

中空円筒供試体を用いた引張応力下の透気試験

宮崎 慎也¹・石井 孝佳¹・石田 毅²・雨宮 清³・水田 義明⁴

¹山口大学大学院 理工学研究科社会建設工学専攻 (〒755-8611 宇部市常盤台2-16-1)

E-mail: c074fd@yamaguchi-u.ac.jp, a002fd@stu.cc.yamaguchi-u.ac.jp

²正会員 山口大学 工学部社会建設工学科 (〒755-8611 宇部市常盤台2-16-1)

³正会員 (機関組 技術・環境本部原子力部) (〒105-8479 東京都港区虎ノ門2-2-5)

⁴正会員 崇城大学 工学部環境建設工学科 (〒860-0082 熊本市池田4-22-1)

放射性廃棄物の地層処分においては、処分坑道周辺のゆるみ領域が核種漏洩の水みちとなることが危惧される。従って安全評価のためには、低い拘束圧下における岩石の浸透率の把握が重要となるが、従来の方法では困難である。著者らは、中空円筒形の岩石供試体を用いたトランジェント法による透気試験法に注目した。この試験では、内圧を外圧よりも大きくした場合、供試体の円周方向直応力が引張となるため、極めて小さい圧縮応力から引張応力にわたる浸透率の拘束圧依存性を調べることができる。本論文では黒髪島花崗岩と来待砂岩を用い、中空円筒供試体の内側と外側の圧力を 0.3 MPa と 0.1 MPa のいずれかに設定して、浸透率の測定を行った結果を報告する。

Key Words : permeability, transient method, laboratory experiment, high level radio-active waste

1. はじめに

放射性廃棄物の地層処分においては、処分坑道周辺の低拘束圧下の領域(ゆるみ領域)が核種漏洩の水みちとなることが危惧される。放射性廃棄物の設置後、処分坑道には砂を混入したベントナイトを充填し、その膨張圧と核種に対する吸着性能を利用して、ゆるみ領域を通じた核種の漏洩を防止する方策がとられるが、その膨張圧は地圧の大きさに比べて小さいため、低拘束下における透水係数の把握が重要である。しかし従来の透水試験法では、供試体と供試体に装着したゴムスリーブの間から水が漏洩することを防ぐために、ある程度大きな拘束圧を作用させる必要があり、極めて小さい拘束圧下における透水係数の把握は困難である。また安全評価に資する長期にわたる水の移動を推定するためには、難透水性岩石の透水係数を精度よく推定することが必要である。

そこで著者らは、Brace ら¹⁾が提案したトランジェント法に基づいて栗山ら²⁾が開発した中空円筒供試体を用いた透気試験法に注目した。この透気試験法は、従来の透水試験法と比較して、次の2つの特徴がある。

1) 円筒供試体の内圧を外圧より大きくした場合、供試体内の円周方向応力は引張となるため、引張応力下における透水係数の測定が可能である。すなわち、極めて小さい圧縮応力から引張応力にわたる透水係数の拘束圧依存性を調べることができ、処分坑道に必要なベントナイトの膨張圧を知ることができる。

2) 水の代わりに粘性の小さい空気を用いるために、難透水性岩石の透水係数を精度よく測定できる。

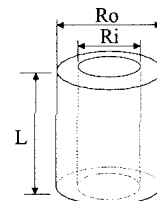


図-1 供試体の形状

本研究では、黒髪島花崗岩と来待砂岩の中空円筒供試体を用い、内側と外側の圧力を 0.3 MPa と 0.1 MPa のいずれかに設定して、トランジェント法による透気試験を行い、浸透率を測定したので、その結果を報告する。

2. 実験方法

(1) 供試体

供試体には、図-1に示す外径 R_o が 4.4 cm、内径 R_i が 3.0 cm の中空円筒形の岩石供試体を用いた。高さ L は黒髪島花崗岩が 5.0 cm、来待砂岩 6.2 cm である。

