

(77) 透水性の低い岩石の室内透水試験方法

清水建設(株) 技術研究所 ○奥野 哲夫

清水建設(株) 技術研究所 斎藤 章

1. はじめに

近年、石油備蓄や放射性廃棄物の処理施設として地下岩盤の利用が考えられるようになった。特に放射性廃棄物の地層処分施設では、極めて透水性の低い岩盤が要求され、高温における透水性評価も重要となる。

これに対処するため、今回はまず常温高压下の試験方法の確立を目的とし、同一条件下で3種類の試験方法を用いて透水係数の測定を行い、その試験方法の比較検討を行った。また、拘束圧が岩石の透水性に及ぼす影響についても調べたので報告する。

2. 透水試験方法

2-1 定水位法 : 定水位法は、従来から室内透水試験として広く一般に行われている方法である。この方法は試料両端を一定水圧差に保って試料内の飽和間隙水に動水勾配を与え、流れが定常状態になった後、単位時間当たりの排水量を測定して透水係数を求める方法である。この場合の透水係数は次式で求められる。

$$k = \frac{Q \cdot L}{A \cdot \Delta h}$$

k : 透水係数 (cm/sec) Q : 単位時間当たりの流量 (cc/sec) L : 試料の長さ (cm)
 A : 試料の断面積 (cm²) Δh : 試料両端の圧力水頭差 (cm)

2-2 トランジェント法 : 透水性の低い岩石を対象として最初にトランジェント法を用いたのはBraceらである。試験方法としては変水位法に属する方法であり、基本的に次のような測定から透水係数を求めるものである。

図-1に示すように試料両端に体積 V_1 、 V_2 が既知である圧力容器を設置し、初期状態で各圧力容器内の圧力 P_1 、 P_2 および試料の間隙水圧 P_p を等しく設定する。時間 $t=0$ において圧力パルス ΔP を V_1 に与えると、時間の経過と共に試料内の動水勾配が変化し圧力伝播が生じる。最終的に P_1 と P_2 が共に圧力 P_f に収束し、この間の圧力と時間の関係から透水係数を求める。

以下に2種類のトランジェント法について説明する。

1) a) 貯留を無視した方法 (Braceらの方法) : Braceらは一次元の変位浸透流の方程式に、岩石の間隙率は十分小さく、水の体積圧縮係数は岩石およびマトリックスのそれに比べて十分大きいという仮定を用いた。この仮定を導入することにより方程式は $\partial^2 P / \partial x^2 = 0$ となる。この物理的モデルとして図-2のように岩石試料の中央に間隙が集中し、かつ間隙率が十分小さい ($V_p \ll V_1, V_2, V_r$) モデルを考えている。これに先の圧力パルスを与えた場合を考え、圧力 P_1 、 P_2 、 P_p の変動とダルシー則から次式を求めている。

$$P_1 - P_f = \Delta P \cdot \frac{V_2}{V_1 + V_2} \cdot \exp(-\alpha t)$$

$$\alpha = KA / (\mu \beta L) \cdot (V_1 + V_2) / (V_1 V_2)$$

P_1, V_1 : 圧力パルスを与える容器の圧力(kgf/cm²), 体積(cc)
 P_2, V_2 : 圧力パルスを与えない容器の圧力(kgf/cm²), 体積(cc)
 P_f : 圧力の収束値(kgf/cm²) ΔP : 圧力パルス (kgf/cm²)
 t : 時間(sec) K : 透水係数(darcy)
 μ : 流体の粘性係数(CP) β : 流体の圧縮率(cm²/kgf)

