

亀裂性岩盤の保水性および流体浸透性に関する実験

愛媛大学大学院 学生会員 ○ 大内健太郎

正会員 安原英明

正会員 木下尚樹

1. はじめに

近年、社会資本を整備する上で地下岩盤の利用はこれまでより複雑化・多様化している。例えば、放射性廃棄物地層処分、CO₂ 地中貯留、メタンハイドレードの資源開発などがある。これらは効率的に資源を輸送すること、施設を安定的に運営することが必要不可欠である。そのためには亀裂性岩盤内の流体浸透性を詳細に把握する必要がある。岩盤内では気体と液体による気液二相流状態が存在するが、完全な挙動解明には至っていない。そこで本研究では、気液二相流実験装置を開発するとともに、透水試験、透気試験、保水性試験、相対透過率測定試験を実施した。そして、相対透過率測定の結果を、van Genuchten model で回帰分析することにより、実験値の妥当性と気液二相流実験装置の有用性を評価した。

2. 透水・透気試験

開発した実験装置を図 1 に示す。本研究では供試体としてベレア砂岩とガラスビーズを使用した。ベレア砂岩は帯水層内に気液二相流が発生することを考慮し使用した。またガラスビーズの使用は、供試体作製時に空隙率を正確に確認できることと比較的大きな空隙率を有しているためである。実験の境界条件を表 1 に示す。透水試験では土質力学の分野で透水特性を表す指標となる透水係数を算出することができる。飽和状態の供試体に対して、排出流量が安定してから 10 分間試験を実施した。ダルシー則より、水の透過率 k_l を以下の式で評価することができる。

$$k_l = \frac{\mu_l Q_l L}{A \Delta P_l} \quad (1)$$

ここで、 μ_l : 水の粘性係数 [Pa s], Q_l : 透水流量 [$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$], L : 供試体尾の高さ [m], A : 供試体断面積 [m^2], ΔP_l : 透水差圧 [Pa] である。

透気試験では透気特性を表す指標となる透気係数を算出することができる。乾燥状態の供試体で試験を実施した。空気の圧縮性を考慮し、空気の透過率 k_g を以下の式で評価することができる¹⁾。

$$k_g = \frac{\mu_g Q_g L^2 P_{down}}{A(P_{up}^2 - P_{down}^2)} \quad (2)$$

ここで、 μ_g : 空気の粘性係数 [Pa s], Q_g : 透気流量 [$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$], P_{up} : 供試体上流側の圧力 [Pa], P_{down} : 供試体下流側の圧力 [Pa] である。結果を図 2 に示す。流量が大きくなるほど空気の透過率は大きくなった。

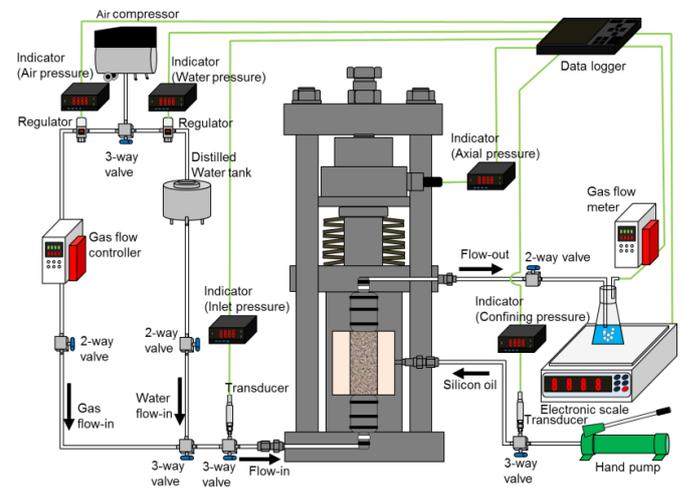


図 1 実験装置

表 1 透水・透気試験の条件

供試体	温度 [°C]	粘性係数 [Pa s]	拘束圧 [MPa]
B-1 Beads	20	1.0×10^{-3}	3.0

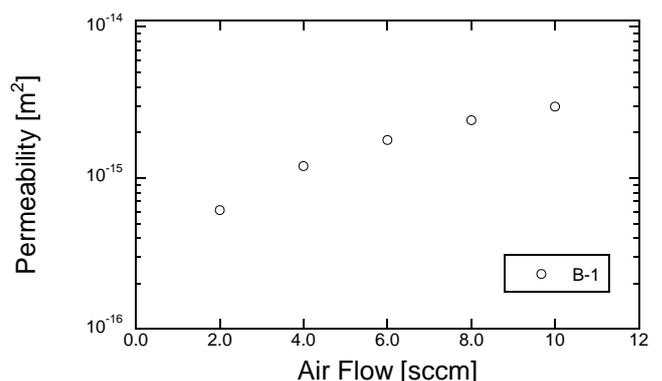


図 2 透気試験結果 (B-1)

