

## 岩石の透水試験における環境温度の制御の重要性†

加藤 昌治\* 奈良 禎太\*\* 福田 大祐\* 河野 勝宣\*\*\*  
佐藤 稔紀\*\*\*\* 佐藤 努\*\*\*\*\* 高橋 学\*\*\*\*\*

### Importance of Temperature Control in Surrounding Environment during Permeability Test for Measuring Hydraulic Constants of Rock

by

Masaji KATO\*, Yoshitaka NARA\*\*, Daisuke FUKUDA\*, Masanori KOHNO\*\*\*,  
Toshinori SATO\*\*\*\*, Tsutomu SATO\*\*\*\*\* and Manabu TAKAHASHI\*\*\*\*\*

Rock masses serve a vital function as natural barriers for geological disposal of radioactive waste; therefore, information on rock permeability is essential. Highly accurate measurement of permeability requires understanding of how temperature changes in the surrounding environment influence measurement results. We performed permeability measurement under conditions with dramatic changes of temperature in the surrounding environment to investigate the influence of such changes on the experimental results. Measurement of permeability with no temperature change was also conducted as reference. All measurements were conducted using the transient pulse method, and the sample material used was Toki granite obtained from Gifu Prefecture in central Japan. We found that temperature changes in the surrounding environment remarkably affected the pressure in reservoirs upstream and downstream, the pressure difference between them, and the confining pressure; all increased when temperature increased for our experimental system. Notably, pressure difference was affected immediately. This difference directly relates to estimation of permeability. As temperature changes significantly affect pressure difference, it is essential to minimize temperature changes in the surrounding environment so as to achieve accurate measurement of rock permeability.

#### Key words:

Permeability test system, Low-permeability rock, Hydraulic conductivity, Temperature variation, Water, Thermal expansion

#### 1 緒 言

放射性廃棄物の地層処分においては、岩盤を天然バリアとして使用する。このことから、低透水性の岩盤はより好ましい環境である。割れ目や断層を含む岩盤スケールの透水性の評価にはボアホールを使用した原位置水理試験が実施されるが<sup>1)</sup>、岩盤実質部の透水性を評価する場合にはコアスケールの岩石に対して室内透水試験が適用できる。後者の場合、低透水性岩石を取り扱う際には、岩石の水理定数(透水係数や比貯留率)を精度よく求めるためには、静穏な実験環境での透水試験の実施が望ましい。この実験環境を乱す要因の一つとして、実験環境の温度変化が挙げられる。実験環境の温度が変化すると、熱伝達により試験装置とそこで使われている水の温度にも変化を生じ、それが制御された水圧とは別の圧力変化を発生させ、透水試験データの理論への適合性を減じることにな

る。そのため、実験環境の温度変化が透水試験データに与える影響についての検討がなされており<sup>2)~4)</sup>、透水試験中の環境温度の変化を抑える工夫もされている<sup>5)~10)</sup>。しかし、実験環境の温度変化が透水試験データに影響を与えることは定性的には明らかであるが、試験結果にどの程度影響を及ぼすのかをデータ解析の誤差も含めて定量的に把握することはできていない。

そこで本研究では、低透水性岩石の室内透水試験を実施する際、実験環境の温度変化が透水試験結果に与える影響を定量評価することにした。本報告では、透水試験における環境温度変化が測定値に及ぼす影響の一例を示すと同時に、それと貯留槽圧の変化との関係について検討した。また、環境温度変化の影響を抑えるために試験時間を短縮する方法についても検討している。最後に、実験データに環境温度変化の影響が極端に出た場合に、解析に

† 原稿受理 平成27年9月16日 Received Sep. 16, 2015 ©2016 The Society of Materials Science, Japan

\* 正 会 員 北海道大学 大学院工学研究院 〒060-8628 札幌市北区北13条西  
Faculty of Eng., Hokkaido Univ., Kita-ku, Sapporo 060-8628

\*\* 正 会 員 鳥取大学 大学院工学研究科 〒680-8552 鳥取市湖山南  
Graduate School of Eng., Tottori Univ., Koyamaminami, Tottori 680-8552

\*\*\* 鳥取大学 大学院工学研究科 〒680-8552 鳥取市湖山南  
Graduate School of Eng., Tottori Univ., Koyamaminami, Tottori 680-8552

\*\*\*\* 正 会 員 日本原子力研究開発機構 幌延深地層研究センター 〒098-3224 北海道天塩郡幌延町  
Horonobe Underground Res. Center, Japan Atomic Energy Agency (JAEA), Horonobe, Hokkaido 098-3224

\*\*\*\*\* 北海道大学 大学院工学研究院 〒060-8628 札幌市北区北13条西  
Faculty of Eng., Hokkaido Univ., Kita-ku, Sapporo 060-8628

