# 軽石凝灰岩の飽和・不飽和領域のガス流動特性 に関する実験的研究

鈴木 健一郎<sup>1\*</sup>・山本 修一<sup>2</sup>・熊谷 守<sup>3</sup>・川本 健<sup>4</sup>

<sup>1</sup>株式会社 大林組(〒204-8558 東京都清瀬市下清戸4-640) <sup>2</sup>株式会社 大林組(〒108-8502 東京都港区港南2-15-2) <sup>3</sup>日本原燃株式会社 (〒039-3212 青森県上北郡六ヶ所村大字尾駮字野附504-22) <sup>4</sup>埼玉大学.(〒338-8570 埼玉県さいたま市下大久保255) \*E-mail: suzuki.kenichiro@obayashi.co.jp

岩盤中の多相流現象を理解するためには,岩盤と流体との組み合わせにより相対透過係数や水分特性と いった非線形パラメータを決定する必要がある.本研究は,余裕深度処分埋設施設から発生するガスの影 響評価をするために,施設候補地近傍の岩盤を対象として,相対透過係数および毛管圧力の非線形パラメ ータを取得する目的で実施した岩石コアを用いた室内透水試験,水分特性試験およびガス注入試験結果に ついて報告するものである.

軽石凝灰岩を用いた室内実験において, 飽和透水係数の拘束圧依存性,水分特性曲線,および不飽和状態でのガス注入試験から得られた透気係数の飽和度との関係について述べる.

Key Words : pumice tuff, gas flows, moisture characteristic curve, unsaturated gas permeability

#### 1. はじめに

岩盤を媒体とする流体の移動特性の評価は,エネル ギー備蓄(原油,LPG,CAES),地下資源開発(地熱, 石油,天然ガス),放射性廃棄物の地層処分,そして温 暖化対策としてのCO2の地下貯留などが対象となり,そ こを移動する流体も,地下水,空気などが混在した多相 流を考慮しなければならない.多孔質媒体中の多相流現 象は,固相-液相-気相間の相互干渉を相対透過係数お よび毛管圧力といった非線形パラメータを用いて表現さ れており,相対透過係数や毛管圧力は,媒体と流体の組 み合わせで実験的また数値解析的に決定されている<sup>1)</sup>.

本研究は,余裕深度処分埋設施設から発生するガス の影響評価をするために,施設候補地近傍の岩盤を対象 として,相対透過係数および毛管圧力の非線形パラメー タを取得する目的で実施した岩石コアを用いた室内透水 試験,水分特性試験およびガス注入試験について報告す るものである.

そのため,施設候補地近傍の岩盤として,新第三紀 層(鷹架層)中の軽石凝灰岩を用いて流体移動に関する 様々な物理特性を把握し,岩盤用透水・透気試験装置を 用いて,岩盤供試体の飽和透水試験と水分特性試験を実 施した.次に,飽和した岩盤供試体のガス注入試験を行 い,排水量と透過ガス量を同時に計測し,実際の岩盤へのガスの移行現象を再現する実験を行った.得られた透水係数,水分特性を用いてガス注入試験のフィッティング解析により岩盤の二相流パラメータを同定する情報を 提供するものである.

#### 2. 試料および実験方法

(1) 試料

用いた試料は,青森県六ヶ所村の日本原燃(株)の 敷地内にある調査坑において採取された新第三紀層(鷹 架層)の軽石凝灰岩である.岩盤のボーリングコアを調 整して直径50mm,高さ97mm(以下,円柱供試体)およ び15mm(以下,ディスク供試体,水分特性用)の供試 体を作成した.余裕深度処分埋設施設の深度100mを想 定し,水圧(約1MPa),拘束圧(約1.6MPa)を模擬で きる岩盤用透気試験装置を用いて,透水試験・水分特性 試験およびガス注入試験に供した.

