

# パルス法を用いて岩石の透水係数を測定する場合の問題点について

高橋 学 (環境地質部) ・ 薛 自 求 (北海道大学)  
Manabu TAKAHASHI · Zi-qi, XUE

## 1. はじめに

岩石や岩盤には、サイズは異なるが、マイクロクラックや亀裂、あるいは断層などと呼ばれる種々の割れ目が必ず存在している。どんな種類の岩石であっても、岩石である以上、その成因を考えるとそれは鉱物の集合体であるから、性質の異なる鉱物同志の間には必ず微小な隙間、即ちマイクロクラックが存在するのである。もちろん、堆積岩などで見られる孔隙（ポア）もマイクロクラックの一種と見なせないわけではない。その場合には、マイクロクラックのアスペクト比が1に近いものとして近似されるであろう。

硬い大きな石の固まりを作り出すのに、このマイクロクラックの存在が多いに利用されていた。例えば、エジプトのピラミッドの時代から、石に割れ易い面があることを利用して、石を加工する技術が発達してきた。現在でも、その技術は石切場の石工によって受け継がれてきている。工藤他(1986a)によれば、各地の石切り場によってその名称は異なるものの、いわゆる「石目」と呼ばれる割れ易い面は、最も割れ易い面を「一番」あるいは「目」と呼び、二番目に割れ易い面を「二番」あるいは「二の目」と呼んでいることが多いと述べている。また、工藤他(1986b)はこれらの原因となっているものは、鉱物中や粒界に存在する、いわゆるマイクロクラックに起因し、圧裂引張強度や弾性波速度に大きな異方性をもたらす原因となっていることを報告している。

さて、一見緻密で堅く、水などを通さないように見えるこれら火成岩類の岩石も、内部に必ず存在するマイクロクラックを通り、非常に遅いスピードではあるが、水が移動しているのである。水の通り易さは、一般的には、通路の幅が大きいほど大きくなることは容易に想像がつく。このような岩石や岩盤の水の通り易さを示す指標として、透水係数(Permeability)なるものが定義されている。透水係数は、岩種や、応力状態、温度、割れ目の性質(割れ目の数、連結性など)等種々の要因により影響を受ける。砂岩や石灰岩、泥岩等の堆積岩では、孔隙率が大きく数十%に達するものもあり、逆に火成岩類では一般に数%以下のものが多い。種々の条件によって左右されるが、全くインタクトな状態であれば、単

純には孔隙率の大きい方が透水係数も大きい。これは、透水係数が孔隙率(ここでは、透水係数に直接支配的な影響を及ぼす連結した孔隙の全体の体積に対する比と考えてもよいことになるが)に依存していることを示している。さらには、透水係数は岩石や岩盤の貯留性能を評価することにもなる。

最近には各省庁が競って地下空間開発計画を打ち出し、種々の目的で地下空間への依存度をますます高めていくが、そこに依然として存在する問題は「亀裂+水」の関係であり、さらには「応力+亀裂+水」のより複雑な相互関係である。これらの問題は、今に始まったことではなく、トンネルや鉱山を初め、原油やLNGの地下備蓄、地下発電所等時代の要求とともに次々と生じてきており、その都度対処療法的に技術対応してきた。これらは、いわゆる割れ目の中でも割とスケールの大きいものであり、従って時間的スケールに直して考えると、「minute~day」オーダーの現象と言いつつ、ところが、より時間スケールの大きい「year」オーダー以上の現象を取り扱う問題も、原子力関係特に廃棄物処理では生じてきている。原子力発電所から出る高レベル放射性廃棄物をどう処理するかは依然として方針が確立されていないが、原子力発電自体の存続をも含め大きな社会的問題となっている。米国では、高レベル放射性廃棄物を地層処分することを念頭におき、難透水性岩石の透水性を評価することが積極的に実施されてきた。パルス法はこのような背景のもと、多くの研究者により採用され、スタンダードな岩石試験の一つとさえなっている。ところが、日本においてはこの手法を用いた研究事例は少なく、まだまだ一般的とは言えない。

そこで、本文ではマイクロダルシー以下のいわゆる難透水性岩石の透水係数をトランジェント・パルス法あるいはパルス・ディレイ法と呼ばれる手法を用いて測定する場合の問題点について検討する。

## 2. 岩石や岩盤の透水試験法

岩石や岩盤の透水係数を測定する方法は、図-1に示すようなものがある。これらについて簡単に説明することにしよう。

### 1) 定水法

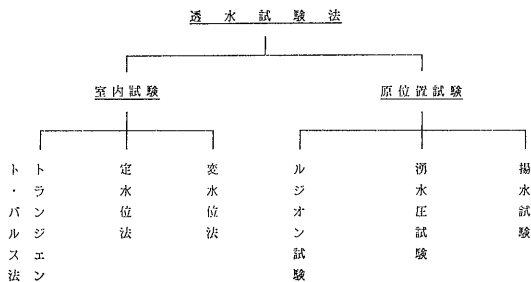


図-1 岩石における透水試験法の分類

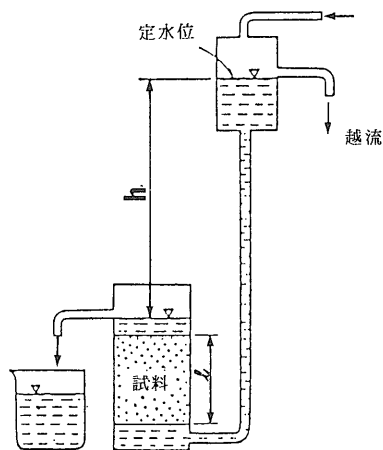


図-2 定水位法の概念図

水位を一定に保った給水槽から 供試体の下部へ水を通し 供試体上部から流出する流量と水頭差から透水係数を求める (図-2参照)。

$$k = Ql / Ah$$

$k$ : 透水係数 (cm/sec)  $Q$ : 浸透流量 (cm<sup>3</sup>/sec)  
 $A$ : 供試体の断面積 (cm<sup>2</sup>)  $l$ : 供試体の長さ (cm)