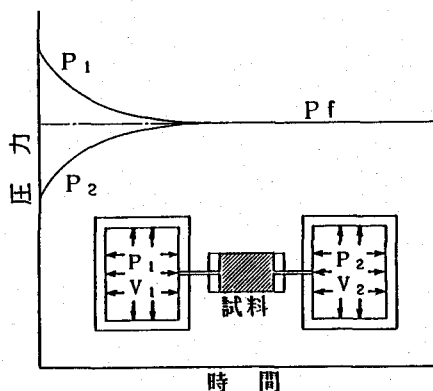


図-1 トランジェント法の概念図

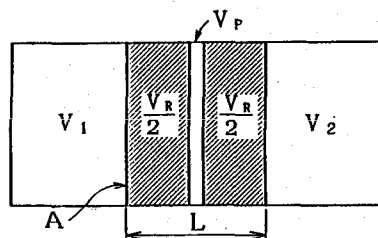


図-2 Braceらの岩石モデル

これより $P1 - Pf$ は指数関数で減少していくことがわかり、測定結果を $P1 - Pf$ の対数と時間 t の関係でプロットし、その直線の傾き α から透水係数が求められる。なお、Brace らが用いた仮定は比貯留量 Ss を無視した方法と言える。

2) b) 貯留を考慮した方法 (Hsieh らの方法): Hsieh らは一次元の非定常浸透流の方程式について図-1に示した条件での厳密解を求めている。さらにこの厳密解についてのパラメータスタディーを行っており、その一例を図-3に示す。ただし各パラメータは次の通りである。

$$\alpha = \frac{k t}{L Ss} \quad \beta = \frac{Ss AL}{Su} \quad r = \frac{Sd}{Su}$$

- Ss : 岩石の比貯留量 (cm^{-1})
- Su : 圧力パルスを与える容器の貯留量 (cm^2)
- Sd : 圧力パルスを与えない容器の貯留量 (cm^2)
- H : 圧力パルス (圧力水頭) (cm)
- hu : 圧力パルスを与える容器の圧力水頭変化 (cm)
- hd : 圧力パルスを与えない容器の圧力水頭変化 (cm)

これは縦軸に圧力水頭比 hu/H 、 hd/H を、横軸に $\alpha \beta^2$ ($= k Ss A^2 t / Su^2$) の対数を取って示しており、 $r = 1$ の場合である。この例から、Neuzil らの比貯留量と透水係数の求め方を示すと次のようになる。まず、横軸に時間 t の対数を取り縦軸に hu/H 、 hd/H を取って測定結果をプロットする。それを図-3に重ねて横軸方向に移動させながら、厳密解の曲線群の中から最も一致するものを選ぶ。一致したところでの β ($= Ss AL / Su$) の値から比貯留量 Ss が求まり、その時の $\alpha \beta^2$ と時間 t の値から透水係数 k を求めることができる。

3 試験装置ならびに試験手順

今回用いた透水試験装置の配管系統図を図-4に示す。この試験装置は、載荷装置、三軸室、液圧発生装置、貯留槽、温度制御装置等からなり、載荷装置および各液圧発生装置は独立にコンピュータ制御を行うことができる。3台の液圧発生装置の内1台で拘束圧を制御し、他の2台でそれぞれ試料両端の間隙水圧を制御する。また今回の試験では、圧力の測定精度が $\pm 0.2 \text{ kgf/cm}^2$ (差圧計 $\pm 0.05 \text{ kgf/cm}^2$)、流量の測定精度が $\pm 0.8 \text{ cc}$ のものを使用した。試験手順は次の通りである。

ゴムスリーブで覆った含水飽和試料を三軸室内にセットし拘束圧を加える。所定の拘束圧を加えた直後、試料両端に等しい間隙水圧を加える。試料内部の間隙水圧が一定になるのを待って試料端に圧力差を与え、透水試験を開始する。なお全試験方法とも圧力差は 5 kgf/cm^2 とした。

