

難透水性材料への変水位透水試験の適用

九州大学工学部 学生員 〇川端 辰己 九州大学大学院 正会員 江崎 哲郎
工業技術院地質調査所 非会員 張 銘 九州大学大学院 正会員 三谷 泰浩
九州大学大学院 非会員 竹田 幹郎

1. はじめに

難透水性の地盤材料は従来の変水位透水試験の適用範囲外にあり、水頭の測定や試験環境等の問題からその評価が困難である。本研究では差圧計による水頭差の計測を高精度に行う変水位試験法、透水係数及び比貯留率を含む解析解を用いた評価手法を開発し、それらの難透水性材料への適用を試みる。また同一の試験体を用いたフローポンプ法による試験結果との比較から、開発した試験方法の有効性を検証する。

2. 透水試験法の理論

圧縮性媒体中を流れる圧縮性流体の一次元連続流は次のように表される。

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

$$\left. \begin{aligned} t=0, H &= \gamma z \quad \text{at } 0 < z < L \\ t=0, H &= H_0 + \gamma L \quad \text{at } z = L \\ t > 0, H &= 0 \quad \text{at } z = 0 \\ t > 0, \frac{a}{KA} \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial H}{\partial z} &= 0 \quad \text{at } z = L \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ここで、

H : 試験体内の水頭

H₀ : 初期水頭

z : 下流端から試験体軸に沿った距離

a : スタンドパイプの断面積

t : 試験開始後の経過時間

γ : 水の単位体積重量

式(1)の基礎方程式に加え式(2)の初期条件及び境界条件を考慮することによって、変水位透水試験の厳密解析解を導くことができる。

このようにして求められた厳密解は未知数のパラメータK, S_sを含む高次元非線形関数であり実験結果から直接K, S_sを直接求めることはできない。これらK, S_sは式(3)に示す誤差関数を用いる逆解析によって評価される。

$$\epsilon = \sum_{i=1}^M \left\{ H(L, t_i) - H(L, t_i)^* \right\}^2 \quad (3)$$

ここでMは逆解析に用いる測定点数であり、この式は時刻t_iにおける測定結果

の水頭H(L, t_i)^{*}とこれに対応する理論値H(L, t_i)の誤差の総和を表す。逆解析ではこの誤差の総和を最小とする最適なK, S_sを求めることでその値を評価する。一方、理論、解析の両面から難透水性地盤材料に対する有効性が確認されているフローポンプ法¹⁾は、変水位法同様に逆解析による評価手法を用いることでK, S_s及びC_v(圧縮貯留率)を評価することができる。

3. 透水試験

3.1 試験装置

本研究で試作・開発した実験装置をFig.1に示す。大別すると、圧力容器、差圧計、スタンドパイプ、拘束圧発生装置、フローポンプ、計測記録装置から構成されている。従来の変水位試験に比べて水頭の測定に差圧計を用いる点及び自動計測用の機器を備えている点が異なっている。スタンドパイプは水の蒸発散の影響を防ぐために同じ条件のものを2本用意し、1本を計測に用いる。高精度に試験中の温度を制御・計測するため、すべての装置を恒温室内に設置し、計測装置以外の器具にはさらに断熱処理を施した。また本装置では変水位及びフローポンプ法による透水試験を同一の装置で実験できるよう設計されている。

3.2 試験条件

試験には白浜砂岩を用いた。供試体は直径100mm高さ50mmの円柱形で軸方向が層理面に対して垂直になるように整形した。供試体の飽和はゴムスリーブで被覆し、さらにシリコンゴムを上塗りし乾燥させた後、圧力容器にセットし真空ポンプで脱気することによって行なった。試験条件として、変水位透水試

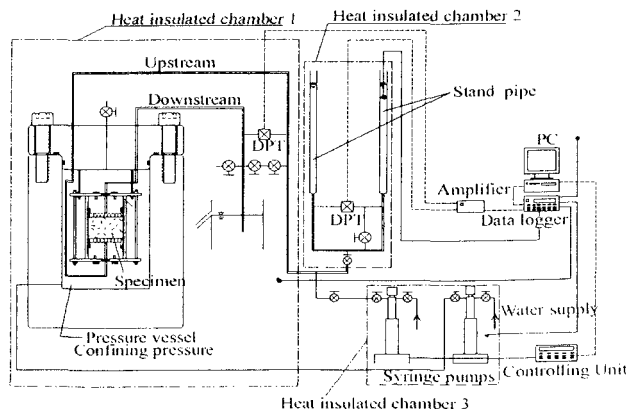


Fig.1 Schematic of the water permeability test system.

