

岩石および開口割れ目における透気に関する基礎研究

坂口雄彦*・伊藤 洋**・佐藤邦明***・清水昭男****

数種の円柱および大型円筒形の岩石供試体を用いた室内透気実験を行い、乾燥および湿潤状態における透気のパラメータを決定した。その結果、本実験で用いた岩石の固有浸透係数は、概ね $1 \times 10^{-19} \sim 1 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ の範囲にあった。また、地下深部を想定した高圧条件下での開口割れ目における漏気条件に関する実験を行い、水圧および割れ目幅と漏気限界ガス圧の関係を得た。

Keywords: gas seepage, permeability, open-crack, gas penetration test, rock sample, underground

1. はじめに

昨今、岩盤地下空間の有効利用が叫ばれ、その利用形態の多様化が進行する中で、既に石油地下備蓄用空洞の建設がなされつつある。それに伴い気化ガスの漏気現象も技術的課題として取り上げられ¹⁾、最近ではガス圧がさらに高くなる LPG (Liquefied Petroleum Gas) 貯蔵²⁾⁻⁴⁾ や圧縮空気貯蔵⁵⁾ などへの対応や、放射性廃棄物処分空洞の URL (Underground Research Laboratory) におけるベンチレーションテスト⁶⁾ などに係わって、岩盤・岩石の透気に係わる現象解明が一層強く望まれるようになってきている。しかしながら、現段階では基本的な岩石自身の気体浸透流に関する基礎的性質を取り扱った研究はきわめて少ない。他方、割れ目系における漏気現象においては、中川・駒田ら^{7), 8)} による地下空洞および岩盤割れ目をモデル化した鉛直スリット模型実験と気液二相解析における空洞からの気泡の上昇防止条件に関する検討、Åberg^{9), 10)} の割れ目内の気泡の上昇・下降条件に関する水理学的検討、および宮下・佐藤¹¹⁾ による割れ目内の気泡そのものの運動をモデル化した理論的・実験的検討などが見られる。しかし、漏気条件の基本となる割れ目入口におけるガス侵入圧力に焦点を当て、地下水圧およびガス圧が実際の地下深部のそれに対応した状況下での実験的検討はなされていない。

本研究では、このような背景から、まず岩石における透気に係わる基本的性質を明らかにするため、本邦で代表的と思われる数種類の岩石を採取し、2種類の透気実

験装置を用いて乾燥状態と飽和湿潤状態の岩石の透気実験を行い、実験的に水理パラメータを決定した。また、多孔媒体中における気体浸透流に係わる理論を提示して透気の取扱いを整理するとともに、透気過程における非定常性についても実験・理論の両面から検討を加えた。つぎに、地下深部を想定した高圧条件下での開口割れ目における漏気条件を実験的に明確にするため、割裂ひびわれを有する人工岩石供試体を用いて、特殊に設計された漏気実験装置により漏気限界圧を測定し、検討を加えた。工学的に有用な知見が得られたのでここにまとめて報告する。

2. 岩石の透気

乾燥および飽和湿潤岩石の透気パラメータを決定すると同時に透気的基本的性質を知るために、円柱状岩石供試体を用いた一次元流と、大型円形岩石供試体を用いた透水実験可能な放射流の2種の異なった透水実験を行った¹²⁾。ここで、一次元流の透水実験も試みたが、浸透流量が小さく測定が困難であった。

(1) 実験装置、方法および岩石試料

a) 一次元流の透気実験 (Exp-I)

Fig.1は円柱状岩石試料による一次元透気流実験を行うための装置である。本装置は、大別して①ガスタンク、②圧力調節バルブ、③圧力計(最大ゲージ圧1.96 MPa)、④目盛り管、⑤岩石試料(直径0.05 m, 高さ0.18~0.20 m)、からなっている。

実験手順はつぎのようである。まず、⑤の岩石試料は乾燥状態とするため110°Cの乾燥炉内に数日間放置した後、硬質エポキシ樹脂を周囲に塗布してセットする。つぎに、①のガスタンクにより試料下面に圧力(199~493 kPa:絶対圧力)を与え、定常状態になるのを待って、透気量および試料内圧力を各々④の目盛り管、③の圧力計により測定する。一方、飽和湿潤岩石は加圧透水

*正会員 (株)熊谷組 エンジニアリング本部 原子力・エネルギー部 (〒162 新宿区津久戸町2-1)

**正会員 工博 (株)熊谷組 エンジニアリング本部 原子力・エネルギー部

***正会員 工博 埼玉大学工学部 助教授

****正会員 理博 (株)熊谷組 エンジニアリング本部副部長

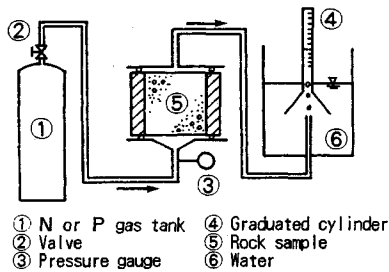


Fig.1 System of experimental apparatus with one-dimensional seepage flow.

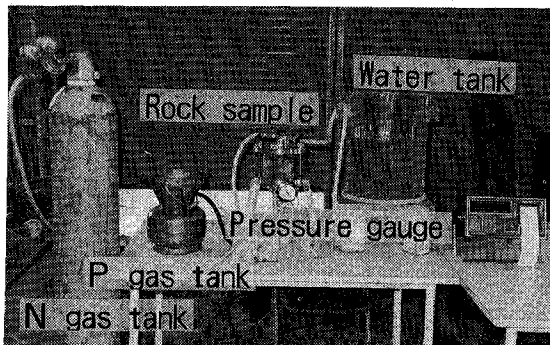


Photo.1 Picture of experimental set up for one-dimensional seepage flow.