用いた試料は直径約 5 cm 高さ約 10 cm の三城目安山岩で、その物理・力学特性を表-1に示す。

試験方法の比較を行うため、同一の試料で拘束圧を

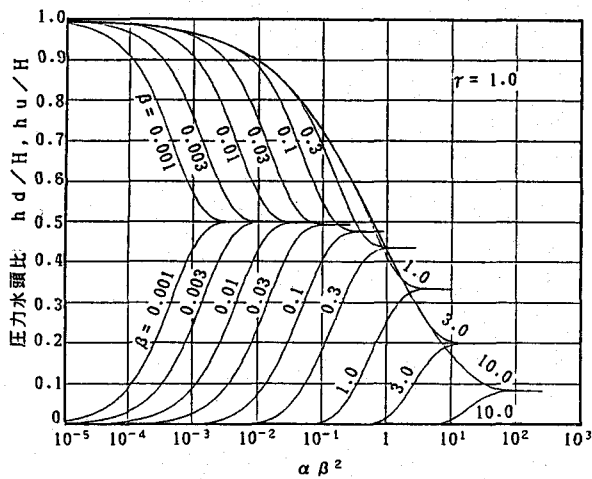


図-3 $\alpha \beta^2$ と圧力水頭比の関係

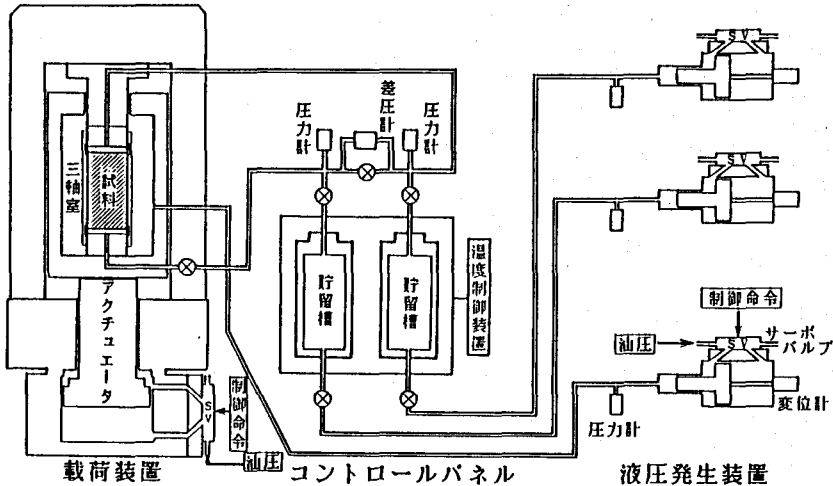


図-4 透水試験装置の配管系統図

表-1 岩石試料

岩 種	密 度 (gf/cm ³)	間隙率 (%)	一軸圧縮強度 (kgf/cm ²)	接線弾性係数 E ₉₀ (kgf/cm ²)	ポアソン比 ν ₉₀
三城目安山岩	2.14	15.8	806	1.34 × 10 ⁵	0.21

一定(表-2の条件①)に保ち、トランジエント法と定水位法を繰り返し行った。岩石の貯留を無視した方法では、岩石内部の間隙量に対して圧力容器の体積を十分大きく取る必要がある。図-4の貯留槽を用いた。これに対して貯留を考慮した方法では、間隙量に対する圧力容器の体積が大きく異なる方がよい。貯留槽上部のバルブを閉め、その先の配管部分を圧力容器として用いた。なお用いた水はイオン交換水を脱気したものである。

さらに拘束圧の影響を調べるため、異なる拘束圧下でトランジエント法(Braceらの方法)を行った。その試験条件を表-2に示す。なお各試料について拘束圧の低い状態から高い状態へ段階的に昇圧し、その各段階で試験を行った。

表-2 試験条件

条 件	拘束圧 (kgf/cm ²)	初期間隙水压 (kgf/cm ²)
①	50	20
②	100	40
③	150	60
④	200	80

4 試験結果

各試験方法の測定例を図-5, 6, 7に示す。定水位法では時間と共に流量が増加していくが、時間の経過に伴って単位時間当たりの流量はわずかず減少している。トランジエント法では、時間の経過に伴って試料両端の圧力が平衡に達していくのがわかる。またHsiehらの方法では、本装置について $\gamma=0.83$ 、 $S_u=5.0 \times 10^{-6} \text{ cm}^2$ と実測されているので、厳密解と測定値は図-7のように求められる。この場合 $\beta=1.8$ 、収束時の $\alpha\beta^2=8.0$ 、収束時間 $t=200 \text{ sec}$ となるので、比貯流量 S_s は $4.4 \times 10^{-8} \text{ cm}^3/\text{sec}$ と求められる。