また、供試体端面からの漏気を防止するために、供試体の両端面を可能な限り平坦にし、中央に直径 20 mm の円孔を有する直径 50 mm、厚さ 2 mm の鋼製の円板を、変成シリコン系接着剤(セメダイン PM165-R)で接着した。この円板の外側から直径 80 mm、厚さ 10 mm、中央に直径 3 mm の穴のある鋼板を、O リングを介してネジ

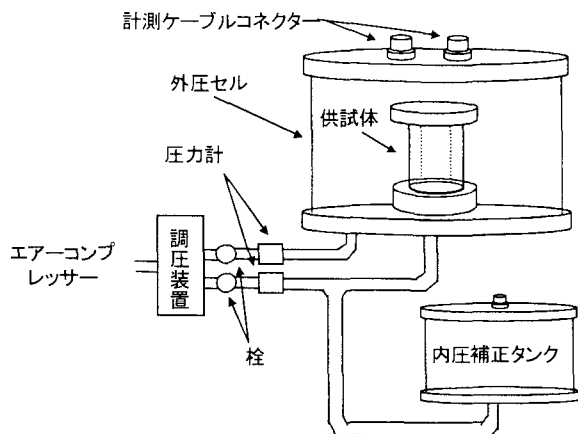


図-2 実験機概略図

圧で押し付けることにより実験装置に固定した。

(2) 実験装置

実験装置の概略図を図-2に示す。エアークンプレッサーは調圧装置を通し、外圧セルに下部より圧縮空気を送り込む。また供試体内側には、外圧セル下部を通して圧縮空気を送り込めるよう配管を接続した。内圧側の体積が外圧側の体積と同じになるよう、内圧側には、体積の調整を目的とした補正タンクを取り付けた。圧力計は、外圧セル、内圧セル共にそれぞれの回路を遮断するために設置した栓のすぐ近くに取り付けた。圧力計には容量 1 MPa のひずみゲージ式圧力計 (共和電業 PGM-10KH) を使用し、圧力の測定にはセンサ・インタフェース (共和電業 PCD-300A) を使用し、1 秒間に 1 回測定を行った。また上部の計測ケーブル・コネクタは温度やひずみの測定データをセル内から取り出すためのものであるが、今回は使用していない。

(3) 実験手順

今回の実験では、円筒供試体の内側と外側の両方に圧縮空気を同時に送り込み、0.1 MPa になった時点で低圧に設定する側の栓を閉じ、高圧に設定する側にはそのままさらに圧縮空気を送り込み、0.3 MPa になった時点で栓を閉じ、圧力変化の測定を開始した。測定を開始すると、空気が供試体中を浸透することにより、高圧側は圧力が低下し、低圧側は圧力が上昇し、ついには両者の圧力が同じ値に収束する。内圧側に取り付けた補正タンクの体積を調整し、内圧側と外圧側の体積を同一にすれば、この収束圧は、内外圧の初期値の平均値である 0.2 MPa にほぼ一致するが、今回の実験では補正タンクの体積の調整が不十分であったため、平均値から若干ずれた圧力値に収束している。今回の実験では、内外圧がこの収束値に到達するか、4 時間経過した時点で実験終了とした。

3. 実験結果

(1) 測定された圧力の経時変化

実験結果の一例として、来待砂岩の場合の圧力の経時変化を図-3に示す。図-3 (a) は外圧が内圧より大きい場合、図-3 (b) は内圧が外圧より大きい場合を示す。図-3 (b) の場合は、供試体内の円周方向応力が引張となるため、圧縮となる図-3 (a) の場合よりも、空気が浸透しやすいと予想されたが、この結果を見る限り、外圧が大きい場合と内圧が大きい場合でそれほど大きな相違は認められない。

図-4 は、花崗岩の場合の結果である。この場合も、外圧が大きい場合と内圧が大きい場合でそれほど大きな相違は認められないが、来待砂岩の場合に比べて、圧力変化が遅い、すなわち、空気が浸透しにくい傾向が顕著である。

