



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	トランジェントパルス法を用いた低透水性岩石の水理定数の高精度評価
Author(s)	加藤, 昌治; 高橋, 学; 金子, 勝比古
Citation	Journal of MMIJ : journal of the Mining and Materials Processing Institute of Japan, 129(7), 472-478 https://doi.org/10.2473/journalofmmij.129.472
Issue Date	2013-07-01
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/59120
Type	journal article
File Information	MMIJ.129(2013).472-478.pdf





トランジェントパルス法を用いた 低透水性岩石の水理定数の高精度評価*

加藤 昌治¹ 高橋 学² 金子勝比古³

Highly Precise Evaluation of Hydraulic Constants of Low-Permeability Rocks Using the Transient Pulse Method

by Masaji KATO^a, Manabu TAKAHASHI^b and Katsuhiko KANEKO^c

- a. Assistant Professor, Division of Sustainable Resources Engineering, Faculty of Engineering, Hokkaido University, Nishi 8, Kita 13, Kita-ku, Sapporo, Hokkaido, 060-8628, Japan (Corresponding author, E-mail: kato@geo-er.eng.hokudai.ac.jp)
- b. Chief Senior Researcher, Institute for Geology and Geoinformation, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Site Central 7, 1-1-1 Higashi, Tsukuba, Ibaraki, 305-8567, Japan
- c. Professor, Division of Sustainable Resources Engineering, Faculty of Engineering, Hokkaido University

The transient pulse method is suitable for measuring hydraulic constants of low-permeability rocks in the laboratory. This method is established and reliable; however, there is room for improvement. In this study, we examined analytical solutions of the transient pulse method and introduced a versatile technique of precise test data analysis with sensitivity analysis and experimental error estimation that is based on the nonlinear least-squares method and is applicable to other permeability tests. We also carried out highly precise transient pulse permeability tests in the laboratory and obtained highly precise experimental data. Based on the results, we validated our proposed data analysis technique based on nonlinear least squares.

We conducted transient pulse permeability tests using Inada granite, which is a low-permeability rock, and evaluated its hydraulic constants (hydraulic conductivity and specific storage) using the exact solution of the transient pulse method. We estimated the experimental error between the analytical solution and the experimental data simultaneously. When the approximate solution is used, we can increase precision by considering the compressible storage of the upstream and downstream reservoirs and tubing, which is estimated by a calibration test, instead of considering only water compression. Sensitivity analysis revealed that the sensitivity of the hydraulic head difference between the upstream and downstream reservoirs in terms of hydraulic conductivity is an order of magnitude greater than that in terms of specific storage. This means that the relative error of hydraulic conductivity obtained in a laboratory test is an order of magnitude less than that of specific storage. In precise experiments, control of the room temperature is important because the fluids used in pore and confining lines have thermal expansion characteristics that are sensitive to temperature variation, and the differential pressure transducer is also directly affected by temperature change. The pressure pulse should be as small as possible because if a large change in pressure occurs, the effective stress state of the specimen changes and the permeability changes with it.

KEY WORDS: Permeability Test, Granite, Hydraulic Conductivity, Specific Storage, Sensitivity Study, Error Estimation

1. はじめに

透水性の低い岩石の水理特性を評価するための室内試験法としては、トランジェントパルス法¹⁾(以下、パルス法とも言う)が適している。透水性の高い低いに明確な基準はないが、本論では、透水係数で 10^{-10} m/s 程度よりも小さい値を示す場合に低透水性と位置づけることとする。このような低透水性岩石の水理特性の評価が必要となるのは、たとえば、高レベル放射性廃棄物の地層処分や二酸化炭素の地中貯留における周囲岩盤の天然バリアとし

ての遮へい性能を知りたい場合、あるいは油層や地熱貯留層の挙動評価においてキャップロックからの流体の漏えいの程度を知りたい場合、地震発生過程を議論する上で重要となるプレート境界をも含めた地下深部における高温・高圧条件下での間隙水の挙動を知りたいような場合などが考えられる。

トランジェントパルス法は、すでに信頼のおける確立された透水試験法となっており、1970年代から多くの実験結果が報告されている²⁻²⁷⁾。また、最近では、シェールガスやシェールオイルに関連して、低透水性の頁岩の透気試験にパルス法を適用する試みがなされている²⁸⁻³²⁾。しかし、低透水性岩石の水理定数の高精度評価を考えた場合、それを達成するためにはいくつかの問題点を指摘することができる。そこで、本論では、まずトランジェントパルス法の理論について整理し、感度解析と誤差評価を含めた非線形最小二乗法に基づく汎用的なデータ解析手法を提案する。そして、高精度なトランジェントパルス透水試験を実施し、

*2013年2月4日受付 2013年5月13日受理

1. 正会員 北海道大学大学院 工学研究院 環境循環システム部門 助教

2. 正会員 産業技術総合研究所 地質情報研究部門 上級主任研究員

3. 正会員 北海道大学大学院 工学研究院 環境循環システム部門 教授

[著者連絡先] FAX: 011-706-6325 (北大・加藤)

E-mail: kato@geo-er.eng.hokudai.ac.jp

キーワード: 透水試験, 花崗岩, 透水係数, 比貯留率, 感度スタディ, 誤差評価

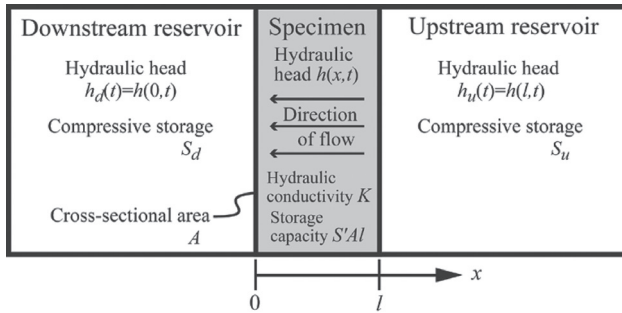


Fig.1 Schematic of the transient pulse method: a specimen connected by two reservoirs.

