

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

Flow pump permeability test method and its application to extremely-low permeability rocks

張 銘*・江崎哲郎**・高橋 学***・坂井健太郎****
M. ZHANG, T. ESAKI, M. TAKAHASHI and K. SAKAI

The recently-developed exact theoretical analysis of the flow pump permeability test is presented. An apparatus capable of evaluating hydraulic properties of extremely-low permeability rocks under high confining and high pore pressure conditions are developed and used to test a typical rock of Inada granite. The hydraulic conductivity and specific storage of Inada granite evaluated from this study were in the range of 10^{-11} to 10^{-12} cm/s and 10^{-6} to 10^{-7} 1/cm, respectively. Both hydraulic conductivity and specific storage of Inada granite decreased with the increment of effective confining pressure, the difference between confining and pore pressures. This dependence was relatively-sensitive at low confining and low pore pressure conditions.

Keyword; flow pump, theoretical analysis, laboratory test, permeability, granite

1.はじめに

近年、石油、液化天然ガス等のエネルギー施設や高レベル放射性廃棄物の地層処分施設等を建設する際に、対象となる岩盤の力学的特性と同時に透水特性を正確に把握することが、設計のみならず施設の機能の長期的な評価や環境の見地からみても必要不可欠である。しかし、対象となる岩盤の透水係数が小さい場合やインタクト部分の透水係数を求める場合には、通常の透水試験法による計測が非常に困難となり、また、その結果の信頼性にも疑問がある。

このような難透水性材料を対象とした室内透水試験法にはトランジェントパルス法¹⁾及びフローポンプ法²⁾があり、それぞれ岩や粘土の透水試験に用いられている。トランジェントパルス法では、透水係数は水頭差が急激に変化する非定常状態においてのみ敏感に求められ、また試験体の比貯留率の計測は装置の貯留率に大きく依存する³⁾。フローポンプ法は試験体の片方の端で一定の微流量を注入または吸引し、試験体の両端間に経時的に発生する水頭差を差圧計で高精度に計測し透水係数を求めるものである。従来のフローポンプ透水試験法では定常状態となったと考えられるときの水頭差を用いてダルシーの法則によって透水係数を評価する。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フローポンプシステムの圧縮貯留率が大きい場合、定常状態に至るまでに比較的長い時間が必要となり、その判断も難しくなる。MorinとOlsenは、より短時間で透水係数及び試験体の比貯留率を算出するために、非定常状態でのフローポンプ透水試験法の解析理論を確立した⁴⁾。しかし彼らの理論ではフローポンプ装置の貯留率を考慮しておらず、フローポンプ装置の貯留率が試験体のそれと比べて無視できる場合のみでしか適用できない。EsakiとZhangは、試験体と装置の圧縮貯留率の両方を考慮したフローポンプ透水試験法の厳密な解析理論を誘導し、解析モデル中のパラメータを非定常時の水頭差の計測値から同時に算出するための方法を提案した⁵⁾。また、それを難透水性混合土の透水試験に適用し良好な結果を収めている。

本研究ではフローポンプ法を更に難透水性岩に対して適用し、超微流量フローポンプを用いた透水試験装置を開発・試作する。そして代表的な難透水性岩石である稲田花崗岩の透水試験を実施し、フローポンプ法の新しい厳密解析理論による解析を行うことによって透水係数及び比貯留率を求め、地下深部を想定した高い拘束圧及び間隙水圧の変化が隔離材料としての岩石の透水特性に及ぼす影響を明らかにする。

* 工博 九州大学工学部 現在通産省工業技術院地質調査所
** 正会員 工博 九州大学教授 工学部環境システム工学研究センター
*** 正会員 工博 通産省工業技術院地質調査所
**** 学生会員 九州大学大学院工学研究科

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ものである⁶⁾。
これはTerzaghiの一次元圧密の式⁷⁾に相当するものである。

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

ここで、 H = 水頭 (L)

z = 試験体の軸方向の距離 (L)

S_s = 試験体の比貯留率 (L^{-1})

