

難透水性地盤材料の定水位及び定流量透水試験法の理論的評価

江崎哲郎¹・張 銘²・竹田幹郎³・高橋 学⁴・坂井健太郎⁵

¹正会員 工博 九州大学教授 工学研究科環境システム科学研究センター
(〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

²工博 地質調査所環境地質部主任研究官 (〒305-8567 茨城県つくば市東1-1-3)

³学生会員 九州大学工学研究科修士課程 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

⁴正会員 工博 地質調査所環境地質部主任研究官 (〒305-8567 茨城県つくば市東1-1-3)

⁵正会員 工修 福岡県土木部技師 (〒819-1112 福岡県前原市大字浦志216-1)

10^{-10} m/s以下の極めて小さな透水係数をもつ地盤材料の水理特性を定量的に評価するための定水位及び定流量室内透水試験法に関して理論解析を行った。ここでは、供試体の透水係数のみならず比貯留率も考慮した厳密な解析理論の誘導を行い、両試験法に対して試験体内の圧力及び動水勾配分布の経時的な変化を表す式を導出した。定水位法に対しては試験体境界面における流入、流出量を算出できる式も導出した。これらの解及びシミュレーション結果に基づき両試験法の長短所を分析し、計測の精度及び特定の試験条件下におけるダルシー則の妥当性について検討した。そして、難透水性材料であるベントナイト混合土を対象に行ったフローポンプ透水試験の結果より、同試験法の有効性及び解析理論の厳密性を確認した。

Key Words: low permeability, hydraulic gradient, theoretical analysis, constant head, flow-pump, permeability test

1. 緒言

難透水性地盤や岩盤、人工的バリア材料(透水係数 10^{-10} m/s以下)の水理学的特性を活用し、地盤内の流体移動を長期に亘り正確に制御及び制限することに関心が集まっている。実用的には不透水とみなされる地盤や岩盤、遮封材料を利用する諸施設;高レベル及び低レベル放射性廃棄物の地下貯蔵¹⁾²⁾、地下水汚染地域における水理バリアの設置³⁾、難透水性砂岩における天然ガスの開発利用⁴⁾などでは安全性、経済性及び合理性などの観点から、計画・設計段階でより正確な透水係数の把握が必要とされている。これは地球環境保全が重視されるようになり、従来よりもさらに厳しい環境への配慮が地下開発・利用に要求されているためである。室内透水試験で正確に代表的な透水係数を得るために、Danielはできるだけ原位置に近い動水勾配を用いることを推奨している⁵⁾。また、自然地下水においては、動水勾配は一般に1より小さく、平坦な地域では 10^{-4} 程度と小さい⁶⁾。人工的に作られる水理バリアでも多くの場合、動水勾配は10または20を超えない⁷⁾。しかし、一般的な室内透水試験法である定水位及び変水位法⁸⁾では、試験体内に発生する動水勾配が比較的高く、これに起因する

圧密作用によって試料に乱れが生じることも懸念される⁹⁾¹⁰⁾。また、これらの試験法は飽和した試料内を通過する流量を測定しその透水係数を算出するものであるが、難透水性材料を対象とした場合、通常用いられている体積計測装置の測定限界が 10^3 cm³であるため¹¹⁾、その流量を正確に測定することは非常に困難である。定常状態に達するまでも長時間を要するため、温度変化による計測誤差やバクテリアの成長による試験体条件の変化が生じる。このように定水位及び変水位法は難透水性材料を対象とした場合実用面で多くの問題を持っている。一方、フローポンプ室内透水試験法(以下フローポンプ法)はOlsen¹²⁾により提案されてから30年以上経ったが、未だ広く用いられていない。これは、通常の室内試験法に比べ装置にかかるコストが高く、比較的高い透水係数($>10^{-9}$ m/s)の材料を対象とする場合には試験時間が短いことを除いて他に利点が多くないためである。しかし、一定超微流量を試験体に注入することにより誘発される試験体両端間の水頭差を1.0Paの精度で計測でき、試験体内に発生する動水勾配も低く抑えられるフローポンプ法はダルシー則の層流条件を忠実に再現できる実用的な試験方法として近年重要視されるようになった¹²⁾¹³⁾¹⁴⁾。AibanとZnidarcicは

