岩石の透水係数と試験中の供試体内 動水勾配の評価について

高橋 学*・張 銘*・林 為人**

西山 哲***・李 小春****

Experimental Study of Hydraulic Conductivity and Hydraulic Gradient
in Rock Specimen

Manabu TAKAHASHI*, Ming ZHANG*, Weiren LIN**,
Satoshi NISHIYAMA***, Xiaochun LI****

Abstract

Laboratory measurement of the hydraulic conductivity of various rock types revealed that the hydraulic conductivity sensitively changes as the porosity and the stress state in the rock change. This effect becomes clear when the porosity and various principal stresses are increased. Review of the previous laboratory experiments indicate that the hydraulic conductivity of various rock types ranged between the order of 10^{-11} cm/sec and 10^0 cm/sec, and it decreases as pore pressure decreases, confining pressure increases and intermediate principal stress increases.

The variation and distribution of hydraulic head and hydraulic gradient within a specimen were evaluated by a general equation which describes the transient pulse test. The hydraulic gradient during the early stage of the transient pulse test remarkably increased at around the upstream end of the specimen. As the time elapsed, the hydraulic head at the upstream side gradually decreased, whereas that at the downstream side monotonously and gradually increased.

Key words : Hydraulic conductivity, Porosity, Hydraulic gradient

キーワード : 透水係数, 間隙率, 動水勾配

I. はじめに

ある媒体内の水の通り易さの指標として, “透水係数” という概念が用いられている。工学から理学, 医学に渡る広い分野で用いられているが, 同じ英語表現でありながらその訳が時として分野毎に異なり, 境界領域において他分野との共同研究を行う際のささやかな混乱・障害となっている。以下にその例を示す。

・ permeability — 透水係数, 透過度, 透水度...
他 (注1)

・ permeability coefficient — 透水係数, 透水度係数, 透過係数

・ hydraulic conductivity — 透水係数, 水理伝導率

これらは後述するダルシー則で定義される速度 [cm/sec, m/sec] のディメンジョンを有する同一のものである。一方, “intrinsic permeability”

* 地質調査所環境地質部 (Geological Survey of Japan)

** (株)ダイヤコンサルタント (Dia Consultants Co., Ltd.)

*** (株)ジオジャイロ (Geogyro Co., Ltd.)

**** 茨城大学工学部 (Faculty of Engineering, Ibaraki University)

は固有透水係数と呼ばれており、流体の性質 (ρ , η , γ 等) に依存しない量であり、面積 [cm^2 , m^2] のディメンジョンを有するものである。

Darcy則は、『砂層を通り抜ける単位時間当たりの流量 Q は断面積 A および砂層の流入流出点における流体の水頭差 ΔH に比例し、砂層の厚さ L に反比例する』というものである。すなわち、

$$Q = cA \Delta H / L \quad (1)$$

と表される。 c は砂層 (あるいは砂) の特性を示す定数である。透水係数 K は (1) 式のダルシー式中の係数 “ c ” に相当し、多孔質媒質および流体を含んだ複合媒質の有効透水係数の意味を持つことになる。

本文では文献から得られる岩石の透水係数の取り得る範囲をおおよそ把握するため、測定手法などの詳細な情報にこだわらず整理してみた。その後、コアサイズにおける透水係数測定結果として主に主応力による影響量について概括する。最後に、現状では岩石コア中の動水勾配を計測することはできないので、数値計算によって供試体中の動水勾配分布を評価した事例について紹介する。

II. 代表的な岩石の透水係数について

日本における地下空間を利用する為の施工では、地下水位の浅さ故に施工中はもとより、施工後の地下水流動を考慮しておく必要がある。各種地下貯蔵施設等では、この地下水流動による有害汚染物質の拡散が重要なテーマとなっているのは一般に知られているところである。この様な地下地質 (土壌、岩盤を含めて) における地下水流動の基本的な特性として “透水係数” (Hydraulic conductivity) があり、各種の原位置試験や室内試験が提案・実用化されている。数 cm オーダーのコアサイズレベルにおける室内透水試験は、原位置の透水係数を得る代りの方法として、あるいは岩石中の物質移動の諸問題を解明するための基礎物性試験として位置付けられてきた。原位置試験における透水係数は、その地域、地質、深度、