後数週間純水（イオン交換水）中に浸漬し、飽和度がほぼ100%となったことを重量測定により確認したものをを用いて、同様の手順で行う。実験はすべて恒温室（19±1°C）内で行われた。

Photo.1は、実験装置の全景と主要各部の名称を示したものである。

b) 軸対称放射流の透気実験 (Exp-II)

Fig.2は円形岩石試料を用いた軸対称放射流による透気流実験装置のシステムを示したものである。本実験では併せて透水実験を行った。

実験装置は、同図(a)に示すように、大別して①エアコンプレッサ（最大圧力はゲージ圧で490 kPa）、②圧力調節バルブ、③圧力計（最大ゲージ圧1.96 MPa）、④目盛り管、⑤岩石試料（直径0.38 m、厚さ0.115 mで直径0.05 mの中心孔があり、上下面は約4 mm厚さの樹脂で被膜してある：図中(b)参照）、⑥水圧ポンプ、⑦ビューレット、よりなっている。

実験手順はつぎのようである。まず、上述 a) Exp-Iと同様に乾燥状態にある⑤の岩石試料をセットし、①のエアコンプレッサにより中心孔に所定圧力 p_0 （絶対圧力で199~591 kPa）の圧縮空気を送り、数分経過した後に④の目盛り管を用いて透気量を計る。つぎに、透水実験として、装置内に水を湛水した後、⑥の水圧ポンプにより所定水圧力 p_0 （ゲージ圧で0.88 MPa）を作用さ

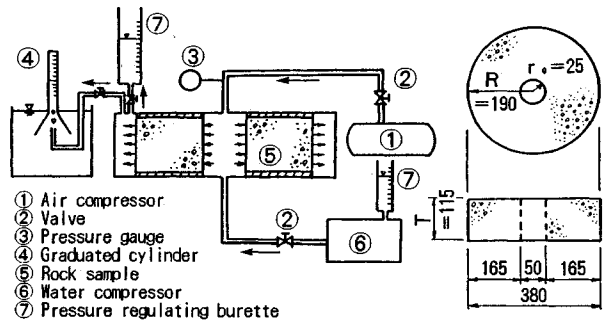


Fig.2 System of experimental apparatus with axisymmetric flow.

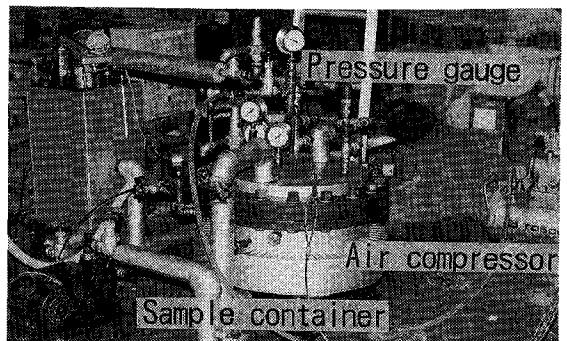


Photo.2 Picture of experimental set up for axisymmetric seepage flow.

せて⑦のビューレットによって注入および浸透流量を測定する。それが終わると再び装置内の水を排水して、長期間の透水により飽和状態にあるとみなせる岩石試料の透気実験を行う。

Photo.2は、実験装置の全景と主要各部の名称を示したものである。

c) 岩石試料とその物性

透気・透水実験には、いずれも本邦より採取された代表的な数種類の岩石を用いた。Exp-Iの一次元流実験には、茨城産花崗岩、白河産安山岩、夾持産砂岩の3種5試料、Exp-IIの軸対称放射流実験には、茨城産花崗岩、江持、白河、大谷産の凝灰岩、および新小松産安山岩の5種5試料を使用した。

Table 1にはそれらの岩石試料の比重、吸水率、空隙率などの物性値を示している。ただし、表中Exp-Iの空隙率およびExp-IIの物性値は、実験試料とほぼ同じ場所で同時に採取された岩石試料片を用いて測定したものの平均値である¹²⁾。

d) 透気気体の物性

本実験では、透気気体として空気、窒素ガス（以後Nガスと称す）、プロパンガス（以後Pガスと称す）を用いるが、空気の物性はなじみ深いのでNガスとPガ

Table 1 Rock sample properties and results of measurements.

(a) Exp-I : Experiments with one-dimensional seepage flow.

Name of rocks	Sample number	Name of gas	Testing conditions						
			Dried			Saturated			
			Pressure difference $\Delta P = P_0 - P_1$ (kPa)	Intrinsic permeability K_a (m)	Porosity (%)	Pressure difference $\Delta P = P_0 - P_1$ (kPa)	Initial intrinsic permeability K_{a0} (m)	Final intrinsic permeability K_{a1} (m)	Final effective porosity λ_{ef} (%)
Andesite (Shirakawa)	A-1-1	N ₂	98.1 ~ 490.3	1.668×10^{-15}	23.1	784.5	2.762×10^{-17}	7.403×10^{-16}	6.9
			490.3			490.3	3.349×10^{-17}	5.141×10^{-16}	5.8
		LPG	98.1 ~ 882.5	1.531×10^{-15}		196.1	9.650×10^{-18}	1.236×10^{-16}	3.3
			784.5	8.116×10^{-17}		784.5	8.116×10^{-17}		
	A-1-2	N ₂	98.1 ~ 490.3	2.068×10^{-15}		784.5	2.792×10^{-17}	7.363×10^{-16}	6.2
			490.3			490.3	3.104×10^{-17}	9.020×10^{-16}	6.2
		LPG	833.5	1.982×10^{-15}		196.1	1.911×10^{-17}	3.460×10^{-16}	4.5
			784.5	5.935×10^{-16}		784.5	5.935×10^{-16}		
Granite (Ibaragi)	G-1-1	N ₂	490.3	1.417×10^{-18}	1.250	These samples' permeabilities were too small to measure.			
			LPG	882.5					
	G-1-2	N ₂	490.3	1.417×10^{-18}					
			LPG	882.5					
Sand stone (Samachi)	S-1-1	N ₂	294.2 ~ 490.3	6.411×10^{-17}	22.3				
			LPG	833.5		4.337×10^{-17}			

(b) Exp-II : Experiments with axisymmetric seepage flow.