2) 変水位法

供試体下部へ水を通しながら 水位計の水位の時間変化から透水係数を求める (図-3参照)

$$k = 2 \cdot 3 \frac{d^2 l}{D^2 t} \log \frac{h_0}{h}$$

$d$ : 水位計の径 (cm)  $D$ : 供試体の径 (cm)  
 $l$ : 供試体の長さ (cm)  $t$ : 通水時間 (sec)  
 $h_0$ : 最初の水位計の水頭  $h$ :  $t$  秒後における水頭

3) パルス法

室内で実施する透水試験法では 最大でも数十 cm の供試体を用いることになり そこで得られた透水係数は岩盤全体のものではなく そのサイズにおけるマイクロクラック間の連結性 (connectivity) や貯留量を示す値となっていることに注意しなければならない。従って

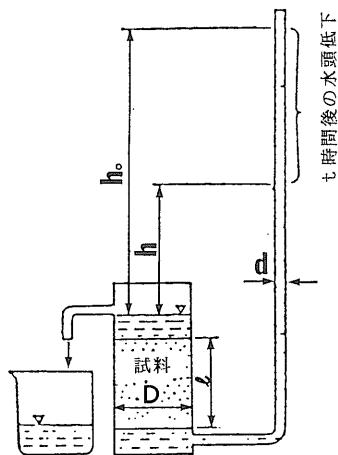


図-3 変水位法の概念図

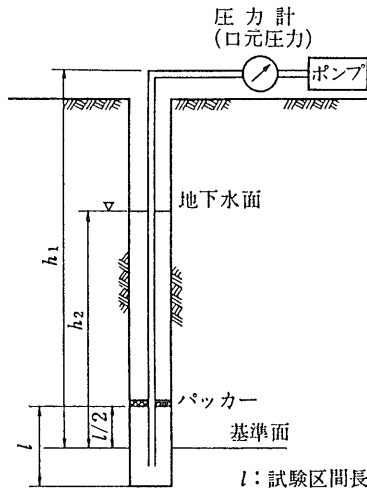


図-5 ルジオンテストの概念図

室内実験において供試体岩石自体の貯留量が小さいため得られる透水係数は十分な精度が要求される。 トランジュントパルス (Transient Pulse) 法 もしくはパルスディケイ (Pulse Decay) 法等と呼ばれる方法で ナノダルシーオーダーの透水係数を測定するのに適している。

岩石の透水係数を測定する場合 通常は ある一定の圧力勾配のもとで単位時間当りの流量を測定する いわゆる定水位法が採用されてきたが 測定可能な透水係数の範囲はマイクロダルシー以上である。 これ以下の透水係数を測定する方法として Brace et al. (1968) は トランジュント・パルス法と呼ばれる方法を考案した。 この方法では 供試体岩石の両端に岩石内の貯留量 (有効空隙率にほぼ等しいものと考えて差し支えない) に 比べる

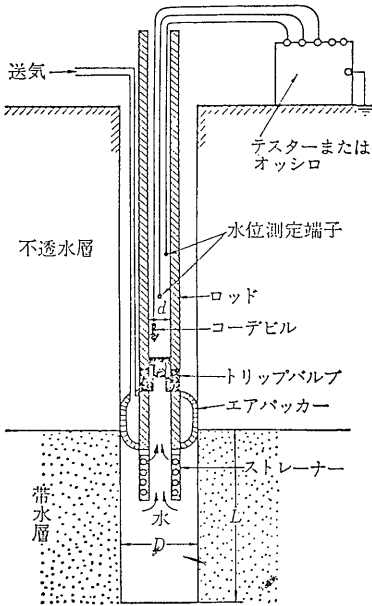


図-6 湧水圧試験の概念図

かに大きな量の貯留槽が連結される。この両貯留槽と供試体内の圧力が平衡な状態(図-4において $P_0$ に相当)から一端に一定圧だけ瞬間的に圧力を増加させる。供試体内には浸透流が生じ 圧力を与えた高圧側から低圧側への圧力伝播が生じ ある時間後には平衡状態に達する。このときに得られる圧力の減衰曲線は図-4のように指数関数的になり 時間に対し対数でプロットするとある傾きをした一本の直線となる。透水係数はこの直線の傾きから算出される。

測定精度の観点から定水位法とトランジェント・パルス法を比べると前者は流量の測定であり 後者は圧力の測定である。供試体へ浸透する水の量を直接測定する変水位法をも含めて水の量を計る場合周囲の条件(温度や湿度)に大きく左右されることが考えられる。従って定水位法や変水位法では測定可能な範囲は $10^{-7}$  cm/sec ( $=10^{-4}$  darcy) 程度とされている。一方圧力の測定精度は近年の測定技術の高精度化にともない仕様圧力範囲 測定スパン等により異なるが 10 Kpa ( $=10^{-3}$  Kgf/cm $^2$ ) 程度までは測定できる。この様に測定精度の点から考えると 圧力測定の方がはるかに良いことがわかる。また測定方法としても圧力を測定する場合には圧力に直接影響を与える因子としてリークや温度の変化に注意しなければならない。これらの制御は工夫次第でかなりの精度を達成することができる。以上は室内試験についてであったが以下では原位置で行う試験法について簡単に述べる。