目的等幅広い項目に依存するので、まとめるのが容易ではない。一方、室内試験における岩石を対象とした透水試験は手法として限られている (定水位及び変水位が主流、他トランジェントパルス、フローポンプ、オシレーション試験) ので、他の基本物性との関連において整理する事ができる。

さて、岩石の透水係数は当然のことながら、岩種に応じて異なる。これは基本的には岩石がどのような鉱物から構成されているか、空隙の寸法や量、そして連結性などの種々の条件によって影響されているからである。これらの諸条件の関連については定性的には理解されているものの、その複雑さ故に定量化されるにはいたっていない。ここでは、岩石の物性として一般的に測定され、基本的に用いられている間隙率に着目し、種々の岩石における間隙率と透水係数との関連について整理してみる。なお、各データに関して測定手法などの差異については検討できないので、測定手法などの条件については無視して整理した。したがって、データの細部における議論は行わず、あくまでも定性的で一般的な内容にとどめておく。Fig. 1 は小鯛 (1985) および Touloukian *et al.* (1989) のデータをもとに、各岩種毎に間隙率と透水係数との関係を示したものである。間隙率の増加とともに透水係数は大きくなり、この傾向は岩種を問わず当てはまる。一般的に物質内の水の流れは、ダルシー則にもあるように通路の断面積に比例し、岩石の様な不均質な物質内では更に通路どうしの連結性に大きく依存する。同一岩種の中でも産地等の違いについては考慮されていないので、透水係数が間隙率に依存しない事を示すデータも散見される。この場合には既述した様に、水の通路となる空間部分の連結性の違いが大きく影響しているものと思われる。これらのデータはナノダルシー ($\approx 10^{-12}$ cm/sec) の計測が可能な測定手法がほとんど用いられていないなどの制約があるため、あたかも 10^{-11} cm/sec 以下の岩石が存在しないかのように読み取れる。しかしながら、フローポンプ法やトランジェントパルス法を用いると 10^{-12} cm/sec 領域の計測が可能となる。これらの詳細につ

Fig. 1 The relationship between porosity and hydraulic conductivity of rocks

Fig. 2 The relationship between porosity and hydraulic conductivity of rocks (from articles published in Japan)

いては高橋ほか (1998) に述べられている。

柳澤ほか (1992) は地表から深度1000m付近までの地盤における透水係数の分布範囲を調べるため、1980-1989年に発行された各種国内学術雑誌をもとに文献調査を実施した。その結果、日本の地盤の透水係数は 10^{-8} cm/secから 10^0 cm/secに分布していることなどを報告している。これらのデータのうち、間隙率が明確になっているものを選び出し、透水係数との関係を調べたのが、Fig. 2である。岩種や測定手法など一切の属性を区分することなく抽出したものであり、間隙率との明確な相関を見出すことができない。ここでは岩石コアや原位置透水試験から得られる透水係数のおおよその取り得る範囲を把握するために示した。以下では、実際に行われている測定結果について紹介する。

Ⅲ. 透水係数におよぼす応力の影響

室内試験では1次元の透水係数を測定することが主となっているので、間隙水圧や主応力による影響量評価を容易に行うことができる。そこで、著者らが現在までに実施した透水試験結果のうち、間隙水圧・封圧・最大主応力・中間主応力および脆性破壊と延性破壊挙動時における透水係数の変化についての代表的な事例について紹介する。なお、供試体は直径3 cm、高さ6 cmの円柱形もしくは $3.4 \times 3.4 \times 7.0$ cmの角柱形である。透水係数