Name of rocks	Sample number	Density (Mg/m ³)	Water absorbing capacity (%)	Porosity (%)	Gas seepage		Water seepage	
					Testing condition	Intrinsic permeability K_a (m)	Permeability k_w (m/s)	Intrinsic permeability K_w (m)
Granite (Ibaragi)	G-II-1	2.637	0.0498	0.131	Dried	5.62×10^{-18}	7.30×10^{-9}	7.49×10^{-16}
					Saturated	1.09×10^{-18}		
Tuff (Enochi)	T-II-1	2.525	7.90	17.8	Dried	1.64×10^{-15}	8.43×10^{-9}	8.62×10^{-16}
					Saturated	5.46×10^{-17}		
Tuff (Shirakawa)	T-II-2	2.594	8.12	18.6	Dried	3.35×10^{-15}	1.59×10^{-8}	1.63×10^{-15}
					Saturated	3.14×10^{-16}		
Tuff (Ohya)	T-II-3	2.504	13.25	27.7	Dried	1.57×10^{-15}	1.48×10^{-9}	1.52×10^{-16}
					Saturated	2.43×10^{-17}		
Andesite (Shinkomatsu)	A-II-1	2.783	0.749	2.06	Dried	3.41×10^{-17}	6.70×10^{-10}	6.85×10^{-17}
					Saturated	8.34×10^{-18}		

スの物性について述べておく。粘性係数は、N ガス、P ガス各々 $1.74 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 、 $7.88 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 、(15°C) で圧力には依存しない¹³⁾。また、密度は、 1.20 kg/m^3 、 2.01 kg/m^3 (15°C) である。また、液状プロパンの蒸気圧は 15°C で 733 kPa (絶対圧力) となる。

(2) 実験結果とその考察

数種類の岩石を用いて、上述した手順で透気実験および透水実験を行うが、その前に岩盤における透気の基本形態の概念を示しておく。Fig.3 は、岩盤中の間隙水の状態を (a) 乾燥状態、(b) 不飽和湿潤状態 (含水比小)、(c) 不飽和湿潤状態 (含水比大) に分けて、透気形態を模式的に示したものである。(a) および (b) ではガスは連続的に浸透するが、(c) では気泡状となって浮力により上方へ移行する可能性がある。しかしながら、かなり抵抗が大きく透気にくいと考えられる。ここでは、初めに同図の (a)、(b) に示したような連続した間隙を有する多孔媒体中の気体浸透流の基礎理論を示し、流体力学的取扱いを明確にした上で、代表的な結果を整理して、その基本的性質を吟味する。

a) 気体浸透流の基礎式と解

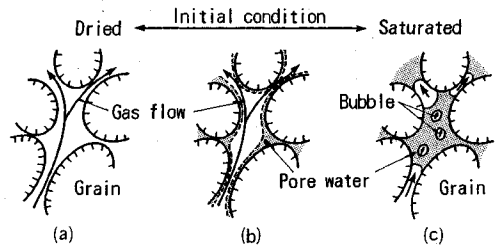


Fig. 3 Fundamental concept of gas seepage mechanism in rock.

気体浸透の場合の特徴はその圧縮性にあり、この点を基礎理論の上でも考慮してその現象を究明する必要がある。ここでは Fig.3 における (a)、(b) の場合を想定して気体浸透流に係わる基礎式を提示すると共に、実験結果の評価に必要な定常解を中心に示すこととする。Fig.3 の (a)、(b) に対応した岩石を含む多孔媒体中における気体浸透の基礎方程式は、①連続方程式、②運動方程式 (ダルシー則)、③状態方程式から結果的につぎのように書くことができる¹⁴⁾。

$$\text{div}(\text{grad } P) - \frac{\lambda \mu_g}{K\beta(1+n)} \left(\beta \frac{1+n}{n} \right)^{1/(1+n)}$$

$$p^{-1/(1+n)} \cdot \frac{\partial p}{\partial t} = 0 \dots \dots \dots (1)$$

$$p = \frac{n}{\beta(1+n)} p^{1+1/n}, \quad n = \frac{c_p}{c_v}$$

ここに、 λ ：空隙率、 K ：固有浸透係数、 μ_g ：気体の粘性係数、 p ：絶対圧力、 n ：断熱指数、 c_p ：定圧比熱、 c_v ：定積比熱、 β ：定数であって、空気のような二原子分子気体での等温状態では $n=1.0$ となる¹⁵⁾。

つぎに、岩石内一次元流と軸対称放射流において基礎式(1)を本実験に適用することを考え、等温状態での一次元 (z 軸方向) および軸対称 (r 軸方向) 座標系で表せばつぎのようになる。また、パラメータ算定に必要な定常解を示す。

1) 一次元流における基礎式、およびその定常解式(1)から $n=1.0$ (等温変化) とおいて、一次元流の基礎式と定常解はつぎのようになる^{12),14)}。

$$\frac{\partial^2 p^2}{\partial z^2} - \frac{2\lambda\mu_g}{K} \frac{\partial p}{\partial t} = 0 : \text{基礎式} \dots \dots \dots (2)$$

$$K = \frac{2Q_g\mu_g p_a}{A} \frac{l}{p_0^2 - p_l^2} : \text{定常解} \dots \dots \dots (3)$$

$$p^2 = \frac{z}{l}(p_l^2 - p_0^2) + p_0^2 : \text{定常圧力分布} \dots \dots \dots (4)$$

ここに、 Q_g ：大気圧 (1 atm = 101 kPa) 下における透気体積、 p_a ：大気圧、 l ：試料の長さ、 A ：試料の断面積、 p_0, p_l ：各々 $z=0, l$ における境界圧力、 z ：座標である。

ii) 軸対称放射流における基礎式、およびその定常解

式(1)を円筒座標系に変換すると基礎式とその定常解はつぎのようになる^{12),14)}。

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(r\partial p^2/\partial r)}{\partial r} - \frac{2\lambda\mu_g}{K} \frac{\partial p}{\partial t} = 0 : \text{基礎式} \dots \dots \dots (5)$$

$$K = \frac{Q_g\mu_g p_a \ln(R/r_0)}{\pi T(p_0^2 - p_R^2)} : \text{定常解} \dots \dots \dots (6)$$

$$p^2 = (p_R^2 - p_0^2) \frac{\ln(r/r_0)}{\ln(R/r_0)} + p_0^2 : \text{定常圧力分布} \dots \dots \dots (7)$$