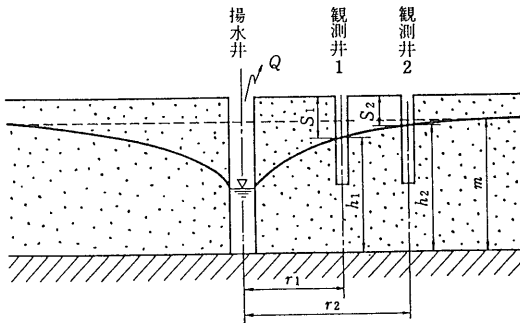


図-7 揚水試験の概念図

4) ルジオン試験

ルジオンテストはボーリング孔を用いて実施されるものであり一定区間長 1 (m) に 10 Kgf/cm $^2$  の圧力水を送り その総水量 Q (l/min) を測定する方法である(図-5参照)。ルジオン値 (Lu) はトンネルやダムなどの基礎岩盤におけるグラウチングの止水・改良効果の確認上有効な指標として用いられている。

$$Lu = Q/1$$

ルジオンテストにおいてダルシー則が成り立つものと仮定すると 透水係数 k (cm/sec) は次式で与えられる。

$$k = \frac{Q}{2\pi HL} \log n \frac{2L}{D}$$

ここで H: 水頭 L: 注入管長 (m)

5) 湧水圧試験

ボーリング孔を利用し 人工的な地下水位の変化を観測し この上昇速度から地層の伝達係数 透水係数を求める(図-6参照)

6) 揚水試験

揚水用および観測用の数本のボーリング孔を利用し揚水孔で揚水すると同時に観測孔で水位変化を観測す

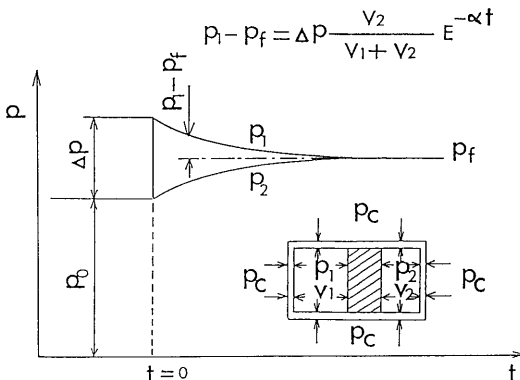


図-4 パルス法の原理の概念図

る。これより透水量係数 (cm<sup>2</sup>/sec) および貯留係数を求めることができる。(図-7参照)

岩盤内には 大小様々の割れ目が存在し これら岩盤全体の透水性を評価するためには 割れ目部分の透水性とマトリックス部分の透水性との2つに分けて考える方法(例えば Barenblattらの提案による二重空隙モデル等)がある。もしこの様な考え方を採用するならば 実験室で得られる透水係数は 試験可能な供試体サイズから考えると マトリックス部における透水性と言える。一方 原位置試験によって得られる透水係数はより大きな割れ目部とマトリックス部における透水性の和として得られるが 普通は両者の間にはオーダー上の違いが存在するので 割れ目部の透水性が支配的となる。この意味からすると 設計・施工に必要な透水性を評価するためには 最終的には原位置試験を実施しなければならないであろう。しかしながら これだけでは 巨視的な透水性は評価できても 亀裂は水をどのような法則にしたがって支配しているのか? という基礎的な問題を解決することはできない。即ち 原位置試験だけでは岩盤浸透流という現象の基礎的解明は出来ないものと考えられる。もし将来 マトリックス部におけるマイクロクラック系の透水性を予測する適切な手法が開発された場合には この手法を外挿し より大きな規模のネットワークで存在する割れ目系の透水性を評価することが出来るかも知れない。そのためにも マイクロクラックを対象とした浸透流現象を解明することは重要である。

本文で述べるパルス法という手法は いわばマトリックス部の透水性を評価するものであり ここで述べるのはこの手法の問題点について 筆者らの経験に基づいてまとめただけの事である。この様な手法を用いて岩盤・岩石内の浸透流解明の実験を今後行う人のために 実験上の問題点をまとめたにすぎない。従来までの論文の中では十分な検討が行われていなかった手法上の問題について若干言及しているので 少しでも時間の節約に役立つのならば幸いである。

### 3. パルス法について

<1 darcy とは?>

経験則である いわゆるダルシー則は 電気伝導度や熱伝導度などと全く同じ関係式で表示される。

$$q = \frac{KA}{\mu} \cdot \frac{d\rho}{dx}$$

ここで  $\mu$  は流体の粘性係数であり dimension は [FT L<sup>-2</sup>] となる。従って 透水係数は [L<sub>2</sub>] の dimension を持つことになる。以下に S I 単位で置き換えた場合を示す。