K = 試験体の透水係数 (L/T)

t = 時間 (T)

注入状態の初期条件は、

$$H(z, 0) = 0 \quad 0 \leq z < L \quad (2)$$

注入状態の境界条件は、

$$H(0, t) = 0 \quad t \geq 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial H(L, t)}{\partial z} = \frac{1}{KA} \left(q - C_e \frac{\partial H(L, t)}{\partial t} \right) \quad t > 0 \quad (4)$$

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)

C_e = フローポンプシステム全体の貯留率 (L^2)、すなわち単位圧力の増加によってフローポンプ中に圧縮される水の体積

時間 t において実際に試験体に注入されている流量は、フローポンプが発生した流量とフローポンプシステム内に圧縮された水の体積との差である。

式(1)~(4)より注入状態の厳密解析解は、次式で表される⁵⁾。

$$H(z, t) = \frac{qL}{AK} \left\{ \frac{z}{L} - 2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\exp\left(-\frac{K}{S_s} \beta_n^2 t\right) \sin(\beta_n z)}{L \delta \beta_n \cos(\beta_n L) \left[L \left(\beta_n^2 + \frac{1}{\delta^2} \right) + \frac{1}{\delta} \right]} \right\} \quad (5)$$

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

$$\tan(\beta L) = 1 / (\beta \delta) \quad (6)$$

実際の透水試験では試験体の両端の水頭差を計測するため、式(5)において $z=L$ とし、また、 $\tan \beta_n$ が式(6)を満たすという条件を利用すると、式(5)は次式(7)のように簡略化される。

$$H = \frac{qL}{AK} \left\{ 1 - 2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\exp\left(-\frac{K}{S_s} \beta_n^2 t\right)}{L \delta^2 \beta_n^2 \left[L \left(\beta_n^2 + \frac{1}{\delta^2} \right) + \frac{1}{\delta} \right]} \right\} \quad (7)$$

上式は、 $t \rightarrow \infty$ となるとダルシー式と等しくなる。さらに、フローポンプシステムの貯留率を無視する場合($C_e=0$, $\delta=0$)、この式はフローポンプ法を提案したMorinとOlsenが確立した式と等しくなる⁴⁾。

試験体の透水係数 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ることができる。

$$\varepsilon = \left\{ \sum_{i=1}^M \left[H(L, t_i)_{(K, S_p, C_p)} - H(L, t_i)^* \right]^2 \right\}^{1/2} \quad (8)$$

ここに、 M は計測点の数、 $H(L, t_i)_{(K, S_p, C_p)}$ 及び $H(L, t_i)^*$ はそれぞれ時間 i において水頭差の計算及び計測値である。この関数は、パラメータ K 、 S_p 及び C_p 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によって計測結果から直接にパラメータ K 、 S_p 及び C_p を求める⁵⁾。

3.実験装置及び手順

実験装置

本研究で試作・開発したフローポンプ透水実験装置を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、蓄圧タンク及び計測記録装置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。このシリンジポンプの流量は $1.0 \times 10^{-5} \sim 50 \text{ ml/min}$ と広範囲であり、極めて微小かつ無脈な流量の発生が可能である。また、シリンジポンプの耐用圧力は69MPaであり、高い間隙水圧のもとでの透水実験が可能となっている。また温度変化による影響を低減するため、このシステム全体は恒温室内に設置している。