ここに、 R ：試料の半径、 r_0 ：試料中心孔の半径、 p_0, p_R ： $r=r_0, R$ における境界圧力、 T ：試料の厚さ、 r ：半径である。

つぎに、透水係数 k_w に対応する透気係数 k_g およびそれに係わる支配パラメータをはっきりさせておくため、両者の関係に触れておくと、通常これらの係数は粘性流体であれば、

$$k = \frac{K\sigma g}{\mu} \dots \dots \dots (8)$$

と定義される。ここに、 g ：重力加速度である。水の場合は、物性 (ρ_w, μ_w) の圧力依存性が小さいので、取扱い上便利なダルシーの透水係数 k_w を専ら用いている。しかし、気体の場合は圧縮性が大きく μ_g の圧力依存性

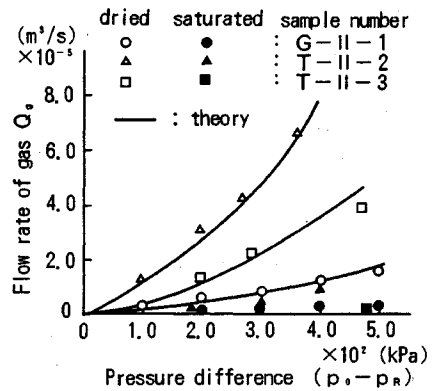


Fig.4 Relationship between flow rate of gas (Q_g) and pressure difference ($p_0 - p_R$) for axisymmetric flow.

はないが、密度 ρ_g が圧力の大きさによって変化するため、同一境界条件・媒体中でさえも透気係数 k_g は変わることになる。したがって、透気に際しては粘性流体の性質、圧力レベルに影響を受けない固有浸透係数 K が支配パラメータとなる。

b) 定常状態における透気的基本的性質

乾燥および飽和湿潤岩石における定常状態での透気と透水に係わる定数を Table 1 にまとめて示す^{12),16)}。透気現象における支配パラメータは、上述の基礎理論で示したように流体の性質によらない固有浸透係数 K である。同表では、Exp-I における N ガスと P ガス、Exp-II における空気と水の固有浸透係数は各々岩石試料ごとに概ね一致しており、 $10^{-19} \sim 10^{-15} \text{ m}^2$ の範囲にある。まず、Fig.4 に岩石中の透気的基本的性質である透気量 Q_g と圧力差 ($p_0 - p_R$) の関係を Exp-II の軸対称放射流について示す。同図には、自然乾燥と飽和状態 (初期) のそれを同時に示している。固有浸透係数 K は、これらの実験値と理論式(6)の $(p_0^2 - p_R^2) \sim Q_g$ の関係に代入して求めることができる。図中の実線は、得られた K を用いた理論曲線である。これより、透気量は圧力差が増大するにつれて大きくなるが、実験的にも非線形傾向が確認できる。また、飽和岩石の透気量は乾燥状態のそれに比べて著しく小さくなっていることが認められる。飽和岩石における気体浸透は、初期に飽和状態にある岩石試料中の一部の空隙水を排除しつつ新たな連続した透気空隙を形成して起こる結果と考えられるが、このときの有効空隙率は乾燥状態でのそれとは大きく異なる。つまり、気体浸透流は岩石の初期の含水状態によって変わってくることを示唆しているものと言える。そこでこういった性質を他の岩石について確認するため、Table 1 の Exp-I、(安山岩) における乾燥状態と飽和状態の固有浸透係数 K に着目する。同表には、乾燥状態における固有浸透係数 K_d 、飽和状態における初期と定常状態時 (ほぼ安定した状態になるまで長時間透気させた最終

的な状態)でのそれ K_{s0} , K_{st} , および乾燥状態の空隙率 λ_d , 初期に飽和状態で定常状態に到達した時の有効空隙率 λ_{st} を示している. λ_{st} は, Fig.3 の (b) の状態で透気によって間隙水を排除して形成された有効流路であり, 流出水分量率でもある. ここで, K_{s0} は漏気開始時刻 $t = t_1$ から $t = 2t_1$ までの平均値をとり, 他方, 定常状態での有効空隙率 λ_{st} は, $\lambda_{st} = (W_{s0} - W_{st}) / \rho_w V$ (ここに, W_{s0} : 初期の飽和岩石重量, W_{st} : 定常状態時の湿潤岩石重量, ρ_w : 水の密度, V : 供試体の体積) により算定する. これより, K_{s0} は各ケース共 K_d の 1/100 程度の値となり, 定常状態時の K_{st} では 1/10 程度まで増大するが K_d より小さい値しかもたないことがわかる. そこで, こういった空隙率と固有浸透係数の相対関係を明確にするため, 乾燥状態と湿潤状態の固有浸透係数の比 K_{st}/K_d と空隙率の比 λ_{st}/λ_d の関係を整理したものが Fig.5 である. 両者にはかなり強い相関が認められ, 最小二乗法により相互の関係式を求めると次式ようになる. ただし, 式 (9) は今回用いた安山岩 (Table 1 の Exp-I) において適用される. また, 同図には圧力レベルの異なるものを同時に示しているが, その影響は認められない.

$$\lambda_{st}/\lambda_d = 0.079 \ln(K_{st}/K_d) + 0.343 \dots\dots\dots (9)$$

c) 非定常状態における透気の基本的性質

乾燥岩石における透気の最終的な圧力分布については, 著者らが過去に行った実験結果より, それが非線形性を示し, 理論解ともよく一致することが実験的に確認されている^{17), 18)}. したがって, ここでは次元流の場合を例にとり, 流体の違いによる現象の差異に焦点を当て, 実験によって得られた透気定数を用いて岩石媒体内の圧力変化を理論的に算出し考察を加える. 一方, 飽和湿潤岩石におけるそれについては, 間隙水の経時的な排除過程に焦点を当てて検討する¹⁶⁾.