その結果から本論で提案する手法の妥当性を示し、いくつかの問題点の解決策について議論する。

2. トランジェントパルス法

トランジェントパルス法では、円柱形供試体の軸方向に圧力勾配を与えて一次元流れを発生させる方法¹⁾と中空円筒形供試体の半径方向に圧力勾配を与えて放射状流れを発生させる方法³³⁾の座標系の異なる二通りが提案されている。本論では、実施例の多い前者の方法について取り上げる。この方法では、円柱形供試体の両端に二つの貯留槽を接続し (Fig. 1), 上流側の貯留槽に瞬時に圧力パルスを与え, その後の二つの貯留槽間の圧力差の減衰を計測することにより, 供試体の水理特性を評価することができる。この方法の優れた点は, 供試体内を浸透する流体の流量を測ることなしに, 流量計よりも相対的に測定精度の高い圧力計や差圧計を用いることにより, 比較的短時間に低透水性の供試体の水理定数を評価できることである。

従来, トランジェントパルス透水試験で得られるデータの解析には, 供試体自体の圧縮貯留量が貯留槽の圧縮貯留量に比べて無視できるような条件下において試験を実施し, 近似解を用いて供試体の透水係数だけを評価していた¹⁻⁴⁾。その後, 近似解の適用範囲が議論され^{34, 35)}, 供試体や装置の圧縮貯留量も考慮したパルス試験の解析解が厳密に導かれ³⁶⁾, 図解により透水係数の最適値を決定する方法が提案されている⁵⁾。最近では, 厳密解を利用することにより, 供試体の透水係数と比貯留率ならびに装置の圧縮率を一度の試験で同時に評価した例が報告されている²⁴⁾。

2・1 理論

まず, 水頭拡散方程式 (加藤ら³⁷⁾の Appendix 1 を参照) から導かれる二つの解析解について述べる。一つは, Brace et al.¹⁾がトランジェントパルス法を提案したときに導入したもので, 供試体自体の圧縮貯留量が貯留槽の圧縮貯留量に比べて無視できるほど小さい場合に有効な近似解である。そのため, この近似解には供試体の比貯留率は表れず, 水理定数としては透水係数だけが含まれている。もう一つは Hsieh et al.³⁶⁾によって導かれた厳密解であり, 供試体の透水係数と比貯留率の両方の水理定数が含まれた形の式となっている。

上流側と下流側の貯留槽の容積 (それぞれ V_u と V_d [m³]) が等しい場合 ($V_u = V_d$) には, Brace et al.¹⁾の近似解は以下のように書き表される。

$$\frac{\Delta h(t)}{H} = \frac{h_u(t) - h_d(t)}{H} = \exp\left(-\frac{2KA}{\rho g \beta_f l V_u} t\right) \dots \dots \dots (1)$$

ここで, t は水頭パルス負荷後の経過時間 [s], $h_u(t)$ および $h_d(t)$ はそれぞれ経過時間 t における上流側および下流側の貯留槽内の水頭 [m] であり, その差を $\Delta h(t)$ とする。 H は水頭パルスの大きさ [m] であり, $\Delta h(0)$ に等しい。 l と A はそれぞれ供試体の高さ [m] と断面積 [m²] である。 K は供試体の透水係数 [m/s] を表す。 g は重力加速度 [m/s²], ρ と β_f はそれぞれ浸透流体の密度 [kg/m³] と圧縮率 [Pa⁻¹] である。

Hsieh et al.³⁶⁾により与えられた厳密解から導かれる水頭差の式は以下のものである。

$$\frac{\Delta h(t)}{H} = \frac{h_u(t) - h_d(t)}{H} = 2 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\exp(-\alpha \phi_m^2)}{\frac{\gamma^2 \phi_m^4}{\beta^2} + \frac{\phi_m^2}{\beta} - (\gamma^2 \beta + \gamma^2 + \gamma + \beta) + \beta^2 + \gamma \beta + \beta} \left\{ \beta(1 - \sec \phi_m) + \frac{\gamma \phi_m^2}{\beta} - (\gamma + \sec \phi_m) \right\} \dots (2)$$

ただし, α , β , γ は

$$\alpha = \frac{Kt}{l^2 S'} \dots \dots \dots (3)$$

$$\beta = \frac{S' A l}{S_u} \dots \dots \dots (4)$$

$$\gamma = \frac{S_d}{S_u} \dots \dots \dots (5)$$

で定義される無次元パラメータである。これらの意味するところは, α が無次元時間, β が上流側貯留槽の圧縮貯留量 S_u [m²] に対する供試体の圧縮貯留量の比, γ が上流側貯留槽の圧縮貯留量に対する下流側貯留槽の圧縮貯留量 S_d [m²] の比である。無次元時間 α は, 供試体の透水係数や比貯留率 S' [m⁻¹], 高さの影響を取り除いた試験時間を表わし, 異なる試験法の実験データの比較などに利用することができる。また, β が十分小さい場合には, 式 (1) に示した Brace et al.¹⁾の近似解の条件を満たす。貯留槽の圧縮貯留量は,

$$S_u = C_{ew} V_u \dots \dots \dots (6)$$

$$S_d = C_{ew} V_d \dots \dots \dots (7)$$

と書くこともでき, ここで C_{ew} は装置の圧縮率 (間隙水と貯留槽および配管類を包含する貯留系全体の圧縮率) [m⁻¹] を表している。上流側と下流側の貯留槽の材質が同じで容積が等しい場合には $S_u = S_d$ と考えてよく, このときには $\gamma = 1$ となる。 ϕ_m ($m=1, 2, \dots$) は次の非線形方程式の非零で正の実数根であり, 無数に存在する。

$$\tan \phi = \frac{(1 + \gamma) \phi}{\frac{\gamma \phi^2}{\beta} - \beta} \dots \dots \dots (8)$$

