



難透水性岩石を対象とした 室内透水試験装置の開発

中野 勝志 斎藤 章

中部事業所

資料番号: 75-9

Design and development of permeability measurement system in laboratory for low permeable rocks.

Katsushi Nakano, Akira Saito
(Chubu Works)

近年の地下空間利用の進展に伴って、地下深部における地下水流動機構の解明のために、難透水性岩石の透水性をより高精度に測定することが必要となりつつある。しかし、今日まで 10^{-6} cm/sec オーダー以下の透水性を有する岩石は半透水または不透水として処理されてきたため、試験例が少なく、その精度についても十分な検討はなされていない。このため、著者らは難透水性岩石を対象とした室内透水試験方法と装置の構造および性能について検討し、この結果に基づいて 10^{-12} cm/sec オーダーまで測定可能な試験装置を開発した。

本稿では、この開発過程における試験装置の設計、試験の実施および試験結果の評価に際して、注意すべき要素を列挙し、その解決方法を示した。

1. はじめに

近年、地下深部岩盤を対象とした地下空間利用計画が目ざされている。こうした地下空間利用計画の中には、非常に長期間にわたる安全性を確保しなければならないものもある。本報で取り上げる岩盤の透水性に関しても、今日まで、不透水層あるいは半透水層のように取り扱われてきた難透水性岩盤 (1×10^{-6} cm/sec 以下) 内の地下水の流れを評価する必要に迫られている。

岩盤の透水性を評価する手法として、室内または原位置における透水試験があるが、透水性の低い領域における試験方法に関しては経験の少ないこともあり、その精度については十分な検討が為されていない。事実、室内透水試験結果の報告例はあるものの、試験方法に関する記述は少なく、測定精度に関する検討を行っている例は皆無に近い。本開発では、岡山大学工学部の西垣助教授にご協力頂き、難透水性岩石の室内透水試験方法について再検討するとともに、それより求められる透水計数の精度を吟味した¹⁾。また、試験装置の設計および試験の実施や、試験結果の整理に際して、注意すべき要素を列

挙し、その解決方法を示した。

2. 試験方法

岩石の室内透水試験方法としては、今日まで供試体の片端に一定の圧力水頭を与える定水位法、あるいは変水位法等が提言されている。しかし、難透水性岩石を対象とした場合、定水位法による室内透水試験では極めて高圧力を加えなければ排出される水量が少なくなる。また、変水位法による室内透水試験においても試験にきわめて長時間を必要とする等の問題点を有している。このため、本開発においては難透水性岩石を対象に Brace らによって提案されたトランジェントパルス法を採用した²⁾。

このトランジェントパルス法は提案された後、多くの研究者により試験装置の構造、境界条件の設定などの異なる様々な評価方法が提示された。しかし、いずれの評価方法も一次元の非定常浸透流の微分方程式により導かれている点に変わりはない³⁾。すなわち、一次元の浸透の支配方程式は次式で表わされる。

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} - \frac{S_a}{k} \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

ここで、

- k : 透水係数 (cm/sec)
- h : 間隙内の全水頭 (cm)
- x : 距離 (cm)
- t : 時間 (sec)
- S_a : 比貯留係数 (cm^{-1})
 $(= \gamma_w [nC_w + C_{eff} - (1+n)C_s])$
- γ_w : 流体の単位体積重量 (kgf/cm^3)
- n : 間隙率
- C_w : 流体の圧縮率 (cm^2/kgf)
- C_{eff} : 岩石供試体の圧縮率 (cm^2/kgf)
- C_s : 鉱物粒子の圧縮率 (cm^2/kgf)

トランジェントパルス法は透水係数の評価手法の違いにより次のように大別される。

- ① 近似解に基づく評価方法 (Brace らの方法など)
- ② 厳密解に基づく評価方法 (Hsieh らの方法など)

この違いは岩石供試体内の貯留性を考慮するか否かに基づいたものであるが、いずれの方法も長所、短所を持っている。

(1) Brace らの方法²⁾

Brace らの方法は岩石供試体内の流体の貯留性を無視した方法である。Brace らは岩石を多孔質媒体と考え、鉱物粒子と水の圧縮による貯留およびダルシー則から次の微分方程式(2)を求め、さらに岩石の間隙率は貯留槽の大きさに比べて十分に小さく、流体の圧縮率は岩石および岩石マトリックスのそれに比べて十分に大きいという仮定に基づき式(3)を求めている。これは、式(1)において比貯留係数 S_a を無視 ($S_a = 0$) したものである。

