

難透水性岩へのフローポンプ透水試験法の適用

Application of flow-pump permeability test method to low permeability rocks

亀谷 裕志*, 平山 伸行*, 船戸 明雄*

Hiroshi Kameya, Nobuyuki Hirayama and Akio Funato

Recently, the flow-pump permeability test method is noticed in order to evaluate hydraulic conductivity of low permeable materials. In this method, an injecting pressure is measured while water is injected from one end of the specimen by constant flow rate. The hydraulic conductivity is calculated from the hydraulic head and the flow rate. Advantages of this method are as follows;

- Hydraulic gradient in the specimen is small
- The flow rate can be controlled exactly and the pressure can be measured precisely.
- Both hydraulic conductivity and storage coefficients can be evaluated.

Flow-pump permeability test method was applied to low permeable rocks and hydraulic conductivities of 10^{-9} to 10^{-10} cm/s order and storage coefficients of 10^{-8} to 10^{-9} 1/cm order were obtained by non-steady state analysis.

Key Words : permeability test ,flow pump ,hydraulic conductivity ,storage coefficient

1 はじめに

地盤・岩盤の地下水流動を評価するためには透水係数と貯留係数を求めることが必要である。室内試験でこの双方を同時に求める方法として、トランジェントパルス法およびフローポンプ法などの透水試験結果を用いる方法や流体圧力・ひずみの同時計測による方法が提案されているが、その測定例は多くない。

フローポンプ法は、今から30年以上も前の1965年にOLSEN¹⁾が提唱している。この方法は、供試体の一端から一定流量の流体を注入した時の供試体両端の水頭差を測定するものである。定常状態に達して水頭差が一定になった時は、定水位法と同じ式(表-1の(A))を用いて透水係数を得ることができる。また、一定圧力に制御して排水量を測定する定水位法に比べ、一定流量を注入して圧力を測定するフローポンプ法の方が、制御精度、測定精度とも優れている²⁾。さらに、定水位法と比較して、試験初期に供試体端面に発生する動水勾配を小さくできる²⁾。なお、定常状態に達する時間は定水位法に比べてより長時間を要する場合もある。しかし、MORINら³⁾やESAKIら⁴⁾による非定常解(表-1)を適用することにより、厳密に定常状態に達する前の結果からも透水係数を求めることが出来、結果として試験時間を短くすることが可能である²⁾。

本報告は、いくつかの難透水性岩にフローポンプ法を適用するとともに、非定常解を用いて透水係数・貯留係数の評価を試みた結果について紹介するものである。

2. 試験装置と試料

(1)試験装置の概要

試験装置の主な仕様を表-2に示す。三軸セルは既往の装置を使用しているため、供試体の直径は $\phi 50$ mmを標準としている。供試体高さは100mmを基本としているが、透水係数に応じて短くすることが可能である。透水係数が小さくなって試験時間が長くなると温度変化の影響が無視できなくなるため、試験装置全体を恒温恒湿室(温度 $20 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 、湿度 $80 \pm 2\%$)に入れ、室温およびセル内の温度をモニタしている。加圧媒体として水を用い、ジャケット材としては低粘性のシリコンゴムとミルドネオプレーンゴムスリーブの二重シールを採用している。比較のためシリンジポンプとしては、表-2に示した2種類を用いた。

* 応用地質株式会社 コアラボ

表－１ フローポンプ法による供試体両端の水頭差を算定する式

式の条件	式	記号の説明
(A).定常状態	$H = \frac{qL}{Ak}$	k : 透水係数 (cm/s) L : 供試体の高さ (cm) q : 流量 (cm ³ /s)
(B).非定常状態 (装置の貯留性を無視) MORIN ら ³⁾	$H = \frac{qL}{Ak} \left[1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\exp\left(-\frac{k}{S_s} (2n+1)^2 \pi^2 t / 4L^2\right)}{(2n+1)^2} \right]$	A : 供試体の断面積 (cm ²) H : 供試体両端の水頭差 (cm) S _s : 供試体の比貯留率 (1/cm)
(C).非定常状態 (装置の貯留性を考慮) ESAKI ら ⁴⁾	$H = \frac{qL}{Ak} \left[1 - 2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\exp\left(-\frac{k}{S_s} \beta_n^2 t\right)}{L \delta^2 \beta_n^2 \left[L \left(\beta_n^2 + \frac{1}{\delta^2} \right) + \frac{1}{\delta} \right]} \right]$	t : 時間(s) $\delta = Ce / (A \cdot S_s)$ Ce : 試験装置の貯留率 (cm ³ /cmH ₂ O) β_n : 下記の方程式の根 $\tan(\beta L) = 1 / (\beta \delta)$