Fig.6 は乾燥岩石試料 S-I-1 の場合について, 試料内の圧力分布の経時変化を示したものである. ここでは, 基礎式 (2) を差分法によって解析する. 図中実線は N ガス, 一点鎖線は P ガスのそれぞれ透気圧力分布を表し, 破線は参考のため比貯留係数 $S_s = 4.8 \times 10^{-7} 1/m$ としたときの透水の場合のそれを示している. この場合の初期条件は $p = p_i$ ($0 \leq z \leq l, t = 0$), 境界条件は $p_0 = 591 \text{ kPa}$, $p_l = 101 \text{ kPa}$ ($t > 0$) ととっている. まず, N ガスと P ガスの場合を比較すると, 圧力分布の形状は同様の傾向となっているが, 圧力上昇速度は粘性の小さい P ガスの方が若干速くなっている. 一方, 透気と透水の場合を比較すると, 圧力上昇速度は透気の方がかなり遅いが, 定常状態では透水のそれより全体に大きくなっている. 圧力上昇過程における分布形状は, 透水の場合には全体にやや上に凸となるが, 透気のそれでは p_0 注入加圧境界付近でやや下に膨らむ傾向となり, そ

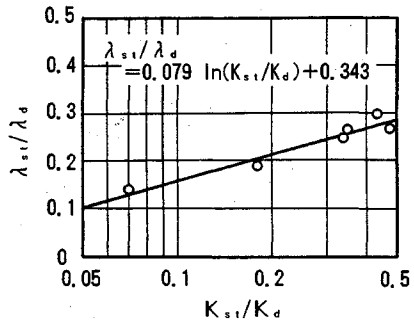


Fig.5 Relationship between λ_{st}/λ_d and K_{st}/K_d .

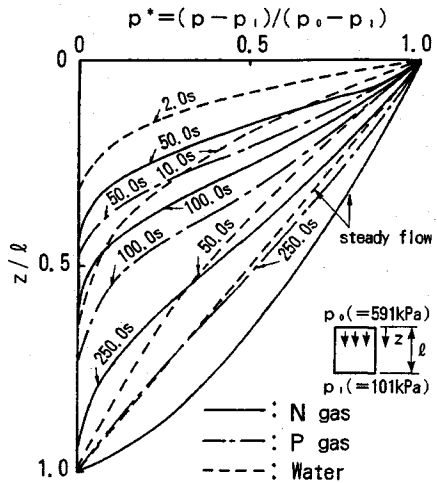
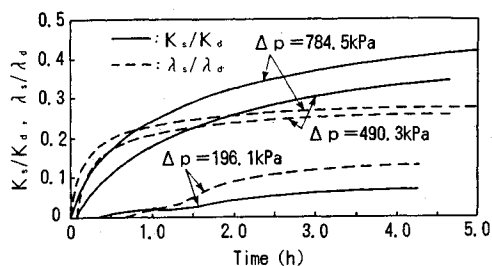
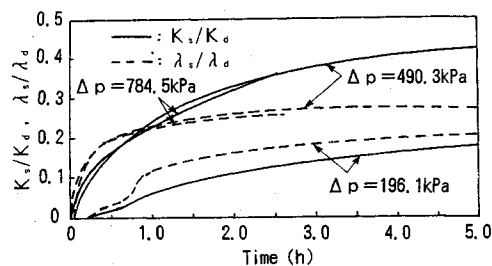


Fig.6 Unsteady pressure distribution of non-dimensional pressure p^* in the case of S-I-1 for Exp-I.

れより離れてくると逆に上に凸の形状となって推移している. また, 透気現象では高圧力域の圧力上昇が低圧力域のそれより速く, 圧縮性流体としての特徴が現れている. つぎに Table 1(a) の 2 種の安山岩 A-I-1, 2 を用い, 飽和湿潤状態を初期条件とし, N ガスの圧力差を $\Delta p = 784.5, 490.3, 196.1 \text{ kPa}$ と 3 ケース変えた計 6 ケースの非定常実験を行う. ただし, ここでは透気量がきわめて小さいと考えられる Fig.3(c) の状態は測定困難と判断し, 連続流路が形成され透気量が增大していく同図の (b) の状態を念頭に置くこととする. Fig.7 は, 実験で得られる透気量 Q_g の経時的測定結果から式 (3) より求めた見掛けの K_s を用いた固有浸透係数比 K_s/K_d , および式 (9) が全ての時刻歴において成立するとして計算した λ_s/λ_d の経時変化を示したものである. 飽和岩石における非定常過程は乾燥岩石のそれが数分オーダに対して, 数時間オーダとかなりの時間を要することとなる. K_s/K_d は, 経時的に上昇するが圧力差が大きいほど上昇速度は大きくなっている. 一方, λ_s/λ_d は初期に急激に増大するがその後は漸増し, K_s/K_d に比べて早期に定常状態に到ることが伺える. これは, 加圧された

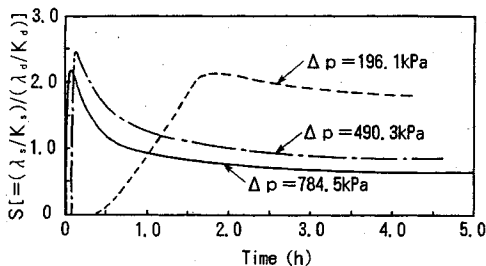


(a)A-1-1

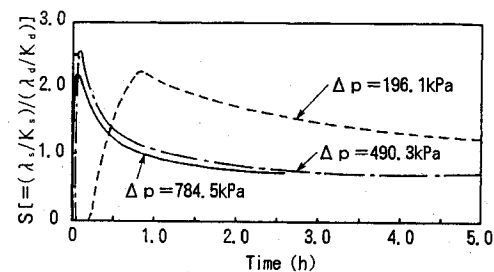


(b)A-1-2

Fig.7 K_s/K_d and λ_s/λ_d with time for different parameter Δp .



(a)A-1-1



(b)A-1-2

Fig.8 $S = (\lambda_s/K_s)/(\lambda_d/K_d)$ with time for different parameter Δp .