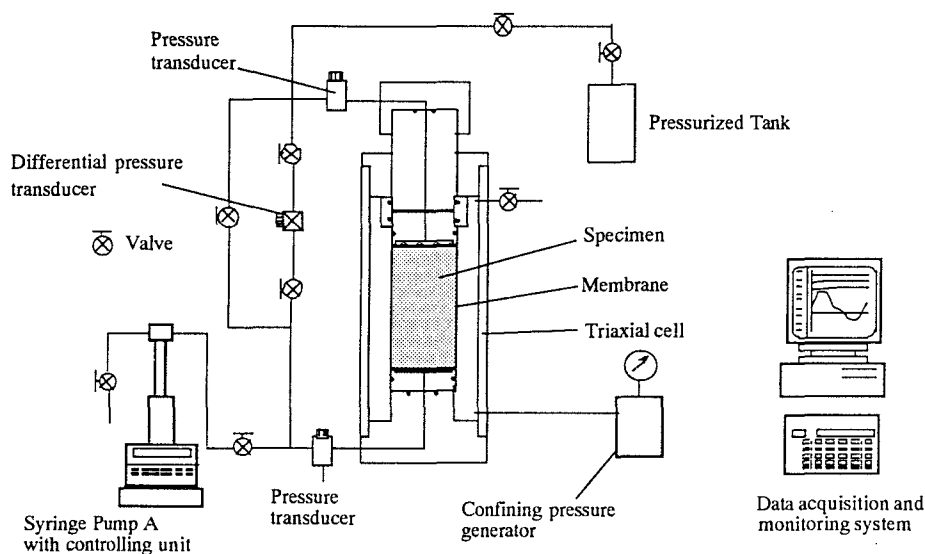


Fig.1 Schematic of permeability test system for extremely-low permeability rocks with constant flow-pump

実験手順

実験に際しては、試験体をゴムスリーブで被覆する前にあらかじめ飽和状態にするため水浸減圧容器に入れ、真空ポンプで24時間以上脱気した。さら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た後回路内の脱気を十分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所定の間隙水圧を加え、この過程においてシリンジポンプの流量を計測・監視することにより試験体全体の間隙水圧が一定となっているかを確認する。間隙水圧が一定になった後、試験体の底部に連結されたシリンジポンプより、一定超微流量を試験体に注入し、試験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する。次にシリンジポンプを停止し、圧力の回復を計測する。更にシリンジポンプを逆回転させ試験体内の水を吸引する。この全ての計測過程において温度の計測・監視も同時に行う。

稲田花崗岩を用いた実験

今回の実験には稲田花崗岩（有効間隙率約0.6%）を用いた。一般に花崗岩には互いに直交する3つの割れやすい面

が存在しており、割れやすい面から順にRift Plane, Grain Plane, Hardway Planeと呼ばれている⁸⁾。このような花崗岩の力学的異方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の（円柱形、 $\phi 50\text{mm} \times 100\text{mm}$ ）を用いて透水実験を行った。

また、拘束圧、間隙水圧及び有効封圧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倍、0.4倍、0.6倍、0.8倍の間隙水圧を加えた条件下で一連の透水実験を行った。また流量は拘束圧10MPaにおいては $0.03 \mu \text{ l/min}$ 、拘束圧20MPaにおいては $0.02 \mu \text{ l/min}$ と設定した。

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～Fig.3に示す。横軸には計測時間を、縦軸には水頭差をとり、フローポンプから水を注入する段階において、水頭差が経時的に変化する様子を表している。この際、容量の大きな蓄圧タンク（タンク+配管 $>2 \text{ l}$ ）を用いたことで下流部の圧力が一定となっていることが圧力計の出力から確認された。計測結果が温度に敏感に影響を受けていると見て取れるものの、シミュレーション結果は比較的近似している。また、今回設定した試験条件下で、新しい非定常解析理論を用いて算出した花崗岩の透水係数は $約5.8 \times 10^{-12} \sim 3.7 \times 10^{-11} (\text{cm/s})$ で、比貯留率は $約2.4 \times 10^{-7} \sim 2.2 \times 10^{-6} (1/\text{cm})$ の範囲であった。

有効封圧（拘束圧と間隙水圧との差）が各パラメータに与える影響を評価するために、Fig.4～Fig.5に結果をまとめる。またFig.4,5上段のグラフ中に、非定常解析による結果に加えて、報告されたトランジェントパルス法を用いた同一材料での実験結果（高橋ら、1990）、及び水頭差の変化がチャート上ではほぼ一定に収束した時点を選定し定常状態とみなしてダルシー式により求めたトランジェントパルス法及びフローポンプ法による結果を示しており、後者二つはよく一致している。