表－２ 試験装置の主な仕様

ポンプ A Harvard model 44	流量制御範囲 0.00002～107ml/min 吐出圧 最大 10 MPa
ポンプ B ISCO 100DM	流量制御範囲 0.00001～25ml/min 吐出圧 最大 7 MPa
三軸セル	供試体径 (標準) $\phi 50$ mm 拘束圧 (最大) 20 MPa 背圧 (最大) 5 MPa
データ収録部	入力 10 CH

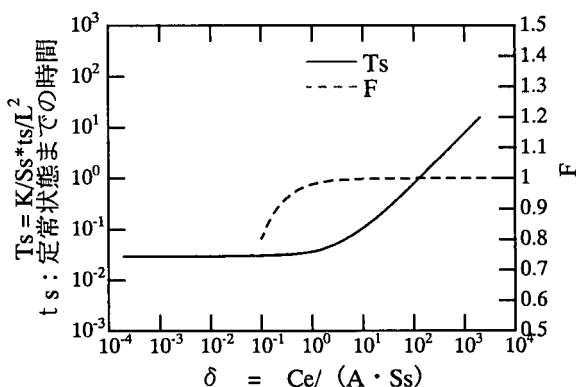
(2)装置の貯留性について

実務上、透水試験を実施する上で重要なことは、試験に要する時間、すなわち定常状態に達するまでにどの程度の時間を要するかである。表－１に示した２つの非定常状態の式は、定常状態に達するまでの時間について、供試体寸法 L および透水係数と比貯留率との比が影響し、さらに装置の貯留性が無視できない場合には、装置の貯留率 / (断面積 × 供試体の比貯留率) ($\delta = Ce / (A \cdot S_s)$) が影響することを示している。また q は時間に影響を及ぼさない。表－１(C)式から、定常状態までの時間と δ との関係求めて、図－１に示す。図から、 $\delta \leq 1$ であれば、装置の貯留性は試験時間にそれほど影響を及ぼさないことが分かる。

一方、装置の貯留率 Ce は単位水頭のあたりの体積変化量として定義される。鋼製ダミー供試体を使用して Ce を実測したところ、ポンプ A では $1 \sim 2 \times 10^{-6} (\text{cm}^3/\text{cmH}_2\text{O})$ 、ポンプ B で $3 \sim 8 \times 10^{-6} (\text{cm}^3/\text{cmH}_2\text{O})$ 程度であった。したがって、供試体断面積 A を約 20cm² とすると、供試体の比貯留率 S_s が 1×10^{-7} (1/cm) 程度以上であれば、装置の貯留性は試験時間に顕著な影響を及ぼさないと考えられる。

(3)試験試料

試験には稲田花崗岩および諫早砂岩を用いた(表－３)。花崗岩は石材商から 30cm 角のブロックを購入し、ダイヤモンドで繰り抜いて端面をカットした。諫早砂岩は徳永⁶⁾の実験と同じブロックから繰り抜いた他の供試体を用いた。これらの供試体を脱気水槽内で 3～7 日間真空吸引して飽和化させ、水中で三軸セルにセットした。これらの試料の多孔質弾性論に基づく三次元貯留係数の値を表－３にあわせて示す。これらの値から今回用いた試料の S_s は装置の貯留率を無視し得ないほど小さいと考えられる。そこで、非定常状態の解析には ESAKI らの提案した表－１(c)式を用い、実測データを最小二乗法によって回帰し k, S_s, Ce の各パラメータを求めた(なお、三次元貯留係数と比貯留率との関係は、徳永⁶⁾が詳しく解説している)。



図－１ 装置の貯留性が定常状態までの時間に与える影響

表-3 供試体の緒元および多孔質弾性論に基づくパラメータ

試料	直径 (mm)	高さ (mm)	密度 (g/cm ³)	有効間隙率 (%)	排水条件の 体積弾性係 数(Gpa)	非排水条件 の体積弾性 係数(Gpa)	B 値	三次元貯留係 数 (1/cm)
稲田花崗岩	50	50	2.65	0.7	19.7	40.8	0.85	3.5×10^{-9}
諫早砂岩	50	100	2.48	8 ⁶⁾	4.9 ⁶⁾	11.8 ⁶⁾	0.68 ⁶⁾	2.5×10^{-8} ⁶⁾

