

# フローポンプ透水試験

平山伸行・船戸明雄

## Flow-pump Permeability Test in Laboratory

Nobuyuki Hirayama, Akio Funato

### Abstract

Recently, flow-pump test is noticed in order to evaluate the permeability coefficient of low permeable materials. In this test, an injecting pressure is measured while water is injected from one end of the specimen by constant flow rate. The permeability coefficient is calculated from the injecting pressure and the flow rate. Advantages of this test 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 permeability and storage coefficients can be evaluated.

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

**Key words** : 透水係数 permeability, フローポンプ flow-pump, 非定常 non-steady state

## 1 はじめに

フローポンプ透水試験法は、今から30年以上も前の1965年にOLSEN<sup>1)</sup>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注入圧力を測定するものである。定常状態に達して注入圧力が一定になった時、次式で透水係数を得ることができる。

$$k = \frac{L \cdot Q}{A \cdot \Delta h} \quad 1) \text{ 式}$$

ここに、

k : 透水係数 (cm/s)

L : 供試体の高さ (cm)

Q : 流量 (cm<sup>3</sup>/s)

A : 供試体の断面積 (cm<sup>2</sup>)

Δh : 注入水頭 (cm)

である。

しかしこの方法は、供試体や試験装置の貯留性によっては、定常状態に至るまで長い時間を要することがある。また透水係数が小さい場合には大きな注入圧力が発生するため、ポンプの能力により適用範囲が限られていた。近年、フローポンプ法が再脚光を浴びてきたのは、張ら<sup>2)</sup>により非定常厳密解が導かれたことに加え、超微

流量を制御できるシリンジポンプの登場によって岩石などの難透水性材料への適用が可能になったことによる。

フローポンプ法は、現在一般的になっている定水位法や変水位法および難透水性岩石に適用されるトランジェントパルス法に比べ、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という利点がある。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<sup>3)</sup>。さらに透水係数だけでなく比貯留率も評価できる点に特徴がある。

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し、張ら<sup>2)</sup>が導いた非定常解を用いて解析した結果を紹介するものである。

## 2 実験装置と試料

### 2・1 実験装置

実験装置の概要を図-1に、主な仕様を表-1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φ50mmとしている。供試体の高さは100mmを標準としているが、透水係数に応じて20mmまで短くすることができる。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