はいずれの供試体においても長軸（最大主応力）方向の1次元透水係数である。測定手法は、トランジェントパルス法であり、飽和状態におかれた岩石供試体の一端から、間隙水圧をパルス状（設定間隙水圧の $1/20 \sim 1/50$ 程度）に与え、このパルス圧の減衰-時間変化から透水係数を評価する手法である。この手法の最大のメリットは、任意の地下応力条件（深度、間隙水圧等）を再現できる点にある。用いた岩種は白浜砂岩と稲田花崗岩である。白浜砂岩は南紀白浜の均質な中粒砂岩であり、有効間隙率は約11%である。稲田花崗岩は茨城県産の花崗岩であり、有効間隙率は約0.6%である。

1. 間隙水圧による影響

透水係数に及ぼす間隙水圧のみの影響を調べた事例は極めて少ない。そこで、白浜砂岩を供試体として封圧30MPa一定の条件で、間隙水圧を最大20MPaまで載荷したときの透水係数の変化をFig. 3に示す。透水係数は間隙水圧の増加とともに増加している。

最近の研究事例では、透水係数測定の際の間隙水圧の増加あるいは減少速度に注意しないと、供試体中の水位分布を大きく変化させ、結果として動水勾配分布を大きく変化させることなどが指摘されている（張ほか、1999）。間隙水圧の影響を検討する場合には、間隙水圧の負荷・除荷速度を

Fig. 3 Effect of pore pressure on hydraulic conductivity (Shirahama sand stone)

小さくし、しかも動水勾配が一定となるよう十分時間を置きながら実験をしなければならない。

2. 封圧による影響

透水係数に及ぼす封圧の影響については多くの報告事例がある。定性的には封圧の増加とともに透水係数は小さくなることが報告されている。Fig. 4は白浜砂岩における間隙水圧を20MPa一定としたときの透水係数の変化を4個の異なる供試体を用いて測定したときの結果を示している。全体的な傾向としては、封圧の増加に伴い透水係数は低下していることが認められる。一般的には、封圧が小さなおとときほど大きな透水係数の減少をもたらすが、封圧が徐々に大きくなるにつれ透水係数の減少の割合が小さくなり、ある程度以上の封圧にいたると透水係数はもはや減少しなくなる。Fig.4では透水係数の変化が急激に変わる点の応力を、それぞれA、Bと記しているが、この点の封圧は岩石の変形特性、特に内部微視的構造の変化と深く関連している。これについては李ほか(1998)で詳しく述べられている。

3. 軸差応力による影響

Fig. 5は稲田花崗岩の潜在割れ目面毎(注2)の透水係数に及ぼす軸差応力の影響を示している。

Fig. 4 Effect of confining pressure on hydraulic conductivity (Shirahama sand stone)

封圧 (P_c) および間隙水圧 (P_p) は20MPaと12MPa一定である。横軸は軸差応力を示しているが、リフト、グレイン、ハードウェイ面ごとに最大の軸差応力、すなわち破壊強度が異なることがわかる。また、透水係数はいずれの面においても軸差応力の増加とともに減少するが、体積歪みが線型状態から非線型状態へと変化する時の応力レベルから、ほぼ増加に転じ、最終的な破断面形成時には大きく増加していることが認められる。このように透水係数が軸差応力の影響を強く受けることは、マイクロクラックの発生や連結、そして全体的な量に大きく依存していることが推定できる。すなわち、軸差応力の初期の荷重では既存マイクロクラックの閉鎖や孤立化などにより透水係数が減少し、破壊強度の半分程度より大きな軸差応力下では新たなマイクロクラックの発生や連結が進み、透水係数が大きくなったものと考えられる。最大強度以上では供試体の分離が起り、透水係数は1桁以上急激に大きくなる。こうして、稲田花崗岩供試体はインタクトな状態から破壊後にいたるまで透水係数は3桁以上にわたって変化することが確認された。なお、この時には変形特性も同時に計測されており、体積歪み特性もFig. 6にその一例を示すように把握されている。したがって、変形に伴い供試体の貯留特性も大きく変化していることになる。このような供試体の変形