\*\*\*\*\* 産業技術総合研究所 活断層・火山研究部門 〒305-8567 つくば市東

Res. Inst. of Earthquake and Volcano Geology, National Inst. of Adv. Industrial Sci. and Technol. (AIST), Higashi, Tsukuba 305-8567

使用したデータの長さに伴う透水係数の解析誤差について検討した結果を示す。

## 2 実験方法

### 2.1 実験装置

本研究では, Fig. 1 に示すような透水試験システムを使用した。本システムは, 大きく分けて, 拘束流体系, 間隙流体系, 制御・記録系および独立した温度制御系から構成されている。

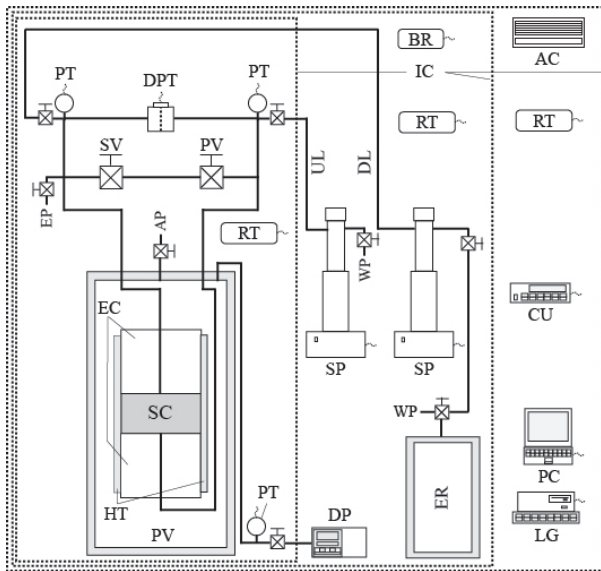


Fig. 1 Schematics of permeability test system

(IC: Triple insulated chamber, AC: Air conditioner, RT: Resistance thermometer, BR: Barometer, PT: Pressure transducer, DPT: Differential pressure transducer, PV: Pressure vessel, ER: Extra reservoir, UL: Upstream line, DL: Downstream line, SV: Separation valve, PV: Pressure pulse valve, EP: Evacuating port, AP: Air discharge port, WP: Water supply port, SC: Specimen, EC: End caps, HT: Heat shrinkable tube, DP: Double plunger pump, SP: Syringe pump, CU: Controlling unit for syringe pumps, LG: Data logger, PC: Note-type PC)

拘束流体系には, 供試体を設置する圧力容器, 拘束圧用ポンプ, 配管類が含まれる。今回使用した小型圧力容器は静水圧で耐圧 10 MPa である。配管類は, 高圧条件下における水漏れを避けるため, 超高压用のチューブやバルブを使用している。また, 拘束圧用ポンプとしてはダブルプランジャーポンプ (ジーエルサイエンス社製 PU610-0X) を利用している。

間隙流体系は, シリンジポンプ (ISCO 社製 100DM, 2 台), 貯留槽, セパレート用バルブを含む配管類から成る。シリンジポンプは, 一定圧力あるいは一定流量で流体供給を制御可能であり, 流量に関しては 50 mL/min から 0.01  $\mu$ L/min の範囲を  $\pm 3\%$  の精度で, 圧力に関しては 1 kPa の分解能で, 最大 69 MPa まで制御できる。シリンジポンプを上流側と下流側それぞれに 1 台ずつ接続し, 間隙水を供給し, 間隙水圧を調整している。透水試験に際しては, シリンジポンプのシリンダーが貯留槽の役割を担う。配

管類は, 高圧条件下における漏水を防ぐために, 超高压用のチューブやバルブを使用している。

制御・記録系には, データロガーとシリンジポンプ用コントローラーおよび各種計測計 (差圧計, 圧力計, 温度計) が含まれる。圧力としては, 拘束圧, 上流側および下流側配管内の水圧, 2 台のシリンジポンプ内の圧力, 気圧, そして上下流間の差圧が計測されている。差圧計 (Validyne 社製 DP15-42) は高線形性を有し, 本実験で重要となる供試体の両端の間隙圧の差を計測するために使われる。また, シリンジポンプ内蔵の圧力計は, 配管内の圧力を計測するために使われ, 配管の漏水をチェックする目的にも使われる。恒温室内の温度は, 3 か所に設置された白金測温抵抗体で測定されている。