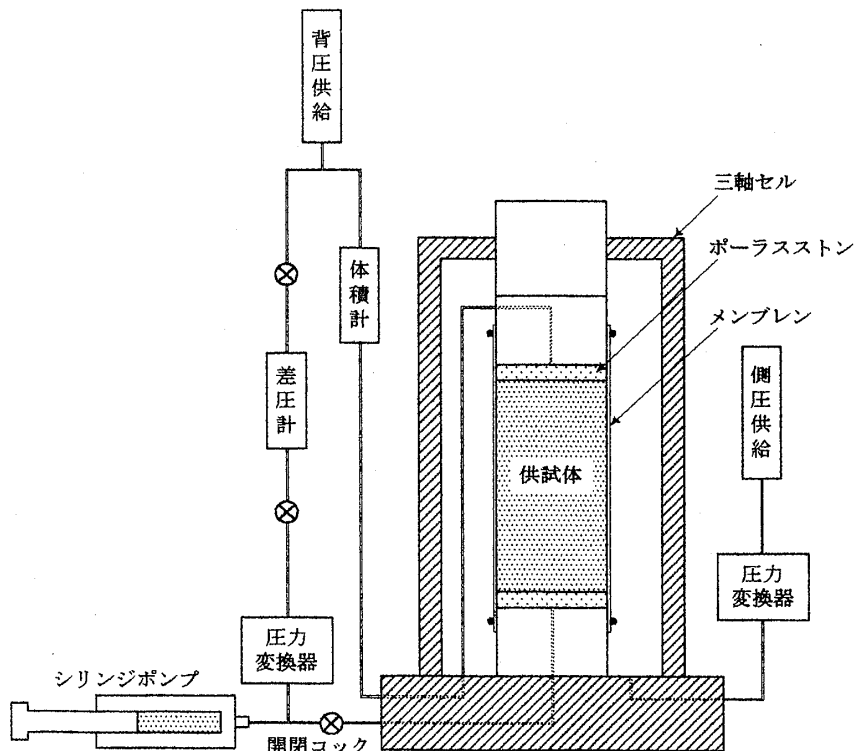


図-1 フローポンプ透水試験装置の概要

Fig.1 Schematic of flow-pump test apparatus

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，さらに隔壁で囲んでセルの温度をモニタしている。

表-1 試験装置の主な仕様

Table 1 Specification of flow-pump test apparatus

シリンジポンプ	流量制御範囲 吐出圧	0.000013~107ml/min 最大10 MPa
差圧計	容量	350 kPa
三軸セル	供試体径 拘束圧 背圧	$\phi 50$ mm 20 MPa 5 MPa
データ収録部	入力	10 CH

高橋ら<sup>4)</sup>は，難透水性岩石の透水試験に用いるジャケット材料のシール性能について検討し，封圧媒体の潤滑油に対しては熱収縮チューブが優れていると結論づけている。さらに林<sup>5)</sup>らは，熱収縮チューブと供試体の間に低粘性のシリコンゴムを塗布する効果を報告している。これらの研究成果とをもとに予備的検討を行ない，筆者らは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ンゴムスリーブの二重シールを採用している。

## 2・2 実験試料

実験には稲田花崗岩，新第三紀の泥岩および諫早砂岩を用いた（表-2）。花崗岩は石材商から30cm角のブロックを購入し，ダイヤモンドで線り抜いて端面をカットした。泥岩は露頭から切り出したブロックから直ナイフで円柱供試体を削り出した。諫早砂岩は徳永ら<sup>6)</sup>の実験と同じブロックから線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。

表-2 供試体の緒元

Table 2 Dimensions and properties of specimens

	直径 (mm)	高さ (mm)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	有効間隙率 (%)
稲田花崗岩	50	50	2.65	0.8
第三紀泥岩	50	100	1.85	40~50
諫早砂岩	50	100	2.48	8 <sup>6)</sup>