## (2) 透水試験

透水試験は,図-1に示す岩石透水・透気試験装置を用 いて円柱供試体に対して行った.この試験装置は,2連 式であり,温度変化の影響を受けないように断熱材にて 主要タンクを覆った.岩盤供試体を真空で72時間水漬飽 和後,複数ケースの一定拘束圧下で,下端より透水圧を 作用させ,上端よりの通水量を計測した.供試体には, 測圧による側部からの供試体への水の浸透を防ぐために ネオプレーンスリーブ(厚さ0.5mm)とラテックスゴム スリーブ(厚さ0.8mm)を二重に被せ,間には信越化学 ㈱製の信越シリコーンKF 96を塗布し,止水した.この 方法により,長期透水,透気試験においても測圧用の水 がゴムを透過して供試体内に入り込むのを防止し,後の 水分特性試験およびガス注入試験における供試体とゴム ジャケットとの間の漏気も防止することとした.拘束圧 は0.5,10,16MPaの3ケースを設定し,背圧は0.01, 1.0MPaとして,透水係数の拘束圧依存性を調べた.透水 圧はすべて排出側との圧力差で0.1MPaとした.

#### (3) ディスク供試体による水分特性試験

試料の保水特性を表す水分特性曲線は,間隙水分量 を表す体積含水率θもしくは飽和度Srと間隙水のポテン シャルエネルギーψとの関係を表すものである.ψを圧 力水頭(cmH<sub>2</sub>O)に換算し,常用対数で表記したもの, log(-ψ)はpFとして定義される.測定は,吸引法,加圧法, 水ポテンシャルメーター法(露点式)の組み合わせで行 い,各測定範囲は以下の通りである.

吸引法: -9.8 kPa < P<0 kPa

加圧法: -1.47 MPa≤ P<-9.8 kPa

水ポテンシャルメーター法: P<-1.47 MPa

吸引法と加圧法はJGS0151-2000「土の保水性試験」基準に準拠して,ディスク供試体に対して行った.試料を 飽和後,各設定pF条件下で全質量変化を測定し,全質量 変化が0.01g/day以下となった時点で平衡に達したものと 判断し,測定を終了した.設定pF段階は,pF1.0, 1.5, 2.0, 2.3, 2.5, 3.0, 4.107段階とした.

水ポテンシャルメーター法はすりつぶした風乾試料 に対して行なった.測定にはWP4T (Decagon device, Inc.) を用いた.

#### (4) 円柱供試体による水分特性試験

飽和状態の供試体に,供試体下端より窒素により圧 力を段階的に(背圧+0.1~0.5MPaまでの5段階)増加 させて窒素ガスを浸透させた.ここで,供試体上端のセ ラミックスディスク(ガス浸入圧0.2MPaおよび1.0MPa) からは水のみが排水され,載荷ガス圧に応じた定常状態 となる.拘束圧は1.6MPa,背圧は1.0MPaで一定とした. 供試体上端より排水した水は水量測定槽に入る.この排 水量の経時変化を差圧計により計測した.

排水量変化が0.01ml/時間以内となることを定常とし, 1ステップを終了し,ガス圧を次のステップまで増加さ せ,同様に排水量が定常になるまで計測を行った.各供 試体に用いたガス圧増分ステップを表-1に示す.

表-1 ガス昇圧ステップ

供試体	拘束圧	背圧	ガス圧
#	(MPa)	(MPa)	(背圧+MPa)
No.3	1.6	1.0	0.0 0.012 0.03 0.05 0.5
No.4	1.6	1.0	0.0 0.02 0.04 0.06 0.14
No.5	1.6	1.0	0.0 0.01 0.03 0.04 0.08
No.6	1.6	1.0	0.0 0.01 0.03 0.07 0.11
			0.40

#### (5) ガス注入試験

透水試験と同様の手順で,飽和または含水比調整し た供試体およびポーラスディスクにゴムスリーブを被せ, 試験装置にセットした.有効拘束圧0.6MPaを作用させた 後,背圧0とし,ガス圧(0.025~0.4MPa)を下端から載 荷して,供試体上部から排水させ,排水量と同時に水量 測定槽を通して透過するガス流量をフローメータで計測 した(図-2参照).



図-1 透水試験および水分特性試験の試験装置概要



図-2ガス注入試験装置概要

ここで,ガスの流量は,飽和度およびガス圧に依存 し,数mL/分から数L/分までの範囲となるため,計測レ ンジの異なる流量計を3段連結して計測を行った.微小 流量計は,株式会社オーバル製のMASS FLOW METER FM-111S-Z12-11N(最大流量15mL/分,最大使用圧力9.8MPa) を用いた.