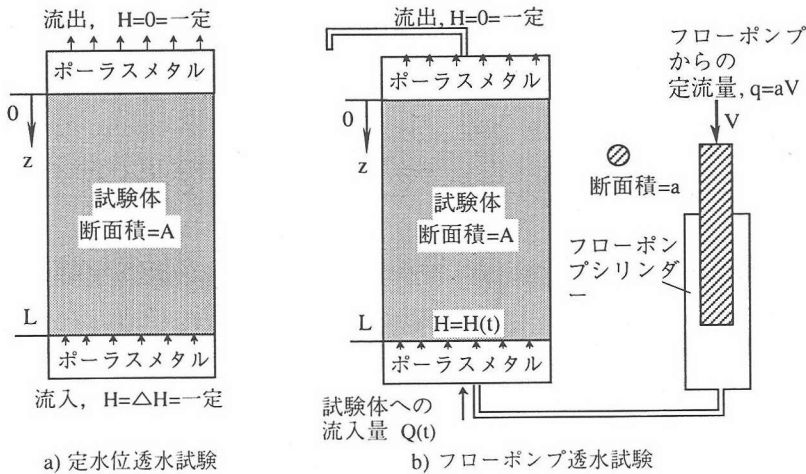


図-1 定水位及び定流量（フローポンプ）透水試験における境界条件と概略図

10⁻⁹m/s 程度の透水係数を持つ試験体を対象にフローポンプ法と定水位法による一連の実験を行い両試験法の利点と欠点を検討した¹⁵⁾。本論文では、さらに低い透水性 (< 10⁻¹⁰m/s) を持った地盤材料へのフローポンプ法と定水位法の適用性を理論解析及び実験に基づき検討する。具体的には、両試験法に対して、供試体の透水係数のみならず比貯留率や装置の圧縮貯留特性（フローポンプ法の場合）も考慮した厳密解析理論を示し、各試験における試験体中の動水勾配の経時的变化を表す式を導く。更に、定水位透水試験法に対しては試験体端面境界面に生じる流入、流出量を評価できる式も誘導する。以上の解析解を用い試験体及び試験装置の水理学的特性の差異が個々の試験方法の応答特性に及ぼす影響を明らかにするとともに両試験法の長所・短所について詳細に検討する。また、フローポンプ法を難透水性遮蔽材であるベントナイト混合土の透水試験の結果に適用し、解析理論の厳密性及び試験方法の有効性を検証する。

2. 理論解析

(1) 数学モデル

定水位及び定流量（フローポンプ）透水試験における境界条件と概略図をそれぞれ図-1.a)及び図-1.b)に示す^{16), 17)}。飽和した浸透性材料を流れる圧縮性流体の一次元流れの式は拡散方程式の形をどっている^{18), 19)}。

$$\frac{\partial^2 H}{\partial z^2} - \frac{S_s}{K} \cdot \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

ここで

H = 水頭, L,

z = 試験体の上端面からの距離, L,

K = 試験体の透水係数, LT⁻¹,

t = 試験開始からの時間, T,

S_s = 試験体の比貯留率, L⁻¹。

比貯留率は透水係数と同様に岩盤の水理学的特性、特に非定常流体移動特性の一つ重要な物性値であり、「単位体積中の単位平均水頭（水圧）の減少時に、水の膨張及び媒質の骨格構造の圧縮により解放される水の体積」と定義されている²⁰⁾。

定水位透水試験における初期条件及び境界条件は

$$t = 0, H = 0 \quad \text{at} \quad 0 < z \leq L \quad (2)$$

$$t > 0, H = 0 \quad \text{at} \quad z = 0 \quad (3)$$

$$t > 0, H = \Delta H \quad \text{at} \quad z = L \quad (4)$$

定流量透水試験における初期条件は式(2)に等しく、境界条件は以下ようになる^{17), 21)}:

$$t > 0, H = 0 \quad \text{at} \quad z = 0 \quad (5)$$

$$t > 0, \frac{\partial H}{\partial z} = \frac{I}{KA} \left(q - C_c \frac{\partial H}{\partial t} \right) \quad \text{at} \quad z = L \quad (6)$$

式(2)~(6)及び図-1において

ΔH = 水頭差, L,

A = 試験体断面積, L²,

q = フローポンプからの一定流量, L³T⁻¹

C_c = 試験装置の圧縮貯留率, L²。水頭の単位あたりの変化によりフローポンプ内に圧縮された透水流体の体積と定義されている¹⁷⁾。

(2) 定水位透水試験

理論解は式(2),(3)及び(4)で表される初期条件と境界条件のもとで式(1)を変数分離法で解くことより得られる²²⁾。

$$H(z,t) = \Delta H \left\{ \frac{z}{L} + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos(n\pi)}{n} \sin \frac{n\pi z}{L} \cdot \exp \left(-\frac{K}{S_s} \cdot \frac{n^2 \pi^2}{L^2} \cdot t \right) \right\} \quad (7)$$

表-1 定水位法の解析に用いた試験体の水理学的特性値及び水頭差

	断面積 (cm ²)	試験体長 (cm)	透水係数 (cm/s)	比貯留率 (1/cm)	初期水頭 (cmH ₂ O)
case1	66	4	6.60E-09	3.29E-05	77.5767
case2	66	4	3.30E-09	3.29E-05	77.5767
case3	66	4	6.60E-09	6.58E-05	77.5767
case4	66	4	6.60E-09	3.29E-05	155.1534

表-2 フローポンプ法の解析に用いた試験体及び試験装置の水理学的特性値と流量

	断面積 (cm ²)	試験体長 (cm)	透水係数 (cm/s)	比貯留率 (1/cm)	実験装置の貯留率 (cm ³ /cmH ₂ O)	流量 (ml/sec)
case1	66	4	6.60E-09	3.29E-05	1.00E-04	8.50E-06
case2	66	4	3.30E-09	3.29E-05	1.00E-04	8.50E-06
case3	66	4	6.60E-09	6.58E-05	1.00E-04	8.50E-06
case4	66	4	6.60E-09	3.29E-05	1.00E-03	8.50E-06