(2) 浸透率の計算方法

測定データから浸透率 (intrinsic permeability) を計算するには、栗山ら²⁾が開発した方法に従った。

すなわち、計算には以下の式を用いた。

$$\ln(P_1 - \frac{V_1 P_1^0 + V_2 P_2^0}{V_1 + V_2}) = \ln \frac{V_2}{V_1 + V_2} (P_1^0 - P_2^0) - \frac{k}{\lambda \mu \ln(R_o/R_i)} \frac{2\pi L}{V_1 V_2} t \quad (1)$$

ここに、 P_1^0 は外圧の初期値、 P_2^0 は内圧の初期値、 V_1 は外圧側の体積、 V_2 は内圧側の体積、 λ は空気の圧縮率、 μ は空気の粘性係数、 k は求めるべき浸透率である。また、 R_o 、 R_i 、 L は供試体の内・外径と高さであり、 P_1 は外圧で時間 t の関数である。これらの値は、今回の実験の場合、表-1 の通りである。

まず、(1)式の左辺を次式のように A とおき、表-1 の値と実験により得られた圧力値をこの式に代入して、横軸に時間、縦軸に A の対数値をとってグラフに示す。

$$A = P_1 - \frac{V_1 P_1^0 + V_2 P_2^0}{V_1 + V_2} \quad (2)$$

来待砂岩で外圧が大きい図-3 (a) の場合のを例に示すと、図-5 のようになる。

次に、(1)式の右边第 2 項の浸透率 k を除いた係数を次式のように α とおき、

$$\alpha = -\frac{1}{\lambda \mu \ln(R_o/R_i)} \frac{2\pi L}{V_1 V_2} \quad (3)$$

これに表-1 の値を代入すると、次の値が得られる。

$$\alpha = -2.34 \times 10^{-12} \quad (4)$$

これらに(1)式の右边第 1 項を C とおき、圧力の初期値と表-1 の値を代入し計算すると、次式のようになる。

$$C = \ln \left\{ \frac{V_2}{V_1 + V_2} (P_1^0 - P_2^0) \right\} = -2.29 \quad (5)$$

(2)~(5)式を(1)式に代入すると、(1)式は次式となる。

$$\ln A = \alpha k t + C \quad (6)$$

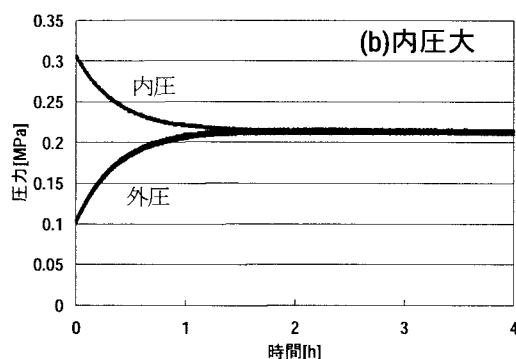
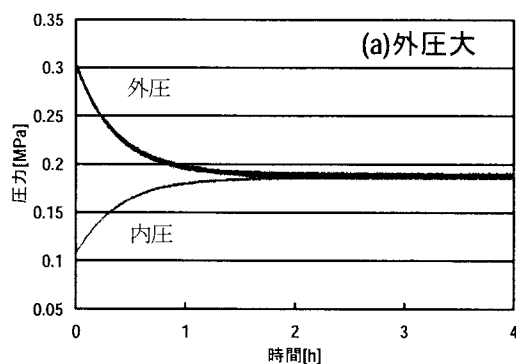


図-3 圧力の経時変化(来待砂岩)

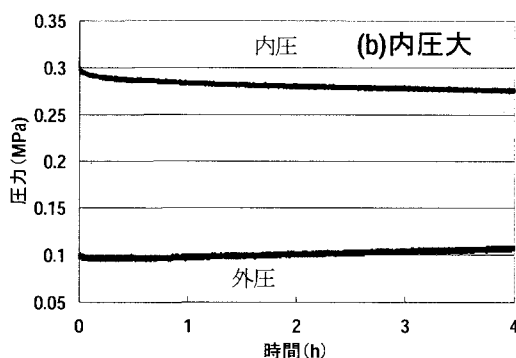
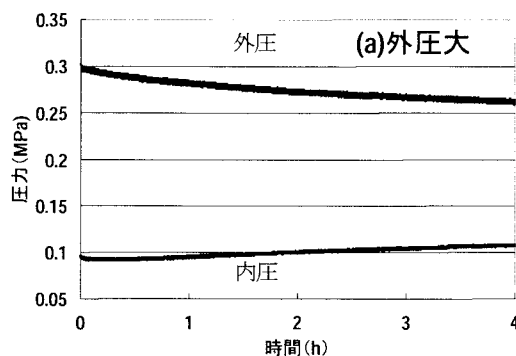


