

試験手法に依存した岩石の透水試験結果の比較

Comparison of Method-Dependent Results of Rock Permeability Tests

山田淳司*・川村考史*・加藤昌治*・高橋学**・金子勝比古***

Atsushi YAMADA, Takashi KAWAMURA, Masaji KATO, Manabu TAKAHASHI and Katsuhiko KANEKO

A series of laboratory permeability tests consisting of the constant head, falling head, flow pump, and transient pulse methods was conducted for a sandstone specimen under the conditions of constant confining pressure and constant pore pressure. The experiments revealed that hydraulic constants obtained from each method differed each other. For hydraulic conductivity, the value obtained from transient methods was underestimated comparing to that obtained from steady-state methods. However, the hydraulic conductivity from the flow pump test containing transient flow within specimen nearly equals that from the constant head test because the sensitivity of hydraulic conductivity to hydraulic head difference over the steady-state flow period is strong and controls the analytical results. For specific storage obtained only by the transient methods, the value obtained from the flow pump test is greater than those from the other two methods. The difference of experimental results is caused by disagreement between theory and experiment in terms of initial and boundary conditions and technical problems in laboratory measurements.

Keywords: laboratory permeability test, constant head method, falling head method, flow pump method, transient pulse method, hydraulic conductivity, specific storage, rock

1. はじめに

多孔体の水理特性は、工学から理学にいたる種々の分野・方面でその重要性が指摘されている。しかし、その水理特性を室内透水試験により評価する場合、試験手法や試験装置の違い、あるいは測定環境に依存した結果となることが知られている。とくに、岩石のような不均質材料な場合、同じ岩体中でも位置によって水理特性に差が認められる。そこで、本研究では、試験手法に対する依存性を明らかにするため、一つの岩石供試体に対し、実験条件や測定環境を変えずに異なる 4 つの透水試験法を適用することを試みた。そして、得られた実験結果に基づき、実験の再現性や、試験手法の違いとデータ解析手法の違いが水理定数の評価結果に及ぼす影響について検討した。

2. 実験装置

本研究では、Zhang et al.¹⁾を参考にして 4 つの試験法（定水位法、変水位法、フローポンプ法、トランジェン

* 北海道大学大学院工学研究科環境資源工学専攻

** 正会員 工学博士 産業技術総合研究所深部地質環境研究センター

*** 正会員 工学博士 北海道大学大学院工学研究科環境資源工学専攻

トパルス法)を適用可能な3つの送水ポンプを備えた試験装置を製作した(図-1)。供試体は、図のように压力容器内に設置され100MPaまでの封圧がかけられる。この装置は、供試体の上流側と下流側それぞれにシリンジポンプが接続されているので、間隙流体に関しては閉じた系を成し、69MPaまでの間隙圧と数10程度の低動水勾配の条件下において、上流・下流の間隙流体を定圧および定流量で独立に制御することができる。上に挙げた4つの透水試験法のうち3つは、下流側を定圧制御する必要があるため、一定圧力を安定して保持する目的で下流側ラインに付加的に压力容器を設置した。また、差圧計は温度変化に対して敏感なので、実験装置は実験室内に建てられた三重の断熱室内に設置されていて温度変化は $\pm 0.1^{\circ}\text{C}/\text{h}$ に抑えられている(図-2)。