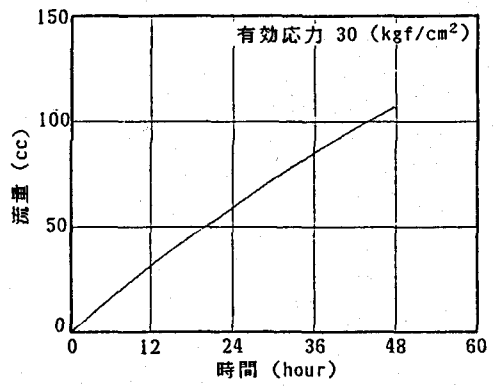


図-5 定水位法の測定例

一定の拘束圧下で、トランジエント法と定水位法を繰り返し行って得られた結果を図-8に示す。これは試験開始からの単位面積当たりの透過水量と、その時求めた透水係数の関係を示したものである。定水位法では、所定時間おきに単位時間当たりの流量を平均して求め、定水位法の繰り返しの合間に行ったトランジエント法の値も共に示している。

拘束圧を変えてトランジエント法(Braceらの方

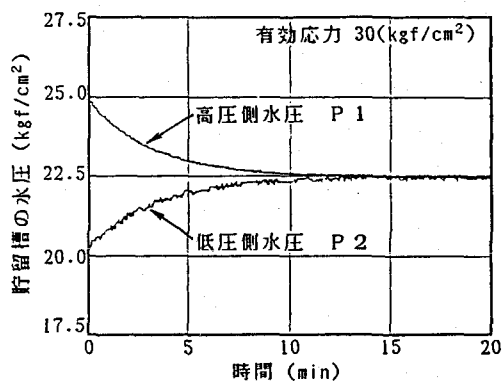


図-6 トランジエント法の測定例 (Braceらの方法)

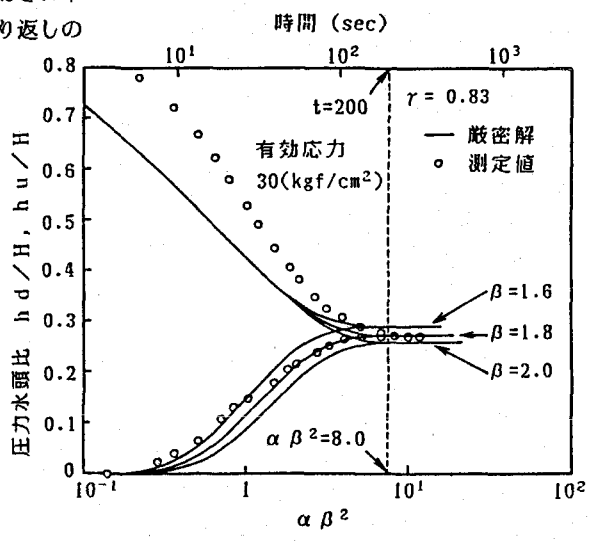


図-7 トランジエント法の測定例 (Hsiehらの方法)

法)を行った結果を図-9に示す。これは有効応力(拘束圧と初期間隙水圧の差)と透水係数の関係を示しているが、拘束圧の影響は明確には現れておらず、ほぼ $1.0 \sim 1.2 \times 10^{-7}$ cm/secの値を示している。

5 考察

図-8から各試験方法で、共に 10^{-8} のオーダーの透水係数が求められていることがわかる。また、定水位法の方がトランジェント法に比べて、大きな透水係数を示しているが、定水位法については各測定時間において定常流になっていることの確認が困難で、両者を直接比較することはむずかしい。

確認が困難な理由として次のことが上げられる。図-8では1点を除いて各試験方法とも、単位面積当たりの透過水量の増加に伴い透水係数が低下している。トランジェント法は圧力パルスを与える方法であるため、その試験中の透過水量は極めて少ない。定水位法を行った後、トランジェント法から求めた値が低下していることは、定水位法による透過水量の増加により、透水係数を低下させるような現象が生じていることが考えられる。一般にこの理由として、間隙内での気泡の発生や溶存物質の析出などによるいわゆる岩石の目詰まり現象が上げられる。今回もこのような現象が考えられるため、定常状態の確認は困難である。