上式(7)を変数zに対して微分することにより動水勾配の垂直分布*i*(z,t)が得られる。

$$i(z,t) = \frac{\Delta H}{L} \left\{ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \cos(n\pi z) \cos\left(\frac{n\pi z}{L}\right) \cdot \exp\left(-\frac{K}{S_s} \cdot \frac{n^2 \pi^2}{L^2} \cdot t\right) \right\} \quad (8)$$

z=0, z=Lの境界においては流量は以下のように求められる。

$$q(0,t) = \frac{K \cdot A \cdot \Delta H}{L} \left\{ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \exp\left(-\frac{K}{S_s} \cdot \frac{n^2 \pi^2}{L^2} \cdot t\right) \right\} \quad (9)$$

$$q(L,t) = \frac{K \cdot A \cdot \Delta H}{L} \left\{ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \exp\left(-\frac{K}{S_s} \cdot \frac{n^2 \pi^2}{L^2} \cdot t\right) \right\} \quad (10)$$

実験開始よりt時間で生じる全流出量*Q_o*(0,t)と全流入量*Q_i*(L,t)は以下ようになる。

$$Q_o(0,t) = \frac{K \cdot A \cdot \Delta H}{L} \left\{ t + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{\exp\left(-\frac{K}{S_s} \cdot \frac{n^2 \pi^2}{L^2} \cdot t\right) - 1}{\left(-\frac{K}{S_s} \cdot \frac{n^2 \pi^2}{L^2}\right)} \right\} \quad (11)$$

$$Q_i(L,t) = \frac{K \cdot A \cdot \Delta H}{L} \left\{ t + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\exp\left(-\frac{K}{S_s} \cdot \frac{n^2 \pi^2}{L^2} \cdot t\right) - 1}{\left(-\frac{K}{S_s} \cdot \frac{n^2 \pi^2}{L^2}\right)} \right\} \quad (12)$$

(3) 定流量透水試験

式(2),(5),(6)で表される初期条件及び境界条件のもとで式(1)から著者ら^{17), 22)}が最近の研究で得たフローポンプ透水試験の理論解を示す。

$$H(z,t) = \frac{qL}{AK} \left\{ \frac{z}{L} - 2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\exp\left(-\frac{K}{S_s} \beta_n^2 t\right) \sin(\beta_n z)}{L \delta \beta_n \cos(\beta_n L) \left[L \left(\beta_n^2 + \frac{1}{\delta^2} \right) + \frac{1}{\delta} \right]} \right\} \quad (13)$$

ここでδ=C_v/(AS_s)とβ_nは以下の式の解である。

$$\tan(\beta L) = \frac{1}{\beta \delta} \quad (14)$$

定水位試験の場合と同様に、フローポンプ透水試験でも試験体内での動水勾配の分布は変数zで式(13)を微分することにより得られる。

$$i(z,t) = \frac{qL}{AK} \left\{ \frac{1}{L} - 2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\exp\left(-\frac{K}{S_s} \beta_n^2 t\right) \cos(\beta_n z)}{L \delta \cos(\beta_n L) \left[L \left(\beta_n^2 + \frac{1}{\delta^2} \right) + \frac{1}{\delta} \right]} \right\} \quad (15)$$

3. シミュレーションによる比較

前節で得られた式を用い、定水位及びフローポンプ法の試験体内における水頭及び動水勾配の経時の変化のシミュレーションを行い、両試験法の応答特性を明らかにする。また、試験体及び試験装置の水理学的特性が両試験法の応答特性に及ぼす影響を明らかにする。これらの結果に基づき、両試験法の長短所を詳細に検討し、計測精度や特定条件下におけるダルシー則の妥当性について検証する。シミュレーションに用いた試験体及び試験装置の水理学的特性値を表-1及び表-2に示す。case1の特性値はベントナイト混合土の室内せん断透水同時試験からZhangら²³⁾が求めたもので、case2以降はcase1の特性値を半分もしくは2倍に設定したものである。

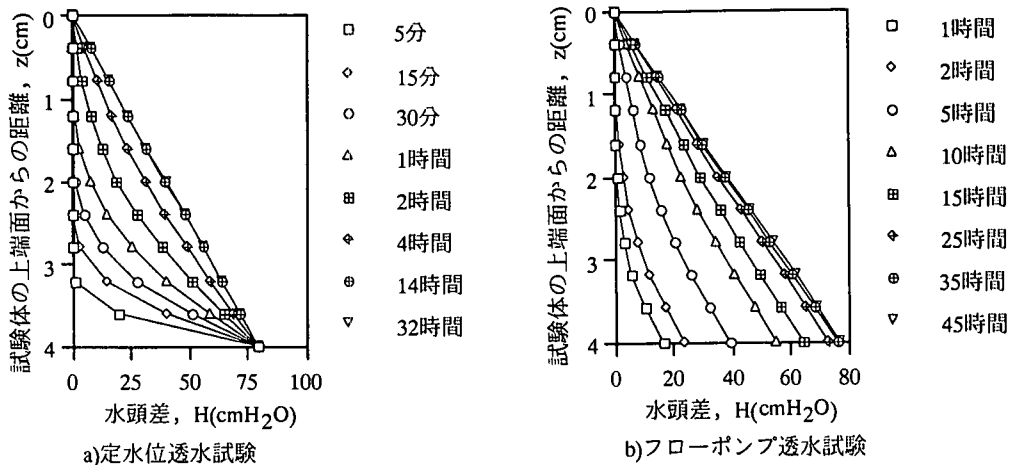


図-2 定水位及びフローポンプ透水試験の試験体内での水頭の経時的変化(1cmH₂O=98Pa).