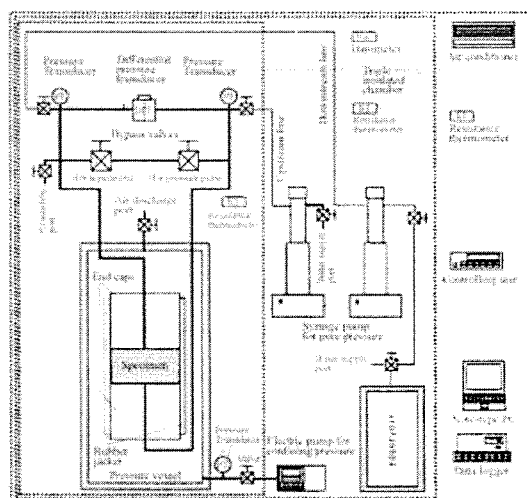


図-1 実験装置

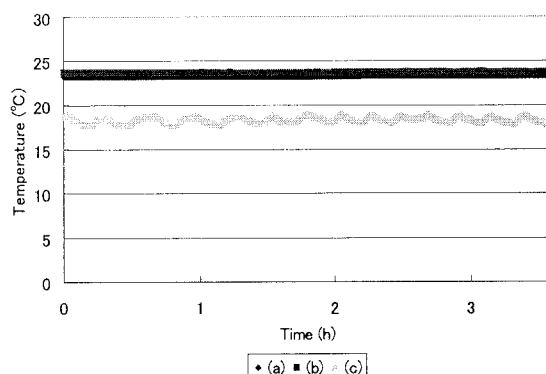


図-2 温度変化 (a : 最内部, b : 中間, c : 外部)

3. 実験方法

本研究では、同一の供試体に対して、フローポンプ法、定水位法、変水位法、トランジェントパルス法の順番で異なる4つの透水試験法を適用した。一つの方法を続けて2回ずつ、4方法合わせて8回の試験を1サイクルとし、各封圧ごとに1~2サイクルの実験をおこなった。それぞれの試験法の実験手順は以下のである。なお、各試験法の概略図を図-3に示す。

フローポンプ試験では、下流側のシリンジポンプの定圧設定により供試体内を所定の圧力にする。下流側のシリンジポンプには一定圧力を安定して保持する目的で压力容器が設置してある(以下、変水位試験まで同様)。その状態で、上流側のシリンジポンプを一定流量で作動させ、供試体に流体を流し込む。このときの差圧とシリンジポンプのシリンダー内残量の経時変化を記録する。

定水位試験では、下流側のシリンジポンプの定圧設定により供試体内を所定の圧力にする。この状態で、上流側のシリンジポンプにより一定圧力を負荷する。負荷する圧力の値は、フローポンプ試験において定常状態となったときの差圧の値を目安とした。これにより供試体両端間に一定の差圧が生じる。この状態を維持し、差圧とシリンジポンプのシリンダー内残量の経時変化を記録する。

変水位試験では、下流側のシリンジポンプの定圧設定により供試体内を所定の圧力にする。この状態で、パルスを使い、所定のパルス圧力(フローポンプ試験において定常状態となったときの差圧の値程度)を上流側に負荷する。そして、その後の差圧の経時変化を記録する。

トランジェントパルス試験では、供試体の上流側と下流側に取り付けられている停止したシリンジポンプのシリンドラーを貯留槽として利用する。さらに、下流側のシリンジポンプに接続された压力容器も使用する。この状態で、バルブを使い、所定のパルス圧力（フローポンプ試験において定常状態となったときの差圧の値程度）を上流側に負荷する。そして、その後の差圧の経時変化を記録する。さらに、下流側に設置した压力容器を切り離れた状態でも同様の試験を実施した。

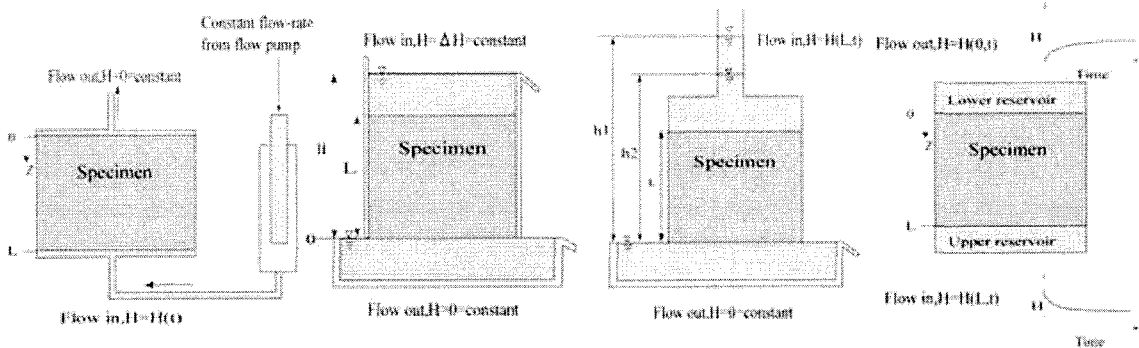


図-3 試験法概略図（左から、フローポンプ法、定水位法、変水位法、トランジェントパルス法）

4. 解析方法

透水試験においては、手法によって供試体内に定常流れが形成されるものと非定常流れしか存在しないものがある。定常流れが形成される定水位試験とフローポンプ試験の後半部分のデータに対しては、次式で表されるダルシーの式を直接適用して透水係数を算出できる。

$$Q = -KA \frac{\Delta h}{l} \quad (1)$$

ここで、 Q は流量 (L^3/T)、 K は供試体の透水係数 (L/T)、 A は供試体の断面積 (L^2)、 $\Delta h/l$ は動水勾配 (-) である。