透水係数K（Fig.4,5上段）は、拘束圧が10MPa、20MPaの場合において、いずれも有効封圧の増加によって透水係数が対数目盛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。トランジェントパルス法及び定常状態と仮定して求めた透水係数は非定常厳密解析の結果より約1オーダー大きい。これらの原因については更に理論的な研究を行い、解明する必要がある。

試験体の比貯留率 S_r （Fig.4,5中段）は、拘束圧が10MPaの場合には間隙水圧の上昇に伴い増加する傾向が見られるが、20MPaの場合にはその増加は小さくほとんど一定である。試験体の比貯留率は試験体の空隙率、水及び試験体の圧縮性に依存する。間隙水圧の増加にともなう試験体の比貯留率の増加は、試験体中の空隙が拡大し、また水及び試験体が圧縮されたためである。水及び試験体の圧縮性は圧力が高いほど小さくなるため間隙水圧の比較的高い状態においては間隙水圧の変化による試験体の比貯留率の変化も小さくなる。

透水試験装置システムの圧縮貯留率 C_r （Fig.4,5下段）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ともに減少する傾向が認められる。

5. 結論

本研究では、極めて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実験を行い、試験体と装置の圧縮貯留率の両方を考慮したフローポンプ法の新しい理論に基づいて解析を行った。

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 $10^{-12} \sim 10^{-11} (\text{cm/s})$ 及び $10^{-7} \sim 10^{-6} (1/\text{cm})$ 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計測が可能であり、フローポンプ法の有効性が確認された。

試験体の透水係数及び比貯留率は有効封圧の増加と共に対数目盛上でほぼ直線的にそれぞれ減少し、試験体の水理学的パラメータが有効封圧に大きく依存することが明らかになった。

装置の圧縮貯留率は実験条件（間隙水圧）によって変化する。これは、最適法に基づく係数の算出方法によって計測結果から直接に求められ、装置に起因する試験体の水理学的パラメータの誤差を除去することが可能であると考えられる。

今後は、本研究に用いた研究手法より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。また、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、所定の計測精度に至る最短時間で計測を終了する判断が可能なりリアルタイム解析システムを開発する予定である。

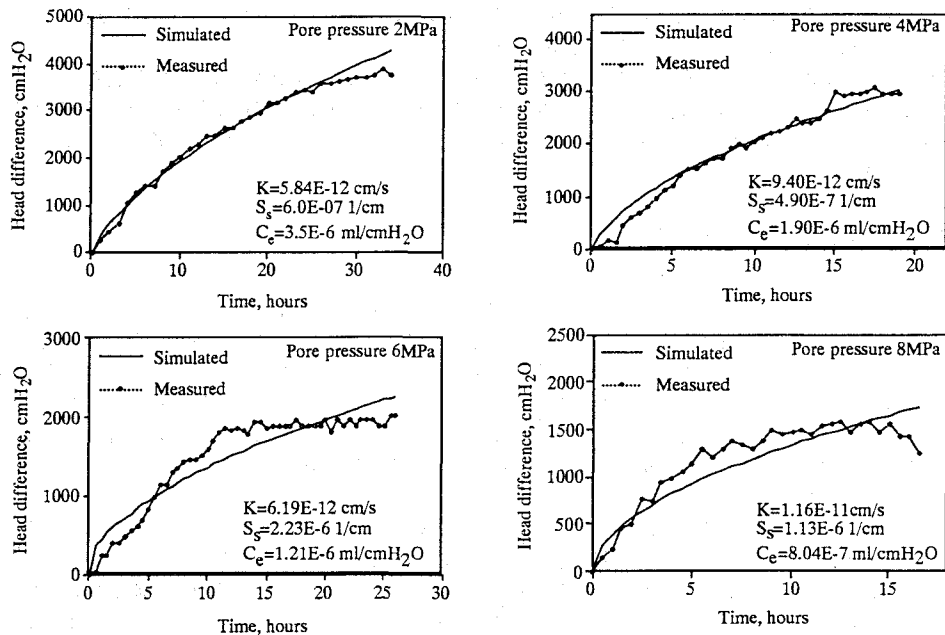


Fig.2 Comparisons between the measured and simulated curves of head difference across the specimen versus time for Inada Granite at confining pressure of 10MPa

