

フローポンプ透水試験の非定常解析及び難透水性材料への適用について

九州大学工学部

正 員 江崎哲郎

学生員 坂井健太郎 ○ 平井太郎

工業技術院地質調査所

正 員 張 銘

1. 緒言

近年、地上立地の困難や環境の見地などから岩盤の隔離性を活用した様々な地下利用が考案されている。石油や圧縮空気エネルギーの地下貯蔵(CAES)、廃棄物の地層処分などがその代表的なものである。これらの地下施設的设计・評価に際しては、岩盤の水理学的特性の正確な調査が必要不可欠となっている。フローポンプ法はこのような難透水性材料を対象とした室内透水試験法の一つであり、供試体に流入或いは流出する流体をフローポンプで外部から制御し、それに起因する供試体間の水頭差を計測することによって透水係数を求めるものである。従来では、定常状態となった時の水頭差を用いDarcy式によって透水係数を評価している。しかし、試験体の透水係数が極めて小さい場合、もしくは試験体及び装置自身の圧縮貯留率が大きい場合には定常状態に至るまでの時間が長くなり、その判断も難しくなる。本研究では、フローポンプ透水試験の早期の計測結果から供試体の透水係数のみならず、比貯留率をも正確に評価できる非定常解を示す。また、開発したフローポンプ透水試験装置を用い、稲田花崗岩の透水試験を実施する。これによって、新しい非定常解析理論の有効性を示すとともに地下深部を想定した高い拘束圧及び間隙水圧の変化が岩石の透水特性に及ぼす影響を明らかにする。

2. フローポンプ法の新しい解析理論

圧縮性のある流体が、飽和されている有孔材料に浸透する過程を表す釣合方程式は以下のようである。

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

(1)式及び注入状態の初期条件、境界条件により注入状態の厳密解析解は、次式で表される。

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

ここで、 L =試験体の長さ(L)、 A =試験体の断面積(L^2)、 q =フローポンプの流量(L^3/T)

また、 $\delta = C_e / (AS_s)$ 、 β_n は下記の方程式の根である。

$$\tan(\beta L) = \frac{1}{\beta \delta} \quad (3)$$

供試体の透水係数 K 、比貯留率 S_s 及びフローポンプシステムの圧縮貯留率 C_e は未知数であり次式で定義された誤差関数を最も小さくする手順で求められる。

$$\varepsilon = \left\{ \sum_{i=1}^M \left[H(L, t_i)_{(K, S_s, C_e)} - H(L, t_i)^* \right]^2 \right\}^{1/2} \quad (4)$$

ここに、 M は計測点の数、 $H(L, t_i)_{(K, S_s, C_e)}$ 及び $H(L, t_i)^*$ はそれぞれ時間 t_i において水頭差の計算及び計測値である。これは、パラメータ K 、 S_s 及び C_e の高次元非線形関数であり、最適法のうち Alternating Variable MethodにGolden Section Methodをカップリングした方法で計測結果から直接にパラメータ K 、 S_s 及び C_e を求めることができる。

3. 実験概要

今回の実験には稲田花崗岩(有効間隙率約0.6%)を用いた。一般に花崗岩にはお互いに直交する3つの割れやすい面から順にRift Plane, Grain Plane, Hardway Planeと呼ばれている。このような花崗岩の力学的異质性が透水特性に及ぼす影響を考慮し、今回はGrain Planeに長軸が直交するように採取したもの(円柱形、 $\phi 50\text{mm} \times 100\text{mm}$)を用いて透水実験を行った。

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、周圧型の三軸圧縮容器、フローポンプ及びコントロールユニット、拘束圧発生装置、及び蓄圧タンク等から構成されている。フローポンプ透水装置としては、ISCO社製シリンジポンプ100DXを用いた。

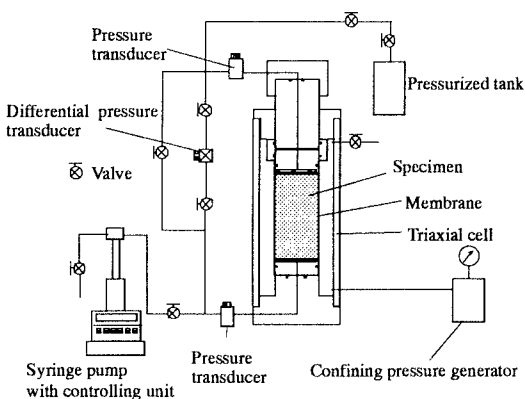


Fig.1 Schematic of permeability test system for extremely-low permeability rocks with constant flow-pump

