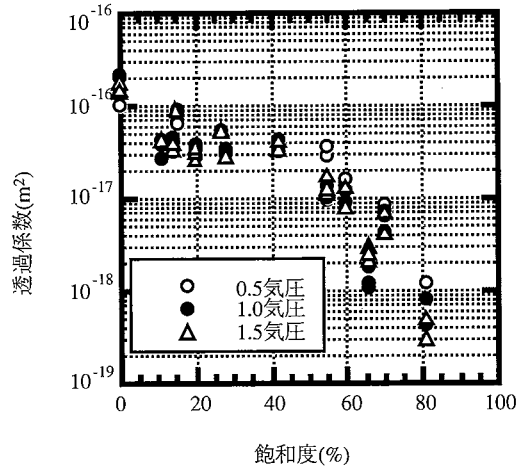


図-2 泥岩の透気特性 (a) 透過係数の飽和度依存性 (b) 透過係数比の飽和度依存性

圧に依存しないことが示された。また、飽和度の増加に伴い透気係数は減少し、80%程度の飽和度では完全乾燥状態での透気係数(固有透気係数)の1/1,000程度まで減少する事がわかる。図-2(b)には完全乾燥状態での平均固有透気係数で無次元化した透気係数比を飽和度に対してプロットした。これらの関係は、指数関数を用いた実験式によると80%の相関性をもって近似された。

3.2 凝灰岩の透気特性

凝灰岩の透気特性についても透気係数により表す。飽和度に対して透気係数をプロットしたのが図-3(a)である。図中の記号はそれぞれ、○、△が1回目および2回目の湿潤状態から乾燥状態への過程での実験結果で、●、▲が逆に乾燥状態から湿潤状態に移行する過程でのそれである。図より透気係数は飽和度の増加に伴い減少し、飽和に近い状態では完全乾燥状態の透気係数の1/100程度まで減少することが確認された。また、今回の実験では乾燥-湿潤、湿潤-乾燥における透気係数の履歴は見られなかった。これは履歴が空気粘性、間隙の幾何学性、岩石基質部の表面活性などに依存するために起こるとすると、透気係数が粘性を含まないために顕著な差となって現れなかったと推定できるが、今後の課題であ

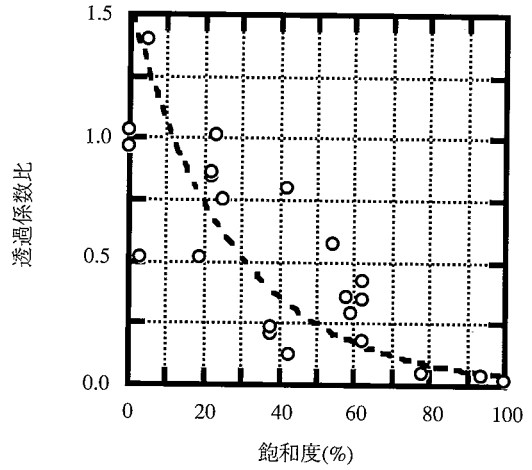
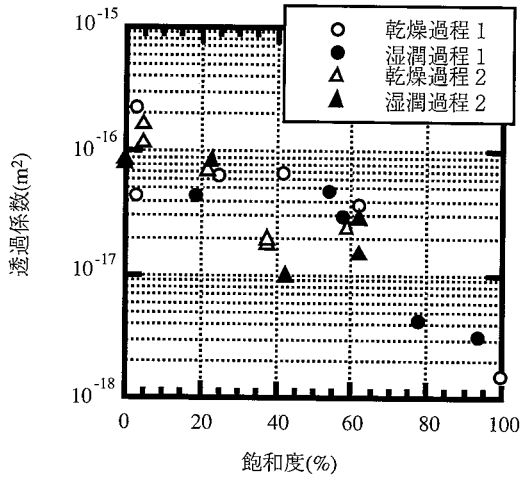


図-3 凝灰岩の透気特性 (a) 透過係数の飽和度依存性 (b) 透過係数比の飽和度依存性

る。図-3 (b) は完全乾燥状態での透過係数で無次元化した透過係数比を飽和度に対してプロットしたものである。本試験に用いた凝灰岩の場合、透過係数比の飽和度に関する減少傾向は泥岩同様、指数関数で近似された。透過係数を完全乾燥状態でのそれで正規化した透過係数比で表すと、岩石によらず図-4 のように指数関数で近似できることが示された。

4. 数値実験

4.1 気液二相流解析の概要

この解析は、同時に2つの浸透流解析を実施するものである。その連成は、2つの流体が1つの要素内に占める体積割合とそれら媒体中の透過抵抗が2者の圧力差の関数となっている点である。したがって、支配式は2つの流体（この研究では、空気と水）それぞれについて