験は初期水頭を $H_0=87.9\text{cmH}_2\text{O}$ 、フローポンプ法では流量を $q=0.5\ \mu\text{l/min}$ とし、拘束圧を 1MPa から 5MPa まで変化させて試験を行なった。

4. 試験結果及び考察

Fig.1 及び Fig.2 に変水位法及びフローポンプ法による透水試験の計測結果とそれぞれの試験より得られた透水係数及び比貯留率を用いて行った水頭差の解析結果の一例を示す。

変水位法における水頭差の計測結果と解析結果は全体的に一致しており、極めて長時間に亘る計測を比較的精度良く行えたと考えられる。しかし、試験初期段階において温度の変動がみられ、水頭差の計測結果にもこれに対応する変動が認められる。比貯留率は非定常状態の計測結果から評価されるため、初期段階における水頭差の変動はその評価結果に影響を与える。したがって、より信頼性の高い比貯留率の値を得るためにはさらに厳しい温度制御を行い試験を実施する必要がある。

フローポンプ法において水頭差の計測結果と解析結果は全体的には一致しているが、試験開始直後の計測値と解析値にはわずかな差がみられる。これについても試験初期段階における温度変動が水頭の計測に影響を与えたためと考えられる。

Fig.3 に変水位法及びフローポンプ法から得られた各拘束圧条件下における透水係数を示す。透水係数は $10^{-9}(\text{cm/s})$ のオーダーであり拘束圧の増加に伴って減少する傾向がみられる。これは、拘束圧の増加に伴い間隙が収縮したためと考えられる。Fig.4 に変水位法及びフローポンプ法から得られた各拘束圧条件下における比貯留率を示す。比貯留率はおよそ $10^{-5}(\text{l/cm})$ のオーダーであり拘束圧条件の変化とともに変動する。この比貯留率の変動は拘束圧の変化にともなう岩石の内部構造の変化に起因すると考えられる。

変水位法及びフローポンプ法により評価された透水係数及び比貯留率の変化は拘束圧の変化に対し同じ傾向を示し、値もほとんど一致している。しかし、難透水性の地盤材料を評価する際には、温度の変動などによる水頭の変化が試験の評価に影響を及ぼすため、両試験法の結果に差異が生じたと考えられる。

5. まとめ

本研究では、難透水性地盤材料を対象に変水位法が適用できる透水試験装置を新しく試作、開発した。これを用い白浜砂岩を対象とする透水試験を実施し、供試体の比貯留率を考慮した解析理論に基づき評価を行った。試験中の温度制御には課題を残したが、開発した試験手法により難透水性の高精度評価が可能なことが確認された。

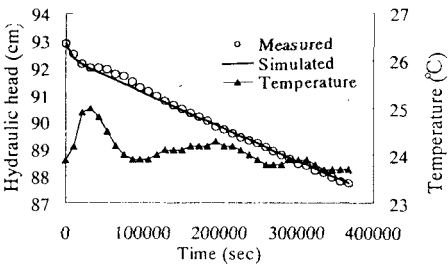


Fig.1 Hydraulic head and change of temperature during falling-head.

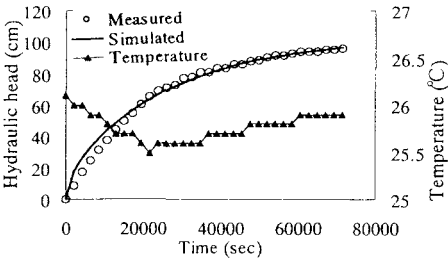


Fig.2 Hydraulic head and change of temperature during flow-pump.

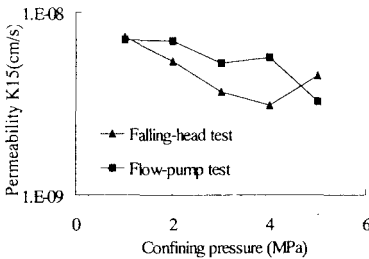


Fig.3 Permeability variation with confining pressure.

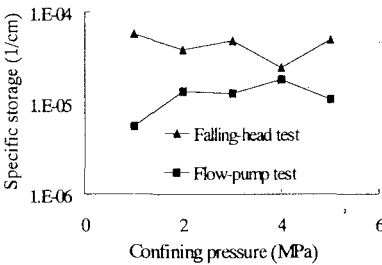


Fig.4 Specific storage variation with confining pressure.

参考文献

1)Zhang, M., Takahashi, M., Morin, R.H., and Esaki, T.:"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, ASTMSTP 1415, M. N. Sara and L. G. Everett, Eds., American Society for Testing and Materials,West Conshohocken, PA, 2002 (In press)