## 3 実験結果

### 3・1 稲田花崗岩の結果

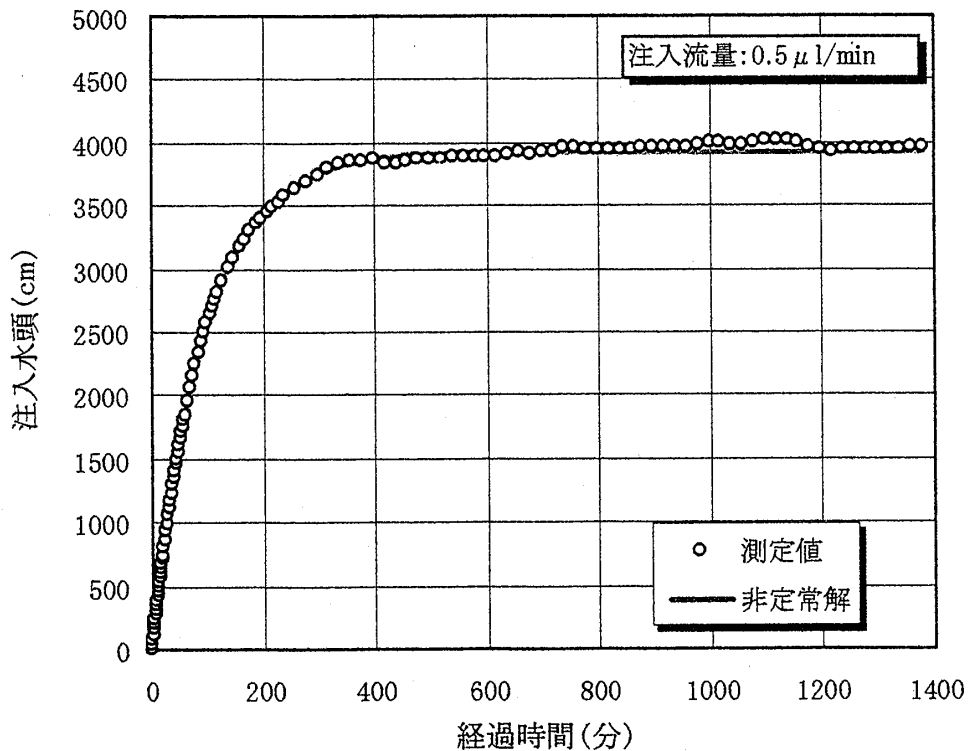


図-2 注入水頭の経時変化（稲田花崗岩）

Fig. 2 Injecting hydraulic head vs. time (Inada Granite)

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1.0MPa、背圧は0.1MPaである。定常状態に達するまで400分程度要している。1)式の定常解から得られる透水係数は5.4×10<sup>-10</sup>cm/sとなった。

張ら<sup>2)</sup>による非定常解は次式の通りである。

$$H(t) = \frac{q \cdot L}{A \cdot k} \left\{ 1 - 2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\exp(-k \beta_n^2 t / S_s) \cdot \sin(\beta_n L)}{\delta \beta_n \cos(\beta_n L) [L(\beta_n^2 + 1/\delta^2) + 1/\delta]} \right\} \text{2)式}$$

ここに、

- H : 水頭
- z : 供試体の注入端からの距離
- t : 経過時間
- S<sub>s</sub> : 供試体の比貯留率
- δ : = C<sub>e</sub> / (A · S<sub>s</sub>)
- C<sub>e</sub> : 試験装置の貯留率
- β<sub>n</sub> : 下記の方程式の根  
tan(βL) = 1 / (βδ)

である。

図-2の実測データを最小二乗法によって2)式に回帰し、k、S<sub>s</sub>、C<sub>e</sub>の各パラメータを求めた。それらの値による注入水頭と経過時間の関係を同図に実線で示す。実測値と極めて良く一致している。

表-3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、全データの場合とほぼ等しい5.3×10<sup>-10</sup>cm/sとなっている。しかし比貯留率は約10%大きい値が得られた。ほぼ定常に達した400分までのデータを用いた場合には、全データの場合と同じ透水係数、比貯留率を得ることができた。このように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。なおここで得られた透水係数は、高

表-3 非定常解析結果の比較 (稲田花崗岩)  
Table 3 Results of flow-pump test (Inada Granite)

データの範囲	k 透水係数 (cm/s)	S <sub>s</sub> 比貯留率 (1/cm)
0~200分	5.3×10 <sup>-10</sup>	7.6×10 <sup>-8</sup>
0~400分	5.4×10 <sup>-10</sup>	6.9×10 <sup>-8</sup>
0~800分	5.4×10 <sup>-10</sup>	6.9×10 <sup>-8</sup>
0~1380分	5.4×10 <sup>-10</sup>	6.9×10 <sup>-8</sup>
1380分 (定常)	5.4×10 <sup>-10</sup>	-

橋ら<sup>7)</sup>がトランジェントパルス法によって求めた稲田花崗岩の値とほぼ等しい。

### 3・2 第三紀泥岩の結果

図-3には第三紀泥岩に0.1μl/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0.4MPa、背圧は0.1MPaである。4日以上継続しても注入圧はわずかずつ上昇しており、定常状態かどうかは微妙である。非定常解によるフィッティングも稲田花崗岩の場合ほど良好ではない。最終の注入水頭から1)式の定常解で求めた透水係数は2.3×10<sup>-10</sup>cm/s、非定常解による透水係数は2.5×10<sup>-10</sup>cm/sとわずかな差がみられた。