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x_1} \left\{ K_{ij} \lambda_n \left(\frac{\partial P_n}{\partial x_j} + \rho_n g \frac{\partial x_3}{\partial x_j} \right) \right. \\ & \quad \left. + K_{ij} R_s \lambda_w \left(\frac{\partial P_w}{\partial x_j} + \rho_w g \frac{\partial x_3}{\partial x_j} \right) \right\} \\ & = \frac{\partial}{\partial t} \left\{ \phi \left(\frac{S_n}{\beta_n} + \frac{R_s S_w}{\beta_w} \right) \right\} - q_n \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x_1} \left\{ K_{ij} \lambda_w \left(\frac{\partial P_w}{\partial x_j} + \rho_w g \frac{\partial x_3}{\partial x_j} \right) \right. \\ & \quad \left. + K_{ij} R_v \lambda_n \left(\frac{\partial P_n}{\partial x_j} + \rho_n g \frac{\partial x_3}{\partial x_j} \right) \right\} \\ & = \frac{\partial}{\partial t} \left\{ \phi \left(\frac{S_w}{\beta_w} + \frac{R_v S_n}{\beta_n} \right) \right\} - q_w \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(4)$$

と、連成項の

$$P_c = P_n - P_w \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$S_n + S_w = 1 \quad \dots\dots\dots(6)$$

である³⁾。ここに

$$\lambda_n = \frac{K_{rn}}{\mu_n \beta_n}, \quad \lambda_w = \frac{K_{rw}}{\mu_w \beta_w}$$

添字 n, w はそれぞれ空気および水を示す。Pは圧力、 ρ は密度、gは重力加速度、kは前述の媒体に固有の透過係数で、Pcは毛管圧、Sは飽和度、 μ は粘性係数、 β は構成体

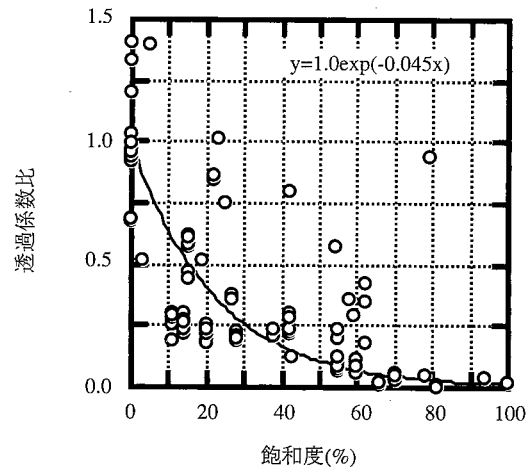


図-4 凝灰岩および泥岩の透過係数比の飽和度依存性

積率、 ϕ は間隙率である。空気の水への溶解率 R_s および水の気化率 R_v も考慮できる。

4.2 解析パラメータの設定

空気の透過係数比、水の透過係数比および毛管圧はそれぞれ飽和度の関数となっている。前述のようにこれらの関数型は岩盤においてはほとんど知られていない。3章で示した実験結果から少なくとも空気の透過係数比と飽和度の関係は得られたと考える。水の透過係数比の飽和度に対する変化は予備的に実施した解析で影響が小さいことが認められたので、ここでは毛管圧と飽和度の関係を図-5に示すように2ケース（ケース1： Δ とケース2： \blacktriangle ）を仮定して計算した。また、二相のそれぞれの圧力はそれぞれの溶解率および気化率を支配する。これら2者についてはここでは一定とする。解析は2次元で、要素分割、境界条件を図-6に示す。空洞天端から地下水位までの距離、すなわち空洞天端での水圧と空洞内の空気の圧力の差を考えることで、空洞の深度を変化させるとほぼ同様の効果が得られることを予備的に調べた。したがって、空洞の気密性の適性深度は地下水位との関係から得られる。