実験手順としては供試体を飽和状態にするため水浸漬圧容器に入れ、真空ポンプで24時間以上脱気し、ゴムスリーブで被覆する。更にシリコンゴムを上塗りし乾燥させた後、三軸圧縮容器にセットし所定の拘束圧を加え回路内の脱気を十分に行い脱気水で満たす。次にシリンジポンプの定圧モードによって供試体全体の間隙水圧を一定にする。この後、供試体の底部に連結されたシリンジポンプから一定超微流量を供試体に注入し、供試体の全長に生じる水頭差を差圧計によって設定した時間間隔で自動的に計測・記録する。

4. 実験結果の非定常解析及び考察

上の実験において得られた注入時の計測データを用いて、非定常解析理論に基づきシミュレーションを行った結果をFig.2に示す。実験は拘束圧、間隙水圧及び有効封圧（拘束圧と間隙水圧との差）が花崗岩の透水特性に与える影響を評価する目的で、拘束圧を10MPa、20MPaとし、それぞれの拘束圧の0.2、0.4、0.6、0.8倍の間隙水圧を加えた条件下で行った。この新しい解析理論を用いて算出した花崗岩の透水係数は約 $5.8 \times 10^{-12} \sim 3.7 \times 10^{-11}(\text{cm/s})$ 、比貯留率は約 $2.4 \times 10^{-7} \sim 2.2 \times 10^{-6}(1/\text{cm})$ であった。

有効封圧が各パラメータに与える影響を評価するために、Fig.3に結果をまとめる。

透水係数 K は、有効封圧の増加によって片対数グラフ上でほぼ直線的に減少している。これは、有効封圧の増加に伴い花崗岩中のマイクロクラックが縮小した結果であると考えられる。

供試体の比貯留率 S_s は、間隙水圧の上昇に伴い増加する傾向が見られる。これは、供試体中の空隙が拡大し、水及び供試体が圧縮されたためである。

透水試験装置の圧縮貯留率 C_c は配管及び水の圧縮性に依存し、上と同様の原理により間隙水圧の上昇と共に減少する傾向が認められる。

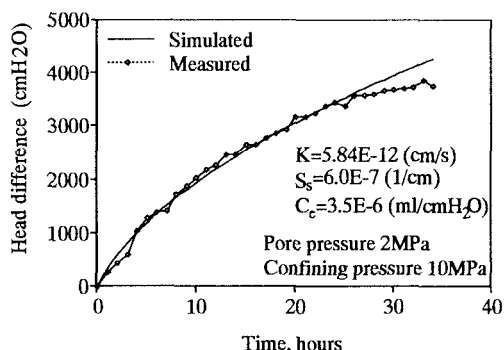


Fig.2 Comparisons between the measured and simulated curves of head difference across the specimen versus time for Inada Granite

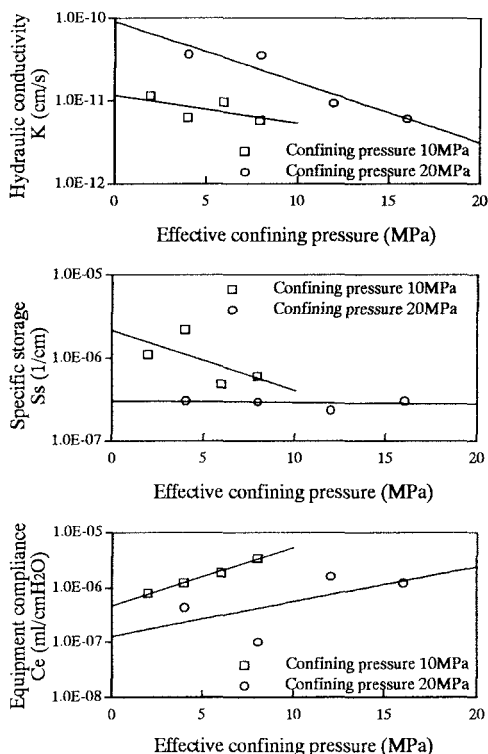


Fig.3 Variation of parameters K , S_s , and C_c with increment of effective confining pressure

5. 結言

本研究では、難透水性の岩石材料に対する高い拘束圧及び間隙水圧のもとでの透水性の計測が可能なフローポンプ透水試験装置を新しく試作、開発した。そしてこれを用いて花崗岩の透水試験を行い、供試体及び装置の圧縮貯留率をともに考慮したフローポンプ法の新しい理論に基づき、解析を行った。

今回用いた稲田花崗岩の透水係数及び比貯留率はそれぞれ 10^{-11} 及び 10^{-7} オーダーとなっており、新しい解析理論に基づくフローポンプ法により数十時間での計測が可能であるため、この方法の有効性が確認された。

現在は、開発したシステム及び非定常解析理論を用いて、計測と同時に解析ができ、さらに所定の精度に至る最短時間で計測を終了する判断が可能なりアルタイム解析システムを開発中であり、今後花崗岩の異方性による透水特性の変化や他の岩種に対する実験データの蓄積を行う予定である。

6. 参考文献

- 1) 張銘他：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回岩盤力学シンポジウム掲載決定