Fig. 5 Hydraulic conductivity of Inada granite as a function of axial differential stress

Fig. 6 Volumetric strain vs. axial differential stress

を伴うような場合の透水特性の評価には貯留特性の評価と併せた議論が必要であり、貯留特性の評価なしに、透水特性のみを評価することは誤った定量評価につながる危険性がある。

Fig. 7 は白浜砂岩の封圧が7MPa、間隙水圧が3MPaの場合の結果である。稲田花崗岩と異なり、軸差応力の全般をとおして透水係数の変化は小さく、破壊強度にいたる直前にわずかに増加するだけである。破壊後の供試体には封圧油が入り込み、透水係数は測定不能となっている。稲田花崗岩との比較から、透水係数を応力によって生じるマイクロクラックの連結性の指標とみなすと、白浜砂岩は稲田花崗岩よりマイクロクラックの連結性が悪い、もしくは連結しても流体移動には寄与しない程度であることが示唆される。

4. 中間主応力による影響

Fig. 8 は最小主応力が10MPaおよび15MPaのときの透水係数に及ぼす中間主応力の影響を示したものである(高橋ほか, 1993)。真三軸試験における応力状態は最小主応力を固定し、中間主応力と最大主応力を順次増加させながら透水係数を測定する方法を採用しているため、Fig. 9 のような载荷経路と応力値をとることになる。したがって、Fig. 8 中には最大主応力の値を異なるシンボルで示している。透水係数は中間主応力の増加とともに、いずれの最小主応力・最大主応力においても減少することがわかる。ただし、最大主応力が45MPa以上では中間主応力の影響を受けなくなる。

Fig. 7 Hydraulic conductivity of Shirahama sand stone as a function of axial differential stress under constant pore pressure of 3.0 MPa and constant confining pressure of 7.0 MPa

Fig. 8 Effect of intermediate principal stress on hydraulic conductivity

Fig. 9 Stress conditions for the test

5. 脆性破壊および延性破壊挙動による影響

供試体は白浜砂岩を用いて、封圧は最大100 MPaまで、間隙水圧は20MPa一定とした応力軸歪み曲線をFig.10 (a) に示す。低封圧域で脆性挙動を示していたものが、封圧の増加とともに最大強度が増加すると同時に応力降下量が少なくなり、結果として延性状態へと移行している。供試体の体積変化は同図 (b) に示されるように脆性領域では圧縮側から膨張側への反転現象が認められるが、封圧の増加とともに延性状態に遷移するにつれ体積変化は圧縮側に圧倒的に依存し、徐荷後も圧縮が続くことになる。脆性破壊挙動から延性破壊挙動に至るまでの透水係数の変化は同図 (c) に示されている。封圧40MPaでは体積歪み特性と同じように、透水係数は一旦減少するものの、体積が膨張側に転じると同じく透水係数は増加している。透水係数の減少から増加への傾向は量的な違いはあるもののいずれの封圧において

も当てはまる現象である。白浜砂岩における変形挙動と透水特性および内部構造との関連については李ほか (1998) にまとめられている。

IV. 供試体内の動水勾配の評価について

数cmサイズのコアにおいて、透水係数が封圧や間隙水圧等の応力によって大きく変化する事が確認された。これらは“透水係数”即ち圧力の変化の違いとして、実測値からその違いを評価することができた。ところが、供試体内部での水位分布や動水勾配分布等の評価は、実測値が得られないという制約があり、従来室内透水試験では議論されていなかった。そこで、本文では室内透水試験の精度向上のため、非定常厳密解を用いた数値シミュレーションによって、岩石供試体内部の水位分布や動水勾配分布を評価したので、その一部を紹介する。