一方、フローポンプ試験、変水位試験、トランジェントパルス試験から得られる非定常データに対しては、厳密解²⁻⁴⁾に基づいた非線形最小二乗法を適用し、次式で表される残差平方和を最小とするように、透水係数と比貯留率の両方を評価している。

$$S(K, S') = \sum_{i=1}^n \left[\frac{\Delta h^*(t_i)}{H} - \frac{\Delta h(t_i)}{H} \right]^2 \quad (2)$$

ここで、 S' は供試体の比貯留率 (L^{-1})、 $\Delta h(t)$ は供試体両端の水頭差であり、上付きの*は実験値を表し、*の付いていないものは解析解から得られる理論値を表す。 H は、フローポンプ法では平衡水頭、変水位法では初期水頭、トランジェントパルス法ではパルス水頭を表す。

なお、フローポンプ試験データの非定常解析においては、平衡状態（定常状態）における差圧の値をあらかじめ固定することなく解析を実施している。

5. 実験結果

5.1 供試体

供試体としては、国内で広く研究に用いられている白浜砂岩を使用した。本試験に用いた円柱状供試体のサイズは、直径 5cm、高さ 2.5cm である。

5.2 圧縮貯留量

今回の透水試験では、間隙水圧を 1MPa で一定とし、上流側貯留槽としてはシンリンジポンプのシリンダー（容積を 15ml に設定）を、下流側貯留槽としては上流側と同様にポンプのシリンダーだけを使用する場合とそれに増設した圧力容器も合わせて使用する場合とがある。これらの条件に対応する装置の圧縮貯留量は、校正試験を実施してあらかじめ求めておいた。上流・下流ともポンプのシリンダー（それぞれの容積は 15ml）だけを使用した場合の圧縮貯留量は $6.90 \times 10^{-10} \text{m}^2$ であり、その状態に加えて下流側に貯留槽を増設した場合の圧縮貯留量は $5.85 \times 10^{-9} \text{m}^2$ であった。

5.3 透水試験結果

4 つの手法で実施した透水係数の結果の一例を図-4 に示す。この図には、封圧 6MPa における差圧の実験値と逆解析から得られる理論値を示している。この図からわかるように、実験値と理論値は良い一致を示している。

実験データを解析して得られた透水係数の値を図-5 に、比貯留率の値を図-6 にそれぞれ示す。透水係数の値には手法ごとに異なっているが、どの手法を用いた場合でも透水係数の封圧依存性は見て取れる。比貯留率に関しては、フローポンプ試験から得られた値に比べ、変水位試験とトランジェントパルス試験から得られた値が 2 オーダー程度小さな値となっていることがわかる。