本システムの特徴は, 実験室内に建てられた恒温室が三重の断熱構造となっており, 恒温室内の一番外側にルームエアコン (東芝社製 RAS-2851ST) を設置して空調し, 圧力容器が置いてある一番内側の断熱スペースには熱源や光源を置いていないことである。これらの結果として, 圧力容器周囲の環境温度変化は, 試験中は  $\pm 0.1^\circ\text{C}$  以下に抑えることが可能である。ただし, 今回の実験に関しては, 故意に環境温度変化を与えるため, 内側二つの断熱扉は任意に開閉している。なお, 本論文では, 三重の断熱室の一番内側で圧力容器から数 cm 離れた位置に設置された白金測温抵抗体で測定された温度を環境温度として採用し, 環境温度変化の指標に用いる。

### 2.2 供試岩石

本研究では, 供試岩石として中粒～粗粒の黒雲母花崗岩 (土岐花崗岩) を用いた。供試体は, 日本原子力研究開発機構東濃地科学センターより提供を受けたボーリングコア (瑞浪超深地層研究所換気立坑側 GL-200m 横坑において初期応力測定および室内物理・力学試験用に削孔された 08MI14 号孔: 深度 7 m 付近) の健全な部分を抽出し, 直径 5.0 cm, 高さ 2.5 cm のディスク状に整形した。

供試体は, デシケーター内で蒸留水に沈めた状態で数時間真空脱気し, 含水飽和させた。その後, 圧力容器にセットするまでの間, デシケーター内で蒸留水に沈めたまま負圧を作用させた状態で保存した。

### 2.3 透水試験

2.1 節で説明した透水試験システムは, 複数種類の透水試験手法を連続して適用可能である。本研究では, 試験時間を要する低透水性岩石に対する透水試験を実施するため, トランジェントパルス法<sup>1)</sup>を採用した。トランジェントパルス透水試験の実験手順は以下のである。

(1) 含水飽和した供試岩石を二つの間隙水供給用のエンドピースの間にはさみ, 熱収縮チューブで側面を覆うことによって, 封圧媒体が岩石内に侵入するのを防ぐ。それを固定円盤にはさみ, 圧力容器の上蓋の裏側 (内側) に設置し, 間隙水配管類を接続して, 封圧媒体 (水) で満たされている圧力容器内に収める。

(2) ダブルプランジャーポンプで封圧を 1 MPa 程度まで上げ, それを一定に維持した状態で, 貯留槽や配管・継手・

バルブに残っている空気や間隙水に溶存している気泡を取り除くために真空脱気をする。脱気後はシリンジポンプを使って間隙水を供給し、一定圧力(封圧の半分以下の値)を維持する。

(3) 断熱室内の環境温度変化や一定圧力で動作させているシリンジポンプの流量をモニタリングする。これにより、室温の安定化を図ると同時に漏水のチェックもおこなう。上述した環境温度の制御(試験中±0.1℃以下)を達成するまでには、この状態で数日を要する。また漏水がある場合には、一定圧力で動作させているシリンジポンプの流量が安定してゼロとならないので、そのときには配管の継手やバルブ等の閉め具合を確認し、漏れがなくなるまで監視を続ける。

(4) 室温の変化が±0.1℃以下で漏水がない(シリンジポンプの流量が安定的にゼロ)と判断した時点で、ポンプを操作し封圧と間隙水圧を所定の値に設定する。今回の実験では、封圧を2~10 MPaで設定し、間隙水圧は1 MPaとした。封圧と間隙水圧を調整した後は、供試体が落ち着くまで数時間の静置が必要である。

(5) 静かにセパレートバルブ(上流側と下流側を切り離すバルブ)を閉じる。このとき、もし前段階で発見できなかった微小な漏水が起っていた場合には、それが差圧の変化に表れることになる。その場合、(3)の手順に戻り、再度調整を実施する。なおセパレートバルブを閉じた後に供試体内の水頭分布が一樣となるには、供試体の透水性にもよるが、数時間が必要である。

(6) 差圧の変動が見られなくなっていれば、所定のパルス圧力(60~80 kPa)を上流側に負荷する。負荷されたパルス圧が減衰し、差圧がパルスをかける前の状態に戻ったときに実験終了とする。

(7) 透水試験で得られた差圧の減衰データに対して、Hsieh et al.<sup>12)</sup>の解析解に基づく非線形最小二乗法によるデータ解析<sup>13)</sup>をおこない、供試岩石の水理定数(透水係数と比貯留率)を評価する。ただし、Hsieh et al.<sup>12)</sup>の解析解を用いたときに水理定数の解が収束しない場合は、Brace et al.<sup>11)</sup>の解を用いて非線形最小二乗法により透水係数だけを評価している。