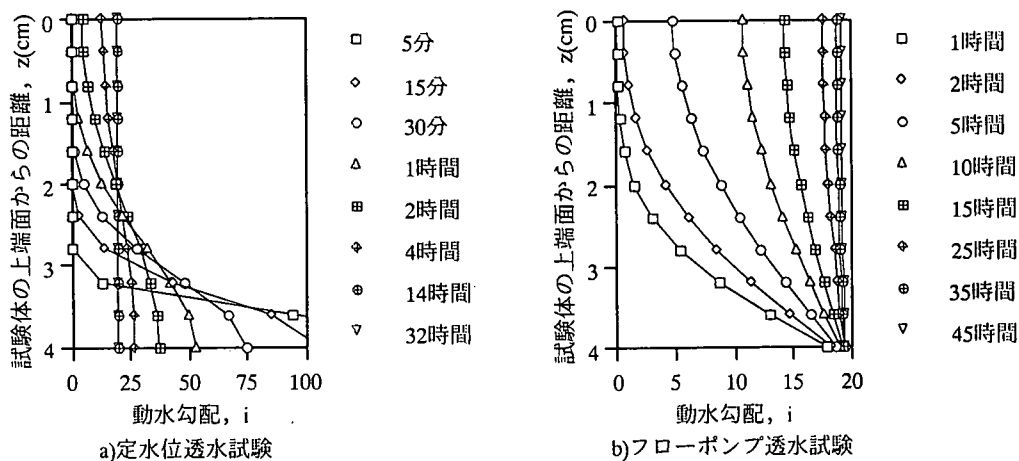


図-3 定水位及びフローポンプ透水試験の試験体内での動水勾配の経時的変化

(1) 水頭と動水勾配

式(7)及び(13)で表される定水位及びフローポンプ法の試験体内における水頭の経時的変化の一例を図-2に示す。ここで用いた条件はそれぞれcase1のものである。定水位法の試験開始直後における試験体流入側端部付近では急激に圧力が増加する。その値は定常状態における値と等しく、比較的大きい。試験体内の他の部分では徐々に圧力が増加して行き、定常状態に達する。これに対して、フローポンプ法では試験全体を通じて急激に圧力が増加することはない。圧力は試験体内全長に亘って徐々に増加し、定常状態に達する。

式(8)及び(15)で表される定水位及びフローポンプ法の試験体内における動水勾配の経時的変化の一例を図-3に示す。ここで用いた条件はそれぞれcase1のものである。解析に定水位法の試験開始直後における試験体流入側端部付近では定常状態と比較し、極めて大きな動水勾配が発生する。時間の経過とともに、

流入側端部付近の動水勾配は急激に減少して行き、流出側では徐々に増加し定常状態に達する。これに対し、フローポンプ法の試験開始直後における試験体流入側端部では定常状態に近い動水勾配が発生する。しかし、試験体全長に亘る動水勾配の増加過程でその値は最終の20を超えず、増加も緩やかである。

(2) 試験体及び試験装置の水理学的特性の影響

表-1の特性値を用い、定水位法の試験体境界面における流入、流出量の経時的変化を表わす式(9)及び(10)により行ったシミュレーションの結果を図-4に示す。この結果より以下のことが分かる。ここでは、case1を基準にする。また、定常状態は試験体上下流端での流量の1時間当たりの変化量が0.1%以下となった時と判断した。この方法で定常状態の判断を行うと、case1では定常状態に達するまでおよそ16時間かかる。

a) 透水係数が1/2倍の場合(case2), 定常状態におけ

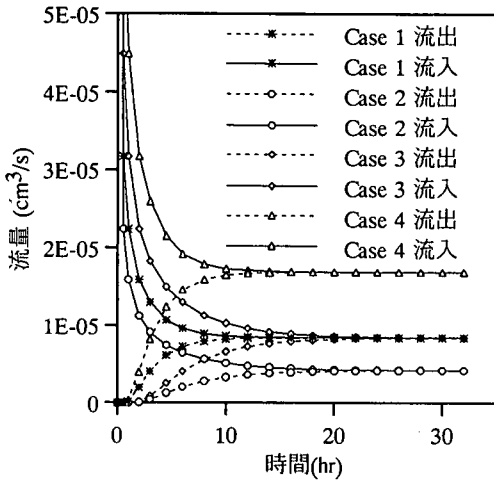


図-4 定水位法の試験体境界面における流入、流出量の経時的変化

る流入、流出量はダルシーの法則に従い、定常状態に達するまでの時間は約28時間となる。

b) 試験体の比貯留率が2倍の場合(case3), 定常状態に達するまでの時間は約20時間となる。

c) 水頭差が2倍の場合(case4), 流入、流出量はダルシーの法則に従い、定常状態に達するまでの時間は約15時間となる。この条件下で、見かけ上流量の計測が容易になるが、供試体中に発生する動水勾配が大きくなるため、ダルシー則が成り立たない恐れがある。

