

(39) 岩及び多孔媒体の非定常透気の特徴

埼玉大学工学部 正会員 佐藤 邦明

／

○小野 誠

1. はじめに

砂や岩を含めて多孔媒体中を気体（あるいは気体と液体の共存流体）が流れる時、特に気体の圧縮性と表面張力が特徴的に現われてくる。従来、透気性については土木工学の分野であり興味をもたれなかったように思われる。しかし、最近岩盤空洞の利用の多様化の中でエネルギー貯蔵に係って透気現象について研究が望まれるようになってきた¹⁾。筆者の一人は昨年基礎的に乾燥した岩石と水で飽和された岩石について透気実験を試み、透気の運動における基礎的な性質を明らかにした²⁾。それによって、乾燥状態の岩石は湿潤状態で透気性が小さくなること、また透気においては気体の圧縮性が圧力分布・透気量に関与して初めにくることが判った。しかしながら、気体と液体が共存して多孔媒体中を流れる時、それを力学的にどう扱えばよいのか、さらにこの場合の透気メカニズムがどうなっているか直接知ることができなかった。そこで、今回は岩石及び水で飽和されたガラス球充填層内の透気について基礎的な実験を行ない二・三の興味ある結果を得たので報告する。

2. 実験装置とその計測システム

今回の実験は図-1、(a)、(b)に示したような二つの実験装置によって行なわれた。(a)図には岩石の透気試験装置を示し、(b)図にはガラス球充填層の透気試験を示す。岩石の透気試験装置は、岩石試料（直径0.05 m、長さ0.2 mの試料周辺を0.02 mの樹脂で固めてある）、圧力計（直径3.5 mm）とその変換・出力計（共和電業、USB-51A）、透気圧ガスボンベ（N₂ガス）、及び透気量測定タンク（直径0.3 m、高さ0.39 m）からなる。一方、飽和多孔媒体中の透気については(b)図のように、多孔媒体コンテナー（長さ0.5 m、幅0.1 m、厚さ0.02 mの透明アクリル製）、上部貯水タンク（寸法0.39×0.39×0.33 m 透明アクリル製）と集気シリンダー、圧力測定用水銀マノメーター、定量加圧送気装置、及びビデオカメラ・記録レコーダーからなる。

実験方法。手順は岩石とガラス球充填層の場合を分けて説明すると次のようである。

まず、岩石の透気は岩石として花こう岩と礫岩を用い、岩石中に圧力計をセットし、N₂ガスタンクから所定の上端圧力を与えて、透気させる。透気中の圧力は圧力変換機によって経時的に計測し、透気量も適当な時間ごとに測る。実験条件は表-1に示すように、加圧力を変えている。

他方、ガラス球充填層の透気実験は大別すると、二つのケースであり、一つはガラス球充填層の上端から透気させる場合であり、透気は飽和水を一部排除する形で下方に進行し、比較的明確な気液界面が形成される。もう一方の透気は充填層下部から透気が起こる場合であって、気体は空隙中で浮力と気体の表面張力によって一様に透気するわけではなく、気泡状になった

