装置の貯留性を考慮した難透過性材料の流体移動特性の評価

九州大学工学部　学生会員　○山下　貴士　九州大学大学院　正会員　江崎　哲郎
九州大学大学院　正会員　三谷　泰浩　九州大学大学院　非会員　秦　将之

1. はじめに

近年，高レベル放射性廃棄物の地層処分や CO_2 の地中貯留といった地下深部の岩盤の隔離性，密閉性を利用したプロジェクトが数多く進められており，地下深部における流体移動特性を正確に評価することが必要不可欠となっている．

現在，難透過性岩盤を対象とした室内透水試験としては，フローポンプ法およびトランジェントパルス法が高い適用性を持つとされている．これらの室内透水試験においては微量の流量の計測が重要となる．これらの方法で得られた非定常状態の計測データに対し，それぞれの試験法の厳密解の逆解析を行って流体移動特性を得る [1)]．しかし，試験体に流体を注入する際，厳密には，注入された流体がすべて試験体に流入するわけでなく，配管の膨張や装置内の水の圧縮の影響から，一部の流体が装置に貯留される．試験体に固有の比貯留率および試験装置に依存する貯留性が解析時の対象となる非定常状態に寄与するため，装置の貯留性の影響を比貯留率と分離することが正確な流体移動特性を評価するうえで重要となる．

本研究では，まず装置の貯留性を求める実験を行い，実験条件に応じた装置の貯留性を求める．その後，フローポンプ法およびトランジェントパルス法による透水試験を行い，装置の貯留性を考慮して厳密解の逆解析を行って流体移動特性を再評価する．

2. 試験装置の概要

使用した試験装置の概略図を **Fig. 1** に示す．

本試験装置は，透水試験として定水位法，変水位法，フローポンプ法，トランジェントパルス法，透気試験として圧力制御法，流量制御法を行うことができる．難透過性材料を対象としてこれらの試験を行うために，シリンジポンプを用いて供試体への流体の注入や拘束圧の載荷を高精度に制御できるようにした．トランジェントパルス法は，シリンジポンプ A，B のシリンダーをそれぞれ上流・下流側の圧力貯留槽とし，試験体にパルス圧を加えて行う．フローポンプ法は，シリンジポンプ A を定流量モード，シリンジポンプ B を定圧モードに設定して行う．

また，温度変化をできる限り低減するために，全ての試験装置を恒温室内に設置し，装置の周辺をさらに断熱材で覆った．

3. 装置の貯留性の実験的評価

装置の貯留性 Ce は以下の式によって求められる．

$$Ce = \frac{dV_e}{dH}$$

ここで，dH：装置内の圧力(水頭)上昇，dVe：その時流入する流体の量である．この式を用いて，装置の貯留性を評価するために，不透水のステンレス製のダミー供試体を用いて一定流量の注入を行い，圧力の上昇を測定する．

今回は，透水試験時と同等のシリンジポンプの容量，流量，間隙水圧および拘束圧条件で実験を行う．実験結果を **Table 1** に示す．

その結果，フローポンプ法およびトランジェントパルス法を想定した装置の貯留性に約１オーダーの差が見られた．これは，フローポンプ法では，試験開始時の間隙水圧が０であるのに対し，トランジェントパルス法では間隙水圧を 0.5 kgf/cm^2 に設定して実験を行うため，あらかじめ装置内の水が圧縮され，注入量に対する水頭差の変化が大きくなり，装置の貯留性にこのような差が現れると考えられる．

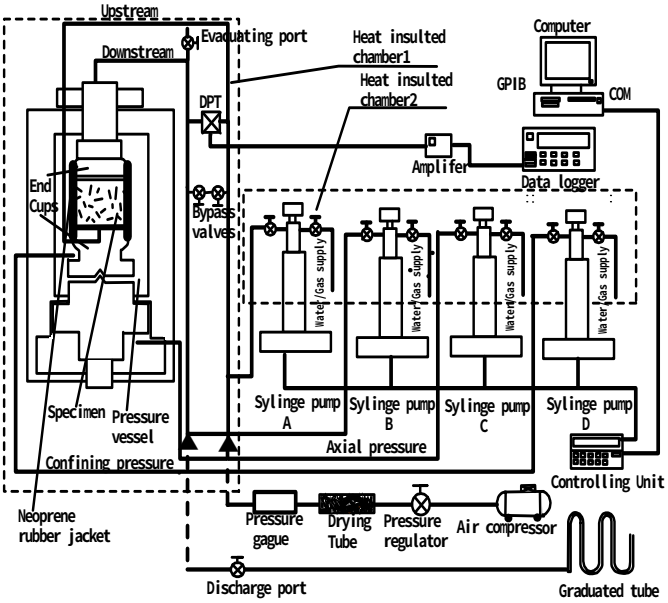

Fig. 1　Schematic view of test system.

Table 1　Storage capacity of the apparatus.