いずれの条件下でも、試験初期段階における流入量は流出量に比べ非常に大きい。実験開始より十数時間は定常状態に達するまで流出量が徐々に増加するのに対し、流入量は急速に減少する。これは試験体と透水流体の圧縮性に関連する比貯留率の応答に起因するものである。

表-2の特性値を用い、フローポンプ法の試験体流入側境界面に誘発される水頭の経時的変化を表す式(13)より行ったシミュレーションの結果を図-5に示す。ここで、パラメータの設定はcase1を基準として行った。定常状態は試験体上下両端面間に発生する水頭差の1時間当たりの変化量が0.1%以下となった時と判断した。この方法で定常状態の判断を行うと、case1では定常状態に達するまでおよそ49時間かかる。

a) 透水係数が1/2倍の場合(case2), 定常状態に達するまでの時間はおよそ89時間かかる。

b) 比貯留率が2倍の場合(case3), 定常状態に達するまでの時間は83時間かかる。

c) 試験装置の圧縮貯留率が大きい場合(case4), 定常状態に達するまでの時間は58時間かかる。

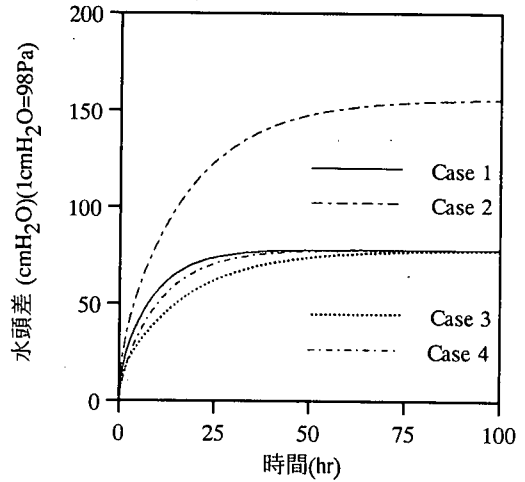


図-5 フローポンプ透水試験における試験体流入側境界面に誘発される水頭の経時的変化

これらの結果から、試験体及び試験装置の水理学的特性値は定常状態に達するまでの時間に影響を与えることが分かる。なお、圧縮貯留率に起因する定常状態に達するまでの遅れは、圧縮率の小さい流体や剛性の高い配管を用いることにより軽減される。

(3) 考察

一連のシミュレーション結果より難透水性材料を対象とする場合、両試験法ともに定常状態に達するまで長時間を要し、フローポンプ法では定水位法と比較し更に長時間を要することが明らかになった。また、両試験法において試験体の比貯留率は透水係数と同様に定常状態に達するまでの時間に大きく影響を与えることも明らかになった。

難透水性材料を対象とする場合、定水位法の試験初期段階における試験体流入端部付近では比較的高い圧力と、それに起因した極めて高い動水勾配が発生する。このような高い動水勾配はダルシー則の層流条件を満たさず、圧密作用を促し試験体の内部構造を変化させる恐れがある。また、試験体境界面の流入、流出量は非常に小さく、試験全体を通じて $10^{-5} \text{cm}^3/\text{s}$ のオーダーである。透水試験で通常用いられている体積計測装置の測定限界は 10^{-3}cm^3 であるため、流量を正確に計測することは困難であり、定常状態を正確に判断することも難しいと考えられる。従って、定常状態の判断を誤り、完全に定常状態に達する前の流入、流出量を用い透水係数を計算する恐れがある。ここで、定常状態以前の流入量を用いると透水係数を大きく、流出量を用いると小さく評価することとなる。また、比貯留率は非定常状態の計測結果より算出されるが、流量の計測精度が低いためこ