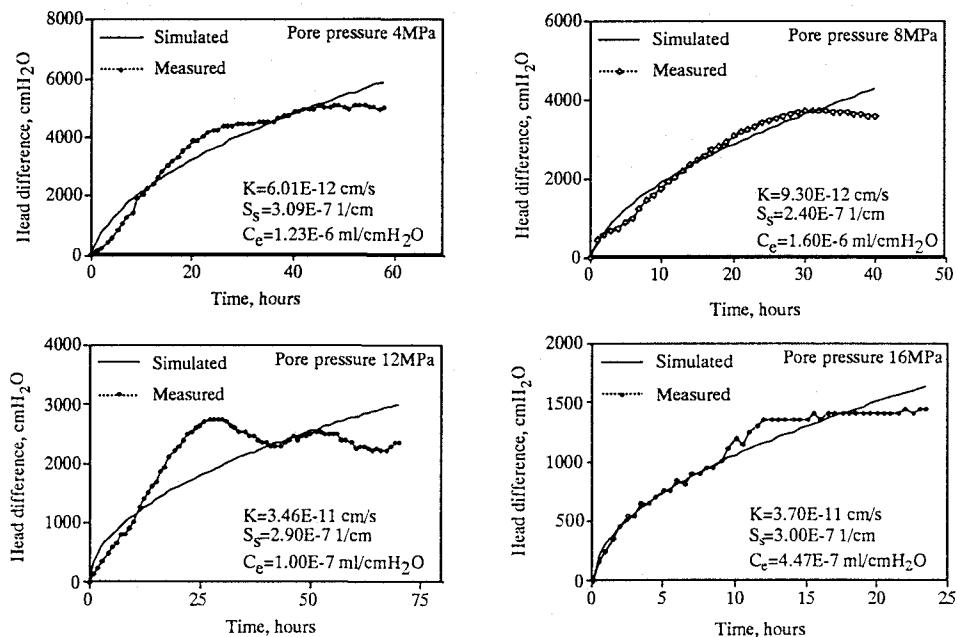


Fig.3 Comparisons between the measured and simulated curves of head difference across the specimen versus time for Inada Granite at confining pressure of 20MPa

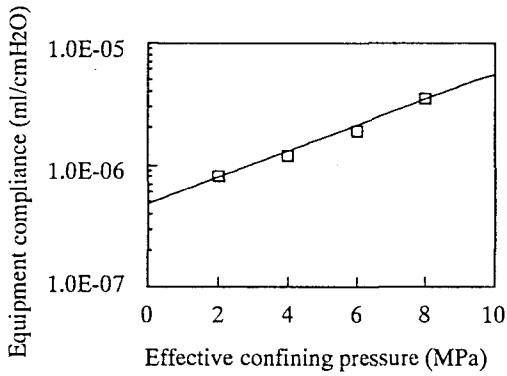
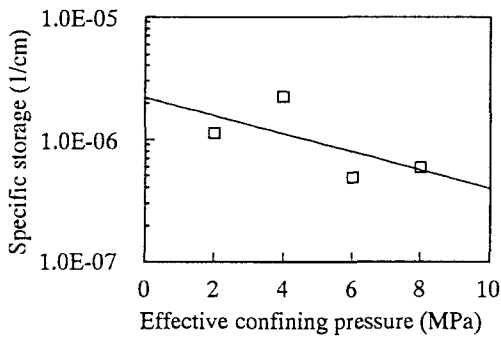
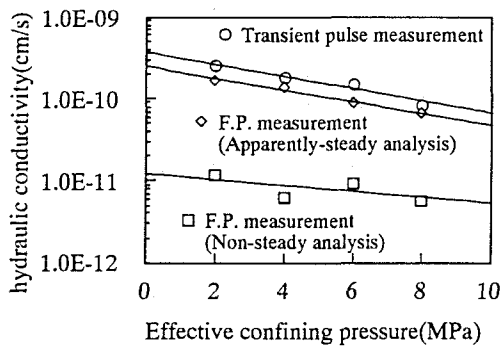