Confining pressure	5MPa	10MPa	15MPa	20MPa
Flow pump method	5.74E-04	6.62E-04	5.46E-04	4.246E-04
Transient pulse method	2.91E-05	2.42E-05	2.42E-05	2.27E-05

(Unit：cm^2)

4. 透水試験

試験体に相浦砂岩(直径：50 mm，長さ：100 mm)を用い，フローポンプ法およびトランジェントパルス法による透水試験を行う．試験条件は，拘束圧をそれぞれ 5，10，15，20 MPa として試験を行う．また，試験体は２つの試験とも同一のものを用いる．透水係数の計測結果を **Fig. 2** に，比貯留率の計測結果を **Fig. 3** に示す．

Fig. 2 より，どちらの試験法とも拘束圧が増加するにつれ，透水係数は減少している． **Fig. 3** より，透水係数と同様に，どちらの試験法とも拘束圧が増加するにつれ,比貯留率は減少している.これらは，拘束圧が増加するに従って，透水性に関与する空隙が収縮したことに起因すると考えられる．

また，各試験法によって求められた透水係数および比貯留率の値は一致していない．フローポンプ法の結果は，トランジェントパルス法に対して透水係数が 2.9～3.9 倍，比貯留率が 3.2～23 倍であり，どちらもフローポンプ法の方が大きく評価されている．

5. 流体移動特性の解析的評価

実験により得られた装置の貯留性の計測データを用いて，厳密解の逆解析を行う．これは，フローポンプ法およびトランジェントパルス法による実験から得られた上流側と下流側の差圧と時間の計測データと厳密解によって理論的に求まる差圧‐時間のデータを比較して，透水係数，比貯留率および装置の貯留性を同定する方法である．

その結果として，新たに評価された透水係数を **Fig.2** に，比貯留率を **Fig. 3** 中に示す．

Fig. 2 より，装置の貯留性を考慮した透水係数は，拘束圧の増加につれて減少する傾向が見られる．

Fig. 3 より，透水係数と同様に，比貯留率は拘束圧が増加するにつれ減少する傾向が見られるが，フローポンプ法の拘束圧 20 MPa 時の比貯留率が大きく増加している．この原因については，さらなる検討を行っていく必要がある．

フローポンプ法の結果は，トランジェントパルス法に対して透水係数が 0.8～1.0 倍，比貯留率が 1.4～15.8 倍である．装置の貯留性を実験的に考慮すると，透水試験で得られた結果と比較して２つの試験法の差が小さくなっていることがわかる．

また，装置の貯留性を考慮することで，考慮しない場合に対してフローポンプ法では透水係数が 0.9～1.0 倍，比貯留率が 0.9～1.1 倍となるのに対し，トランジェントパルス法では透水係数が 3.2～3.8 倍，比貯留率が 3.3～4.2 倍と大きくなった.このように，トランジェントパルス法では，装置の貯留性を考慮して流体移動特性を評価することが重要であると考えられる．

6. まとめ

本研究では，難透過性材料の正確な流体移動特性を評価するために，フローポンプ法，トランジェントパルス法の実験時の装置の貯留性求め，それを考慮して透水係数，比貯留率を評価した．その結果，装置の貯留性を考慮することで，フローポンプ法およびトランジェントパルス法で評価される透水係数および比貯留率の差が小さくなった．特に，トランジェントパルス法は，装置の貯留性が及ぼす影響が顕著であり，装置の貯留性を実験的に求めたうえで流体移動特性を評価することが重要であると考えられる．

参考文献

１）T.Esaki *et al*., Rigorous Theoretical Analysis of a Flow Pump Permeability Test, Geotechnical Testing Journal, Vol.19, No.3, pp.241-246, 1996

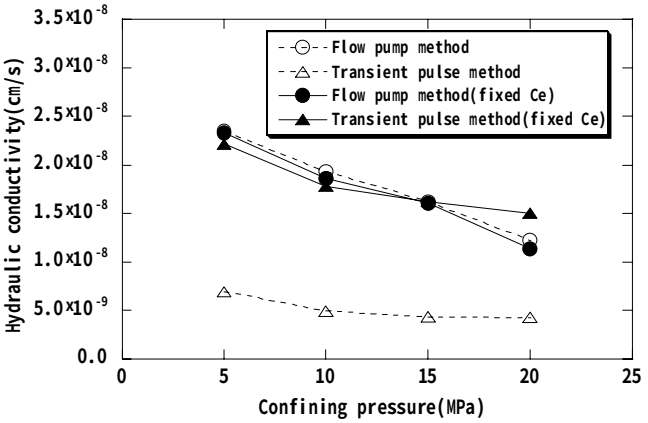

Fig. 2　Comparison of hydraulic conductivity.

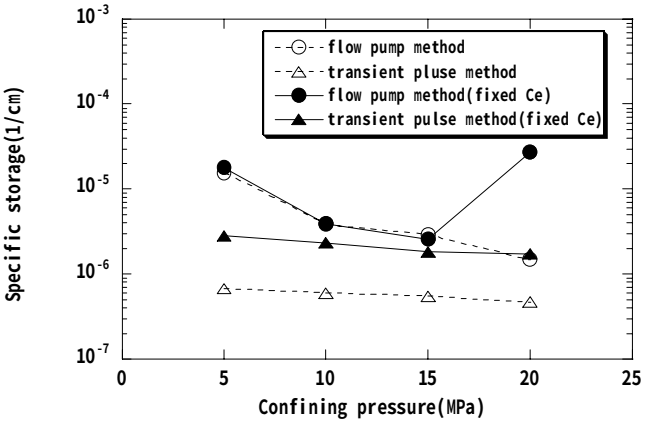

Fig. 3　Comparison of specific storage.