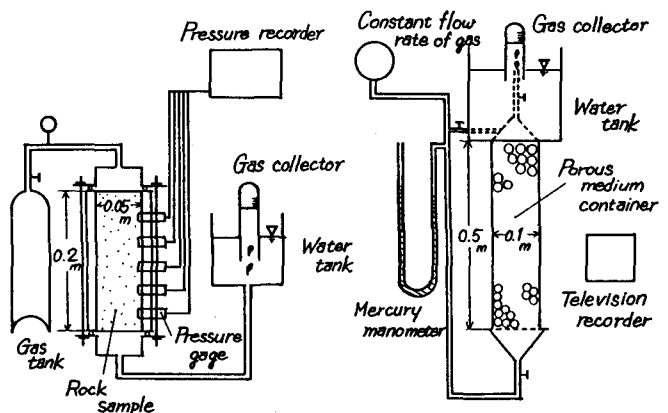


図-1 実験装置とそのシステム

り、フリップ流れ状に上昇する。これらの実験は次の手順で行なう。

表-1 実験条件と物性値

多孔媒体充てんコンテナーにガラス球を充てんした後、下端から水を供給して飽和させ、上端の集気タンクにも水を張る。しかる後に上下部コックを止め、加圧送気装置と送気パイプを接続し、水銀マノメーターに連結する。そこで、コックを開放して上端あるいは下端から送気して、界面あるいは気泡をビデオカメラで撮影し、マノメーターの読み、透気量を経時的に読み取る。ビデオカメラで写真撮影する際にカメラと反対側に光源を置いて光効果をうまく利用して映像を捉える。

実験の条件は表-1にまとめ示してあるように設定する。

試料No.	多孔媒体	直径 (m)	高さ (m)	空隙率 (%)	初期圧力 (MPa)	流量 (m ³ /s)	固有透気係数 (m ² /s)	透気係数 (m ² /s)	透水係数 (m ² /s)
EXP. 1	花崗岩	5.00 ×10 ⁻²	2.00 ×10 ⁻¹	0.82	0.20	4.22 ×10 ⁻⁴	7.75 ×10 ⁻⁴	5.03 ×10 ⁻⁴	752 ×10 ⁻⁴
					0.29	9.33 ×10 ⁻⁴	9.09 ×10 ⁻⁴	5.40 ×10 ⁻⁴	882 ×10 ⁻⁴
					0.39	2.34 ×10 ⁻³	1.52 ×10 ⁻³	9.86 ×10 ⁻⁴	1.47 ×10 ⁻³
EXP. 2	花崗岩	5.55 ×10 ⁻²	2.03 ×10 ⁻¹	0.92	0.20	1.11 ×10 ⁻³	1.71 ×10 ⁻³	1.11 ×10 ⁻³	1.66 ×10 ⁻³
					0.30	2.60 ×10 ⁻³	2.01 ×10 ⁻³	1.30 ×10 ⁻³	1.94 ×10 ⁻³
					0.38	4.34 ×10 ⁻³	3.83 ×10 ⁻³	2.42 ×10 ⁻³	3.72 ×10 ⁻³
EXP. 3	礫岩	5.19 ×10 ⁻²	2.00 ×10 ⁻¹	0.94	0.33	7.72 ×10 ⁻⁴	5.36 ×10 ⁻⁴	3.48 ×10 ⁻⁴	5.20 ¹⁾ ×10 ⁻⁴
					0.48	1.79 ×10 ⁻³	8.16 ×10 ⁻⁴	5.30 ×10 ⁻⁴	7.93 ¹⁾ ×10 ⁻⁴
					0.57	2.36 ×10 ⁻³	8.82 ×10 ⁻⁴	5.72 ×10 ⁻⁴	8.62 ¹⁾ ×10 ⁻⁴
EXP. A	ガラス球 φ0.8 ~1.5mm	断面 0.1 ×0.02	5.00 ×10 ⁻¹	13.8	—	2.00 ×10 ⁻⁴ 4.00 ×10 ⁻⁴ 8.00 ×10 ⁻⁴	—	253 ×10 ⁻⁴	379 ³⁾ ×10 ⁻⁴
EXP. B	ガラス球 φ1.5 ~2.5mm	断面 0.1 ×0.02	5.00 ×10 ⁻¹	34.9	—	2.00 ×10 ⁻⁴ 4.00 ×10 ⁻⁴ 8.00 ×10 ⁻⁴	—	7.15 ×10 ⁻⁴	1.07 ²⁾ ×10 ⁻³

3. 実験結果とその検討

3.1 岩石の透気の場合

一次元の透気量について、基礎式は、 $\frac{\partial P}{\partial t} = (K/2\lambda\mu) \frac{\partial^2 P}{\partial x^2}$ (ZIZ, P: 気体圧力, K: 固有透気係数, λ : 空隙率, μ : 粘性係数, t : 時間, x : 座標とする) で表われ、非線型の微分方程式である。筆者の1人は昨年この式を数値解析によって解いたが、境界圧力差があまり大きくなければ、この式は式(1)のように線型化でき、変数変換して式(2)のような常微分方程式に書き変える。

$$\frac{\partial P}{\partial t} = G \frac{\partial^2 P}{\partial x^2}, \quad (1) \quad \frac{d^2 P}{d\eta^2} + 2\eta \frac{dP}{d\eta} = 0, \quad \eta = x/2\sqrt{GE}, \quad (2)$$