試験条件は,飽和状態の供試体に対して,0.025,0.05,0.1MPaと段階的にガス圧を増加させ,各昇圧段階では,排水量が一定になりガス排出が定常になるまで注入し,次の段階に昇圧した.

最後に60 で3日間の炉乾燥の後,0.025MPaのガス圧 にて,乾燥状態(飽和度%)の場合のガス注入試験を実 施し,固有透過係数を算出した.

3. 試験結果および考察

#### (1) 物理特性

軽石凝灰岩の物理諸量の計測結果を表-2に示す.岩片 試料による計測以外のものは円柱供試体で測定したもの で,そのばらつきは,薄い色の粒状の軽石と基質部の分 布が写真-1に示すように供試体により異なるためである.

P( = 1	
自然状態含水比	58~65 %
自然状態密度	1.58~1.63 g/cm <sup>3</sup>
弾性波速度√p	1439~1831 m/s
弾性波速度Vs	634~827 m/s
有効間隙率	56 % 岩片による
吸水率	54 % 岩片による

表-2 物理特性計測結果

#### (2) 透水試験

透水試験では,ダルシー則が成り立つとして次式で 透水係数を評価し,水の粘性係数および密度から固有透 過係数を算出した.

$$k_w = \frac{Q_w L}{A(h_1 - h_2)} \tag{1}$$

ここで, $k_w$ は透水係数(m/s), $Q_w$ は流量( $m^3/s$ ),Aは 試料の断面積( $m^2$ ),Lは試料の長さ(m), $h_l$ および $h_l$ はそれ ぞれ注水側,排水側の水頭(m)である.透水係数は水 の流れやすさを表わすが,流れる媒質に依存しない岩石 固有の透過係数(以下固有透過係数K)は,透水係数か ら次式により求めた.

$$K = \frac{\mu_w}{\rho_w g} k_w \tag{2}$$

ここで,μ<sub>w</sub>は水の粘性係数(1.002×10<sup>3</sup>Pa·s),ρ<sub>w</sub>は水 の密度(998kg/m<sup>3</sup>),gは重力加速度(9.81m/s<sup>2</sup>)である.

透水係数と有効拘束圧の関係を図-3に示す.今回の圧

力範囲において,若干の拘束圧依存性が見られ,その傾きは-2.0×10<sup>8</sup> (m/s/MPa)であった.

### (3) 水分特性試験

ディスク供試体および円柱供試体で得られた飽和度Sr と毛管圧との関係,いわゆる水分特性曲線を図4に示し た.これは,ディスク供試体,円柱供試体の試験共,排 水過程での保水性を示すものである.ディスク供試体の 飽和度Srは毛管圧の増加とともに減少し,風乾状態では 飽和度ほぼ0で毛管圧57MPaの値を示した.円柱供試体 は,ディスク供試体と比較して飽和度の高い領域におい て若干高い毛管圧を有している.これは,試料の長さ (ディスク供試体15mm,円柱供試体97mm)の違いによ





写真-1 供試体の側面展開画像

上:軽石(薄い色の粒状部)の面積率43%供試体 No.3

下:軽石(薄い色の粒状部)の面積率9%供試体 No.5



る不均質性によると考えられる.

水分特性曲線の解析にあたり,測定データを次に示 す体積含水率の近似式,van Genuchten式<sup>2</sup>(以下VG 式),Bimodal(二重間隙構造)のVG式<sup>3</sup>(以下Bimodal VG式),Brooks and Corey式<sup>4</sup>(以下BC式)で回帰した. なお,Bimodal VG式は,微細間隙(添え字1)と粗大間 隙(添え字2)からなる二重間隙構造試料のそれぞれの 領域をVG式で表したものである.