Fig.4 Variation of parameters K , S_s , and C_e with increment of effective confining pressure (Confining pressure 10MPa)

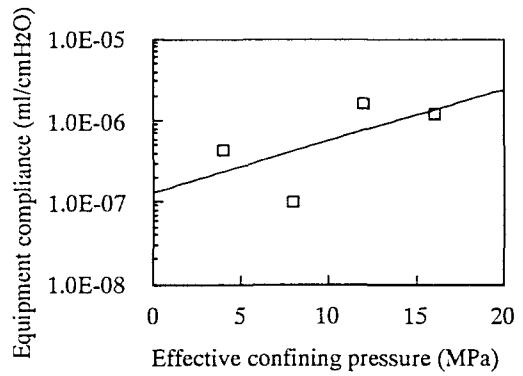
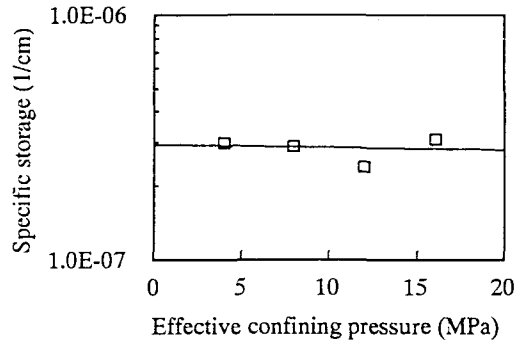
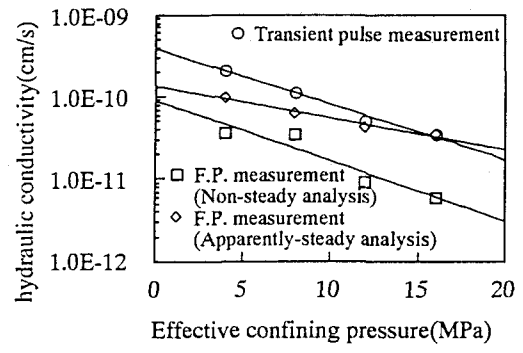


Fig.5 Variation of parameters K , S_s , and C_e with increment of effective confining pressure (Confining pressure 20MPa)

6.参考文献

- 1) Brace, W. F., Walsh, J. B., and Frangos, W. T.: Permeability of granite under high pressure, J. Geophys. Res. 73: pp.2225~2236,1968.
- 2) Olsen, H. W.,Nichols, R. W., and Rice, T. L.: Low-gradient permeability measurements in a triaxial system, Geotechnique, 35(2), pp.145~157,1985.
- 3) Wang, H. F., and Hart, D. J.: Experimental error for permeability and specific storage from pulse decay measurements, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 30, No. 7, pp.1173~1176,1993.
- 4) Morin, R. H., and Olsen, H. W.: Theoretical analysis of the transient response from a constant flow rate hydraulic conductivity test. Water Resources Research, Vol. 23, No. 8, pp.1461~1470,1987.
- 5) Esaki, T., and Zhang, M., et al.: Rigorous Theoretical Analysis of a Flow Pump Permeability Test, Geotechnical Testing Journal, Vol. 19, No. 3, pp.241~246,1996.
- 6) Hsieh, P. A., Tracy, J. V., et al.: A transient laboratory method for determining the hydraulic properties of 'tight' rocks-I, Theory. Int.J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 18, pp.245~252,1981.
- 7) Terzaghi, K.: Theoretical Soil Mechanics, John Wiley, New York, pp.510,1943.
- 8) 高橋 学・平田実雄・小出 仁: 稲田花崗岩の透水係数に及ぼす封圧及び間隙水圧の影響について, 応用地質31巻3号, pp.1~10,1990.