3. 相対透過率測定試験²⁾

相対透過率試験とは、対象とする材料の相対透過率を測定する試験である。透水・透気試験では流体が1種類であり、その流体の移動特性を絶対透過率と呼んでいるが、2種類以上の流体が混合した状態に対しては各流体に対する透過率を有効透過率と言う。絶対透過率と有効透過率の比を表したものを相対透過率と言う。次に試験による岩石の相対透過率の評価方法について述べる。水をレギュレータによる圧力制御で、空気をマスフローコントローラによる流量制御で流入させることで、気液二相流を再現した。排水流量は電子はかりで測定し、排出空気流量はマスフローメータによって測定する。そして、それぞれの流量から相対透過率を算出することができる。相対透過率測定試験の境界条件を表2に示す。計測された水と空気の流量は、多相流ダルシー則より、以下の式で表すことができる。

$$Q_{\beta} = k_{r\beta} \frac{A \Delta P_{\beta} k}{\mu_{\beta} L} \quad (3)$$

ここで、 β : 液相(l)および気相(g), Q_{β} : β 相の流量 [$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$], $k_{r\beta}$: β 相の相対透過率 [-], ΔP_{β} : β 相の差圧 [Pa], μ_{β} : β 相の粘性係数 [Pa s]である。絶対透過率 k は透水試験より既知であるので、透水・透気流量を時系列で計測し有効透過率を算出することで相対透過率を評価できる。飽和度については、計測された水と空気の流量比から以下の式で表すことができる。

$$S_l = \frac{Q_l}{Q_l + Q_g} \quad (4)$$

式(3)および式(4)から、相対透過率曲線を求めることができる。

ベレア砂岩の結果を図3に示す。また、ベレア砂岩を使用した研究結果と比較した。本研究では水と空気を使用したが、既往研究では塩水と N_2 を使用して実験が実施されている。既往研究の結果を図4に示す³⁾。図3と図4比較すると、気体の相対透過率曲線、液体の相対透過率共に下に凸となり同様の挙動を示している。

4. おわりに

本研究で気液二相流を再現可能な実験装置を開発し実験を実施した。既往研究と比較してみると、似た挙動を示したことから装置の有用性、実験の再現性を確認できたと考えられる。今後、本実験を含む多様な条件下でのデータの蓄積が必要である。

参考文献

- 1) SCHEIDEGGER, A.E : The physics of flow through porous media, University of Toronto press, 102p., 1974
- 2) 小暮哲也, 北村哲也, 山田達也, 西澤修, 薛自求 : 多孔質砂岩中の定常流動状態における水—超臨界 CO_2 系の相対浸透率, 地学雑誌 Journal of Geography, Vol.120, No.6, pp944-954, 2011
- 3) Maria Gudjonsdottir, Halldor Palssonb, Jonas Eliassonb, Gudrun Saevarsdottir : Calculation of relative permeabilities from field data and comparison to laboratory measurements, Geothermics, Vol.54, 9pp., 2015

表2 相対透過率測定条件

供試体	温度 [°C]	粘性係数 [Pa s]	透水圧 [Pa]	拘束圧 [MPa]
B-1 Bead	20	1.0×10^{-3}	1.0×10^5	3.0

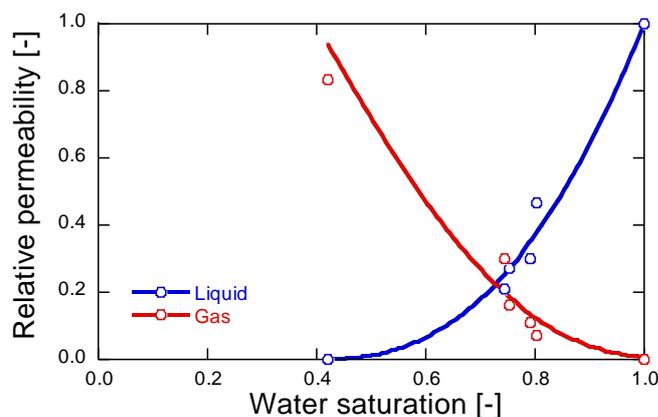


図3 相対透過率曲線 (B-1)

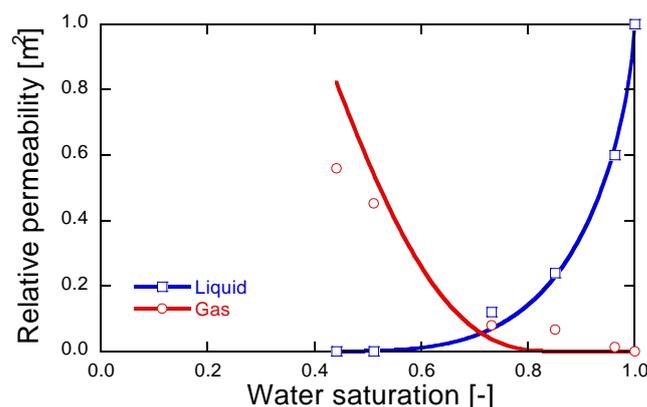


図4 相対透過率曲線 (既往研究 : Paul, 2016)