注；多孔質弾性論のパラメータは側圧5Mpa. 背圧0.8Mpaで0.5Mpaの等方圧の変化を与えて求めた値

3. 試験結果

(1) 稲田花崗岩の結果

図-2には稲田花崗岩に0.5μl/minの流量で注入した時の注入水頭の経時変化を示す。有効拘束圧は0.9Mpa, 背圧は0.1MpaでポンプAを使用している。図-3は有効拘束圧4.2Mpa, 背圧0.8Mpaで0.2μl/minでポンプBによる試験結果である。これらのデータを非定常式により解析した結果を表-4に示す。得られた透水係数は、高橋ら⁷⁾がトランジェントパルス法によって求めた値とほぼ等しい。しかし、比貯留率は三次元貯留係数とオーダが異なり明らかに大き目の評価となっている。この原因は、非定常式には装置の貯留率C_eが比貯留率S_sとの比で含まれることから、現在筆者らが用いている解析プログラムでは両者を分離して精度良く求めることが困難であるためと推測している。

また、図-2のデータは定常状態に達するまで400分程度要している。表-5には非定常解析に用いるデータの範囲を変化させた場合の解析結果を示す。定常に達する前の200分までのデータから求めた透水係数は、定常解(5.4×10^{-10} cm/s)とほぼ等しい 5.3×10^{-10} cm/sとなっている。このように非定常解析を併用することにより、完全に定常状態に達しない段階でも比較的精度良く透水係数を求めることが出来る。

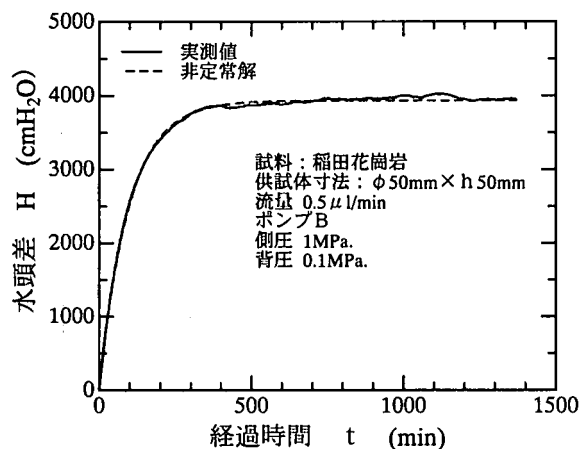


図-2 注入水頭の経過時間変化(稲田花崗岩)

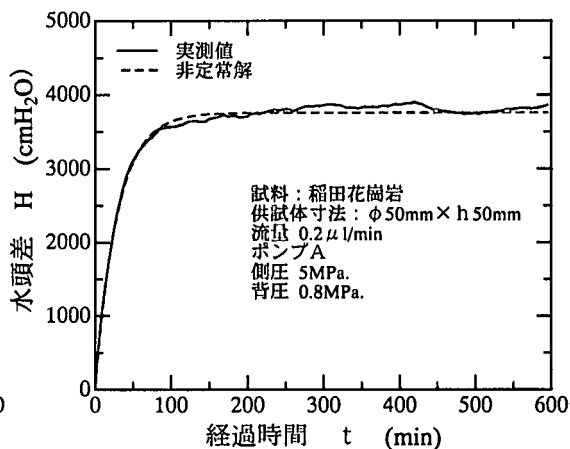


図-3 注入水頭の経過時間変化(稲田花崗岩)

表-4 非定常解析結果(稲田花崗岩)

有効拘束圧 (Mpa.)	ポンプ	透水係数 (cm/s)	比貯留率 (1/cm)	装置の貯留率 (cm ³ /cmH ₂ O)
0.9	B	5.4×10^{-10}	6.9×10^{-8}	1.0×10^{-5}
4.2	A	2.2×10^{-10}	2.3×10^{-8}	7.9×10^{-7}

表-5 定常前のデータによる解析結果(稲田花崗岩)

データの範囲	0~200分	0~400分	0~800分	0~1380分	定常解
透水係数 (cm/s)	5.3×10^{-10}	5.4×10^{-10}	5.4×10^{-10}	5.4×10^{-10}	5.4×10^{-10}