VGIT: 
$$\theta(\psi) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left[ \frac{1}{1 + (\alpha |\psi|)^n} \right]^m$$
 (3)

ここで,ψはポテンシャルエネルギー(cmH<sub>2</sub>O), <sub>s</sub>: 飽和体積含水率(cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>), <sub>r</sub>:残留体積含水率(cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>), α, n, m (=1-1/n):フィッティングパラメータである. Bimodal VG式:

$$\theta(\boldsymbol{\psi}) = \left\{ \theta_{\mathrm{r}} + w_{1}(\theta_{\mathrm{s}} - \theta_{\mathrm{r}}) \left[ \frac{1}{1 + (\alpha_{1} |\boldsymbol{\psi}|)^{n_{1}}} \right]^{m_{1}} \right\} + \left\{ w_{2}(\theta_{\mathrm{s}} - \theta_{\mathrm{r}}) \left[ \frac{1}{1 + (\alpha_{2} |\boldsymbol{\psi}|)^{n_{2}}} \right]^{m_{2}} \right\}$$

$$(4)$$

ここで,  $\alpha_{l}$ ,  $n_{l}$ ,  $m_{l}$  (=1-1/ $n_{l}$ ): 微小間隙領域のフィッティン グパラメータ,  $\alpha_{2}$ ,  $n_{2}$ ,  $m_{2}$  (=1-1/ $n_{2}$ ): 粗大間隙領域のフィッ ティングパラメータ,  $w_{l}$ ,  $w_{2}$ : 各領域の比率 ( $w_{l}+w_{2}=1$ ) である.

BC 
$$\vec{x}$$
:  $\theta(\psi) = \begin{cases} \theta_{s} & (\psi \ge \psi_{b}) \\ \theta_{r} + (\theta_{s} - \theta_{r}) \left(\frac{\psi}{\psi_{b}}\right)^{-\lambda} & (\psi < \psi_{b}) \end{cases}$ 
(5)

ここで, $\psi_h$ :空気浸入ポテンシャル(cmH<sub>2</sub>O), $\lambda$ :フィッティングパラメータである.

ディスク供試体試験結果に対するVG式,Bimodal VG 式,およびBC式による回帰を体積含水率を飽和度に, ポテンシャルを毛管圧(1cmH<sub>2</sub>O = 98 Pa)に変換して図-5に示した.VG式,BC式は,毛管圧>1の高圧領域を除 き,測定データを良好に回帰できていることがわかる. 軽石凝灰岩が,軽石部と基質部から構成される2つの構 造を持つものであることからBimodal VG式を適用したが, 全毛管圧領域の測定データを回帰しているものの,毛管 E > 0.10領域での測定データが少ないため,この領域での回帰式の妥当性は今後の検討課題である.

#### (4) ガス注入試験

供試体No.5における排水量・透気量~時間関係を図-6 に示す.飽和状態からガス圧0.025MPaでの処女載荷 (図-6上段)では,始めに供試体内の水分が押し出され, 約100mmの供試体の下端から上端に連続するガス経路が 出来るとガスの排出が始まる.その後は,ガスの排出と 同時に水も排水されており,ガス透過経路の拡大が示唆 される.排水量が定常になった段階で,ガス圧を 0.05MPaに増加させたのが中段の図である.排水量の振 動が上段に比べて大きくなっている.これは,排水量測 定槽内を上昇する気泡の大きさが大きくなったためであ る.さらにガス圧を増加させ0.1MPa(下段の図)では, ガスの透過量が多くなり排水量の正確な値は計測困難に なった.この場合は,ガス流量が十分定常になった時点 で実験を終了して,供試体の重量測定により総排水量を 測定した.



図-5 水分特性のフィッテインングとパラメータ

排水量と透気量と時間関係が定常になった時点での 透気量に対して,固有透過係数を次のように求めた<sup>5</sup>.

$$K = \frac{2Q_g \mu_g p_a}{A} \frac{l}{p_a^2 - p_i^2}$$
(6)

ここで,K:固有透過係数( $m^2$ ), $\mu_g$ :気体の粘性係数(Pa·s), $Q_g$ は大気圧(101 k Pa)下における透気体積( $m^3$ ), $p_a$ は大気圧(Pa),lは試料の長さ(m),Aは試料の断面積( $m^2$ ), $p_0$ , $p_i$ はそれぞれ試料下端,上端の境界圧力(Pa)である.





この実験では, p<sub>i</sub>=p<sub>a</sub> (大気圧: 101 k Pa)として計算 した.ただし,窒素の粘性係数は1.76 × 10<sup>5</sup> Pa⋅s,窒素 の密度は, 1.165kg/m<sup>3</sup>を用いた.