### 2・4 環境温度変化試験

透水試験とは別に、前節の(5)の状態において、2か月程度をかけて環境温度変化試験を実施した。ただし、エアコンによる空調が透水試験装置にすばやく影響するように、三重の断熱室の内側二つの断熱扉を開けたまま実験をおこなった。本実験では、エアコンの設定を変えることで、実験装置の置かれた恒温室の室内温度を強制的に変化させ、それに伴い取得される貯留槽圧やその差圧および封圧の測定値にどの程度影響が出るのかを実験的に観察した。低透水性岩石を供試体とした透水試験を実施する際の環境温度変化を想定して、その測定値への影響がわかるように環境温度をできるだけ単純・単調に変化させ、貯留槽圧やその差圧および封圧の変化を測定し

た。本試験においては、前節の透水試験と同じ測定項目について測定を実施している。

## 3 実験結果

### 3・1 環境温度変化試験の結果

環境温度変化試験の結果の一例を Fig. 2 に示す。この図で室温としているのは、2・1 節で定義した環境温度を指す。ただし、本実験では、エアコンによる空調の効果が圧力容器周辺に迅速に届くように内側二つの断熱扉は開放したままとなっているが、装置にはエアコンの送風が直接当たらないようにしている。Fig. 2 では、上流側と下流側の貯留槽圧がほぼ重なって見えるが、その差圧は感度のよい差圧計で計測された値が示されており、差圧の変動は明確に表れている。Fig. 2(a)にはこの環境温度変化試験の全体が示されており、Fig. 2(b)には環境温度変化の大きかった時間帯を拡大して示してある。

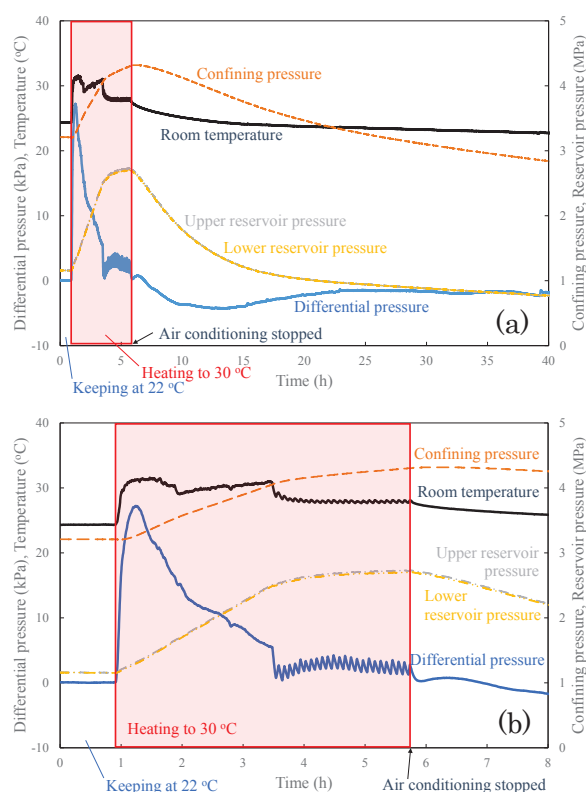


Fig. 2 Variation of measured values with temperature change (temperature transition with cooling at 22 °C, warming at 30 °C, and then air conditioner stopped). Figure (b) provides an enlarged view of time of figure (a)

Fig. 2 の最初の1時間弱(0~0.9 h)は環境温度も他の測定値も安定した状態となっていることがわかる。これは、本試験に先立ち、1か月程度エアコンの設定を22℃(冷房)として稼働し続けていたからである。ただし、装置にはエアコンの送風が直接当たらないようにしているため、装置周りの温度は22℃よりも2℃程度高い値を示している。その安定した状態から突然エアコンを30℃(暖房)に設定変更している。当然装置周りの温度は急激に上

昇し (0.9~1.1 h), それに引き続き不規則な動きはしているもののほぼ安定状態となりプラトーを示した (1.1~3.5 h). しかし, この段階ではまだ恒温室内に置かれているものすべてが完全には温まっていない. その後, 恒温室内全体が温められることにより, エアコンの送風の強弱に合わせて周期的に環境温度が変動する時間帯となる (3.5~5.8 h). 5.8 h でエアコンの電源を切ったため, そこからは温度がゆっくり低下している.

Fig. 2 から, 環境温度の変化が他の測定値 (貯留槽圧, 差圧, 封圧) にどのような影響を及ぼすのかを知ることができる. 今回実験で与えた環境温度の変化に対して, 差圧, 貯留槽圧, 封圧の順に敏感に反応していることが見て取れる.

