

岩の透気特性に関する高精度評価技術の開発

九州大学 学生員○水原道法 正 員 江崎哲郎

学生員 竹田幹郎

地質調査所 正 員 張 銘 高橋 学

1. はじめに

天然ガスや石油などの地下流体資源の有効開発¹⁾, CO₂の地中貯留技術の確立や廃棄物地層処分施設の長期的安全性の適切な評価^{2) 3)}などでは従来より高精度に岩の透気係数を把握することが必要とされている. しかし, 透気試験法に関する研究や実験例は少なく, その基準も確立されていないのが現状である. 本研究では新たな透気試験装置を開発し, 拘束圧, 飽和度, 異方性などの要因が岩の透気特性に及ぼす影響を明らかにするとともに高精度な透気試験法の提案を目指す.

2. 室内透気試験法について

透気試験法には基本的に流量制御及び圧力制御による二種類の方法がある. 圧力制御法は試験体の一端に一定のガス圧を加え, 他端から流出するガスの流量を計測する事により透気係数を求めるものである. 一方, 流量制御法は試験体の一端に一定流量でガスを注入し, これに起因して発生する試験体両端間の差圧を計測することにより透気特性を調べるものである⁴⁾. 気体は液体と比べ熱伝導率が2オーダー以上大きいので, 高精度な透気係数の測定には試験体を通過する気体の温度を正確に制御, 計測しなくてはならない. また, 気体の圧縮率は液体と比べ非常に大きく, 流量制御法による透気実験では試験時間が非常に長くなると考えられる. 更に, 流量制御法では注入気体の圧力が漸次に増加し, 気体の温度が変化する可能性がある. 従って, 本研究では試験中の気体の温度を比較的容易に制御, 計測でき, 試験も比較的短時間でできる圧力制御法を用いる.

圧縮性を考慮した等温条件下における定圧透気試験の基本方程式及び解を以下に示す⁵⁾.

ここで, p : 絶対圧力(Pa) z : 気体注入側の試験体端面からの軸方向の距離(m) λ : 試験体の間隙率(%) μ : ガスの粘度(Pa·s) K : 透気係数(m²) t : 時間(s) Q_g : 大気圧状態における流出量(m³/s) p_a : 大気圧(Pa) A : 試験体の断面積(m²)

l : 試験体の長さ(m) p_0, p_1 : $z=0$ (ガス流入側) 及び $z=l$ (ガス流出側) における絶対圧力(Pa)

$$\frac{\partial^2 p^2}{\partial z^2} - \frac{2\lambda\mu}{K} \frac{\partial p}{\partial t} = 0$$

$$K = \frac{2Q_g t p_a}{A} \frac{l}{p_0^2 - p_1^2}$$

3. 実験概要

3.1 実験装置

本研究で開発した実験システムの概要をFig.1に示す. 大別すると, 静水圧型三軸試験容器及び拘束圧発生装置, コンプレッサー, ガス圧制御装置, ガス乾燥装置, 貯留容器, ガス圧計測記録装置, ガス流出量計測チューブ, 流入・流出ガスの温度と環境温度の監視センサー, 及び断熱装置などから構成される. 高精度にガスの温度を制御・計測するため, 全ての装置を恒温室内に設置し, 貯留容器, 三軸圧縮容器は更に断熱装置の中に設けた. また, 温度計測装置は温度を0.1℃の精度で計測できるものを用い, 試験体の直前直後に設置した. ガス圧制御, 計測装置はガス圧を0.07kPaの精度で制御, 計測できるものを用いた. また, 試験に使用するガスの湿度は試験中に一定に保つ必要があるため乾燥剤としてシリカゲルを用いたガス乾燥装置を使用した⁶⁾

3.2 試験体及び実験条件

実験に用いた試験体は直径50mm高さ25mmの円柱形で, 軸方向が層理面に対して垂直, または平行となるように成形したものである. 実験条件をtable.1に示す. 試験体の飽和度の設定は2通りの方法で行った. 飽和度を0%に設定するには試験体を乾燥炉によって105℃で24時間以上乾燥させ, 飽和度を大きく設定するには密封容器の中に水

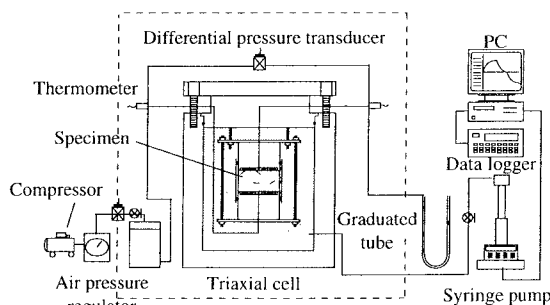


Fig. 1 Schematic of gas permeability test system.