ここに、 $G = K(P_0 + P_e)/2\lambda\mu$, P_0, P_e : それぞれ $x=0, x=l$ での境界圧力とする。

式(2)は式(3)の条件下で解くと、式(4)のような解をうる。

$$\left. \begin{aligned} x=0 (\eta=0), \quad P=P_0 \\ x=l (\eta=l/2\sqrt{GE}=\alpha), \quad P=P_e \end{aligned} \right\} (3) \quad P = \frac{(P_0 + P_e)}{E} \int_0^\eta e^{-\eta^2} d\eta + P_0, \quad (4)$$

ここに、 $E = \int_0^\alpha e^{-\eta^2} d\eta$, $\alpha = l/2\sqrt{GE}$, $G = K(P_0 + P_e)/2\lambda\mu$ とする。

定常の状態では、 $\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} = 0$ より条件 $x=0, P=P_0, x=l, P=P_e$ を用いると、 $P^2 = (P_e^2 - P_0^2) \frac{x}{l} + P_0^2$ となる。

今回の実験で得られた圧力の経時変化と式(4)の適合性を比較したものが図-2(a), (b), (c) のようである。図中における圧力分布は岩石試料の中央 $x=l/2$ での圧力経時変化を境界圧力 (つまり試料上端の圧力) を変えて得られたものであり、図中の実線は理論式(4)を表-1に示したようなパラメーターを用いて描いたものである。図-2, (a), (b), (c) はそれぞれ岩石の違いによるもので、実験で得られた圧力と理論曲線はいい一致を見せているが、実験開始直後の圧力は実験値の方がやや小さくなる傾向がある。これは必ずしも基礎式の線型化による差とも言えない。つまり、もともと透気量が小さいために圧力センサーを岩石中に設定する小孔と圧力計の壁の間に少しすき間が出来るためにたとえ0.2mm程度のすき間でもそこは透気した気体で貯ってそこでの圧力を現わ

すなわち時間遅れが生じることに原因がある。線型化された理論解は数値解より計算し易い。

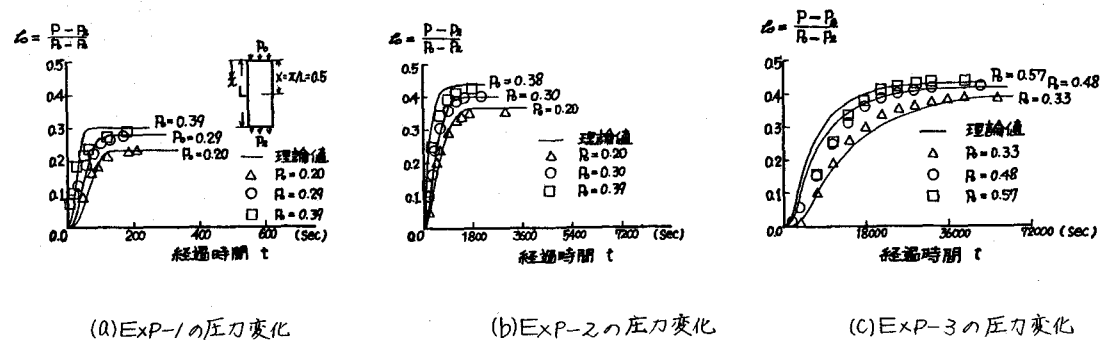
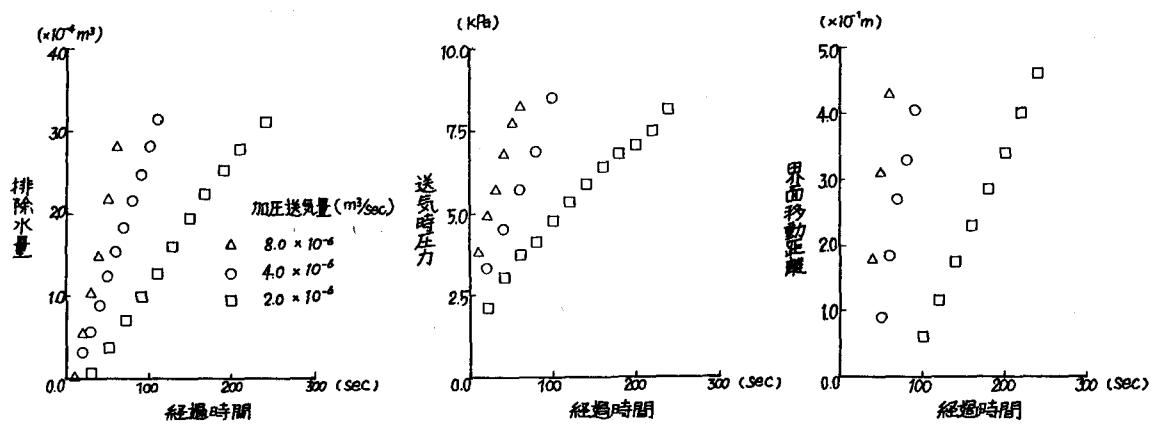