### 3・2 環境温度変化を与えたときの透水試験結果

土岐花崗岩を供試体として, 環境温度の変化を抑えて透水試験を実施するのに加えて, 透水試験中に人為的に環境温度に変化を与えたときに, どのような実験データが得られるのかを確かめた. その結果の一例を Fig. 3 に示す. この図には, 空調を止めた状態において (室温 22.6°C), トランジェントパルス法の通常の手順に沿って上流側貯留槽にパルス圧力をかけた後 (Fig. 3 では差圧をパルス圧力で規格化して無次元水頭差としている), それが減衰して 0.8 を下回ったあたりでエアコンを暖房 (30°C 設定) で動作させたところ, 室温が 28.5°C まで上がり, それに伴い水頭差も 1.1 まで上昇している様子が示されている. そこでエアコンを停止したが, 差圧と室温の計測は継続している. なお, Fig. 3 に示している室温も Fig. 2 と同じ環境温度を表している. また, Fig. 3 で使用している記号を経過時間に対応させると次のようになる; (A): 0 min, (B): 6 min, (C): 9 min, (D): 11 min, (E): 13 min, (F): 15 min, (G): 17 min, (H): 19 min, (I): 23 min, (J): 65 min, (K): 98 min.

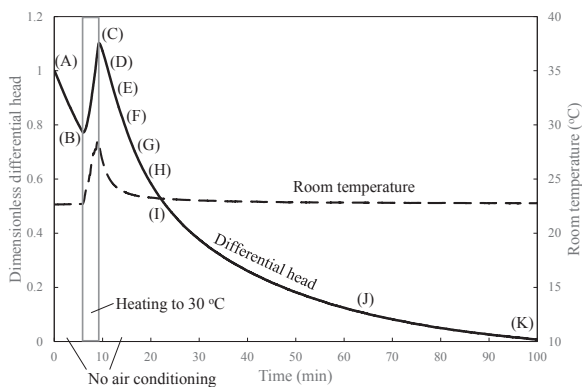


Fig. 3 Dimensionless hydraulic head variation with temperature change during transient pulse permeability test.

ここで得られた実験データは, 透水試験データとしては, 環境温度変化の影響が大きく出ている悪い例となる. ここでは, このデータを解析して得られる透水係数がどのようなになるか, またその解析誤差はどうなるかを検討する. 通常, 供試体の透水性が低く, 実験に長時間を要するときには, 差圧が減衰して 0 になる前に実験を終了す

る場合が多いと思われる. そこで, 本節での検討には, 解析に用いるデータ数 (データスパン) の影響も加味する. 解析には, Hsieh et al.<sup>12)</sup>の解析解を用いた場合には解が収束しなかったため, Brace et al.<sup>11)</sup>の解を用いて非線形最小二乗法により透水係数を評価した.

データスパンを変えてデータ解析をして得られた透水係数を Fig. 4 に示す. 図中の左端の reference は, 封圧や間隙水圧の条件は同じで, 環境温度変化を与えなかった場合のデータを解析した結果で, 今回の透水係数の標準となる. Fig. 4 では, すべてのプロットに解析誤差を表すエラーバー<sup>10)</sup>を付与した. このエラーバーは, 最小二乗解析における誤差評価<sup>11)</sup>で得られる透水係数の絶対誤差を表している. reference に関しては精度がよく, エラーバーがプロットの中に納まっている. それ以外は, 環境温度変化を与えた透水試験データをそれぞれのデータスパンで区切って解析したものになる. Fig. 4 で使用している記号 (A)~(K) は, Fig. 3 で使用しているものと同じである. なお, Fig. 4 の右から 2 番目の (A)~(B) のデータを使用した解析は, 環境温度変化の影響が出る前のデータを用いて解析した結果ということになる. また, 右端の (C)~(K) のデータを使用した結果は, (C) を試験開始時刻  $t=0$  とみなし, 環境温度変化の影響で無次元水頭差が 1.1 とピークを迎えたところで初期パルスが与えられたとみなして解析した結果を表している. これら二つの透水係数の値は, reference と近い値が得られており, 解析誤差も小さい結果となった. これら以外は, データスパンが短くなればなるほど透水係数の値が過小評価され (1 けた小さい値となり), 解析誤差も数けたにまたがる大きなものとなっている.

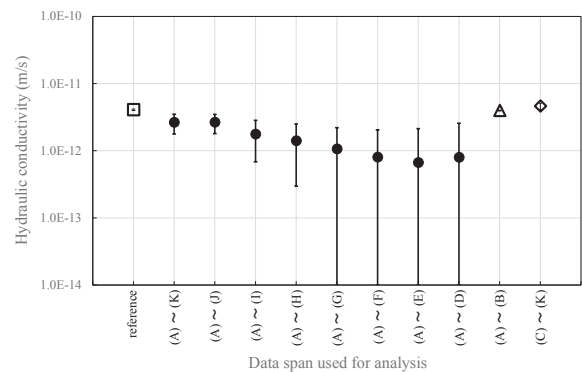


Fig. 4 Hydraulic constants of granite obtained by analysis with the difference of data span used

なお, 環境温度の変化を抑えた透水試験では, 同じ有効封圧条件で複数回透水試験を実施し, 再現性の確認もおこなっている. 得られた土岐花崗岩の透水係数は, 有効封圧 1~9 MPa, 間隙圧 1 MPa において, 透水係数は  $21 \sim 2.6 \times 10^{-11}$  m/s であり, 比貯留率は  $1.2 \sim 23 \times 10^{-7}$  1/m の範囲であった.