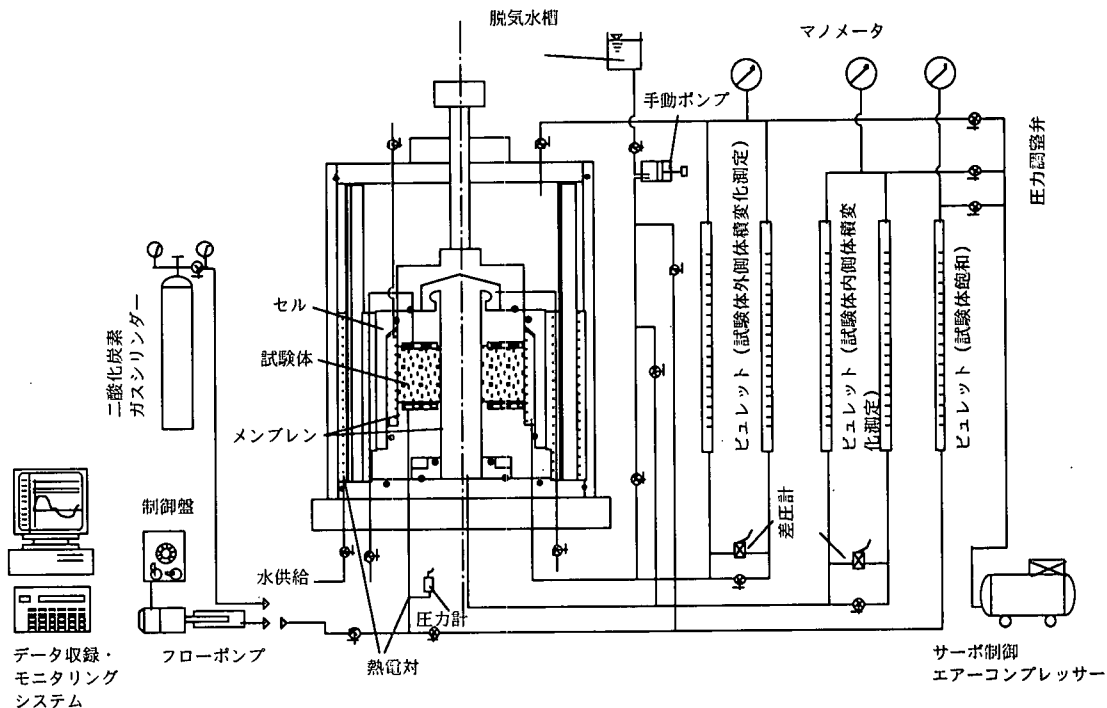


図-6 室内せん断透水同時試験装置図

表-3 各試験状態で計算された試験体及び試験装置の水理学的特性値

パラメータ	注入状態		ポンプ停止 状態	平均*	定常状態	
	早期#	全体			注入状態	吸引状態
$k(m/s) \times 10^{-11}$	5.38	5.99	5.46	5.61	7.01	7.93
$S_s(l/m) \times 10^{-3}$	2.78	2.39	2.97	2.71		
$C_e(m^3/kPa) \times 10^{-9}$	1.37	1.48	1.12	1.32		

#注入状態における早期の計測値

*注入状態における早期、全体及びポンプ停止状態の計測値の平均値

れを正確に求めることも非常に難しいと考えられる。

フローポンプ法で難透水性材料を対象とする場合、試験体全長に亘って発生する圧力は定水位法の場合と比べて緩やか増加する。試験全体を通じて動水勾配の増加も緩やかであり、定常状態での値も定水位法と比較すると低い。また、式(15)から流入量を変化させることにより、動水勾配を任意の値に設定することが可能なため、ダルシー則の層流条件を満たし、試験体条件を損なわない動水勾配下で試験を行うことが可能と考えられる。定常状態は試験体全長に亘る水頭差が一定値になったことで確認される。水頭差の計測は1.0Paオーダーの分解能を持った差圧力変換器で正確に継続して行えるため、得られる透水係数の信頼性は非常に高い。試験全体を通じて精度の高い計測が可能のため、非常状態の計測結果から信頼性の高い透水係数及び比貯留率を算出できると

考えられる^{17), 21), 23)}。また、これにより試験時間を短縮することも可能である。

4. フローポンプ透水試験法の新しい解析理論の実験への適用例

Zhangらはフローポンプ法によるベントナイト混合土の室内せん断透水同時実験を行った¹⁴⁾。ここではこの実験結果に対しフローポンプ透水試験法の新しい解析理論を適用し、その厳密性及び有効性を検証する。