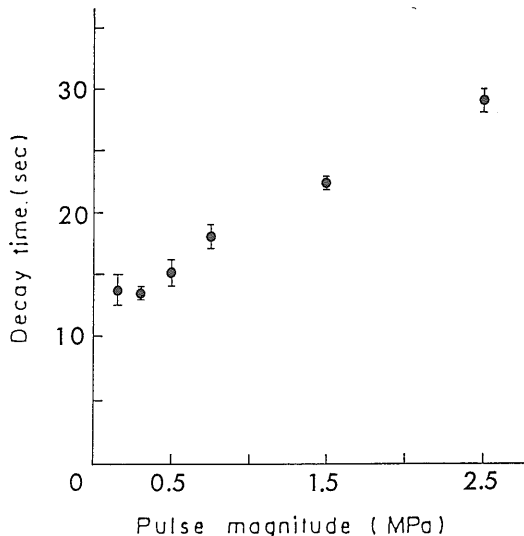


図-8 パルス圧と Decay Time との関係

$$1 \text{ darcy} = 10^{-8} \text{ cm}^2$$

また 透水係数が Hydraulic conductivity に相当すると考えれば

$$1 \text{ darcy} = 9.65 \times 10^{-4} \text{ cm/sec} \doteq 10^{-3} \text{ cm/sec}$$

となる。

<ダルシー則は成り立つか?>

ダルシー則は流速  $V$  が水位差  $h$  と流れた距離の比 即ち動水勾配に比例する事を述べたものである。透水係数を求める際に導入した偏微分方程式はこのダルシー則が成り立つことが大前提である。実験中の供試体中の浸透流は果してこのダルシー則を満たしているのだろうか? ダルシーの法則が成り立つためには供試体の測定範囲内にて 長さ方向において圧力勾配が一定であることが保証されなければならない。パルス法で圧力勾配を一定にするためには 与えるパルス圧を極力小さくしなければならない。もし必要以上に大きなパルス圧を与えた場合には 浸透流は乱流状態になることが予想され 正確な透水係数を評価することができなくなる。Walder and Nur (1986) はパルス圧を 0.1~2.5 MPa (1~25 Kg/cm<sup>2</sup>) の間で変化させ 各パルス圧における岩石供試体 (Spirit River Sandstone) の Decay time を測定し この Decay time が 0.5 MPa 以下のパルス圧ではほぼ一定であることを見つけた。また 0.5 MPa 以上の圧力では減衰時間はパルス圧の増加とともにほぼ一定の割合で増加している (図-8参照)。これは直径 1.9cm 長さ 14.2cm の長い供試体を用いて 図-9に示されるように各パルス圧の時間変化を 与えたパルス圧の大ききで normalize すると 時間の経過とともに減衰の様子が変化しているのがわかる。この図でほぼ一

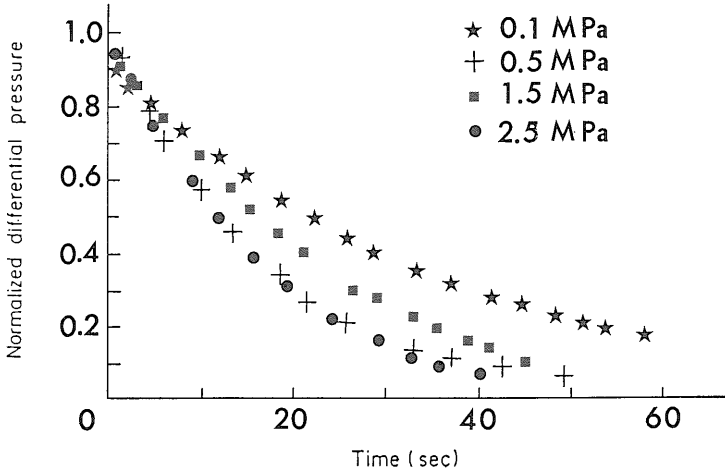


図-9 パルス圧の変化による差圧の時間変化

定の傾きで減衰しているのは normalized stress=0.4 程度までであり 前述した図-8では Decay timeとしてこのときの時間を定義して用いている。この様な実験結果をもとに 著者らはパルス圧は設定間隙水圧の10%以下にしなければならぬと述べている。もしそうでなければ ダルシー則は成り立たず 従って 正確な透水係数を評価することが出来ず 得られる透水係数はかなり過小評価することになると結論している。もちろん彼らの実験は用いた岩石も採用された封圧や間隙水圧の値もごく限られた数値ではあるが パルス法を採用する場合には十分注意しなければならない問題である。例えば 設定した間隙水圧が5 MPa であれば パルス圧は 0.5 MPa 以下でなければならない。これは経験的に従来用いられてきたパルス圧 5 Kgf/cm<sup>2</sup>と一致するものであり 間隙水圧が5 MPa 以上で得られた透水係数においてはダルシー則が成り立っているものと考えられる。

以上から パルス法ではパルス圧はできるだけ小さくしなければならないが あまり小さくし過ぎても温度変化による影響の中に消されてしまうほどでも良くないことが指摘されている (Walls, 1982)。従って 用いる岩種や応力状態に合わせたパルス圧を決定してから本格的な実験を行うのが理想的である。

さてこの様にして細心の注意を払って得られた圧力減衰曲線から透水係数を求める訳であるが ここで透水係数の求め方について触れておかなければならない。パルス法による透水係数の決定方法は 大別して以下の2通りに分けられる。

1) Brace らに代表される近似解を用いて求める場合

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{\mu\beta}{k} \left[ \frac{\beta eff - \beta s}{\beta} + \eta \left( 1 - \frac{\beta s}{\beta} \right) \right] \frac{\partial p}{\partial t} \quad (1)$$