2・2 水理定数の感度解析

トランジェントパルス法における水理定数の感度スタディについては既に報告がある¹⁸⁾。Wang and Hart¹⁸⁾が“感度係数”として計算している $\partial \Delta h(t) / \partial (\ln K)$ と $\partial \Delta h(t) / \partial (\ln S')$ は, それぞれ透水係数および比貯留率の水頭差に対する感度係数である。この感度係数は, 水理定数を少しだけ変化させたときに水頭差がどのくらい変化するかを表す指標である。これらの値は, 本研究においては後述する最小二乗法によるデータ解析で使用されているヤコビアン行列の成分を用いて計算できる。なお, 感度の大小を議論するときには, 感度係数の絶対値を用いる。

これまでの報告では、これら感度係数間の関係については明らかにされていなかった。ここで、装置の圧縮率 C_{ew} の感度係数 $\partial \Delta h(t_i) / \partial (\ln C_{ew})$ を導入すると、3つの感度係数の間に次式のような従属関係が認められた。

$$\frac{\partial \Delta h(t_i)}{\partial (\ln K)} + \frac{\partial \Delta h(t_i)}{\partial (\ln S')} + \frac{\partial \Delta h(t_i)}{\partial (\ln C_{ew})} = 0 \quad (9)$$

上式は、感度係数の関係が独立ではないことを示しており、データ解析において極めて重要な意味を持つので、後節で説明する。

3. データ解析手法

岩石の透水係数の高精度評価を考えた場合、実験で得られたデータをどう処理するのことも重要となる。そこで本章では、実験データの解析手法について述べる。

トランジェントパルス透水試験で得られるデータの解析には、供試体自体の圧縮貯留量が貯留槽の圧縮貯留量に比べて無視できる場合には、Brace et al.¹⁾の近似解を用い、片対数グラフに実験データをプロットし、その近似直線の傾きを求めることにより、比較的簡単に供試体の透水係数だけを評価できる。Hsieh et al.³⁶⁾が厳密解を導いてからは、供試体の透水係数と比貯留率の評価が可能となったが、当時は精度の高い実験データを得ることが難しかったことと、解析にはグラフ解法⁵⁾が用いられており手順が煩雑であったことから、その適用例は数少ない。その後、Zhang et al.²⁴⁾がグラフ解法を用いずに、コンピュータを利用して探索法により岩石の水理定数を求めることに成功している。

本論では、従来の手法よりもさらに汎用性を高めたものとして、非線形最小二乗法を利用したデータ解析手法を提案する。

3・1 非線形最小二乗法

本研究では、非線形最小二乗法 (Gauss-Newton 法)³⁸⁾を採用することにより、トランジェントパルス試験で得られる水頭差の減衰曲線から厳密解を用いて透水係数と比貯留率を同時に算出する手法を提案する。最小二乗法では、次式で表される残差平方和 S を最小とするように水理定数 (K, S') を決定することができる。

$$S = \sum_{i=1}^n \left[\frac{\Delta h^*(t_i)}{H} - \frac{\Delta h(t_i)}{H} \right]^2 \quad (10)$$

ここで、 $\Delta h(t)$ は供試体の両端の水頭差、すなわち上流側と下流側の貯留槽の水頭差 $h_u - h_d$ [m] 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 (式 (2)) から得られる理論値を表す。 t は測定開始時からの経過時間 [s] である。なお、従来法である近似解を用いる手法は考察で使用している。

Gauss-Newton 法では、 ΔX が任意の収束条件を満足するまで次式の繰り返し計算をおこなう。

$$A \Delta X = Y \quad (11)$$

ここで、

$$A = \frac{1}{H} \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta h(t)}{\partial K} \bigg|_{t=t_1} & \frac{\partial \Delta h(t)}{\partial S'} \bigg|_{t=t_1} \\ \frac{\partial \Delta h(t)}{\partial K} \bigg|_{t=t_2} & \frac{\partial \Delta h(t)}{\partial S'} \bigg|_{t=t_2} \\ \vdots & \vdots \\ \frac{\partial \Delta h(t)}{\partial K} \bigg|_{t=t_n} & \frac{\partial \Delta h(t)}{\partial S'} \bigg|_{t=t_n} \end{bmatrix} \quad (\text{ヤコビアン行列})$$

$$\Delta X = \begin{bmatrix} \Delta K \\ \Delta S' \end{bmatrix}, \quad Y = \frac{1}{H} \begin{bmatrix} \Delta h^*(t_1) - \Delta h(t_1) \\ \Delta h^*(t_2) - \Delta h(t_2) \\ \vdots \\ \Delta h^*(t_n) - \Delta h(t_n) \end{bmatrix}$$

である。式 (11) は、どのような実験データに対しても収束するという保証はないが、著者らの経験上、理論曲線のように滑らかなデータが取れたときには、計算は素早く収束する。データが理論曲線のように滑らかということは、実験値が理論解に近いということであり、次節で述べる誤差評価を行なうことによってそれが定量的に明らかにされる。

3・2 誤差評価

前節で述べた最小二乗解析において、収束条件は実験データの精度から判断する必要がある。実験データの精度が高ければ、厳しい条件を与えても計算は収束するであろう。逆に、実験データの精度が低い場合は、与える条件によっては計算が収束しないことが考えられる。そこで、本研究では、実験データの精度を議論するために、式 (10) の残差平方和から、得られた水理定数の相対誤差を評価することにした。水理定数の相対誤差が得られれば絶対誤差も計算できるので、最終的な結果に誤差評価を反映することができる。