ガスは間隙水を排除し比較的早期に有効流路を形成するが、ガスの浸透そのものはその圧縮性のために圧力伝播が遅れるものと解釈できる。境界圧力が小さい $\Delta p = 196.1 \text{ kPa}$ の場合には実験終了時においても流路形成過程の途上であり、非定常過程は著しく遅くなっていると考えられる。

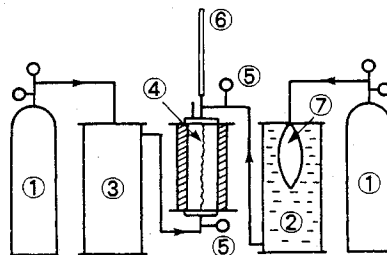
つぎに、Fig.8は圧力伝播時間に係わるパラメータとして基礎式(2)の時間変化項に係わる λ_s/K_s を λ_d/K_d で除した無次元量 $S = (\lambda_s/K_s)/(\lambda_d/K_d)$ の経時変化を示したものである。この S が大きいと非定常過程の進行は遅いことになり、 $S = 1.0$ は見掛け上乾燥状態におけるそれに等しいことになる。同図より、初期の S は急激に上昇ピークとなり、その後指数関数的に減少して一定値に漸近して行くことがわかる。このごく初期の上昇過程では前述の Fig.3 の (c) の状態であって、新たに有効流路を形成し、経時的に (b) の状態に推移していくものと考えられる。また、圧力差が小さいと初期の有効流路形成に時間がかかってピークが遅れてくることになる。結局、湿潤岩石における非定常透気過程は全体に乾燥のそれより遅くなるが、特に初期において著しいことになる。

3. 開口割れ目における漏気条件

地下深部を想定した加圧条件下で開口割れ目における漏気条件を調べるため、特殊に設計された漏気実験装置を用いて検討を行う¹⁹⁾。

(1) 実験装置と方法

実験装置の概略を Fig.9 に示す。本装置は、大別して



- ① N gas tank
- ② Water tank
- ③ Cushion tank
- ④ Sample
- ⑤ Pressure gauge
- ⑥ Transparent cylinder
- ⑦ Rubber balloon

Fig.9 System of experimental apparatus with gas seepage in open-crack.

①窒素ガスタンク（水圧用および漏気圧用）、②加圧タンク、③逆流防止タンク、④人工岩石供試体（直径0.1 m、高さ0.135～0.184 m、周囲をエポキシ樹脂により止水）、⑤圧力計（水圧用および漏気圧用、最大ゲージ圧1.96 MPa）、⑥漏気確認用透明管、⑦ゴムバルーン、からなっている。

実験手順は次のようである。まず、割裂割れ目を発生させた④の人工岩石供試体を十分に飽和させた後、装置にセットする。次に、②の加圧タンク内に設置された⑦のゴムバルーンに①の窒素ガスタンクからガスを送り込むことにより供試体上面に所定の水圧（0.05～0.5 MPa）を与える。供試体下面から窒素ガス圧を供試体上部に設けた⑥の漏気確認用透明管への気泡の有無を確認しつつ段階的に上げる。割れ目からの漏気圧力は、こ

Table 1 Properties of rock samples.

Sample No.	Sample length l (mm)	Crack width w (mm)	Sample No.	Sample length l (mm)	Crack width w (mm)
1	147	0.21	13	178	0.056
2	151	0.043	14	172	0.47
3	164	0.05	15	171	0.056
4	166	0.02	16	135	0.24
5	174	0.044	17	136	0.084
6	162	0.022	18	153	0.087
7	169	0.016	19	158	0.03
8	174	0.081	20	146	0.22
9	184	0.04	21	168	0.05
10	169	0.06	22	150	0.10
11	180	0.37	23	178	0.325
12	153	0.32	—	—	—

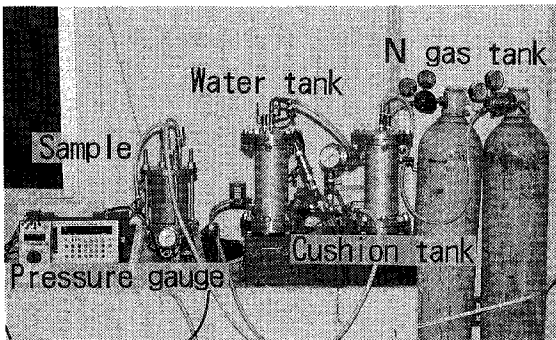


Photo.3 Picture of experimental apparatus with gas seepage in open-crack.

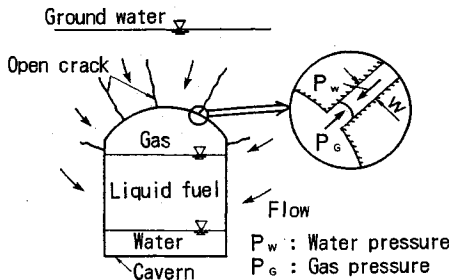


Fig.10 Concept of gas leakage mechanism around the cavern.

の⑥の透明管において気泡が認められたときの⑤の圧力計の水圧 P_w およびガス圧 P_c を測定する。実験に用いる供試体は 23 体であり、各々の供試体について割れ目幅の測定を行う。測定は、クラックルーペにより各供試体の上下面各々 10 点について行い、それらの平均値を割れ目幅 w とする。Table 2 には、各供試体の割れ目幅 w と供試体長さ l を併せて示している。Photo.3 は、実験装置の全景と主要各部の名称を示したものである。

(2) 実験結果とその考察

岩盤空洞壁面における漏気防止条件は、原理的には Fig.10 に示したように空洞天端付近の水圧 (実験の P_w に対応) と割れ目入口付近の気体表面張力圧 (P_c) と

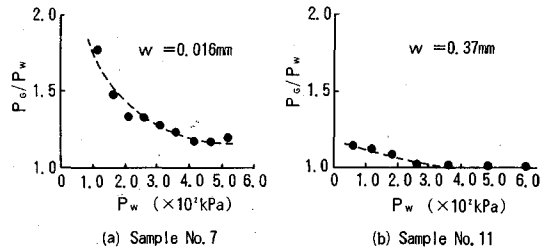


Fig.11 Relationship between P_c/P_w and P_w for sample No.7 and No.11.