#### 4 考 察

本研究では、環境温度変化が透水試験結果に及ぼす影響について検討することを目的としている。しかし、試験時間が短ければ、そのような影響を考慮する必要はないかもしれない。そこで、本考察では、まず環境温度変化の影響を最小限に抑えるために、試験時間を短くするための工夫について言及する。しかしながら供試岩石の透水性が低い場合には試験時間の短縮にも限界がある。その場合、環境温度変化が実験結果に及ぼす影響について、本実験で使用した実験装置を中心にして考察する。

##### 4・1 試験時間の短縮方法

試験時間を短くすることができれば、実験環境の温度変化が実験結果に与える影響を抑えることができる。そこで、ここでは試験時間の短縮方法とその長所・短所について整理しておく。

トランジェントパルス透水試験において、試験時間を短縮するという事は、パルス圧負荷後の差圧の減衰を速めるということと同等である。ここで、パルス圧の大小は減衰の割合とは関係ないが、パルス圧を大きくすることは、測定データに表れる温度変化の影響を相対的に小さくするという効果をもっている。トランジェントパルス試験において差圧の減衰を速めるためには、その方法の一つとして、あるパルス圧に対して供試体内の流量を大きくするということが考えられる。ダルシーの式を考えるとわかるように、差圧が一定で、ある供試体に対して流量を大きくするためには、供試体の高さ（流れ方向長さ）を小さくし（すなわち動水勾配を大きくし）、断面積を大きくすることが有効である。トランジェントパルス試験の透水挙動は非定常であるので、供試体サイズ（断面積と高さ）と試験時間とは単純な比例関係にはないが、他の実験条件が同じであれば、これらのことは試験時間の短縮につながる。ただし、供試岩石を構成している鉱物粒子サイズに対して供試体高さが小さい場合には、マイクロクラックが主要流路となり、ダルシー則が成立しない可能性が出てくる。また、上述のように、供試体の高さを小さくすると、同じ差圧に対しては供試体内の動水勾配が大きくなる。そうすると、供試体の両端面で圧力に大きな差が生まれてしまい、この差圧に合わせて有効封圧も変化するので、供試体内の有効封圧分布も一様ではなくなる。特に供試体高さが小さい場合には、有効封圧に大きな勾配ができてしまう。透水係数には有効封圧依存性があるので、おおきな有効封圧勾配は避けたほうがよい。なお、差圧自体を大きくすることでも動水勾配を大きくすることはできるが、同様な理由から、本研究で実施したトランジェントパルス透水試験においては、有効封圧に対してパルス圧が最大で5%、通常1%以下となるようにしている。短所をもう一つ付け加えると、供試体高さを小さく、断面積を大きくした場合には、供試体が扁平なディスク状になり、静水圧下であったとしても供試体をエンドピースで挟んで固定している関係で偏差応力が発生し、予期せぬひずみが生じる可能性がある。そこで、こ

れらの長所・短所を踏まえて、試験時間を最大限短縮するために、本研究では供試体の高さを2.5 cm、断面の直径を5.0 cmとしている。

差圧の減衰を速めるもう一つの方法として、実験装置の仕様に関して、上流側と下流側それぞれに設置されている貯留槽の容積を小さくすることで両者の圧縮貯留量を小さくし、間隙水圧の変化への応答を速くすることが考えられる。供試体サイズと同様に、貯留槽容積と試験時間には単純な比例関係はないが、他の条件が同じであれば、試験時間の短縮につながる。ただし、貯留槽容積が小さくなり圧縮貯留量が小さくなると、環境温度の変化に対しても敏感になってしまう。また、上流側と下流側で貯留槽容積に違いがある場合は、環境温度の変化が貯留槽圧に与える影響にも差が生じ、差圧を測定している場合にはそれが顕著に表れる。そこで、本実験では、上流・下流の貯留槽としてシリジポンプのシリンダーを使用し、それぞれの容積を両者ともシリンダーの最大容積に近い100 mLとしている。