4. 実験方法および結果

4・1 実験方法

本研究で使用した透水試験システムは Fig. 2 のようである。このシステムは、大きく分けて、間隙流体系、拘束流体系、制御・記録系および独立した温度制御系から成る。拘束流体系には、供試体をセットする圧力容器 (耐圧 100 MPa)、加圧用のハンドポンプならびにその配管類を含む。間隙流体系は、貯留槽 (耐圧 100 MPa; 容積 1 L×2 本)、間隙流体供給・圧力制御用シリンジポンプ (ISCO 社製 100DX: 最大圧力 69 MPa; 圧力分解能 1 kPa; 流量範囲 $10^{-5} \sim 30$ mL/min)、セパレート用およびパルス用バルブ (Swagelok 社製 Sno-Trik SS-445-FP) を含む配管類から成る。制御・記録系には、データロガー (濱田電機社製マルチロガー H1201) 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 (Validyne 社製 DP363-40)、圧力計、温度センサー (熱電対)) が含まれる。独立した温度制御系は、温度センサー (白金測温抵抗体) と温度調節器および電気ヒーターから成っている。

供試体の設置方法は以下のようである。まず円柱形の供試体 (直径 5 cm、高さ 2.5 ~ 5 cm) を分水盤と O リングの備わったステンレス製のエンドピース (直径 5 cm) で両側からはさみ、長期間の実験にも耐えうよう低透過性のバイトンチューブ (内径 5 cm、長さは供試体より約 4 cm 長くする) を被せ、固定円盤ではさんでボルトで固定する。そして、エンドピースとチューブの接触部には、封圧媒体の侵入を防ぐためシリコンシーラントを塗布する。シリコンが乾燥固化した後、圧力容器のふたの裏側に供試体を設置して、供試体の両端面側からふた側に上流側・下流側合わせて 2 本の間隙水チューブを接続する (Fig. 3)。この裏返ったふたを逆さに戻して圧力容器に下ろし (Fig. 4)、ボルトを締めれば、封圧媒体および間隙水を供給できる状態となる。

トランジェントパルス試験では差圧計のデータが重要である。しかし、差圧計は微小な温度変化でも敏感に反応してしまう。その理由は、差圧計自体に温度依存性があることに加えて、固体に比べて流体の熱膨張率は大きく、微小な温度変化でも間隙流体の膨張収縮を引き起こし、それが圧力変化に直結するからである。

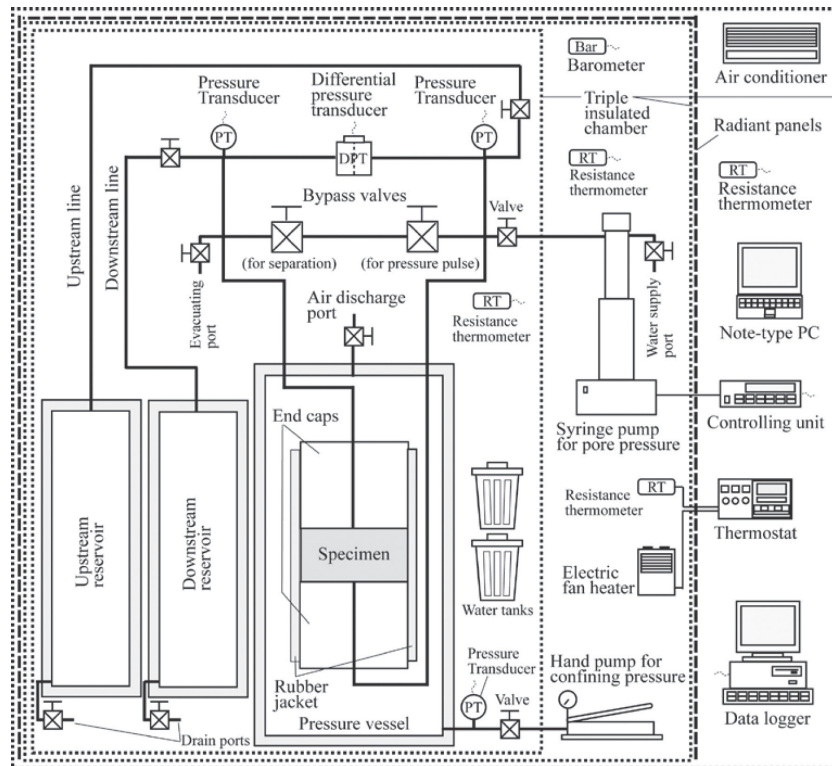


Fig.2 Permeability test system for the transient pulse method.

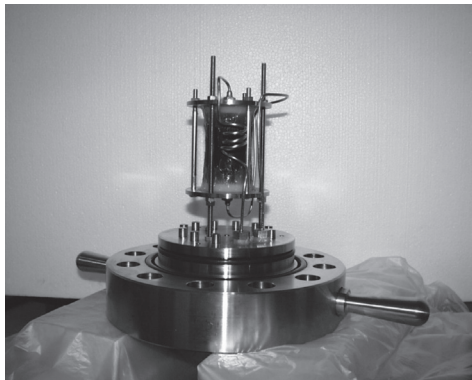


Fig.3 Photograph of specimen assembly. Specimen is pinched by a couple of end caps, covered with black Viton jacket, and applied by silicone sealant. Pore water lines connect end caps to the reverse side of the lid of the pressure vessel.

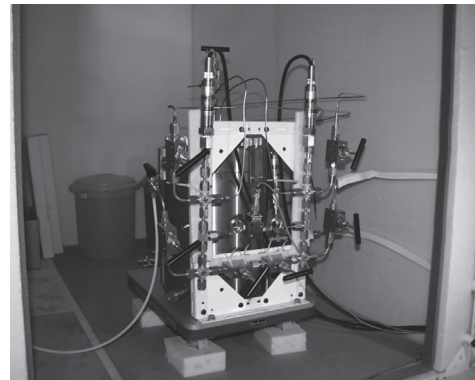


Fig.4 Photograph of pressure vessel with tubing panel, which includes valves, pressure transducers, and differential pressure transducer in the center, put in the inside chamber of the permeability test system.