$\mu$ : 流体の粘性係数  $\beta s$ : 鉱物粒子のみの圧縮率  
 $\eta$ : 岩石の孔隙率  $t$ : 時間  
 $\beta$ : 流体の圧縮率  $p$ : 圧力  
 $\beta eff$ : 岩石全体の圧縮率  $x$ : 距離

2) 厳密な数値解をデータにマッチングさせてもとめる  
 場合—Hsieh et al. (1981) の解について—

$$\frac{hu}{H} = \frac{1}{1+\beta+\gamma} + 2 \cdot \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\exp(-\alpha \phi_m^2) (\beta + \gamma^2 \phi_m^2 / \beta)}{[\gamma^2 \phi_m^4 / \beta^2 + (\gamma^2 \beta + \gamma^2 + \gamma + \beta) \phi_m^2 / \beta + (\beta^2 + \gamma \beta + \beta)]}$$

$$\frac{hd}{H} = \frac{1}{1+\beta+\gamma} + 2 \cdot \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\exp(-\alpha \phi_m^2) (\beta - \gamma \phi_m^2 / \beta)}{\phi_m^2 / \beta + (\beta^2 + \gamma \beta + \beta)} \cos \phi_m \quad (2)$$

ここで サフィックス u, d は u: upstream d: downstream の頭文字を示す。

$h$ : 圧力水頭  $H$ : パルス圧  $\alpha = kt/l^2 Se$  (無次元量で時間に相当)  $\beta = SsAl/Su$  (高圧側の貯留槽と供試体の貯留量の比)  $\gamma = Sd/Su$  (高圧側に対する低圧側の貯留槽の比)  
 $\phi_m$ :  $\tan \phi = (1+\gamma) \phi / (\gamma \phi^2 / \beta - \beta)$  の根  $Ss$ :  $w = \gamma (nCw + Ceff - (1+n)Cs)$  (供試体の比貯留量)  $\gamma w$ : 流体の比重  
 $Cw$ : 流体の圧縮率  $n$ : 孔隙率  $Ceff$ : 供試体の有効圧縮率  $Cs$ : 鉱物粒子の圧縮率  $k$ : 透水係数  $t$ : 時間  
 $A$ : 供試体の断面積  $l$ : 供試体の長さ  $S$ : 貯留槽の貯留量  $v$ : 貯留槽の体積

以上2つの偏微分方程式を示したが 基本方程式は同じであり 供試体内の圧力勾配を一定とするか否かによる違いがある。即ち Brace らは以下のような2つの仮定をすることにより 解析をごく単純な形で行っている。

① 岩石内部の水の貯留量は 外部に設置した貯留槽

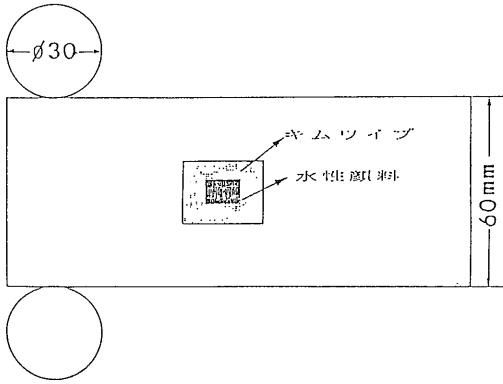


図-10 試験前の供試体の展開図

の量に比べはるかに小さい

②流体の圧縮率は岩石供試体の鉱物粒子や鉱物粒子と空隙を含めた岩石供試体全体の圧縮率よりもはるかに大きい

この2つの仮定から 偏微分方程式は

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = 0 \quad (3)$$

となり 圧力勾配はただ単に時間の関数で与えられる。杉本ほか(1985)は来待砂岩(孔隙率25.4%) 和泉砂岩(孔隙率6.3%) 荻野凝灰岩(孔隙率29.5%)の3つの岩種についてパルス法を用いて透水係数を求めた。その際圧縮率および岩石の孔隙率を考慮した(1)式を用いて透水係数を求め (3)式で求めた場合との比較を行った。その結果 Brace らが提案した式で求めた透水係数は圧縮率や孔隙率を考慮した場合のせいぜい24%しかないことを報告している。この様に Brace らの方法で透水係数を求める場合 厳密解に基づいて求めた場合よりも過小評価することに注意しなければならない。しかしながら 厳密解では 計算が複雑で 時間がかかり しかも解に合うように試行錯誤して透水係数を決定しなければならない。Brace らの計算の単純さなどから考えると Brace らの方法は依然として有効な手法と考えられる。

<供試体とジャケット部との間水が流れるのでは?>

透水係数測定時に供試体側面とジャケット部との間水が流れるような事が生ずれば 供試体の真の透水係数を評価することができなくなる。「供試体側面水が流れない」と言いざることが本当にできるのであろうか? これは この種の試験には常に付きまといってきた疑問の一つである。通常は封圧と間隙水圧との差を0.5 MPa 以上とすれば 何ら問題はないと言われてきたがそのための明確な試みがほとんどなされてきていないというのが実状である。そこで 筆者らはこの様な現象