(1) 実験装置及び試料

実験装置を図-6に示す。この装置は難透水性土質試験体のせん断ひずみが透水特性に及ぼす影響を調べるために開発されたものである。試験体は厚肉円

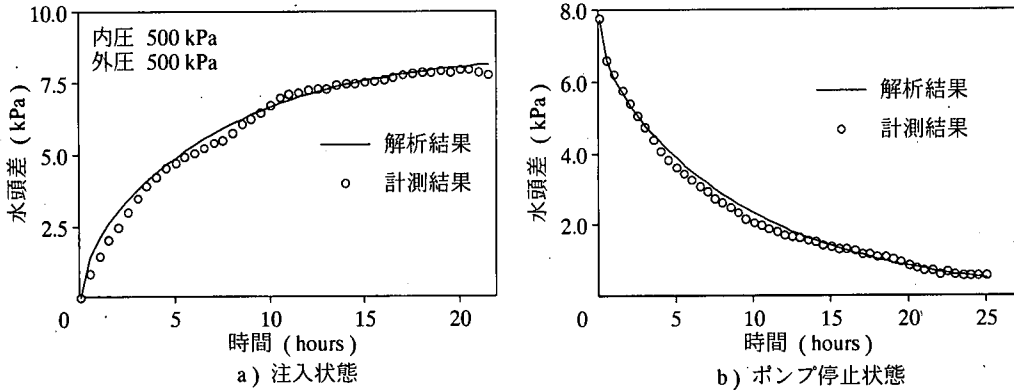


図-7 フローポンプ透水試験における水頭変化の実験及び解析結果の比較

筒形であり、内半径2cm、外半径5cm、高さ4cmである。せん断変形は平面ひずみ状態に拘束された厚肉円筒形試験体の内・外側面に加えた拘束圧力の差より発生させる²³⁾。今回の透水試験は内・外側面の拘束圧を等しくしフローポンプ法により行った。試作したフローポンプの微流量は 3.31×10^{-12} から $11.74 \times 10^{-12} \text{m}^3/\text{s}$ まで制御ができ、試験時には $8.5 \times 10^{-12} \text{m}^3/\text{s}$ と設定した。実験に用いた試料はベントナイト混合土であり、ベントナイト(クニゲルVI)と砂(段丘砂)の重量比を15:85とし、土質工学会基準(JIS A 1210)に基づいて最適含水比で締め固めたものである。また、飽和は試験体内に24時間、5kPaで二酸化炭素を注入した後、10kPaで脱気水を1ヶ月半注入して行った。飽和状態は流出水に気泡が含まれなくなったことで確認した。なお、透水試験中供試体からの微小粒子の流失を防ぐため、供試体の上下端面とペDESTALの間高分子濾紙(Microporous Polypropylene Hydrophobic Flat Sheet/Celgard 2400)を入れた。また、実験は恒温室の中で行い、透水試験において試験体上下両端面間の差圧力を圧力計、透水試験用の水の温度を熱電対によって測定・監視を行った。

(2) 実験結果及び解析

ここでは内・外圧に加えた拘束圧が等しい場合の実験結果を一例として用いる。定常状態及びポンプ注入、停止状態での水頭差の計測結果より求めた試験体及び装置の水理学的特性値を表-3に纏める。各パラメータは透水試験の非定常状態の水頭差を用い、フローポンプ法の厳密解析理論に基づいた逆解析法によって算出した^{17), 21), 23)}。解析結果と比較するため、非定常状態である注入状態(transient rise)及びポンプ停止状態(transient decay)の水頭差の計測結果と得られたパラメータを用い行った水頭差の解析結果を図-7に示す。

(3) 考察

表-3及び図-7によって以下の知見が得られる。非定常状態の計測結果を用い理論解析より求めた透水係数は定常状態の計測結果を用いダルシー式で算出した値とほぼ同じであった。水頭差の解析結果も計測結果と近い値を示している。これはフローポンプ透水試験の一次元厳密解析理論が試験結果を精度よく評価できると言える。透水試験の非定常解析に関する数値解析結果でもこのように結論付けられている²⁴⁾。従って、フローポンプ法は非定常状態においても高精度な透水係数と比貯留率を算出でき、比較的長時間を要する難透水性材料の透水試験を短時間で実行する有効な透水試験法であると考えられる。

5. 結論

理論的立場から難透水性材料を対象とした場合の定水位法及びフローポンプ法の比較・検討を行い、両試験法の長短所を明らかにした。また、試験体と試験装置の水理学的特性の差異が両試験法の応答特性に与える影響を示した。フローポンプ法による透水試験結果をもとに、その試験方法と解析理論の有効性を検証した。得られた結果を以下に示す。

(1) 難透水性材料を対象とした場合、定水位法の試験初期段階における試験体流入端部付近では比較的高い圧力と、これに起因した高い動水勾配が発生する。これはダルシー則の層流条件を満たさないとともに、試験体条件を変化させる恐れがある。また、発生する流量は $10^{-5} \text{cm}^3/\text{s}$ のオーダーであるため、精度よく計測できない。従って、高精度に透水係数と非貯留率を求めることは困難である。

(2) 難透水性材料を対象とした場合、フローポンプ法は試験体内に発生する動水勾配が定水位法と比較すると低く、より原位置に近い条件下での試験が可

能である。試験全体を通じて試験体間の水頭差を高精度に計測できるため、難透水性材料を対象とした場合でも透水係数、比貯留率と試験装置の圧縮貯留率を正確に求めることが可能である。更に、これらの値を非定常状態の計測結果から求められるため、試験時間の大幅な短縮も可能である。

(3) 難透水性材料を対象とした場合、両試験法とも定常状態に達するまでに長時間を要する。水理学的特性、特に試験体の透水係数及び非貯留率は両試験法の定常状態に達するまでの時間に大きく影響する。