##### 4・2 環境温度変化と貯留槽圧力との関係

Fig. 2 からわかるように環境温度の変化に一番敏感に反応し、透水試験においても最も重要な差圧についてみておく。装置周りの7°Cの温度上昇に対して、それに追従する形で差圧は27 kPa 上昇している (Fig. 2)。その後は、温度上昇が落ち着くのと相まって、供試岩石内へ水が浸透していくので、差圧は他の測定値の挙動とは異なり減衰していくことになる。なお、差圧が上昇したのは、上流側の貯留槽および配管類が下流側のそれよりも圧力上昇したことを意味している。これは、上流側への伝熱が先じたからか、あるいは上流側にある水の体積が小さいからか、などいくつかの要因が考えられる。ここではその要因を特定するだけの材料を持ち合わせていないが、本装置に関しては、装置周りの温度変化が起こった場合に、測定値にどのような影響が出るのかその傾向をつかむことができた。実際、ここに掲載してはいないが、装置周りの温度を急激に低下させたときには、Fig. 2 の結果とは逆の変化が得られている。

さて、本研究で使用した実験装置に限定して、環境温度の変化が貯留槽圧にどのような影響をもたらすか、もう少し定量的に検討する。貯留槽および配管・継手・バルブ内の水が環境温度変化により熱膨張あるいは収縮し、それが圧力（水頭）変化をもたらすと考える。すなわち、

(1) 環境温度変化 ⇔ 貯留槽・配管・継手・バルブ内の水の体積変化

(2) 貯留槽・配管・継手・バルブ内の水の体積変化 ⇔ 圧力（水頭）変化

のような対応関係に分割して考える。

まず、対応関係 (2) から検討する。通常、水の体積変化と圧力変化との関係は、水の圧縮率を知っていれば計算できる。しかし、今回の装置の場合は水だけではなく、貯留槽や配管の剛性も関係してくるので単純ではない<sup>8),10)</sup>。貯留槽や配管の剛性は、多くの要素が絡み、実験装

置固有のものとなるので、設計図から計算することは難しい。そこで、本研究では、貯留槽や配管・継手・バルブを含めた貯留系の圧縮貯留量（単位水頭変化当たり貯留される流体の体積）を実験的に評価してある。下流側および上流側の貯留系の圧縮貯留量をそれぞれ  $S_d$ ,  $S_u$  とおくと、その値は  $S_d=S_u=8.5 \times 10^{-10} \text{ m}^3$  である。例えば、貯留槽内の水を  $10 \mu\text{L}$  だけ微小体積変化させた（圧縮した）場合、 $118 \text{ kPa}$  ( $12 \text{ m(H}_2\text{O)}$ ) の圧力（水頭）上昇となる。逆に、 $100 \text{ kPa}$  ( $10.2 \text{ m(H}_2\text{O)}$ ) の圧力（水頭）変化を与えた場合、 $8.7 \mu\text{L}$  の体積変化が起こることになる。確認のため、トランジェントパルス透水試験でパルス圧を負荷する際にシリンジポンプを使用し、パルス圧と水の容積の微小変化との関係を実験的に概算したところ、 $60 \sim 80 \text{ kPa}$  のパルス圧（圧力上昇）に対して  $5 \sim 8 \mu\text{L}$  の体積変化が観察された。

つづいて対応関係 (1) も併せて検討する。水の熱膨張率は、 $20^\circ\text{C}$  において  $2.1 \times 10^{-4} \text{ 1/K}$  である。一方、ステンレス鋼 (SUS410) の熱膨張率は  $10.4 \times 10^{-6} \text{ 1/K}$  であり、水のその 20 分の 1 である。したがって、ここでは環境温度変化の影響が水の熱膨張にだけ表れると考える。片側の貯留槽（容積  $100 \text{ mL}$ ）において、温度変化が  $1^\circ\text{C}$  あったとすると、水の体積変化は  $21 \mu\text{L}$  ということになる。これを対応関係 (2) で考えると、 $247 \text{ kPa}$  ( $25 \text{ m(H}_2\text{O)}$ ) の圧力変化が表れることになる。この値は、トランジェントパルス透水試験のパルス圧を数十  $\text{kPa}$  程度にしている場合、S/N比が1以下となり、実験が無効となる数値である。

これらのことを踏まえると、トランジェントパルス透水試験において  $100 \text{ kPa}$  のパルス圧の付与を想定すると、実験データ（差圧の測定値）への環境温度変化の影響を  $5 \text{ kPa}$ （パルス圧の 5%）以下とするためには、環境温度変化を  $0.02^\circ\text{C}$  以下に抑えなければならないことがわかる。したがって、試験時間を要する低透水性岩石の透水試験を実施する場合には、環境温度変化を抑えることは重要であると言える。