このような非定常解による理論曲線と実測値のずれの原因としては、試験装置の貯留率(管路のジョイント部の締め付け具合やシリンジの残容量など)、供試体の飽和度、注入による目詰まりなどが考えられるが、現時点では原因を特定できず、今後の課題である。

### 3・3 諫早砂岩の結果

表-4 試験結果の比較 (諫早砂岩)  
Table 4 Results of flow-pump test (Isahaya Sandstone)

	注入流量	k 透水係数 (cm/s)	S <sub>s</sub> 比貯留率 (1/cm)
非定常	5μl/min	2.6×10 <sup>-9</sup>	6.9×10 <sup>-8</sup>
	1μl/min	2.4×10 <sup>-9</sup>	6.9×10 <sup>-8</sup>
定常	5μl/min	2.6×10 <sup>-9</sup>	-
	1μl/min	2.4×10 <sup>-9</sup>	-
徳永ら <sup>6)</sup>		3.5×10 <sup>-9</sup>	2.5×10 <sup>-8</sup>

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、注入流量を5.0μl/minと1.0μl/minとして2回行なっている。解析結果を徳永ら<sup>6)</sup>の実験結果と比較して表-4に示す。注入流量5.0μl/minの時の方が1.0μl/minの時より透水係数は若干大きくなっている。これは試験上の誤差かもしれないが、流量が多いほど注入圧が高くなり、その結果、有効拘束圧が小さくなることで説明できる可能性もある。いずれにしても有効拘束圧の影響については今後の課題である。

一方、徳永ら<sup>6)</sup>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、貯留係数の値と、フローポンプ法によるそれらの値は、オーダー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

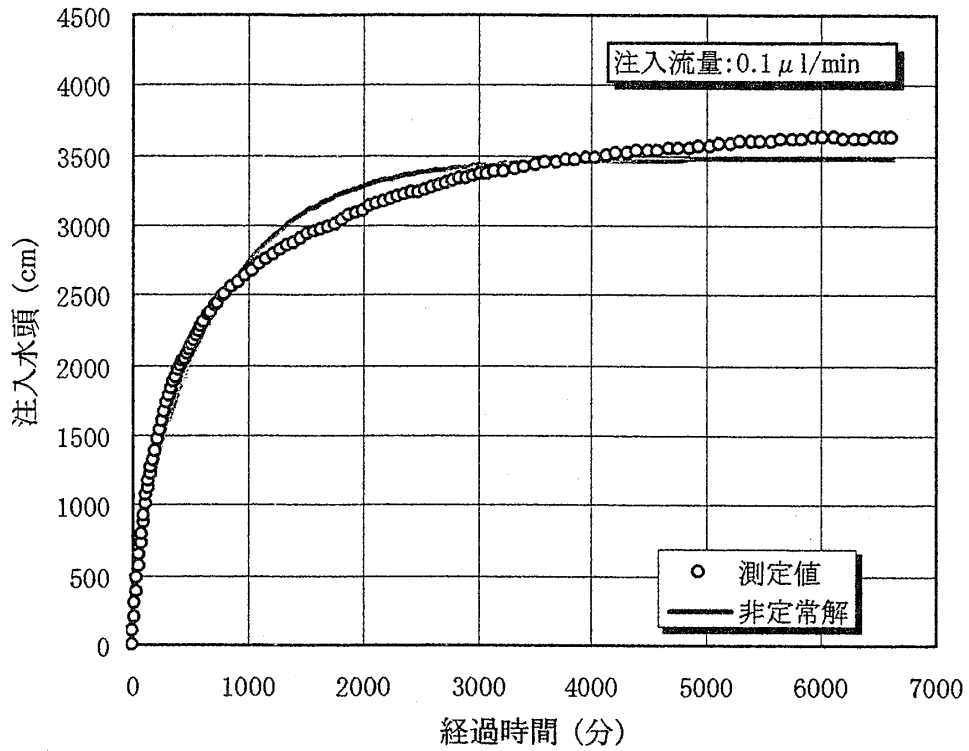


図-3 注入水頭の経時変化 (第三紀泥岩)  
 Fig.3 Injecting hydraulic head vs. time (Tertiary Mudstone)