(4) フローポンプ法の実験への適用結果より、その厳密な解析理論が忠実に試験状態を再現でき、同試験方法が有効であることが立証された。

参考文献

- 1) Moore, D. E., Morrow, C. A. and Byerlee, J. D.: High-Temperature Permeability and Groundwater Chemistry of Some Nevada Test Site Tuffs, *J. Geophysical Research*, Vol. 91, No. B2, pp. 2163-2171, 1986.
- 2) Tsang, C. F., editor: *Coupled Processes Associated with Nuclear Waste Repositories*, 443 pp, Academic Press, New York, 1987.
- 3) Hanor, F. S.: Effective Hydraulic Conductivity of Fractured Clay Beds at a Hazardous Waste Landfill, Louisiana Gulf Coast, *Water Resources Research*, Vol. 29, No. 11, pp. 3691-3698, 1993.
- 4) Lin, C., Pirie, G. and Trimmer, D. A.: Low Permeability Rocks: Laboratory Measurements and Three-Dimensional Microstructural Analysis, *J. Geophysical Research*, Vol. 91, No. B2, pp. 2173-2181, 1986.
- 5) Daniel, D. E.: State of the Art: Laboratory Hydraulic Conductivity Tests for Saturated Soils, Hydraulic Conductivity and Waste Contaminant Transport in Soil, ASTM STP 1142, D. E. Daniel and S. J. Trautwein, Eds., American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, pp. 30-78, 1994.
- 6) Urish, D. W. and O'Reilly, M. J.: Tracking Multiple Pollution in a Coastal Aquifer, Cape Cod National Seashore, Provincetown, Massachusetts, *Transactions American Geophysical Union*, (abs.) Eos Fall Meeting Supplement, Vol. 73, p. 190, 1992.
- 7) Dunn, R. J. and Mitchell, J. K.: Fluid Conductivity Testing of Fine Grained Soil, *J. Geotechnical Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol. 110, No. 11, pp. 1648-1665, 1984.
- 8) Lambe, T. W. and Whitman, R. V.: *Soil Mechanics*, 553 pp, John Wiley & Sons, New York, 1969.
- 9) Olsen, H. W.: Darcy's Law in Saturated Kaolinite, *Water Resources Research*, Vol. 2, No. 6, pp. 287-295, 1966.
- 10) Fox, P. J.: Analysis of hydraulic Gradient Effects for Laboratory Hydraulic Conductivity Testing, *Geotechnical Testing J.*, Vol. 19, No. 2, pp. 181-190, 1996.
- 11) Alva-Hurtado, J. E. and Selig, E. T.: Survey of Laboratory Devices for Measuring Soil Volume Change, *Geotechnical Testing J.*, Vol. 4, No. 1, pp. 11-18, 1981.
- 12) Pane, V., Croce, P., Znidarcic, D., Ko, H. Y., Olsen, H. W. and Schiffman, R. L.: Effects of Consolidation on Permeability Measurements for Soft Clays, *Geotechnique*, Vol. 33, No. 1, pp. 67-72, 1983.
- 13) Olsen, H. W., Nichols, R. W. and Rice, T. L.: Low-Gradient Permeability Measurements in a Triaxial System, *Geotechnique*, Vol. 35, No. 2, pp. 145-157, 1985.
- 14) Zhang, M., Esaki, T. and Mitani, Y.: Permeability Variation of Bentonite-Sand Mixture Due to Shear Strain, *Scientific Basis for Nuclear Waste Management XVIII, Symposium Proceedings*, Vol. 353, Material Research Society, pp. 261-268, 1995.
- 15) Aibin, S. A. and Znidarcic, D.: Evaluation of the Flow Pump and Constant Head Techniques for Permeability Measurements, *Geotechnique*, Vol. 39, No. 4, pp. 655-666, 1989.
- 16) Head, K. H.: Permeability, Shear Strength and Compressibility Tests, *Manual of soil laboratory testing*, Vol. 2, London, Engineering Laboratory Equipment Limited, 1980.
- 17) Zhang, M.: A New Coupled Shear and Permeability Test Method for Evaluating Engineered Barriers in Low-Level Radioactive Waste Disposal Facilities, Ph. D. thesis, Kyushu University, Japan, 1996.
- 18) Al-Dhahir, Z. A. and Tan, S. B.: A Note on One-Dimensional Constant-Permeability Tests, *Geotechnique*, Vol. 18, pp. 499-505, 1968.
- 19) Morin, R. H. and Olsen, H. W.: Theoretical Analysis of the Transient Pressure Response from a Constant Flow Rate Hydraulic Conductivity Test, *Water Resources Research*, Vol. 23, No. 8, pp. 1461-1470, 1987.
- 20) Hantush, M. S.: *Hydraulics of Wells*, *Advances in Hydroscience*, Vol. 1, Chow, V. T. Ed., Academic Press, New York and London, pp. 281-432, 1964.
- 21) Esaki, T., Zhang, M., Takeshita, A. and Mitani, Y.: Rigorous Theoretical Analysis of a Flow Pump Permeability Test, *Geotechnical Testing J.*, Vol. 19, No. 3, pp. 241-246., 1996.
- 22) Gao Y. C.: *Mathematical Equation and Its Numerical Solution*, p. 304, Education Press, Beijing, 1984.
- 23) Zhang, M., Esaki, T., Olsen, H. W. and Yasuhiro M.: Integrated Shear and Flow Parameter Measurement, *Geotechnical Testing J.*, Vol. 20, No. 3, pp. 296-303, 1997.
- 24) Hart, D. J. and Wang, H. F.: Poroelastic Effects during a Laboratory Transient Pore Pressure Test, *Poromechanics*, Thimus et al. (eds), pp. 579-582, 1998.

(1999.1.13 受付)

EVALUATION OF THE CONSTANT HEAD AND THE CONSTANT FLOW-RATE PERMEABILITY TESTS FOR LOW-PERMEABILITY GEOMATERIALS

Tetsuro ESAKI, Ming ZHANG, Mikio TAKEDA, Manabu TAKAHASHI
and Kentarou SAKAI

A theoretical analysis is presented that compares the response characteristics of the constant head and constant flow-rate laboratory techniques when testing geomaterials having $K < 10^{-10}$ m/s. Rigorous solutions are developed for each method that describe the transient distributions of hydraulic head and hydraulic gradient within a test specimen. Expressions simulating the inflow and outflow rates across the specimen boundaries during a constant-head permeability test are also presented. These solutions illustrate the advantages and disadvantages of each method, including insights into measurement accuracy and the validity of using Darcy's law under certain conditions. The efficiency of the flow pump technique with the rigorous solution are supported by its application to a bentonite-sand mixture.