Brace *et al.* (1968) は, Westerly 花崗岩の透水特性を計測するためトランジェントパルス法を提案した。この装置は円柱形の岩石供試体とそれに連結した二つの貯留容器からなる (Fig.11参照)。試験方法は、岩石供試体に間隙水圧を加えた状態から、片方の貯留容器に瞬間的に圧力パルスを与える。流体は加圧した貯留容器から徐々に供試体を通り他方の容器に到達し、同時に加圧した容器内の圧力は徐々に減少する。透水係数は供試体に連結した貯留容器の水圧の経時変化から求められる。Braceらが行ったトランジェントパルス法の理論解析は、岩石供試体自身の圧縮による貯留を無視したものである。この解析はFig.11において容器1の圧力 P_1 の圧力減小による以下に示すような指数関数から得られる。

$$P_1 - P_f = H \cdot \frac{V_d}{V_u V_d} \cdot e^{-\theta t} \quad (2)$$

ここで、

$$\theta = (KA/\gamma_w \lambda L) (1/V_u + 1/V_d) \quad (3)$$

V_u と V_d はそれぞれ上流及び下流側貯留槽の容積、 P_f は圧力の収束値、 H は圧力パルスの大き

Fig.10 Differential stress, volumetric strain and hydraulic conductivity as a function of axial strain during axial compression under various confining pressures indicated by the figures. For each of the specimens, the pore pressure (P_p) is 20 MPa. The initial hydraulic conductivity is taken as 1.

Fig.11 Transient pulse technique.

さ、 γ_w は流体の比重、 λ は流体の圧縮率である。透水係数は試験から得られた指数関数的に減少する圧力時間曲線 ($P_i - P_f$) の傾き $-\theta$ から式 (3) より算出する。基本的に圧縮貯留性を考慮していないこの仮定は、有効間隙率が小さな結晶質岩にとって合理的であるが、多孔質で圧縮貯留性に富む堆積岩類の岩種にとっては適当でない。そのため、Hsieh (1981) らが岩石供試体自身の圧縮貯留特性を考慮したトランジェントパルス法の厳密解析理論を導いた。Hsiehらの手法では、上下流貯留槽の圧力の変化から供試体の透水係数のみならず、供試体の比貯留率も評価できるようになっている。供試体中の水頭分布の経時的变化は次式で表される一般解より評価できる。

$$\frac{h(Z,t)}{H} = \frac{1}{1+\beta+\gamma} + \frac{\exp\left(-\frac{Kt}{L^2 S_u} \phi_m^2\right) \left[\cos\left(\phi_m \frac{Z}{L}\right) - \left(\frac{\gamma \phi_m}{\beta}\right) \sin\left(\phi_m \frac{Z}{L}\right) \right]}{+ 2 \sum_{m=1}^{\infty} \left(1+\beta+\gamma - \frac{\gamma \phi_m^2}{\beta}\right) \cos \phi_m - \phi_m \left(1+\gamma + \frac{2\gamma}{\beta}\right) \sin \phi_m} \quad (4)$$

ここで、

$$\xi = \frac{Z}{L}, \quad \alpha = \frac{Kt}{L^2 S_u}, \quad \beta = \frac{S_u A L}{S_d}, \quad \gamma = \frac{S_d}{S_u}$$

また、 S_u 及び S_d はそれぞれ上下流貯留槽の貯留率、 ϕ_m は次の方程式の根である。

$$\tan \phi = \frac{(\gamma+1) \phi}{\gamma \phi^2 / \beta - \beta} \quad (5)$$

式(4)を更に Z に対して微分すれば、供試体中の動水勾配は次式により求められる。

$$\frac{i(Z,t)}{H} = 2 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\phi_m}{L} \frac{\exp\left(-\frac{Kt}{L^2 S_u} \phi_m^2\right) \left[\sin\left(\phi_m \frac{Z}{L}\right) - \left(\frac{\gamma \phi_m}{\beta}\right) \cos\left(\phi_m \frac{Z}{L}\right) \right]}{\left(1+\beta+\gamma - \frac{\gamma \phi_m^2}{\beta}\right) \cos \phi_m - \phi_m \left(1+\gamma + \frac{2\gamma}{\beta}\right) \sin \phi_m} \quad (6)$$