そこで、装置周辺の温度変化を最小限に抑えるために、Fig. 2 に描かれているように、圧力容器と差圧計を含むメインの配管は3重の断熱室の一番内側に設置し、一番外側には家庭用のエアコンで冷房し、中間の部屋では温調器と小型電気ヒーターで微小暖房することにより、一番内側の圧力容器周りの温度変化を試験中は $\pm 0.01^\circ\text{C}$ 以内に制御するように努めた。

岩石供試体の実験に先立ち、較正試験を実施し、装置（間隙水配管系全体）の圧縮率 C_{ew} を実験的に求めておいた。その方法は、不透水性の金属供試体をセットし、シリンジポンプを使って上流側と下流側の貯留槽に定流量で送水し、そのときの圧力の上がり具合から圧縮貯留量 S_u と S_d を求めるというものである。式 (6) と (7) から、圧縮貯留量を貯留槽の容積で割れば、装置の圧縮率を求められることがわかる。結果として、Fig. 2 の装置の圧縮率 C_{ew} は、間隙水圧 1 MPa のときには $5.85 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$ であった。

透水試験には、低透水性の岩石として稲田花崗岩を用いた。そ

の理由は、稲田花崗岩を供試体として透水試験を行なった研究は数多く^{9, 13-17, 20-25, 27)}、それらを参考にすれば実験の計画がたてやすく、結果の比較もできるからである。供試体のサイズも、既往の研究²³⁻²⁵⁾を参考に、直径 5.0 cm、高さ 2.5 cm のディスク状とした。

透水試験の圧力条件は、間隙圧を 1 MPa で固定し、封圧を 2 ~ 10 MPa の間で 5 段階に設定した。ただし、最初の条件（封圧 2 MPa、間隙圧 1 MPa）では、実験の再現性を検証するために、同じ条件で連続的に複数回実験を行なった。なお、圧力パルスはできるかぎり小さいほうが望ましい。なぜなら、大きな圧力パルスを与えると、衝撃的な間隙圧変化が起こり、急な動水勾配を発生させ、供試体の有効応力状態を急激に変化させて体積変形を生じさせ、それに伴い供試体の透水性も変えてしまうからである。さらに言えば、試験中は時間と共に間隙圧分布が大きく変化するので、供試体内の透水性の分布も変化しながらの試験となってい

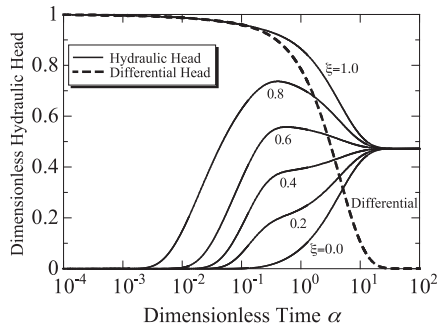


Fig. 5 Variations of hydraulic head distribution within a specimen and head difference during the transient pulse test.

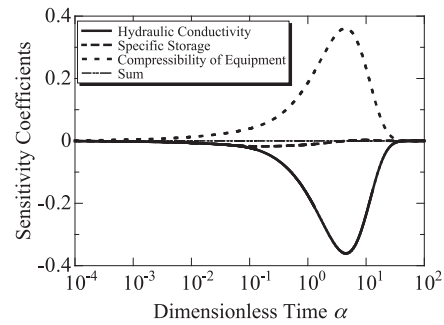


Fig. 6 Variation of sensitivity coefficients of head difference in terms of hydraulic constants and compressibility of equipment.

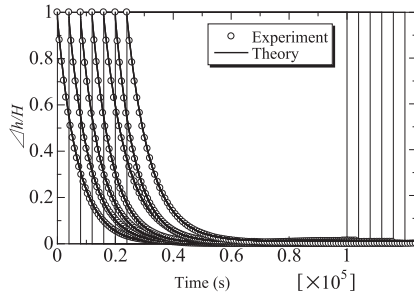


Fig. 7 Experimental data of hydraulic head differences obtained by seven times of transient pulse tests with theoretical decline curves. These are displayed by 4000 s.

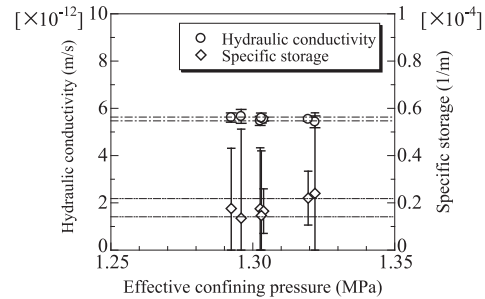


Fig. 8 Hydraulic constants of Inada granite with error bars evaluated by the exact solution.

まう。また、衝撃的な間隙圧変化により鉱物の小片が移動し目詰まりの原因になるかもしれない。このようなことを避けるため、本試験では、圧力パルスは 10 kPa 程度とした。これは有効応力の 1% 以下に抑えられている。

4・2 実験結果

まず、感度係数を見ておく。本研究で使用した実験装置の仕様と封圧が 2 MPa のときに得られた透水試験結果に対応させて、供試体内の水頭分布と水理定数の感度係数を求めるとそれぞれ Figs. 5, 6 のようになった。横軸には無次元時間 α の対数をとっている。Fig. 5 の供試体内の水頭分布については、供試体の軸方向の無次元位置 $\xi = x/l$ ($0 \leq \xi \leq 1$) を導入して、軸方向に下流側端面から上流側端面に向かって 5 等分し、 $\xi = 0.0$ (下流側端面), 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 (上流側端面) の 6 点での水頭の経時変化を示している。同図には、水頭差の経時変化も掲載している。Fig. 5 と Fig. 6 を比較すると、水頭差の減衰が大きいき ($0.5 \leq \alpha \leq 15$) に対応して透水係数の感度も大きくなっていることがわかる。比貯留率の感度係数に関しては、水頭差の減衰初期 ($\alpha = 0.15$ 付近) で最大値を示すが、その絶対値は透水係数のそれに比べて一桁以上も小さいことがわかる。このことから、水理定数の評価精度を考えた場合、比貯留率の相対誤差が透水係数のそれよりも一桁以上大きくなることが予想される。