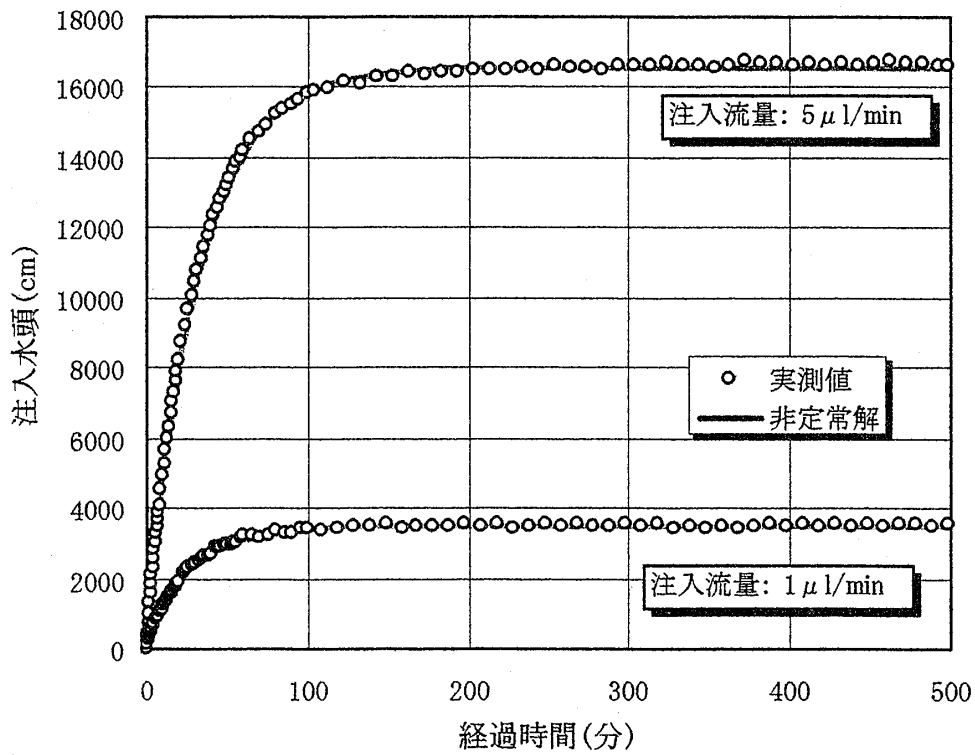


図-4 注入水頭の経時変化 (諫早砂岩)  
 Fig.4 Injecting hydraulic head vs. time (Isahaya Sandstone)

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 $S_s$ は、2)式では試験装置の貯留率 $C_e$ との比で含まれているため、現在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は困難である。プログラムの改良と共に、試験装置の貯留率を実験的に求めることを今後検討してゆく必要がある。

#### 4 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、以下の成果を得た。

- 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や比貯留率は、他の方法で求められた値とほぼ等しい。

今後は透水係数がより小さい材料への適用を図るとともに、装置の貯留性の改善、供試体の比貯留率の精度向上、透水係数の較正方法などについて検討していく必要があると考える。

#### 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) 張 銘・江崎哲郎・高橋学・坂井健太郎 (1997) : 超微流量フローポンプ透水試験法の提案及び難透水性岩への適用, 第28回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.244-250.
- 3) 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.
- 4) 高橋学・李小春・張 銘 (1998) : 岩石透水試験のためのジャケット材料について, 応用地質, 第39巻, 第2号, pp.217-220.
- 5) 林為人・高橋学・李小春・鈴木清史 (1999) : 異なる方法で被覆した白浜砂岩供試体の透水係数測定結果の比較, 応用地質, 第40巻, 第5号, pp.299-305.
- 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年度研究発表会講演論文集, 日本応用地質学会, pp.89-92.

- 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.