と試験体を入れ、室温で蒸発する水蒸気中に試験体を約3週間放置した。Table.1 に示した飽和度は供試体を三軸試験容器にセットする直前に測定したものである。

3.3 実験手順

試験体及びベDESTALをゴムスリーブで被覆し、拘束圧液が試験体に侵入するのを確実に防ぐためベDESTALとゴムスリーブの接触点を覆うようにシリコンを塗布する。三軸容器に試験体をセットし拘束圧を加える。その後、試験体の下流端に一定のガス圧を加え、上流端からのガス流出量を計測チューブ内のマンオメーターオイルの移動により計測する。

4. 結果及び考察

Fig.2 に試験中の流入、流出ガスの温度と試験体のガス流入側端部における圧力の計測結果の一例を示す。この図より、流入、流出ガスの温度は試験中を通してほぼ等しく一定に保たれていると判断できる。また、流入端におけるガス圧は試験中を通して一定に制御されていると判断できる。Fig.3 に4通りの試験体条件下で得られた拘束圧と透気係数の関係を示す。ここで各拘束圧条件における透気係数は各ガス浸透圧条件下で得られた値の平均値である。拘束圧の増加に伴って透気係数は単調に減少する傾向が認められる。これは試験体内の空隙が圧縮され、透気経路が収縮されたためと考えられる。飽和度が大きいほど透気係数が小さくなる傾向が認められる。これは試験体内の空隙に水分が存在すると透気経路が狭くなるためと推測される。飽和度0%の試験体の実験結果より、飽和度条件が同じであれば、層理面に対し軸方向が平行となるように成形された試験体の透気係数の方が直交に成形された試験体のそれと比較し大きいことが認められる。これは岩の堆積過程で生じる異方性に起因すると考えられる。

5. まとめ

本研究ではガスの温度を比較的高い精度で制御、計測できるとともに、高い拘束圧にも耐えられる透気試験装置を開発した。この装置を用い透気実験を行った結果、拘束圧、飽和度及び異方性などの要因が白浜砂岩の透気特性に大きく影響することが明らかになった。今後はガス圧の設定範囲をさらに広げ、ガス圧の増減が透気係数に及ぼす影響などを詳しく調べる予定である。また、他の岩種、例えば、花崗岩についても同様の透気試験を行い、既に行っている白浜砂岩、花崗岩を対象とした透水試験の結果から、試験方法と使用した流体の差異が岩の流体に対する浸透特性を評価する際に与える影響などについて明らかにする。

参考文献

- 1) Lin, C. et al., 1986, J. Geophysical Research, 91(B2), pp. 2173-2181.
- 2) Moore, D. E. et al., 1986, J. Geophysical Research, 91(B2), pp. 2163-2171.
- 3) Tsang, C. F., editor, 1987, Coupled Processes Associated with Nuclear Waste Repositories, Academic Press, New York, 443 pp.
- 4) Eischens, G. et al, 1996, Geotechnical Testing J., 19(2), pp.232-238.
- 5) Bloomfield, J.P. et al, 1995, Quaterly J. of Eng. Geology, 28, pp.143-150.

Table 1 Conditions for the gas permeability test.

Name	Direction	Degree of * saturation (%)	Gas pressure (kPa)	Confining pressure (MPa)
V-0	Parallel to bedding	0	10, 25, 50 75, 100	1, 2, 3, 4, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70
V-53		55.79 → 53.88	10, 50, 100	1, 2, 3, 4, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70
H-0	Perpendicular to bedding	0	10, 25, 50 75, 100	1, 2, 3, 4, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70
H-37		39.44 → 37.37	10, 50, 100	1, 2, 3, 4, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70

* (Before testing → After testing)

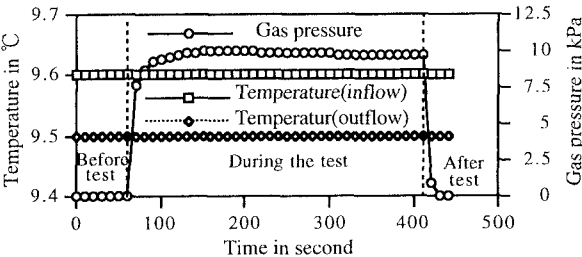


Fig.2 Gas pressure and temperature

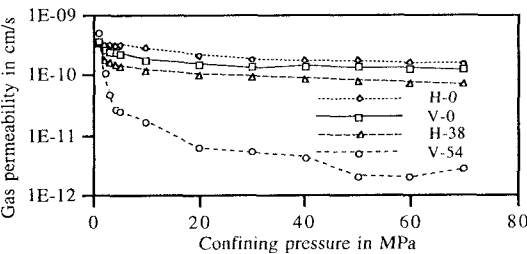


Fig. 3 Gas permeability variation with confining pressure.