式(4)及び(6)を用いてシミュレーションしたトランジェントパルス透水試験中の供試体内部の水頭分布や動水勾配の一例をFig. 12, 13に示す。

仮定した供試体は直径5 cm、高さ10 cmの円柱状である。ここでは、透水係数が $K=10^{-9}$ cm/sec (Case1) と 10^{-11} cm/sec (Case2) の場合について、三次元貯留係数は 5×10^{-8} l/cm でシミュレーションした結果について検討する。なお、上流側、下流側の圧力貯留槽はそれぞれ500 mlとした。Fig. 12, 13は透水係数が 10^{-9} 、 10^{-11} cm/sec の場合の結果である。水頭分布、動水勾配分布ともパルス圧で正規化した値で示した。両者とも、上流側 (1.0L) では急激な圧力水頭の増加の後に、時間経過とともに減少し、一定値に漸近している。上流側に近い0.9Lから0.6Lまでは急激な増加の後極大値を示しながら一定値に収束している。一方、下流側に近い部分では時間経過と共に増加し、一定値に漸近している。動水勾配については、変水位法と同じように場所ごとに相当複雑な変化を示しており、透水係数によるその傾向の違いは見いだせない。変水位法と合わせ、トランジェントパルス法は複雑な水頭分布と動水勾配分布を示すことに留意しなければならない。

Wang (1993) らはトランジェントパルス透水試験における透水係数及び比貯留率の最適評価は圧力パルスが迅速に低下する部分の結果を用いて行うことを提案しているが、その時供試体中に発生する動水勾配は比較的大きい。また、動水勾配の値も急激に変化している。そのため、Wangらの提案の通りに求めた供試体の水理学的常数の信頼性には疑問がある。実際の現場に近い動水勾配のもとで透水特性を評価するためには、圧力パルスをできるだけ小さくする必要がある。従って、透水試験開始直後の動水勾配の極めて高い状態の計測結果を利用しない方がよい。

V. ま と め

岩石の透水係数がおおよそどの程度の範囲に分布するかを調べた。その結果 $10^{-11} - 10^{-9}$ cm/sec

Fig.12 Simulated hydraulic head and hydraulic gradient distributions within the specimen during the transient pulse test for case 1.

という広い範囲に分布することがわかった。透水係数の測定手法、特に 10^{-12} cm/secという小さな値を測定する場合にはトランジェントパルス法やフローポンプ法を用いなければならない。トランジェントパルス法を用いて白浜砂岩や稲田花崗岩の各種応力条件（間隙水圧、封圧、軸差応力、中間主応力、脆性・延性変形挙動）下での代表的な結果について整理した。これらと透水試験における測定中の供試体内の水位分布や動水勾配分布について数値シミュレーションを行い、特に動水勾配が実験の初期に極めて複雑になることを確認した。コアサイズの透水係数を精度良く求めるためには、供試体内の動水勾配を極力小さくする必要がある。この観点からすると、トランジェントパルス法ではパルス圧を小さくする事、フローポンプ法では流量を小さくする事が必要である。い

Fig.13 Simulated hydraulic head and hydraulic gradient distributions within the specimen during the transient pulse test for case 2.