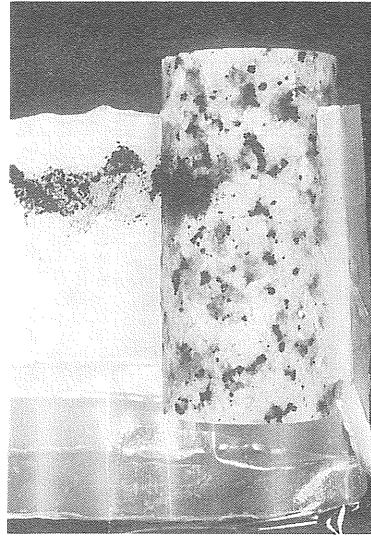


図-11 試験後の供試体側面の様子。左上部に顔料が溶けずに存在していることが認められる。

が本当にあるのかどうかを実験的に確かめてみることにした。

図-10はこの為に準備した供試体の様子を示したものである。供試体は Rift plane が長軸と直行するようにコア抜きしたものである。水性の顔料は常温の水によく溶けるものを使用した。この顔料をペーパータオルの間に挟み 供試体表面におきこの上から シリコンゴムをむらなく数十回程度繰り返し塗り塗布した。この後に別の種類のシリコンゴムにて更に 被覆を完全にした。こうして出来上がった供試体に 通常の方法と同じ手順で水を浸透させ 飽和させた後に1週間程度そのままの状態で放置した。尚 このときの封圧は20 MPa 間隙水圧は15~19 MPa まで変化させた。ここでのねらいはもし供試体側面水が流れるのであれば 供試体側面の顔料を溶かし この顔料の色が他の部位に広がるだろうと考えたからである。試験の結果 他の部位で顔料の存在が確認できない場合は もはや供試体側面水が流れるということの懸念は必要ないものと考えられる。

実験結果は図-11に示すとおり 顔料の他の部位への広がりを確認することはできず 供試体側面水が流れることの懸念は必要なくなった。従って ゴムスリーブを使わず この様な2種類のシリコンゴムを併用するような場合には供試体側面にシリコンゴムが完全に密着し もはや供試体側面水が流れる可能性は全くないものと言える。但し ここで使用した岩石は孔隙率が1%以下の岩石であり 従って供試体内を移動する水の量もごくわずかである。この様な少ない水の量に対し

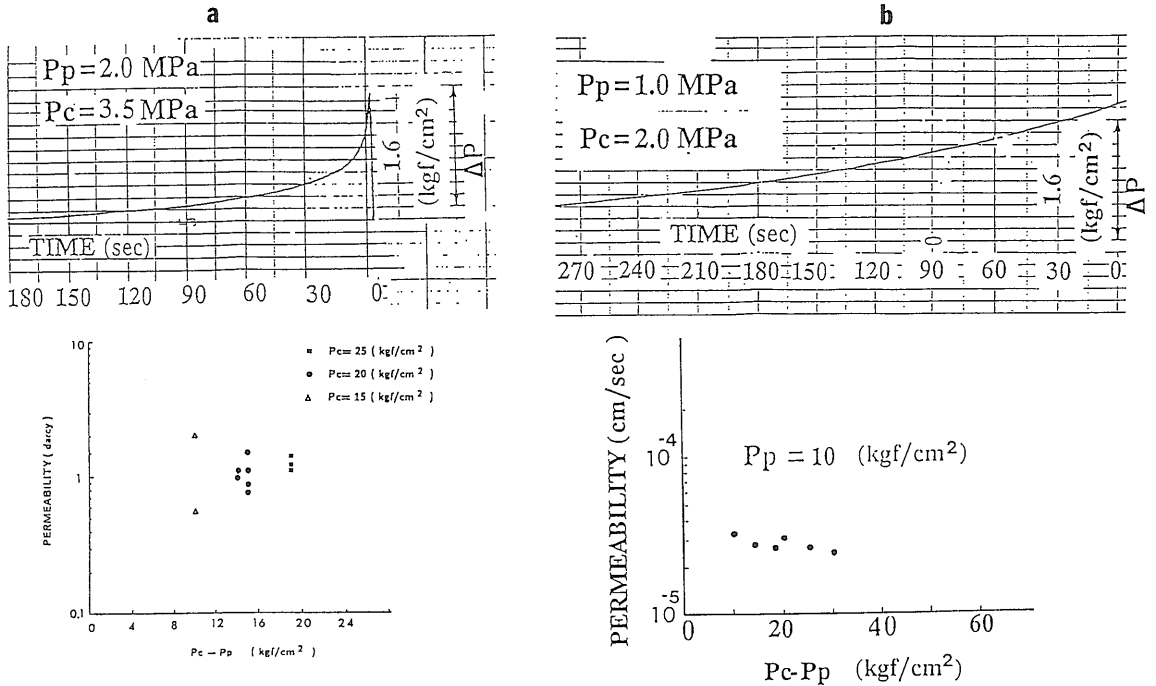


図-12 圧力減衰曲線及び透水係数に及ぼす有効封圧の影響  
 a: 真空処理無し    b: 真空処理有り

前述した程度の放置時間で十分かどうかの疑問は依然として残る。しかし 同一供試体を用いて行う実際の実験では 通常 1週間~10日間程度であり 今回の放置時間にはほぼ匹敵する。従って この程度の時間のオーダーの実験においては上述した内容はやはり 正しいと判断しても良いだろう。

<測定前の“Vacuum”は必要か？>

供試岩石中のポアやクラックには空気や水が満たされており 測定前にはこれらはすべて水と入れ替わっていないなければならない。もし 供試体内の一部のポアや他のクラックと連結していないクラック等が孤立して存在する場合などには パルス圧を負与する事によりそれが他のクラックやポアと連結し 結果として得られたパルス圧の減衰曲線は真のものとは異なったものとなることが予想される。