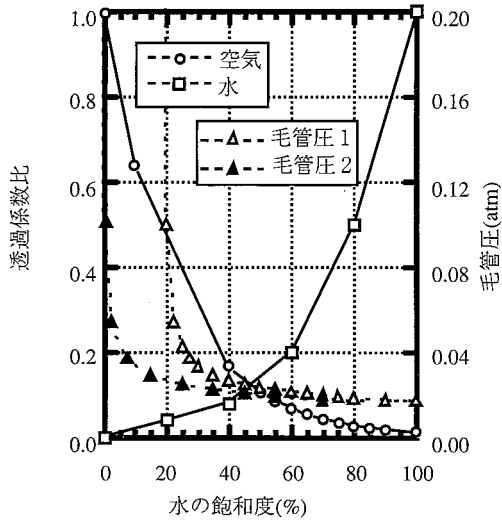


図-5 飽和度と毛管圧, 水および空気の透過係数比

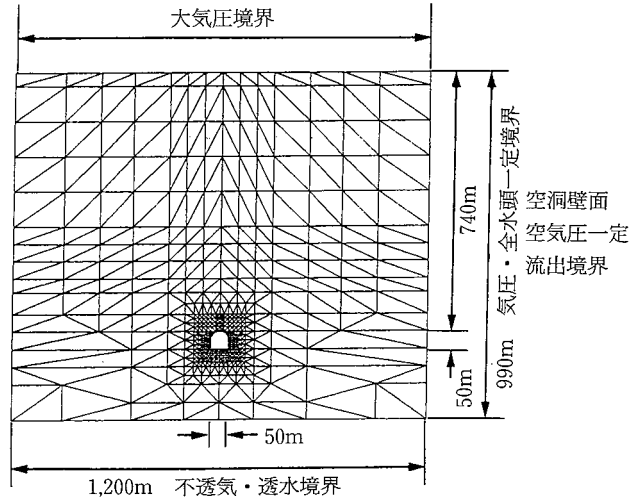


図-6 解析メッシュと境界条件

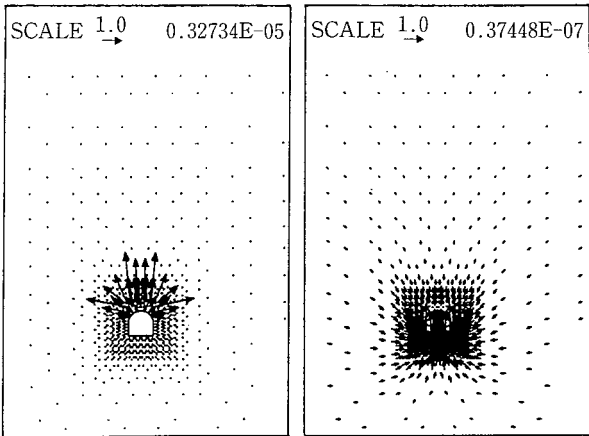


図-7 解析例 (空気および水の流速ベクトル図)

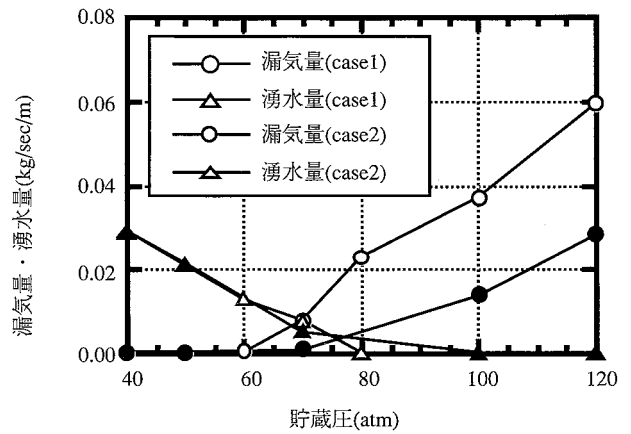


図-8 貯蔵圧に対する湧水量および漏気量

4.3 解析結果

図-6のケース1の条件で貯蔵圧70気圧の場合の解析結果を図-7に示す。空洞天端から漏気(左図)があり、空洞底盤より湧水(右図)が見られる。これらの総量を貯蔵圧に対してプロットしたのが図-8である。図は水圧と貯蔵圧の釣合により漏気が抑えられるが、空洞内への湧水により地下水位が低下し、水圧と貯蔵圧の釣合に問題が生じることを示している。毛管圧と飽和度との関係の異なる影響は湧水量よりも漏気量に顕著に現れる。これらのことから、気密性評価では透過係数の飽和度依存性を把握した上で、計算上飽和度を決定する毛管圧の決定も重要であること、自然水封の場合、地下水の低下も考慮した空洞深度が必要であることが示された。

5. まとめ

岩石の透気試験および二相流解析を実施し、次の様な知見を得た。① 透気係数は圧力により体積が異なるので透過係数として実験結果を整理すると透気圧にかかわらずほぼ一定値が得られる。② 透過係数は媒体の水の飽和度に依存し、それはおよそ指数関数的に変化する。

③ 気体の岩盤貯蔵に当たり、経済的には空洞への湧水量を最少にし、気密性を保持するには気体貯蔵圧相当の水圧を空洞天端で保つ必要がある。岩盤空洞内に高圧で気体を貯蔵するための気密設計法は鉛直動水勾配により規定されている。今回は、大局的に岩盤を捉えたが、空洞近傍の気体と水の流れについて気体の溶解も含めて詳細に捉えていく必要がある。

参考文献

- 1) 電気事業連合会：水封式燃料地下貯蔵施設技術指針，(1970)
- 2) 坂口，伊藤，佐藤，清水：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，III-18，p. 17～25，(1992)
- 3) Meiri：Analysis of compressed air aquifer storage by finite element method, Doctal Thesis of University of Wisconsin-Milwaukee, (1979)
- 4) 中川，駒田：気液二相流解析による岩盤内圧縮空気貯蔵の検討，電力中央研究所報告384045，(1985)