ガス圧 (P_c) のバランスによって単純に決まることになる^{7),20),21)}。つまり、漏気防止条件は三者の圧力バランスから以下のように書けることになる。

$$1 + \frac{P_c}{P_w} \geq \frac{P_c}{P_w}, \quad P_c = C \frac{\sigma}{w} \dots \dots \dots (10)$$

ここに、 C : 補正係数, σ : 表面張力, w : 割れ目幅, である。ここで、補正係数 C には、割れ目内に侵入したガス面の曲率 r と平均割れ目幅 w の差の補正が含まれる。

ここでは、漏気防止条件は同式に帰着すると考え、検討を進めることとする。

まず、代表的な実験結果として、圧力レベルを代表する値として水圧 P_w をとり、 P_c/P_w との関係の一例を示した Fig.11 に注目する。図中の (a) は割れ目幅が比較的小さい供試体 No.7 ($w=0.016$ mm) の、(b) はそれのやや大きい No.11 ($w=0.37$ mm) の場合である。いずれの場合にも、 P_c/P_w は水圧 P_w が大きくなるほど減少し、また割れ目幅の小さい (a) の方が全体に P_c/P_w が大きいことがわかる。これは式 (10) の性質から、同一条件下では P_c はほぼ一定であると考えられるので、 P_w が増大すれば P_c は相対的に小さくなって P_c/P_w が減少することになり、また、 P_c は割れ目幅 w に逆比例するので w の小さい方が P_c が大きくなり、 P_c/P_w が増大することが明確に伺える。

つぎに、Fig.12 は 23 体の供試体について行った全てのケースにおける P_w と P_c/P_w の結果をプロットしたものである。全体的に見ても Fig.11 と同様に水圧 P_w が大きくなるほど安全度 P_c/P_w は小さくなる傾向にあるが、その最小値を結んだ線 (図中破線) に注目するとほぼ $P_w=3.0 \times 10^2$ kPa 付近で $P_c/P_w=1.0$ となり、割れ目幅を無視すれば毛管圧力 P_c があまり期待できないことが認められる。ただ、 P_c/P_w が 1 を下回ることはなく、本実験の割れ目幅 w の範囲 (0.016~0.47 mm) では漏気防止条件式 (10) が満足されていることがわかる。参考までに、今回の実験における補正係数 C を求めてみると、20°C における水の表面張力を $\sigma=72.75 \times 10^{-3}$ N/m、 $P_c=P_c-P_w$ とおけば、概ね $C=10^1 \sim 10^2$ (無次元量) 程度の値となった。ここで、 C 値は上述した

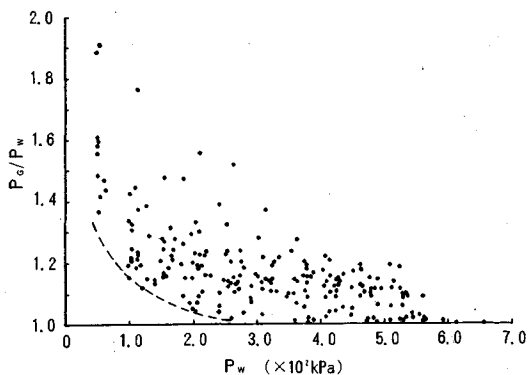


Fig.12 Relationship between P_G/P_W and P_W .

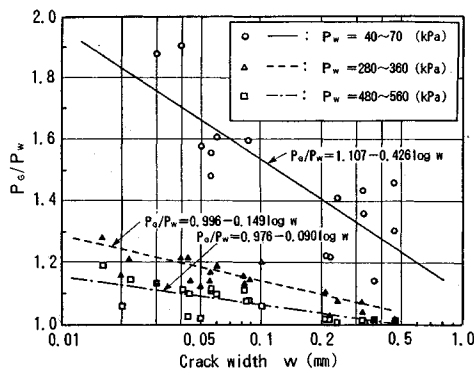


Fig.13 Relationship between P_G/P_W and crack width w as a parameter of P_W .

ように実際のガス面の曲率 r と割れ目幅との補正ということになるが、完全な平滑管モデルであると $C=4$ 程度となるが²²⁾、本実験供試体では粗度が大きく空隙の空間分布のパラツキが大きいこと、また、表面平均割れ目幅は透水係数との比較においても大きめの値となること²³⁾などを考え合わせると十分納得できる値と考えられる。

つぎに、こういった漏気に対する P_G/P_W と割れ目幅 w の関係を各水圧レベルごとに整理したものが Fig.13 である。同図において、 P_W が 40~70, 280~360, 480~560 kPa の場合を各々○, △, □で表している。また、 $P_G/P_W \sim w$ の近似式を最小自乗法により求め、各々実線、破線、一点鎖線で示している。同図より、水圧レベル P_W とひびわれ幅 w から漏気に対する P_G/P_W の値を得ることができる。従来の研究では、Aberg の「空洞壁面付近の鉛直動水勾配が 1 以上であること」との条件⁹⁾が専ら用いられてきたが、中川らの提案⁷⁾では、毛管圧力の影響を示唆し、 $P_G < P_W$ を提示している。

結局、本実験においては、圧力レベルとひびわれ幅といったパラメータを加味して漏気を生じた条件を示したが、全体的に見てみるとすべて $P_G > P_W$ 、($P_G/P_W \geq 1$) となっており、視点は逆であるが、中川らの提案した漏気防止条件 ($P_G < P_W$) と対応した結果となっている。

4. 結 論

岩盤内への LPG や圧縮空気といった気体エネルギーの貯蔵に対する技術的対応・評価法の確立への社会的ニーズが高まりつつある昨今、岩石自体の透気に関する基本的性質は土木の分野ではほとんど明らかにされておらず、一方、割れ目系における漏気現象についても実験データが少なく、十分な基礎的検討がなされていなかったように思う。