以上に述べた現象も含めて、特に透水性の低い岩石に定水位法を用いると、測定に長時間を要することになる。これに対してトランジェント法では、図-6、7に示したように短時間で試験を行うことができる。

また、2種類のトランジェント法において、明確な違いは認められない。Neuzilらは、圧力容器の体積が同一の場合には、岩石の貯留を無視した方法の方が透水係数を小さく評価する危険性があることを示している。今回の岩石の貯留を無視した方法とそれを考慮した方法では、その仮定等を満たすように測定に用いた圧力容器の体積を変えており、透水係数を求める上では有意差が認められなかった。

6 結論

以上の試験結果と考察から次のことが結論となる。

- 1) 定水位法および2種類のトランジェント法により、共に三城目安山岩について 10^{-8} cm/secのオーダーの透水係数が測定できた。
- 2) 定水位法では、透過水量が増加するのに伴って透水性の低下する現象がみられる。これに対して、トランジェント法では試験中の透過水量が極めて少ないため、透水性を低下させずにその透水係数を評価できる。
- 3) 定水位法と比較して、トランジェント法は透水性の低い岩石で極めて短時間に試験を行うことができる。
- 4) 有効応力 120 kgf/cm^2 以下では、三城目安山岩の透水性は拘束圧の影響をほとんど受けない。

7 参考文献

- 1) Brace W.F. et al., Permeability of granite under high pressure., J. geophys. RES. 73, 2225-2236 (1968)
- 2) Hsieh P.A. et al., 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 (1980)
- 3) Neuzil C.E. et al., A transient laboratory method for determining the hydraulic properties of 'tight' rocks - II. Application., Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 18, 253-258 (1980)

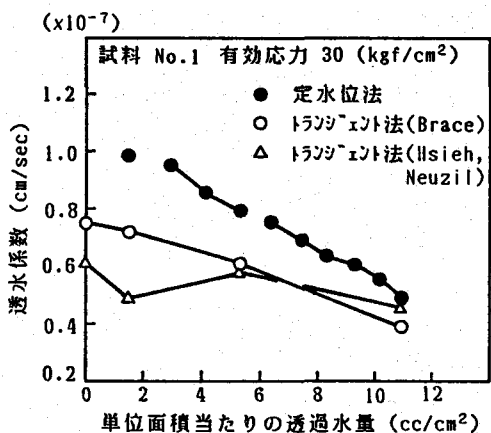


図-8 単位面積当たりの透過水量と透水係数の関係 (×10⁻⁷)

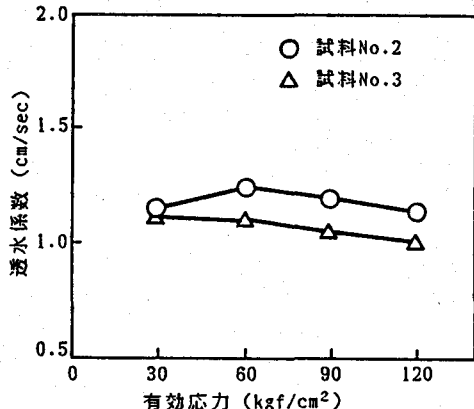


図-9 有効応力と透水係数の関係

(77) Laboratory Permeability Tests on very low permeable rocks

by Tetsuo Okuno
Akira Saito
Shimizu Construction Co., LTD.

Three types of permeability test on very low permeable rocks have been carried out with Sanzyoume andesite. One is a constant pressure method and others are transient methods. These methods have been evaluated and the effect of confining pressure on the permeability of Sanzyoume andesite has been investigated.

The following results have been obtained:

- 1) The hydraulic conductivity of Sanzyoume andesite, which have been obtained by three tests, has been agreed with in the order of 10^{-8} cm/sec.
- 2) It has been confirmed that the hydraulic conductivity, measured by the constant pressure method, has been decreased with increasing flow volume through a rock. On the contrary, the hydraulic conductivity, measured by two transient methods, have been seemed to be reliable because of little flow volume.
- 3) Two transient methods can be accomplished in very short term, compared with the constant pressure method.
- 4) The hydraulic conductivity of Sanzyoume andesite is not affected by the effective confining pressure up to 120 kgf/cm².