トランジェントパルス試験で得られる実験データは、供試体両端間の水頭差の減衰曲線である (対数を取った場合は Fig. 5 の破線のような)。まず、パルス試験の再現性を検証するために実施した繰り返し実験の結果を示す。Fig. 7 には、封圧 2 MPa、間隙圧 1 MPa の条件下で、一つの供試体を圧力容器にセットしたまま連続して 7 回のパルス試験を行なったときの水頭差の減衰曲線の実験値と解析で得られた理論値を示す。ただし、連続した実験と言っても、1 回ごとに間隙圧を調整し、それが平衡になるのを待ってから次の実験に移っている。したがって、平衡状態

Table 1 Statistics of hydraulic constants of Inada granite measured by the repetition transient pulse method under the conditions of 2 MPa confining pressure and 1 MPa pore pressure.

	Mean	Standard deviation	Coefficient of Variation
Hydraulic conductivity	5.55×10^{-12} m/s	0.08×10^{-12} m/s	0.014
Specific storage	0.18×10^{-4} 1/m	0.04×10^{-4} 1/m	0.22

を待つ時間を含めて 1 回の実験には 2 日程度要している。Fig. 7 を描くにあたり、複数回実施した実験のデータをそのまま重ねてしまうと、すべて良い一致を示しているため違いがわからなかった。そこで、複数回のデータを横方向に 4000 s ずつずらして、それぞれに実験値と理論曲線の両方を示した。なお、縦軸には水頭差を水頭パルスの値で除して規格化 (無次元化) した値をとっている。この図から、今回の実験の再現性の良さと、実験値と理論曲線の良い一致が見て取れる。

つぎに、繰り返し試験の実験データの非線形最小二乗解析で得られた水理定数を検討する。本解析では、較正試験から得られた間隙水配管系全体の圧縮率 C_{ew} を使用して、式 (10) の残差平方和を最小にするように花崗岩の透水係数と比貯留率を決定した。なお、データ解析には、水頭差が初期値から 10% に減衰するまでのデータを使用した。データ解析の結果を Fig. 8 と Table 1 に示す。Fig. 8 には個々の水理定数に絶対誤差を表すエラーバーを付けて示した。Table 1 には、繰り返し試験で得られた水理定数の平均、標準偏差および変動係数が掲載されている。Fig. 8 に描かれたエラーバーの長さや Table 1 の変動係数から、感度解析で予想していたように、透水係数の相対誤差が比貯留率の相対誤差に比べて 1 桁以上小さいことがわかる。

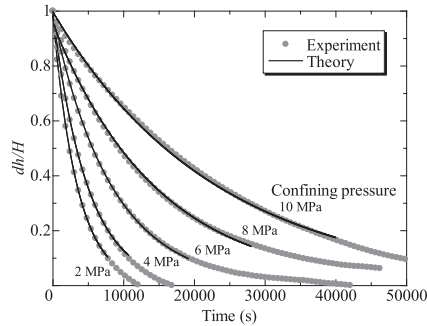


Fig.9 Experimental data of hydraulic head differences at each confining pressure obtained by the transient pulse tests with theoretical decline curves.

繰り返し透水試験に続いて実施した封圧を変えた場合の透水試験の結果を Fig. 9 に示す。グラフには無次元化した水頭差の実験値がプロットされており、解析で得られた理論曲線も描かれている。この図から、封圧が増加すると、水頭差の減衰が緩やかになっていくことがわかる。しかしながら、いずれの封圧においても実験値と理論曲線が良好一致を示していることがわかる。データ解析で得られた透水係数を Fig. 10 に示す。この図から、透水係数が封圧の増加に伴って減少していく様子がわかる。この図には、次章の考察で使用するプロットも載せてある。

5. 考 察

本研究で得られた稲田花崗岩の透水係数は、同等の封圧条件下の実験結果と比較すると、Hsieh et al.³⁶⁾ の厳密解を用いた Zhang et al.²⁴⁾ の結果よりも 1 オーダー程度低い値となった。同岩石で Brace et al.¹⁾ の近似解を用いた高橋ら¹⁴⁾ の結果と比較すると数倍大きな値を示している。この結果を検討するために、厳密解を用いた場合と近似解を用いた場合とでどのような違いが表れるかを検討しておく。

Brace et al.¹⁾ の近似解の有効性は、Zhang et al.³⁹⁾ に述べられているように、上流・下流の貯留槽の容積が等しい場合には、計測開始直後の実験データを用いたときに透水係数を過大評価してしまう。そのため、近似解を使う場合は、供試体内の水の流れが準定常状態になる計測後半のデータを用いることが望ましい。しかしながら計測時間が長くなると、温度変化等なんらかの因子が計測結果に影響を与える可能性があるため注意が必要である。ここで、計測開始直後のデータを Brace et al.¹⁾ の近似解で評価すると過大評価してしまう原因は、比貯留率の影響が計測開始直後に大きく表れるからである。すなわち、近似解では岩石の圧縮貯留量は貯留槽の圧縮貯留量に比べて無視できるくらい小さいという仮定をおいているからである。なお、本研究で用いた透水試験装置は、Brace et al.¹⁾ の仮定を満たすように設計されている ($\beta=0.117$)。

そうすると、次に考えなくてはならないのは、装置の剛性の問題である。Brace et al.¹⁾ は、貯留槽の圧縮貯留量を考えるときに、貯留槽自体は剛的に扱い、その中に入っている水の圧縮性だけを考慮している。すなわち、貯留槽の圧縮貯留量の値は、貯留槽の容積に水の圧縮率をかけたものとなっている。しかし、実際の試験装置では貯留槽や配管の剛性はあまり高くはないので、水および貯留槽・配管全体の圧縮率は水だけの圧縮率よりも大きい値を示す。Zhang et al.²⁴⁾ はそれを考慮して供試体の水利定数を決定している。この全体の圧縮率は、シリンジポンプのような高精度ポンプを使い、校正試験をおこなうことにより実験的に評価することができる。Zhang et al.³⁹⁾ はさらに厳密解を用いた逆解析からも