図-2 岩石透気による圧力(ε=1/2点)の経時変化

3.2 ガラス球充てん層の透気

(1) 置換透気の場合(上端よりの加圧)

ガラス球充てん層の上端から一定供給速度で透気させ、界面の移動速度と圧力変化について計測した。界面はすべての実験で明瞭に観測された。図-3はそれらの結果を示したものであり、(a), (b), (c)図にもそれぞれ送気量による充てん層の排除気体量、圧力変化及び界面の移動距離の関係が示されている。(a), (c)図から判るように送気量はそのまま排除気体量に比例し、単純に気液界面は送気によって排除されるのみとなることが知れる。



(a)送気量と排除気体量の関係 (b)送気量と気相圧力変化の関係 (c)送気量と気液界面移動距離の関係

図-3 送気量による充てん層の排除気体量、圧力変化及び気液界面移動距離の関係

(2) 気泡状透気の場合(下端よりの加圧)

ガラス球充てん層の下端から定圧、定流量で透気させる場合であり、下方からある圧力に至って図-4のように気泡状に透気し、気泡は上昇に伴って表面張力により形状を変えつつ減速傾向をとっている。図中、(a), (b)の違いは充てん層のガラス球の粒径が違っただけで、ケースBの方が粒径が大きいため上昇速度は小さくなっていることが判る。つぎに、図-4で得られた気泡上昇距離を所要時間で割って値を気泡上昇速度としてその経時変化を示したものが図-5である。この関係からすると、気泡は初め速く上昇するが、時間と共に一定値に近づく傾向がある。つまり、気泡は上昇と共にその体積を増し、浮力は大きくなるもののさらに分散されて上昇速度は一定値に近づくものと考えられる。

つぎに、図-6は飽和充てん層中を図-4に示したような形態で上昇する気泡の累積透気流出量の経時変化であって、時間当りの送気量をパラメーターに送気圧力値と共に示してある。明らかに透気発生圧力はケースAの粒径の小さい方が大きくなっており、粒径が小さいほど透気に高い圧力を要することをはっきり示している。また、送気量はほとんど一定の割合で表われ、い