(2) 諫早砂岩の結果

図-4には諫早砂岩の試験結果を示す。

有効拘束圧は5MPa、背圧は0.5MPaで、ポンプBでは注入流量を5.0μl/minと1.0μl/minとして2段階、ポンプAでは注入流量を1.0μl/minとして行なっている。装置の貯留率の小さなポンプAの方がポンプBよりも定常状態に達するまでの時間が短くなっていることから、装置の貯留率が影響を与えていることが分かる。一方、注入流量を変えたポンプBの2つの結果では5.0μl/minの方が定常状態に達するまでの時間がやや長い、これはシリンジ内の水の残量により、装置の貯留率がより大きかったためと考えられる。解析結果を表-6に、また他の試験方法より得られた透水係数を表-7に示す。徳永⁶⁾が流体圧力とひずみの同時計測によって求めた諫早砂岩の透水係数とは、オーダは同じであるが必ずしも一致していない。その原因としては、供試体のばらつき、応力条件の違い、試験時の温度の差などが考えられる。また、供試体の比貯留率はばらつきが大きく、稲田花崗岩の場合と同様に解析上、試験装置の貯留率との分離がうまくいっていないと考えられる。

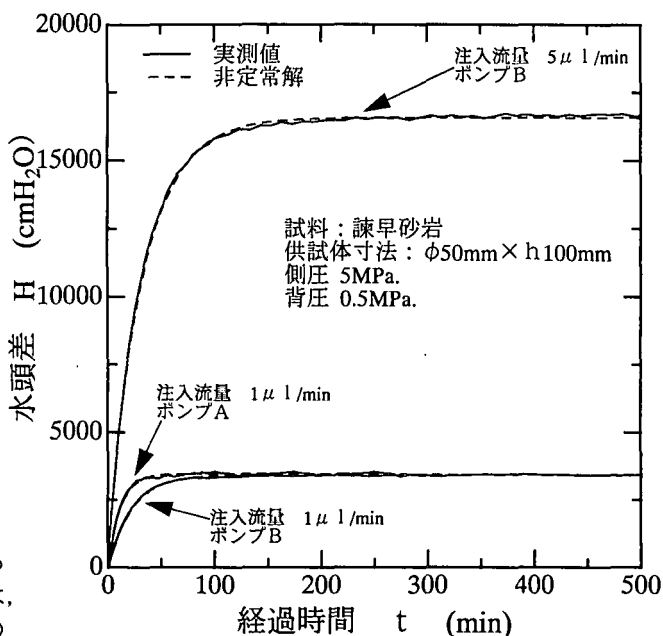


図-4 注入水頭の経過時間変化（諫早砂岩）

表-6 非定常解析結果（諫早砂岩）

有効拘束圧 (Mpa.)	シリンジポンプ	注入流量	透水係数 (cm/s)	比貯留率 (1/cm)	装置の貯留率 (cm ³ /cmH ₂ O)
4.5	A	1μl/min	2.5×10 ⁻⁹	2.5×10 ⁻⁹	3.2×10 ⁻⁶
	B	5μl/min	2.6×10 ⁻⁹	6.9×10 ⁻⁸	5.0×10 ⁻⁶
		1μl/min	2.5×10 ⁻⁹	4.0×10 ⁻⁹	6.3×10 ⁻⁶

表-7 他の試験方法による透水係数（諫早砂岩）

試験方法	有効拘束圧 (Mpa.)	最大の水頭差 (Mpa.)	透水係数 (cm/s)
流体圧力・ひずみの同時計測による方法 ⁶⁾	4.2	0.35	3.5×10 ⁻⁹
定水位法 ⁸⁾	0.7	0.5	2.1×10 ⁻⁹

4. 考察

今回実施した2岩種の試験結果はESAKIらの提案した非定常解と良くフィットするものであった。また得られた透水係数は他の透水試験法のデータと若干の差はあるものの概ね一致していると言える。一方で供試体の比貯留率は適切に評価出来ているとはいいがたい。これは解析精度の問題が大きいのと考えられるが、ここでは解析精度を向上させるのではなく、装置の貯留率を実測することにより比貯留率の評価を試みた。

表-1 (C) 式を時間で微分し、 $t=0$ とした場合、1) 式が得られる。

$$q \cdot dt/dH (t=0) = C e/F \quad 1) \text{ 式}$$

ただし

$$F = 2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\delta}{L(\beta_n^2 \delta^2 + 1) + \delta}$$