圧力容器内へ供試体をセットし 圧力ラインを結線した段階では 高圧パイプ内にも空気は残る。しかし その量は少なく 高圧を負荷することにより ヘンリーの法則に従うとすれば 10 MPa 以上では空気のほとんどが水の中に溶け込むことになる。従って 花崗岩のような孔隙率の小さい岩石供試体を用いて しかも大きな間隙水圧のもとで実験を行う場合には 空気の存在に関してはほとんど問題にならないものと考えられる。

しかしながら 砂岩や泥岩のような孔隙率の大きな堆積岩類を使用し しかも 低い間隙水圧のもとで透水係数を測定すると 空気の存在は得られる圧力減衰曲線に大きな影響を与えることが予想される。そこで 孔隙率が30%以上という泥岩を用い 真空処理をするかしないかで 得られる圧力減衰曲線にどの程度影響を及ぼすのかを調べてみた。図-12はその結果を示し a: は真空の処理無し b: は12時間真空処理した場合の結果である。真空処理しない場合 パルス圧を与えた直後に急激な圧力低下を引き起こすが b: の真空処理した場合にはそのような現象は生じないことがわかる。

また 同図下段にはそれぞれの場合の透水係数と封圧との関係が示してある。一般的には b: の真空処理した場合の結果に示されるように透水係数は封圧の増加とともに減少する。しかし 真空処理しない場合には透水係数は封圧の増加と供に逆に増加する現象が現われる。内部における詳細な変化については分からないがこれは供試岩石中やパイプ中に取り残された空気が 見かけ上透水係数を増加させたに過ぎない。以上の結果から 孔隙率の大きい岩石を用いて透水係数を測定する場合 必ず真空処理しなければならないことが判明した。もちろん 孔隙率の小さい岩石の場合でも 真空処理の方がよいことは間違いないであろう。但し この場合には圧力ラインのパイプのサイズにより 真空

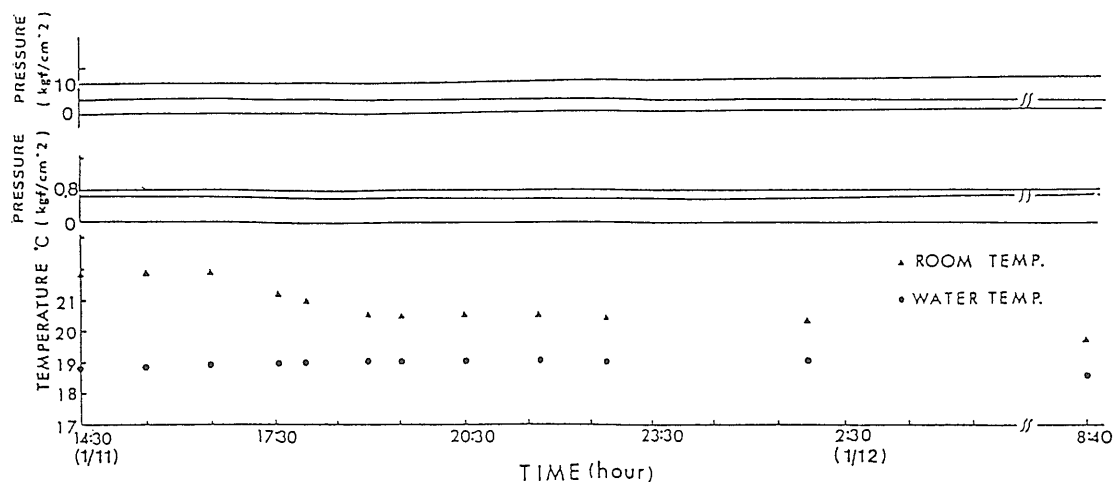


図-13 高圧・低圧 差圧 室温 及びタンク内水温の時間変化

処理する時間が異なることに注意しなければならない。即ち 真空処理する場合の導管のコンダクタンスは次式で近似的に表される。

$$G = a^3/l \quad (1/\text{sec})$$

ここで  $a$  は導管の半径  $l$  は長さを示す。従って理想的には直径の大きいそして短い導管で真空処理するのがよいが やむを得ずそれができない場合には長時間真空処理する必要がある。

<温度の影響はキャンセルできるか？>

トランジェント・パルス法は 簡潔に言うならば 圧力を精度良く測定することに尽きる。従って 最も注意しなければならないことはリークである。実験前には ダミーサンプルを用いて1週間程度のリークチェックが必要である。リークの問題は注意深い取扱によって100%解決することができるが その他の条件 例えば自然現象である室温の日変化や 空調などによる空気の流れによる熱損失などの温度変化は解決するのが非常に困難である。この温度変化の問題はリークの次に重要な問題となる。さて 室温の影響をキャンセルするためには以下の2つの方法が考えられる。

1) 測定系を含めて試験装置全体を恒温槽の中に入れ温度を一定にコントロールする。

2) 温度変化はあるものとして 両貯留槽の圧力差には温度変化の影響が入らないようにする。

1)の方法では そのような設備をそろえるとなるとかなり高価なものとなり 現実的には不可能である。2)においては装置の設計の段階で 配管などに若干の工夫を施せば十分可能である。即ち パルス法ではパルスを与える高圧側の貯留槽と それとは反対の方向に設置される低圧側の貯留槽の2つが存在する。これらの配置