うまでもなく送気量が大きいと透気も大きいことを示す。この事は透気中に多孔媒体中に拘束される気体はほとんどないことを表す。

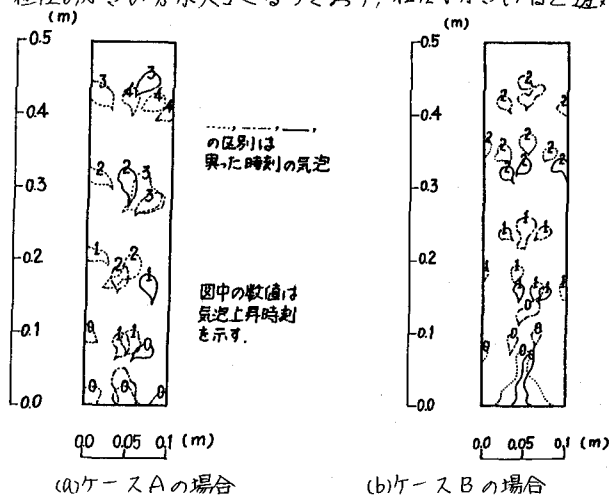


図-4 観測された気泡の形状と上昇状況

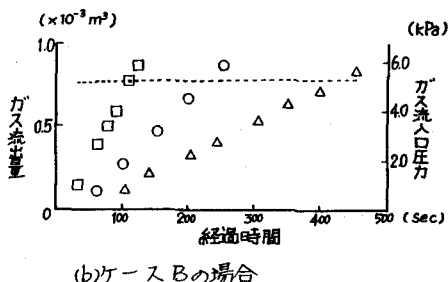
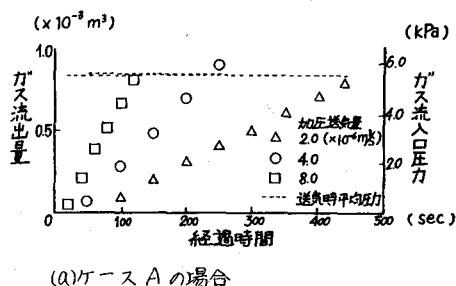
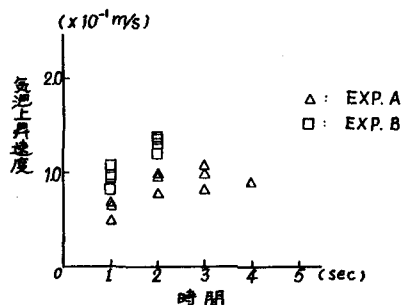


図-6 累積透気量と時間の関係

むすび

岩石とガラス球充てん層における透気の性質について実験的に検討を加えた。その結果、岩石の透気については一次元透気の基礎式を線型化してむすびなり実験結果が説明される。さらに、飽和ガラス球充てん層の透気については上端から透気させる場合には一種の気体置換流となり浮力、表面張力効果は乏しく安定した気液界面を形成するが、下方向からの透気は表面張力と浮力が支配的となって気泡を形成して分散・フリーブ流となって透気することが明らかとなり、気泡自体上昇中に減速傾向をむつようになることが明確になった。

最後に、本研究を進めるに当たって石油公団及び地下貯蓄期間実証プラント協同企業体からご協力を得たことを記して心よりお礼申し上げる次第であります。

参考文献

- 1) 宮下・佐藤：岩盤断層モデル中の気液二相流に関する実験的研究，工質工学会論文報告集，Vol. 24, No. 4 Dec. 1984, PP 155 ~ 162
- 2) 佐藤・青野：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，土木学会，Feb. 1986, PP 386 ~ 400
- 3) 伊藤・佐藤・清水：岩石の透気における非定常現象について，第21回工質工学研究発表会，1986, PP 997 ~ 998

(39) Characteristics of unsteady gas seepage in rock and porous media

by Kuniaki Sato* and Makoto Ono**

Gas seepage becomes important in dealing with for the energy storage in rock cavern and air curtain in soils. This paper presents some characteristics of gas seepage in rock and porous media. Two experiments are separately carried out by two different apparatuses : gas seepage in rock and gas flow in columnar packing of glass spheres. The pressure change with time in gas seepage through rock samples and gas flow rate are measured, and the results are compared with theoretical solution of linearized differential equation.

Thus, the permeability of gas in rock is determined for the granites. The fundamental characteristics is clarified experimentally.

*,** : Hydrosience and Geotechnology Laboratory, Faculty of Engineering, Saitama University, Urawa, Saitama.