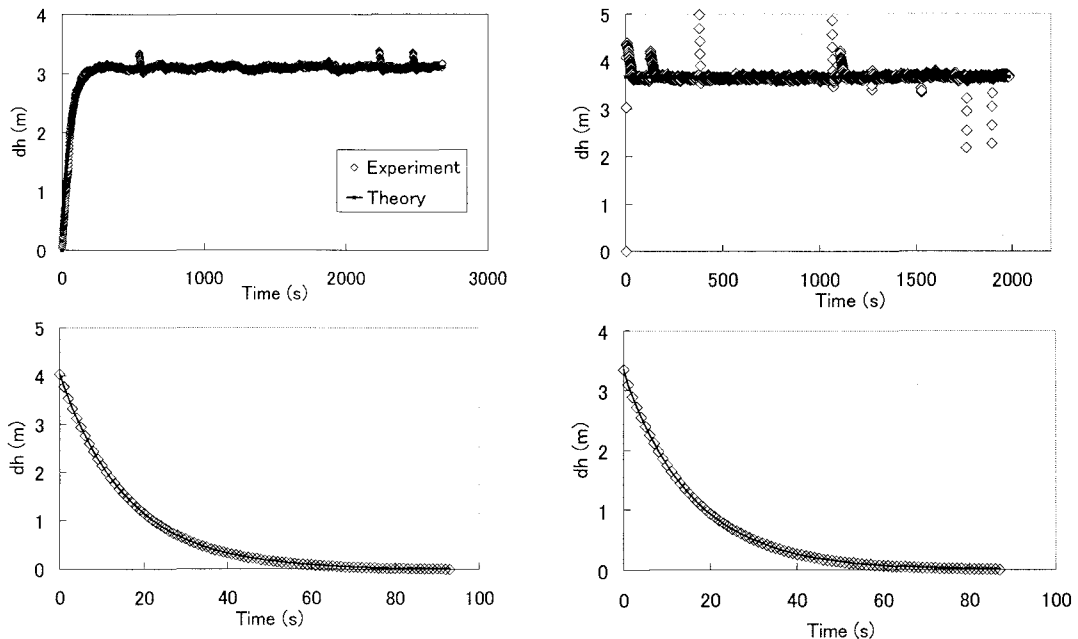


図-4 差圧の経時変化（左上：フローポンプ試験，右上：定水位試験，
左下：変水位試験，右下：トランジェントパルス試験）

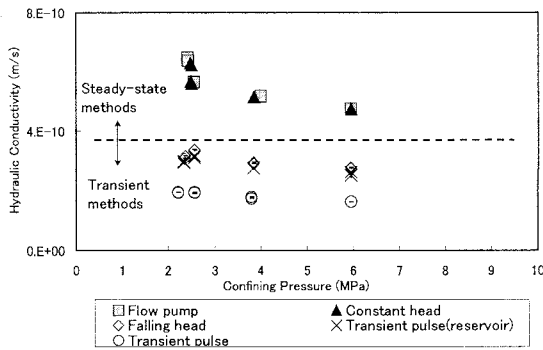


図-5 異なる試験法で得られた透水係数の比較

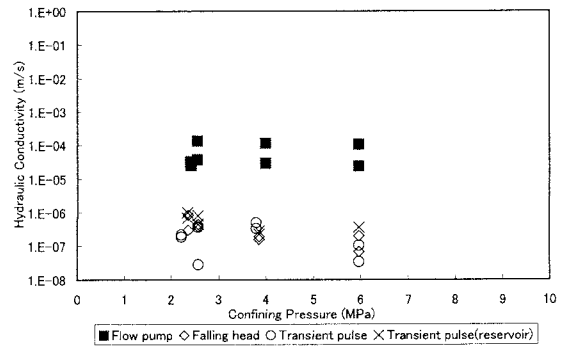


図-6 異なる試験法で得られた比貯留率の比較

6. 考察

6.1 実験の再現性

本研究では、異なる透水試験を連続しておこなうため、一連の試験が供試体の水理的性質を変化させる可能性がある。そこで、トランジェントパルス法、変水位法、定水位法、フローポンプ法の順でおこなう連続試験を同じ封圧・間隙水圧条件下で2サイクル実施した。1サイクルの中では、それぞれの試験を2回ずつおこなっている。その結果を図-7に示す。この図から、2サイクル目の値が若干低いものの、一連の試験による供試体への影響は小さく、この実験システムでおこなう透水試験の結果の再現性が高いことがわかった。