本論では、乾燥・飽和湿潤状態における各種岩石の水理パラメータを実験的に決定し、透気に関する理論的検討を行った。さらに、加圧条件下における開口割れ目に

おける漏気現象を実験的に検討し、水圧、割れ目幅と漏気限界圧の関係を求めた。本論で得られた結論は以下のよう要約される。

- (1) 本実験で用いた岩石の固有浸透係数は、概ね $1 \times 10^{-19} \sim 1 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ の範囲にあった。
- (2) 透気量と圧力の関係は非線形であり、圧力差が大きくなるとその傾向が顕著になることが実験的にも認められた。
- (3) 定常圧力分布は透水のそれに比べて全体に大きく凸型となり、また圧力差の大きさによっても変わってくるのがわかった。
- (4) 湿潤岩石における非定常透気過程は間隙水の排除過程が主であり、全体に乾燥のそれより遅くなるが、特に初期において著しい。
- (5) 閉口割れ目における漏気条件を P_G/P_W (P_G : ガス圧, P_W : 水圧) で表し、水圧レベル P_W と割れ目幅 w との関係で示した。
- (6) P_G/P_W は地下水圧および割れ目幅の増大によって小さくなるが、本実験の範囲 (P_W : 40~660 kPa, w : 0.016~0.47 mm) では 1 を下回らないことが実験的に確認できた。

参 考 文 献

- 1) 佐藤邦明：燃料地下備蓄の現状とその水封・気密機能，土木学会誌，pp.48~54, 1985.9.
- 2) Lindblom, U.E.: The development of hydrocarbon storage in hard rock cavern, Proc. Int. Conf. on Storage of Gases in Rock Caverns, Trondheim, pp.15~30, 1989.6.
- 3) Palmqvist, K.: Design and construction of an LPG rock cavern near by an existing LPG rock storage, Proc. Int. Conf. on Storage of Gases in Rock Caverns, Trondheim, pp.307~315, 1989.6.
- 4) 日本 LP ガス協会技術保安委員会タンク部会：LP ガス岩盤地下貯蔵に関する基礎技術調査報告書，日本 LP ガス協会，1986.6.
- 5) 林正夫：水没工法による深部軟岩でのドーム空間建造に

- 関する構想研究—都市型 CAES の実現を目指して—, 土木学会論文集, 第 418 号/III-13, pp. 17~44, 1990. 6.
- 6) Brewitz, W. et al. : The ventilation test, Nagra bulletin, Special Edition, pp. 46~49, 1988.
- 7) 中川加明一郎ほか: 岩盤内圧縮空気貯蔵空洞からの漏気防止条件, 土木学会論文集, 第 370 号/III-5, pp. 233~241, 1986. 6.
- 8) 駒田広也ほか: 水封式燃料地下貯蔵用空洞周辺岩盤の浸透流に関する検討, 土木学会論文報告集, 第 300 号, pp. 69~80, 1984. 12.
- 9) Åberg, B. : Prevention of gas leakage from unlined reservoirs in rock, Symp. on storage in excavated rock caverns, Rock store 77, Stockholm, Sweden, pp. 399~414, 1977.
- 10) Åberg, B. : Pressure distribution around stationary ary gas bubbles in water-saturated rock fractures Proc. Int. Conf. on Storage of Gases in Rock Caverns, Trondheim, pp. 77~86, 1989. 6.
- 11) 宮下国一郎・佐藤邦明: 岩盤節理モデル内の気液二相流に関する実験的研究, 土質工学会論文報告集, Vol. 24, No. 4, pp. 155~162, 1984. 12.
- 12) 佐藤邦明ほか: 岩石における LPG の透気に関する基礎実験, 第 7 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp. 253~258, 1987. 12.
- 13) 国立天文台編: 理科年表, p. 448, 丸善, 1988.
- 14) Aravin, V.I. et al. : Theory of fluid flow in undeformable porous media, Israel Program for Scientific Translation, Jerusalem, pp. 54~97, 1965.
- 15) 今井功: 流体力学, pp. 15~18, 岩波全書, 1983.
- 16) 伊藤洋ほか: 湿潤岩石内における透気の非正常性について, 第 23 回土質工学研究発表会講演集, pp. 1123~1124, 1988. 6.
- 17) 伊藤洋ほか: 岩石内の透気における非正常現象について, 第 21 回土質工学研究発表会講演集, pp. 997~998, 1986. 6.
- 18) 佐藤邦明ほか: 岩石の透気に関する基礎的研究, 第 18 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp. 396~400, 1986. 2.
- 19) 伊藤洋ほか: 加圧条件下における閉口割れ目内の漏気に関する基礎的実験, 第 24 回土質工学研究発表会講演集, pp. 1119~1120, 1989. 6.
- 20) 佐藤邦明: 液化ガスの岩盤備蓄における水封・気密機能解析へのアプローチ, 第 20 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp. 314~318, 1988. 2.
- 21) 土壌物理研究会編: 土の物理学, pp. 217~219, 森北出版, 1979.
- 22) 例えば, 本間仁: 水理学, pp. 3~5, 1967.
- 23) 伊藤洋ほか: コンクリートクラック内の透水性に関する実験的研究, セメント技術年報 41, pp. 217~220, 1987. 12. (1990. 10. 13 受付)

FUNDAMENTAL STUDY OF GAS SEEPAGE IN ROCK AND OPEN-CRACK

Takehiko SAKAGUCHI, Yo ITO, Kuniaki SATO and Teruo SHIMIZU

In order to investigate the fundamental mechanism of gas seepage in rocks and open-cracks, the experiments were carried out by using three inherent apparatuses. This paper presents how to determine the intrinsic permeability of rocks having one-dimensional and axisymmetric seepage flow in a laboratory. Some characteristics of gas flow in rocks and open-cracks were discussed based on the experiments and the calculations. The rock intrinsic permeabilities were in the range of 10^{-19} ~ 10^{-15} m² to various kinds of rocks. The leakage condition of gas in open-cracks could be obtained. Namely, it is relationship between P_G/P_W (P_G : gas pressure, P_W : water pressure) and crack width as a parameter of P_W .