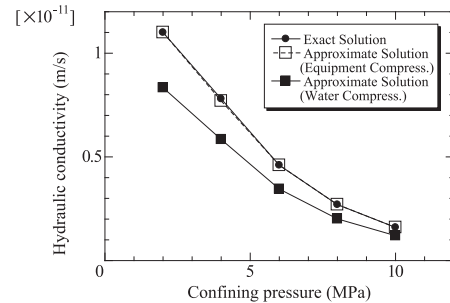


Fig.10 Comparison of hydraulic conductivities of Inada granite obtained by different analytical solutions.

全体の圧縮率を評価している。しかしながら、この全体の圧縮率に関しては、実験値と解析値で若干の開きがあるようである。

ここで、上述した Hsieh et al. の厳密解³⁶⁾ を用いた場合と従来用いられてきた Brace et al. の近似解¹⁾ を用いた場合とで水利定数の評価結果にどのような違いが表れるかを実際に検討しておく。本研究で用いた装置は、前述したように、近似解が適用可能なように、すなわち岩石の圧縮貯留量が貯留槽の圧縮貯留量に比べて小さくなるように設計されているため、両手法を用いたデータ解析結果を直接比較することができる。

今回の実験データ (Fig. 9) に対して、Brace et al.¹⁾ の近似解に水だけの圧縮率を使用したときに算出される透水係数は、Fig. 10 の■のプロットとなり、予想通り、厳密解を使用した結果 (●) より過小評価され、約 72 ~ 81% の値となっている。これで、実験装置の貯留槽や配管の剛性はあまり高くなく、間隙水貯留系全体の圧縮率は水だけの圧縮率より大きいということが示された。

そこで、近似解を用いる場合でも、精度良く透水係数を評価可能な方法をここで提案したい。その方法は、近似解を用いるときに、水の圧縮率だけではなく、貯留系全体の圧縮貯留量を考慮するというものである。その場合の近似解は次式のように表される。

$$\frac{\Delta h(t)}{H} = \exp \left\{ -\frac{KA_t}{l} \left(\frac{1}{S_u} + \frac{1}{S_d} \right) \right\} \dots \dots \dots (12)$$

ここで、式中の S_u と S_d は、式 (6)、(7) では上流・下流の貯留槽の圧縮貯留量としていたが、厳密にはそれぞれ上流・下流の貯留槽と配管を含めた貯留系全体の圧縮貯留量と定義するほうが正確である。したがって、実験的にこの圧縮貯留量 S_u と S_d を精度よく評価しておくことができれば、近似解を用いた場合でも精度よく透水係数が求められるはずである。そこで、Fig. 9 の実験データに対して、貯留系の圧縮貯留量を考慮して近似解を適用して透水係数を求めたところ、Fig. 10 の□のようなプロットとなり、きれいに厳密解のプロットと重なった。これらの値を比べると、厳密解と近似解から得られる透水係数の差異は 1% 未満であった。

6. ま と め

本論では、低透水性岩石の水利定数の高精度評価を目的として、トランジェントパルス法による透水試験についていくつかの検討を行なった。最初に、パルス法の理論について整理し、感度解析と誤差評価を含めた非線形最小二乗法に基づく汎用的なデータ解析手法を提案した。そして、低透水性の稲田花崗岩に対して高精度なトランジェントパルス透水試験を実施し、その結果から本論で提案する手法の妥当性を示し、いくつかの問題点の解決策について議論した。その結果として得られた知見は以下のようである。

- (1) Hsieh et al. の厳密解³⁶⁾を用いて非線形最小二乗法によるデータ解析を実施することにより、稲田花崗岩の二つの水理定数(透水係数と比貯留率)を精度よく評価することができた。これは汎用的な手法であり、他の透水試験のデータ解析にも適用可能である。
- (2) このとき、理論解と実験データとの乖離を表わす指標となる実験誤差の評価も行なうことができた。
- (3) Brace et al. の近似解¹⁾を使った場合でも、水の圧縮率ではなく、そこに装置の圧縮貯留量を代入することにより、透水係数の評価精度を上げることができた。装置の圧縮貯留量は、較正試験により実験的に求めておくことが望ましい。
- (4) 水理定数などパラメータの感度解析から、本システムでは、透水係数の感度が比貯留率のそれに比べて1桁以上大きいことがわかった。このことは、裏を返せば、水理定数の評価に際しては、透水係数の評価精度が比貯留率のそれに比べて1桁以上高いことを意味している。

最後に、高精度なトランジェントパルス透水試験を実施する際に注意が必要な事項を二つ掲載して、本論を締めくくりたい。

- (1) 実験においては、装置周囲の温度変化を抑えることが重要である。透水試験は間隙流体の挙動を測る実験であり、固体に比べて流体の熱膨張率は大きく、微小な温度変化でも間隙流体の膨張収縮を引き起こし、それが圧力変化に直結するからである。また、差圧計自体にも温度依存性がある。
- (2) 圧力パルスはできるかぎり小さいほうが望ましい。なぜなら、衝撃的な間隙圧変化が供試体の有効応力状態を急激に変化させ、体積変形を生じさせ、それに伴い供試体の透水性も変えてしまうからである。また、衝撃的な間隙圧変化により鉱物の小片が移動し目詰まりの原因になるかもしれない。とくに有効応力が小さいときには注意が必要である。