れの条件下においても、解析に耐えられるデータを得ようとする、装置自体の温度変化への対策や剛性を高くする等の工夫が必要となる。

脚 注

注1 [permeability]という単語は、日本語では様々な分野で用いられている。一例を示すと、浸水率（船舶、造船船体）、浸透性（化学、農学、機械設計）、浸透率（鉱山、機械、石油）、通気率（化学）、透過性（動物、化学、分光、プラスチック、原子力、農学、環境工学、植物）、透湿率（建築材料）、透磁率（採鉱冶金、計測、化学、電気）、その他、透水係数、透水量、透水性など。

注2 一般に花崗岩には互いに直交する3つの割

れ易い面が存在する。採石場ではこれらの面の存在は昔からよく知られており、地域によって多少呼び方は違うが、割れ易い面から順番に「目」(1番)、「2番」,「重ね」(しわ),等と呼ばれていることが多い。これらに対応する英語の名称は、それぞれRift Plane, Grain Plane, Hardway Plane,である。ここでは以下、英語の呼び方に従うこととする。Rift面とGrain面を特徴づけるものは、これらの面に沿う方向に選択的に配向された潜在クラックである。これらのクラックは石英内に多く存在するが、Rift面に沿うクラックの方がGrain面に沿うクラックよりも長く、密度も高い。一方、Hardway面は多くの場合、液体包有物や裂開などによって特徴づけられる。液体包有物は長石内に多く存在する。このように各面内に存在するクラックの選択的な配向により、P波速度や圧裂引張強度などのクラックの存在に敏感な物理量に著しい異方性が生じると考えられている。これら花崗岩の力学的異方性や潜在クラックの形態などは、工藤ほか(1986a,b)等によって詳しく研究されている。

文 献

- 工藤洋三・橋本堅一・佐野 修・中川浩二(1986a): 石工の経験則と花崗岩の力学的性質. 土と基礎, 34(8), 47-51.
- 工藤洋三・橋本堅一・佐野 修・中川浩二(1986b): 花崗岩の力学的異方性と岩石組織欠陥の分布. 土木学会論文集, 370, 189-198.
- 小鯛桂一(1985): 粒状堆積物の透水性, 間隙率と地質年代の関係. 土と基礎, 33(3), 61-64.
- 高橋 学・杉田 裕・藤 自求・大西康智・石島洋二(1993): 白浜砂岩の透水特性に及ぼす各主応力の影響について—ダイラタンシー以前の応力状態の場合—. 資源と素材, 109, 802-808.
- 高橋 学・張 銘・林 為人・西山 哲・李 小春(1998): 室内透水試験における供試体中の水頭分布, 動水勾配, 貯留係数について. 資源と素材, 114, 888-894.
- 張 銘・高橋 学・江崎哲郎・林 為人・竹田幹郎(1999): 室内三軸及び透水試験における間隙水圧の加圧過程について. 北海道応用地学会同研究会論文集, 10, 73-78.
- 柳澤孝一・古屋和夫・大澤英昭・若松尚則・梅田浩司(1992): 我が国における地盤の透水性に関する調査・研究(その1) —各岩種における透水係数の収集・解析—. PNC TN 7410 92-015.
- 李 小春・高橋 学・張 銘(1998): 白浜砂岩の延性挙動と透水特性との関連について. 第10回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, 707-712.
- Brace, W. F., Walsh, J. B. and Frangos, W. T. (1968): Permeability of granite under high pressure. *J. Geophys. Res.*, 73, 2225-2236.
- Hsieh, P. A., Tracy, J. V., Neuzil, G. E., Bredehoeft, J. D. and Silliman, S. E. (1981): A transient laboratory method for determining the hydraulic properties of 'tight' rocks I-, Theory. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 18, 245-252.
- Touloukian, Y. S., Judd, W. R. and Roy, R. F. (1989): Physical Properties of Rocks and Minerals. *CINDAS Data Series on Materials Properties*, II (2), 63-76.
- Wang, H. F. and Hart, D. J. (1993): Experimental error for permeability and specific storage from pulse decay measurements. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 30, 1173-1176.

(受付: 1999年5月8日)

(受理: 1999年9月2日)

この論文に対する「討論」を1999年5月31日まで受け付けます。