図-4 圧力の経時変化(黒髪島花崗岩)

表-1 透気試験の諸元

	来待砂岩	黒髪島花崗岩
外径Ro (cm)	4.4	4.4
内径Ri (cm)	3.0	3.0
高さL (cm)	6.2	5.0
外圧初期値 (MPa)	0.1または0.3	
内圧初期値 (MPa)	0.3または0.1	
外圧セルの容量 $V_1(l)$	1.14	
内圧セルの容量 $V_2(l)$	1.26	
空気の圧縮率 $\lambda (Pa^{-1})$	3.33×10^{-6}	
空気の粘性係数 $\mu (Pa \cdot s)$	1.82×10^{-5}	
水の粘性係数 $\eta_w (Pa \cdot s)$	8.90×10^{-4}	

ここに、 α と C は定数、 t は時刻であり、 A は時々刻々の外圧の圧力値であるから、測定データを図-5のような片対数グラフに整理すると、測定データは理論的には、求めるべき浸透率 k と定数 α の積である $k\alpha$ を傾きとする直線になるはずである。

図-5に示した測定データの直線部分を、縦軸の切片をとし、最小2乗法で直線近似すると、次式を得た。

$$\ln A = -9.90 \times 10^{-4} t - 2.29 \quad (7)$$

(6)式と(7)式を比較して、

$$k\alpha = -9.90 \times 10^{-4} \quad (8)$$

となるから、(4)式の α の値を代入して、

$$k = 4.23 \times 10^{-16} (m^2) \quad (9)$$

という浸透率を得ることができる。

このように、(1)式によって外圧の測定データだけから、浸透率を求めることができる。同様に(1)式の内圧に関する値と外圧に関する値を入れ替えた式を用いて、内圧の測定データだけから浸透率を求めることができる。

(3) 測定された浸透率と考察

上記の計算方法を用いて求めた来待砂岩と黒髪島花崗岩の浸透率を表-2に示す。それぞれの試験で、外圧データから求めた浸透率と内圧データから求めた浸透率は、来待砂岩の場合 2 倍程度、黒髪島花崗岩では 10 倍程度異なるが、表-2には両者の平均値を示した。

すでに述べたように、内圧が外圧より大きい場合供試体内の円周方向直応力が引張となるため、圧縮応力となる場合よりも、浸透率が大きくなることが予想されるが、図-2に見られるように、今回の実験の範囲では、そのような傾向は顕著には認められなかった。

一方、来待砂岩と黒髪島花崗岩の浸透率の違いについては間隙率との関係を調べるために、有効間隙率の測定を行った。その結果、表-3に示すように、来待砂岩の有効間隙率は黒髪島花崗岩より約 25 倍大きいことがわかった。このことから、来待砂岩と黒髪島花崗岩の浸透率の違いは、両者の間隙率の差に強く依存しているものと思われる。

得られた浸透率を、従来から多くの試験で得られている透水係数と比較することは興味を持たれる。そこで次式により、得られた浸透率を透水係数を換算し、文献に示されている透水係数と比較した。

$$K_w = k \frac{\rho_w \cdot g}{\eta} \quad (10)$$

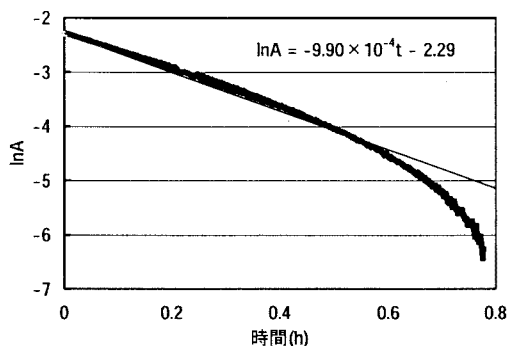


図-5 $\ln A$ の経時変化

ここに g は重力加速度であり、 η は水の粘性係数である。表-4に示すように、今回の透気試験で得られた浸透率から換算した透水係数は、いずれの岩石についても文献で示された透水係数の範囲内にあることがわかる。