飽和度と求めた透過係数との関係を図-7に示す.不飽 和状態でのガスの透過係数は,試料により,飽和度が 50%から80%を下回ると急激に増加し始めることがわか る.対数表示により高飽和度領域での透気特性を示した のが図-8である.高飽和度においてガスの透過する抵抗 が低飽和度に比べて極端に大きいことがわかる.また, 同図に飽和透水試験結果から得られた固有透過係数を併 記した.飽和状態での水の透過特性と乾燥状態における ガスの透過特性は,媒体に固有の係数である固有透過係 数の意味からは本来は同じ値になるはずである.しかし, ガス注入試験から求めた固有透過係数は,透水試験から 求めたそれの15倍と大きな値を示した.この違いは,固 相壁面でのスリップ現象として説明される<sup>5</sup>以上の大き な差で,検討課題であり,次に示すデータとの関係から 空隙構造の詳細な検討が必要と考える.

坂口ら<sup>®</sup>は岩種の異なる試料を用いて,透気試験と透水試験により固有透過係数を得ている.透過する流体による比を(乾燥透気試験による固有透過係数K<sub>g</sub>/飽和透水試験による固有透過係数K<sub>w</sub>)と定義し,有効間隙率との関係をまとめる図-9のようである.これらのデータからは十分な検討はできないが,有効間隙率が大きいほど透過係数比が大きく気体の方が透過しやすい傾向が見られ,今回の結果も坂口らのデータと整合しているのがわかる.





4. まとめ

軽石凝灰岩について透水試験,水分特性試験,ガス 注入試験を実施し,飽和・不飽和領域において,ガスの 流動特性を調べた.その結果以下の点が明らかになった. (1)飽和透水係数は,10<sup>8</sup> m/s(固有透過係数10<sup>-15</sup> m<sup>2</sup>)オー ダーで,拘束圧0から1.6MPaの範囲では拘束圧依存性は 小さい(拘束圧の変化に対する透水係数の変化率は,-2 ×10<sup>8</sup>(m/s/MPa)).

(2)水分特性曲線を得,それらはVG式,BC式,Bimodal VG式などで近似された.

(3)ガス注入試験では,0.025MPaのガス圧で長さ約100mmの供試体を透過し,ガスの透気経路が形成された.この時の飽和度は80%程度であった.

(4)水やガスが流動する間隙構造を特徴づける固有透過 係数は, 飽和状態での透水試験と乾燥状態での透気試験 により異なった.これは岩石の間隙の大きさにも依存す るものであることが示唆された.



図-9 気相/液相固有透過係数の比と間隙率との関係

#### 参考文献

- 岩井卓,登坂博行:単一亀裂の気液2相流相対浸透 率の計測,資源と素材,Vol.119,pp.593-598,2003.
- van Genuchten, M.Th.: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 44, pp.892-898, 1980.
- Durner, W.: Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure. Water Resour. Res. 30, pp.211-223, 1994.
- Brooks, R.H. and Corey, A.T.: Hydraulic properties of porous media. Hydrol. Paper 3. Colorado State Univ., Fort Collins, CO, USA, 1964.
- Bear, J. : Dynamics of Fluids in Porous Media, Dover Publications, Inc, 1972.
- 6) 坂口雄彦,伊藤洋,佐藤邦明,清水明男:岩石および 開口割れ目における透気に関する基礎研究,土木学 会論文集 No.445/-8, pp.17-25, 1992

# EXPERIMENTAL STUDY ON GAS TRANPORT PROPERTIES OF PUMICE TUFF IN THE SATURATED AND UNSATURATED REGIONS

## Kenichiro SUZUKI, Shuichi YAMAMOTO, Mamoru KUMAGAI, and Ken KAWAMOTO

In order to evaluate gas flow through the rock mass around the facility for low level waste disposal, laboratory experiments for gas/water transport properties of the rock were carried out.

The pumice tuff was subjected to water permeability tests, moisture characteristic tests, and gas injection tests in the saturated and unsaturated regions. The non-linier properties such as relative permeability for gas and moisture characteristic curve and water permeability depending on confined stress obtained from these tests were discussed in this paper.