1) 式の左辺は $t=0$ における注入量と水頭差の勾配であり、これに F を乗じたものが装置の貯留率になる。 F は δ と L の関数であり、 $L=5\text{cm}$ について計算してみると、図-1に示すように $\delta \geq 1$ であれば、 $F \approx 1$ となる。したがって非常に早期の注入量/水頭差の勾配を求めることにより、装置の貯留率を推定することが可能であると考えられる。早期の注入量/水頭差の勾配を精度良く求めるため、試験後にシリンジポンプを停止し、水頭差がほぼ0となった時点で試験時の50倍の注入速度で急速な注入をおこない、このデータから装置の貯留率を算定した。さらにこの値を固定して試験データのフィッティングを行った結果を表-8に示す。比貯留率は三次元貯留係数と整合する値となり、概ね妥当な評価が出来たと考えられる。

今回は $\delta \geq 1$ のため装置の貯留率の評価が必要となったが、仮に $\delta \leq 1$ であれば、装置の貯留率を無視した表-1(B)式を用いて解析をおこなうことも可能ではないかと考えている。なお、装置の貯留率の実測には鋼製ダミー供試体を用いる方法も考えられるが、その値は有効拘束圧、背圧、シリンジの残量、試験装置の飽和度等に影響を受けるため、試験後に実測したほうがより望ましいと思われる。

表-8 急速注入結果を用いた比貯留率の算定結果(諫早砂岩)

試料	有効拘束圧 (Mpa.)	ポンプ	試験時の注 入流量	急速注入時 の流量	装置の貯留 率(実測) ($\text{cm}^3/\text{cmH}_2\text{O}$)	透水係数 (cm/s)	比貯留率 ($1/\text{cm}$)
稲田花崗岩	4.2	A	$0.2 \mu\text{l}/\text{min}$	$10 \mu\text{l}/\text{min}$	1.4×10^{-6}	2.2×10^{-10}	3.6×10^{-9}
諫早砂岩	4.5	A	$1 \mu\text{l}/\text{min}$	$50 \mu\text{l}/\text{min}$	1.6×10^{-6}	2.4×10^{-9}	2.8×10^{-8}
	4.5	B	$1 \mu\text{l}/\text{min}$	$50 \mu\text{l}/\text{min}$	3.9×10^{-6}	2.5×10^{-9}	4.4×10^{-8}

5. まとめ

透水係数が $10^{-9} \sim 10^{-10} \text{cm/s}$ の難透水性岩を用いてフローポンプ透水試験を行ない、以下の結果を得た。

①試験で得られる注入水頭～経過時間の関係は非定常理論解に良くフィットしている。

②非定常解析を併用することにより、試験時間を短縮することができる。

③今回フローポンプ法で求めた透水係数は、他の方法で求められた値とほぼ等しい。

また、装置の貯留率を実測することにより、供試体の貯留係数を評価する方法について示した。

今後は透水係数がより小さい材料や比貯留率の異なる材料への適用を図るとともに、解析精度の向上などについて検討していく必要があると考えている。

謝辞 本検討の実施にあたっては、東京大学の徳永助教授のご好意によりシリンジポンプをお借りさせていただきました。また、先生には数々の貴重なアドバイスをいただきました。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 1) Olsen, H. W (1965): Deviations from Darcy's law in saturated clays, Soil Science Society of American Proceedings, Vol. 29, No. 2, pp. 135-140.
- 2) 高橋 学・張 銘・江崎哲郎・坂井健太郎(1998): 室内透水試験法について, 応用地質, 第39巻, 第3号, pp. 315-321.
- 3) Morin, R. H. and Olsen, H. W (1987): Theoretical analysis of the transient response from a constant flow rate hydraulic conductivity test. Water Resource Research Vol. 23, No. 8, pp. 1461-1470.
- 4) T. Esaki, M. Zhang, A. Takeshita, and Y. Mitani (1996): Rigorous Theoretical Analysis of a Flow Pump Permeability Test, Geotechnical Testing Journal, Vol 19, No. 3, pp. 241-246.
- 5) 徳永朋祥(1998): 貯留係数に関する一、二の議論, 応用地質, 第39巻, 第5号, pp. 475-479.
- 6) 徳永朋祥・青柳理香・茂木勝郎・亀谷裕志・登坂博行(2000): 流体圧力・歪の同時計測による透水係数および貯留係数の推定方法について, 平成12年度応用地質学会研究発表会
- 7) 高橋 学・平田実雄・小出 仁(1990): 稲田花崗岩の透水係数に及ぼす封圧および間隙水圧の影響について, 応用地質, 第31巻, 第3号, pp. 1-10.
- 8) 青柳理香(2000): 多孔質弾性論に基づく岩盤物性推定法に関する研究. 平成11年度東京大学大学院工学系研究科地球システム工学専攻修士論文, 138pp.