を完全に同一に しかも同じ容量になるよう配管を工夫することにより達成される。高圧側と低圧側の貯留槽を含めた全体の体積が同じであれば パルス法の原理から 両者の差圧を測定して解析に用いても良いことになる。更に 配管の位置などの条件が同じならば 圧力減衰曲線におよぼす温度の影響をより精度良くキャンセルすることができる。また 両貯留槽を水タンク内にセットすることで より一層温度変化の影響を押し込めることができる。これは貯留槽の容積が1000ccであるのに対し 供試体を除いた配管部の容積は20cc程度であり 結果として 全体では温度変化を極力抑えることになる。

ちなみに 図-13は実験室の室温の日変化(床より1.6m上で測定)の記録であり 同じように両貯留槽を収納するタンクの水温度変化である。また ダミーサンプルを用いた場合の高圧・低圧側の圧力変化及び両者の差圧を示した。室温や 両貯留槽の圧力変化が著しいのに比べ差圧計はチャート上ではほとんど変化していないのがわかる。

<有効封圧はどの時点での応力か？>

パルス法では設定間隙水圧  $P_0$  から瞬間的にパルス圧  $\Delta p$  を加え 圧力を加えた側の減衰の時間曲線から 透水係数を求めるものであり 一定時間後には平衡圧  $P_f$  に達する。さて 実験結果を整理するとき 有効封圧はどの時点での応力状態を示しているのだろうか？ 通常はパルス圧を与える直前の封圧から 間隙水圧をさしひいた値を有効封圧として用いているものと解釈し 採用し実験結果を整理してきた。ただし ここで述べる有効封圧とは 封圧からただ単に間隙水圧だけをそのまま差し引いたものとして用いることにする。Krantz et al



(1979) や Bernave (1986) が述べているような透水係数に及ぼす封圧と間隙水圧との影響の度合が異なる場合の有効応力の表現については 別な機会に譲ることにする。この有効封圧の定義にしたがって 具体的な数値を用いて考えてみることにする。例えば 封圧  $P_c = 20$  MPa 初期設定間隙水圧  $P_p = 10$  MPa としてパルス圧  $\Delta p = 5$  MPa であれば 設定直前では有効封圧  $P_{eff} = 10$  MPa となる。ところが パルス圧  $\Delta p$  は時間と共に  $0.5 \sim 0.25$  MPa (ただし  $V_1 = V_2$  とした時) まで変化するので これを考慮すると  $P_{eff} = 9.5 \sim 9.75$  MPa となる。即ちパルス圧分を考慮することにより 有効封圧は考慮しないときよりも小さな値となり 実験結果を整理する上で若干の修正が必要となってくる。しかし 設定封圧と間隙水圧との差が大きい場合や設定間隙水圧がパルス圧よりもかなり大きい場合には それほど大きな問題とはならないだろう。従って 要はどの応力状態で有効封圧を定義して使うのかを予め明確にして その後は統一して整理すれば 実用的には問題にならないものと考えられる。

#### 4. まとめ

マイクロダルシー以下の極めて小さな透水係数を測定する場合 Brace et al. (1968) によって開発されたトランジェント・パルス法を用いるときの問題点について検討してみた。その結果 以下のような事に注意しなければならないことがわかった。

- ① Brace らによる透水係数の求め方では厳密解を用いて求めた場合よりもかなり過小評価することに注意しなければならない。
- ② ダルシー則を満たすためにはパルス圧は設定間隙水圧の  $1/10 \sim 1/20$  以下にする必要がある。
- ③ 供試体のジャケットとして シリコンゴムを直接供試体に塗布する方法においては供試体側面が水が流れることはない。
- ④ 実験開始前には必ず真空処理を行い 供試岩石中及び高圧パイプ中の水や空気を取り除くこと

- ⑤ 圧力に及ぼす温度の影響を無くするために 高圧・低圧側の貯留量を大きくし 更にこれらを水タンク内に収納する。また 高圧・低圧側の配管を全く同一にし 断熱用のテープなどでその上を被覆する。

#### 参考文献

- Bernabe Y.: The effective pressure for permeability in Chemsford granite and Barre granite, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, Vol. 23, No. 3, pp. 267-275, 1986.
- Brace W. F., Walsh J. B. and Frangos W. T.: Permeability of granite under high pressure, *J. Geophys. Res.*, Vol. 73, No. 6, pp. 2225-2236, 1968.
- Hsieh, P., Tracy J. V., Neuzil C. E., Bredehoeft J. D. and Silliman S. E.: A transient laboratory method for determining the hydraulic properties of tight rocks-1. Theory, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 18, pp. 245-252, 1981.
- Krantz R. L., Frankel A. D., Engelder T., and Scholz C. H.: The permeability of whole and jointed Barre granite, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 16, pp. 225-23, 1979.
- 工藤洋三 橋本堅一 佐野修 中川浩二: 石工の経験則と花崗岩の力学的性質 土と基礎 Vol. 34, No. 8, pp. 47-51, 1986 a.
- 工藤洋三 橋本堅一 佐野修 中川浩二: 花崗岩の力学的異質性と岩石組織欠陥の分布 土木学会論文集第370号 pp. 189-198, 1986 b.
- 杉本文男 松木浩二 遠藤修: トランジェントパルス法による岩石の透水係数測定について 応用地質, 26巻3号, pp. 11-18, 1985.
- Walder N. and Nur A. M.: Permeability measurement by the pulse-decay method: effects of poroelastic phenomena and non-linear pore pressure diffusion, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 23, pp. 225-232, 1986.
- Walls J. D., Nur A. M. and Bourbie T.: Effects of pressure and partial water saturation on gas permeability in tight sands: experimental results, *J. Petrol. Tech.*, Vol. 34-1, pp. 930-936, 1982.