4. まとめ

内圧が外圧より大きい場合供試体内の円周方向直応力が引張となるため、圧縮応力となる場合よりも、浸透率が大きくなることが予想されたが、今回の実験の範囲では、そのような傾向は顕著には認められなかった。また、来待砂岩と黒髪島花崗岩の浸透率の違いについては、有効間隙率の違いが大きく影響していると思われた。

実験の再現性を高めることが当面の課題であるが、今後さまざまな種類の岩石に対して試験を行うとともに、亀裂を有する岩石に対しても試験を行い、内圧が大きい場合と外圧が大きい場合で浸透性に違いが生じないかどうかを検討したいと考えている。また同じ岩石に対し、透水試験を行って浸透率を比較

表-2 測定された浸透率

	浸透率 (m^2)	
	外圧大	内圧大
来待砂岩	3.22×10^{-16}	4.74×10^{-16}
黒髪島花崗岩	9.69×10^{-19}	8.59×10^{-19}

表-3 供試体の有効間隙率

	有効間隙率 $n_e(\%)$
来待砂岩	20.6
黒髪島花崗岩	0.84

表-4 透水係数

	透水係数 (m/s)	
	外圧大	内圧大
来待砂岩	3.55×10^{-9}	5.22×10^{-9}
砂岩(文献) ³⁾	$1.6 \times 10^{-9} \sim 1.2 \times 10^{-7}$	
黒髪島花崗岩	9.69×10^{-12}	8.60×10^{-12}
花崗岩(文献) ³⁾	$5 \times 10^{-13} \sim 2 \times 10^{-11}$	

すること、さらには二酸化炭素の地下貯留に関連した課題にも、この試験法を応用していきたいと考えている。

参考文献

- 1) Brace, W.F., Walsh, J.B. and Frangos, W.T.: Permeability of granite under high pressure, J. Geophys. Res., Vol. 73, pp. 2225-2236, 1968.
- 2) 栗山 憲・水田義明・土井昭仁: 中空円筒供試体を用いたトランジェント法による浸透率測定における数理的基礎、資源と素材, Vol. 118, pp. 667-674, 2002.
- 3) 水田義明監修: 地下環境制御とエキスパートシステムー地下空間の防災支援ー(上), 山海堂, 1995.

AIR PERMEABILITY TEST UNDER TENSILE STRESS CONDITION USING A HOLLOW CYLINDRICAL ROCK SPECIMEN

Shinya MIYAZAKI, Takayoshi ISHII, Tsuyoshi ISHIDA,
Kiyoshi AMEMIYA, and Yoshiaki MIZUTA

In underground disposal of the high level radioactive waste, it is apprehensive that stress-released region around the drifts would be paths of water contaminated with radioactive substances. Thus, it is important to measure the rock permeability under a low confining stress; however, it is difficult by conventional water permeability test. The authors found to measure it by an air permeability test using a hollow cylindrical rock specimen with an analytical method established by Kuriyama et al. (2002) following the transient method by Brace et al. (1968). In this test, permeability under tensile stress condition can be measured, because the tangential normal stress of the specimen becomes tensile when the inner pressure is higher than the outer pressure. Thus, this test can clarify dependency of the intrinsic permeability under the stress from small compression to small tension. The air permeability tests were conducted for the specimens of Kurokami-jima granite and Kimachi sandstone under the two conditions that the inner and the outer pressures were set at 0.3 and 0.1 MPa respectively and that they set in the opposite. In this paper, the measuring results are reporte.