#### 4・3 透水試験結果への環境温度変化の影響

前節で考察したように、環境温度の変化が貯留槽圧ひいては差圧に与える影響は無視できない。したがって、環境温度変化の影響ののった差圧データを用いて解析をおこなえば、当然のことながら誤差の大きな結果が得られることになる。Fig. 3 のような実験データが得られれば、明らかに誤差の大きいデータと気づくことができる。しかし、見かけ上滑らかなデータが得られたとしても、データ解析において誤差を評価することにより、ある程度は実験データの信頼性の判断をすることができる。極端な例ではあるが、Fig. 4 のように、評価された透水係数は1桁の違いに収まっているが、データの信頼性が低い場合にはエラーバーが数桁にまたがるような結果となっているので、実験環境の温度管理が重要であることは明らかである。

なお、透水係数の評価結果への温度変化の影響を定量評価するには、データ測定中にいつ温度変化が起こり、そ

の変化の様子はどうか（単発か、断続的か、周期的か）という情報も必要となってくる。今回の実験では、本論の趣旨から単発で単純・単調に温度変化を与えているため、それに足るデータは取得されていない。

## 5 結 言

本研究では、透水試験装置の置かれた断熱室の室内温度を強制的に変化させ、それに伴い取得される貯留槽圧力やその差圧および封圧のデータにどの程度影響が出るのかを実験的に確かめた。できるだけ環境温度は単調な変化とし、それが貯留槽圧や封圧に与える影響を観察し、それらの相関を明確に示すように努めた。その結果、供試体の上流側と下流側に接続されている貯留槽の圧力差（差圧）と貯留槽圧そのもの、それから封圧については、この順番で環境温度変化に対して敏感に反応することがわかった。透水試験においては、大きな環境温度の変動はもちろんのこと、微小な温度変化でさえ、実験データに影響を及ぼすことが確認された。環境温度変化の影響を抑えるためには試験時間を短くする工夫は有効であるが、比較的短時間で実施可能なトランジェントパルス透水試験でさえも、実験環境の温度変化には注意が必要であることがわかった。

本研究は、「放射性廃棄物共通技術調査等事業（放射性廃棄物重要基礎技術研究調査）」（2014 年度～）のサポートを受けて実施した。

## 参 考 文 献

- 1) S. Takeuchi, R. Takeuchi and K. Ando, "Study on hydrogeological conceptualization in a fractured rock based on the cross-hole hydraulic test", Proceedings of the Institute of Natural Sciences, Nihon University, No.48, pp.95-110 (2013).
- 2) Y. Bernabé, "Technical Note: A wide range permeameter for use in rock physics", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Vol.24, No.5, pp.309-315 (1987).
- 3) M. Takahashi and Z. Xue, "On problem in measuring permeability of rocks using pulse method", Chisitsu News, No.421, pp.46-54 (1989).
- 4) K. Nakano, A. Saito and M. Nishigaki, "Laboratory measurement technique for low permeability of rock sample", Soils and Foundations, Vol.31, No.3, pp.164-174 (1991).
- 5) H. J. Sutherland and S. P. Cave, "Argon gas permeability of New Mexico rock salt under hydrostatic compression", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Vol.17, No.5, pp.281-288 (1980).
- 6) D. Trimmer, "Laboratory measurements of ultralow permeability of geologic materials", Review of Scientific Instruments, Vol.53, No.8, pp.1246-1254 (1982).

- 7) Y. Bernabé, “The effective pressure law for permeability in Chelmsford granite and Barre granite”, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, Vol.23, No.3, pp.267-275 (1986).
- 8) M. Zhang, M. Takahashi, R. H. Morin and T. Esaki, “Evaluation and application of the transient-pulse technique for determining the hydraulic properties of low-permeability rocks – part 2: experimental application”, *Geotechnical Testing Journal*, Vol.23, No.1, pp.91-99 (2000).
- 9) Y. Nara, P. G. Meredith, T. Yoneda and K. Kaneko, “Influence of macro-fractures and micro-fractures on permeability and elastic wave velocities in basalt at elevated pressure”, *Tectonophysics*, Vol.503, No.1, pp.52-59 (2011).
- 10) M. Kato, M. Takahashi and K. Kaneko, “Highly precise evaluation of hydraulic constants of low-permeability rocks using the transient pulse method”, *Journal of MMIJ*, Vol.129, No.7, pp.472-478 (2013).
- 11) W. F. Brace, J. B. Walsh and W. T. Frangos, “Permeability of granite under high pressure”, *Journal of Geophysical Research*, Vol.73, No.6, pp.2225-2236 (1968).
- 12) P. A. Hsieh, J. V. Tracy, C. E. Neuzil, J. D. Bredehoeft and S. E. Sillman, “A transient laboratory method for determining the hydraulic properties of ‘tight’ rocks – I. theory”, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanical Abstracts*, Vol.18, No.3, pp.245-252 (1981).
- 13) T. Nakagawa and Y. Oyanagi, “Experimental data analysis by least squares method”, 206p. (1982) The University of Tokyo Press.