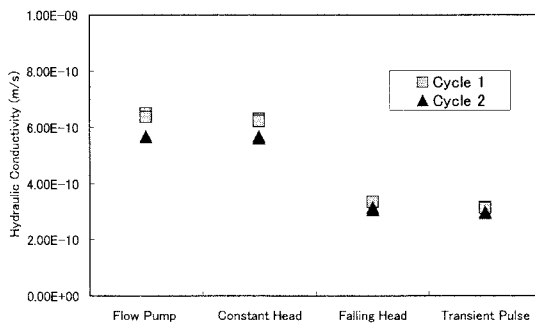


図-7 実験の再現性

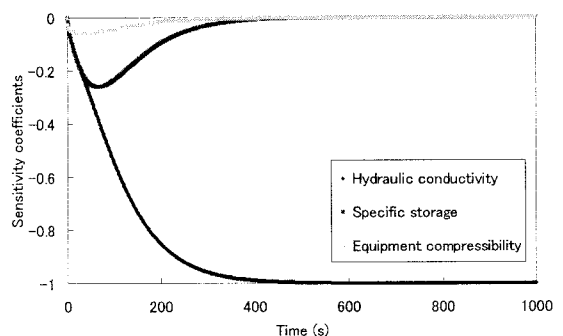


図-8 フローポンプ法における水理定数の感度係数

6.2 異なる試験で得られた透水係数の比較

図-5より、定水位試験とフローポンプ試験から得られた透水係数と、変水位試験およびトランジェントパルス試験から得られた透水係数とに違いがあることがわかる。すなわち、定常法と非定常法といった区別をした場合、定常法を基準にとると、非定常法で得られた透水係数の値が過小評価されているといえる。その理由として、次の二つのことが影響していると考えている。まず第一に、非定常法では、供試体内における実際の水の流れが、理論上起こりうる流れと異なっている可能性がある。トランジェントパルス法と変水位法では、理論上の初期・境界条件を満足させるためには、試験開始時に供試体の上流側端面に瞬時に圧力パルスを与えなければならないが、実際の実験ではそれは難しい。つまり、実験で与えられる圧力パルスは、理論と比較してシャープではない。もう一つは、

計測上の問題である。今回の実験では、データロガーにおいて1秒間隔で計測データを記録している。供試体の透水性にもよるが、圧力パルスの立ち上がりを正確にとらえるためには、本実験においては、データを記録する時間間隔がまだ大きいようである。したがって、このことも、先に挙げた理由に重なって、実験結果に違い（非定常法では定常法に比べて透水係数を過小評価しているということ）を生じさせている一因と考えられる。

ここで、フローポンプ試験の結果については検討しておく必要がある。当試験で得られたデータ全体を使用して非定常解析をおこない水理定数を評価した場合には、非定常解析であっても、定常流れが形成されている部分でのデータに強く依存した解析結果となることに注意が必要である。このことは、図-8に示すフローポンプ法における水頭差に対する透水係数の感度係数からも理解できる。このため、フローポンプ試験の結果は、定常法である定水位試験の結果とほぼ等しい値となっている。

7. まとめ

フローポンプ試験、定水位試験、変水位試験、トランジェントパルス試験の順でおこなう一連の透水試験を同じ封圧・間隙水圧条件下で一つの砂岩供試体に対して実施した。その結果、試験法ごとに得られる水理定数に違いが表れた。透水係数については、非定常法で得られた透水係数が、定常法で得られたものと比較すると過小評価されていた。ここで、非定常流れと定常流れの両者が存在するフローポンプ試験の結果については、解析において定常流れデータの影響が強いため、定常法（定水位法）で得られた結果とほぼ等しいものとなった。非定常法だけからしか得られない比貯留率に関しては、透水係数と傾向は同じで、フローポンプ試験で得られた値が他の二つの試験から得られた値よりも大きくなった。これらのことは、供試体内の実際の水の流れと理論上のそれとの相違や計測技術上の問題などが原因となって表れていると考えられる。

参考文献

- 1) M. Zhang, M. Takahashi, R. H. Morin, H. Endo, and T. Esaki: Determining the Hydraulic Properties of Saturated, Low-Permeability Geological Materials in the Laboratory: Advances in Theory and Practice, Evaluation and Remediation of Low Permeability and Dual Porosity Environments, ASTM STP 1415, M. N. Sava and L. G. Everett, Eds., ASTM, West Conshohocken, PA, 2002
- 2) T. Esaki, M. Zhang, A. Takeshita, and Y. Mitani: Rigorous Theoretical Analysis of a Flow Pump Permeability Test, Geotechnical Testing Journal, Vol. 19, No. 3, pp. 241-246, 1996
- 3) 張銘, 高橋学, 江崎哲郎, 坂井健太郎: 室内変水位透水試験法に関する理論的評価, 北海道応用地学合同研究会論文集, No. 9, pp15-20, 1998
- 4) P. A. Hsieh, J. V. Tracy, J. D. Bredehoeft, and S. E. Silliman: A Transient Laboratory Method for Determining the Hydraulic Properties of 'Tight' Rocks-1. Theory, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech, Vol. 18, pp. 245-252, 1981