謝辞 試験装置の設計に関しては張銘博士(産業技術総合研究所)にご教示いただいた。装置の製作においては林為人博士(海洋研究開発機構)にお世話になった。実験の実施に際しては、北大大学院生の佐ノ木哲氏(現在:地層科学研究所)、宮城淳氏(現在:1st Dog Cafe)の協力を得た。論文の作成に際して、北大大学院工学研究院の川崎了准教授には日々励まされた。これらの方々に謝意を表する。

References

- 1) W. F. Brace, J. B. Walsh and W. T. Frangos: *J. Geophys. Res.*, **73** (1968), 2225-2236.
- 2) M. D. Zoback and J. D. Byerlee: *J. Geophys. Res.*, **80** (1975), 752-755.
- 3) R. L. Kranz, A. D. Frankel, T. Engelder and C. H. Scholz: *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, **16** (1979), 225-234.
- 4) W. F. Brace: *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, **17** (1980), 241-251.
- 5) C. E. Neuzil, C. Cooley, S. E. Sillman, J. D. Bredehoeft and P. A. Hsieh: *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, **18** (1981), 245-252.
- 6) Y. Bernabe, W. F. Brace and B. Evans: *Mech. Mater.*, **1** (1982), 173-183.
- 7) D. A. Trimmer: *Geophys. Res. Lett.*, **8** (1981), 973-975.
- 8) W. Lin: *J. Geophys. Res.*, **87** (1982), 1055-1060.
- 9) F. Sugimoto, K. Matsuki and O. Endo: *Jour. Japan Soc. Eng. Geol.*, **26** (1985), 121-128.
- 10) C. Lin, G. Pirie and D. A. Trimmer: *J. Geophys. Res.*, **91** (1986), 2173-2181.
- 11) D. E. Moore, C. A. Morrow and J. D. Byerlee: *J. Geophys. Res.*, **91** (1986), 2163-2171.
- 12) J. Walder and A. Nur: *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, **23** (1986), 225-232.
- 13) F. Sugimoto and M. Furuzumi: *Journal of MMIJ*, **105** (1989), 727-731.
- 14) M. Takahashi, A. Hirata and H. Koide: *Jour. Japan Soc. Eng. Geol.*, **31** (1990), 105-114.
- 15) Y. Ishijima, Z. Xue and M. Takahashi: *Jour. Japan Soc. Eng. Geol.*, **32** (1991), 209-220.
- 16) Xue, Z., Y. Ishijima, and M. Takahashi: *Journal of MMIJ*, **108** (1992), 769-775.
- 17) Y. Ishijima, Z. Xue and M. Takahashi: *Journal of MMIJ*, **109** (1993), 511-516.
- 18) H. F. Wang and D. J. Hart: *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, **30** (1993), 1173-1176.
- 19) D. E. Moore, D. A. Lockner and J. D. Byerlee: *Science*, **265** (1994), 1558-1561.
- 20) T. Kiyama, H. Kita, Y. Ishijima, T. Yanagidani, K. Aoki and T. Sato: *Rock Mechanics Tools and Techniques, Proc. 2nd NARMS'96, Montréal, (Balkema, Rotterdam, 1996)*, **2**, pp. 1643-1650.
- 21) K. Suzuki, M. Oda, M. Yamazaki and T. Kuwahara: *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, **35** (1998), 907-921.
- 22) W. Lin and M. Takahashi: *Jour. Japan Soc. Eng. Geol.*, **40** (1999), 25-35.
- 23) M. Takeda, M. Zhang, T. Esaki, M. Takahashi and Y. Mitani: *Jour. Japan Soc. Eng. Geol.*, **41** (2000), 210-217.
- 24) M. Zhang, M. Takahashi, R. H. Morin and T. Esaki: *Geotech. Test. J.*, **23** (2000), 91-99.
- 25) M. Zhang, M. Takahashi, T. Esaki and H. Endo: *Jour. Japan Soc. Eng. Geol.*, **43** (2002), 83-91.
- 26) T. Yamaguchi, S. Kojima and K. Yairi: *Jour. Japan Soc. Eng. Geol.*, **44** (2003), 303-312.
- 27) W. Tanikawa and M. Sakaguchi: *Jour. Japan Soc. Eng. Geol.*, **49** (2008), 105-110.
- 28) P. F. Boulain, P. Bretonnier, N. Gland and J. M. Lombard: *Oil Gas Sci. Technol. - Rev. IFP Energies nouvelles*, **67** (2012), 387-401.
- 29) F. Civan, C. S. Rai and C. H. Sondergeld: *Transp. Porous Med.*, **86** (2011), 925-944.
- 30) H. Darabi, A. Etehad, F. Javadpour, and K. Sepehrnoori: *J. Fluid Mech.*, **710** (2012), 641-658.
- 31) R. Giot, A. Giraud, T. Guillon and C. Auvray: *Acta Geotechnica*, **7** (2012), 151-165.
- 32) A. Sakhaee-Pour and S. L. Bryant: *SPE Reservoir Eval. Eng.*, **15** (2012), 401-409.
- 33) K. Kuriyama, Y. Mizuta and A. Doi: *Journal of MMIJ*, **118** (2002), 667-674.
- 34) S. E. Yamada and A. H. Jones: *Soc. Petrol. Eng. J.*, **20** (1980), 357-358.
- 35) W. Lin: *J. Geophys. Res.*, **87** (B2) (1982), 1055-1060.
- 36) P. A. Hsieh, J. V. Tracy, C. E. Neuzil, J. D. Bredehoeft and S. E. Sillman: *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, **18** (1981), 245-252.
- 37) M. Kato, M. Takahashi and K. Kaneko: *Journal of MMIJ*, **129** (2013), 409-417.
- 38) T. Nakagawa and Y. Oyanagi: *Saisyō Jijyō Hou niyoru Jikken De-ta Kaisēki*, (Tokyo Daigaku Syuppankai, Tokyo, 1982), pp.95-124.
- 39) M. Zhang, M. Takahashi, R. H. Morin and T. Esaki: *Geotech. Test. J.*, **23** (2000), 83-90.