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} = \frac{\mu C_w}{K} \cdot \left[\frac{C_{eff} - C_s}{C_w} + n \cdot \left(1 - \frac{C_s}{C_w} \right) \right] \cdot \frac{\partial P}{\partial t} \quad (2)$$

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

ここで、

- P : 間隙圧力 (kgf/cm^2)
- μ : 流体の粘性係数 (cp)
- K : 透水係数 (darcy)

Brace らはこの物理モデルとして図1のように岩石供試体の中央に間隙が集中し、かつ間隙率が十

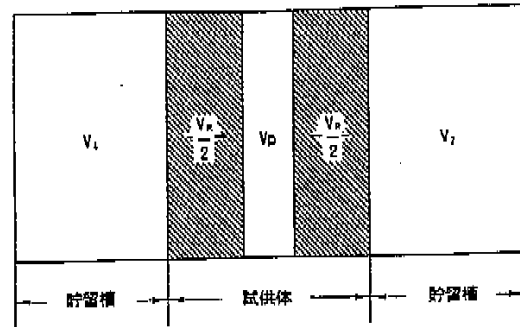


図1 Brace らの仮定モデル¹⁾

分小さい ($V_p \ll V_1, V_2, V_R$) モデルを考え、これに圧力パルスを与えた場合の圧力 P_1, P_2 の変化とダルシー則から式(4)を求めている。

ここで、

- V_1 : 高圧側貯留槽の体積
- V_2 : 低圧側貯留槽の体積
- V_p : 岩石供試体内の間隙の体積
- V_R : 岩石供試体の実質部の体積

$$P_1 - P_2 = \Delta P \cdot \frac{V_2}{V_1 + V_2} \cdot \exp(-\delta t) \quad (4)$$

$$\delta = \frac{KA}{\mu C_w L} \cdot \frac{V_1 + V_2}{V_1 V_2} \quad (5)$$

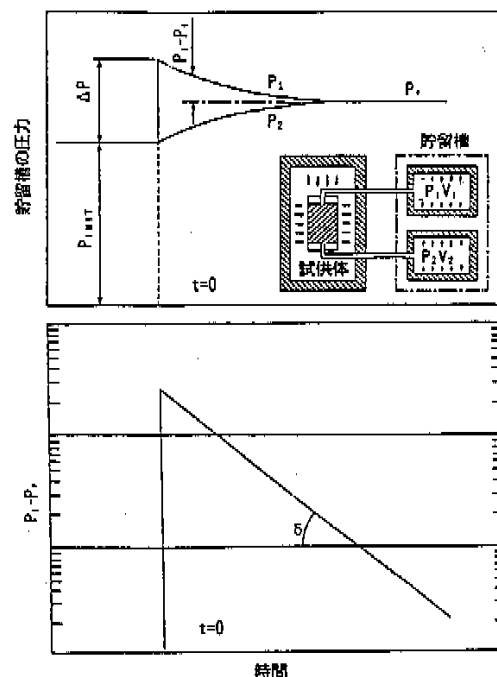


図2 トランジェントパルス法 (Brace らの方法) の概念図

ここで、

- P_1 : 高圧側貯留槽の圧力 (kgf/cm²)
 V_1 : 高圧側貯留槽の体積 (cm³)
 V_2 : 低圧側貯留槽の体積 (cm³)
 P_f : 圧力の収束値 (kgf/cm²) [図-2 参照]
 ΔP : 圧力パルス (kgf/cm²)
 δ : $P_1 - P_f$ の時間 t に対する傾き
 A : 供試体の断面積 (cm²)
 L : 供試体の長さ (cm)

試験は図2に示すように、供試体両端に体積 V_1 , V_2 が既知の貯留槽 (圧力容器) を設置して行う。初期状態で各貯留槽内の圧力 P_1 , P_2 および供試体内の間隙圧力を等しく設定し、試験開始時 ($t = 0$) において圧力パルス ΔP を V_1 に与えると、時間の経過と共に供試体内の動水勾配が変化し、圧力伝播が生ずる。すなわち、 $P_1 - P_f$ は時間の経過に伴い指数関数的に減少してゆき、時間 t と $P_1 - P_f$ の対数との傾き δ から透水係数は式(5)により求められる。

(2) Hsieh らの方法

Hsieh らは式(1)について図1に示した Brace らのモデルと同一の条件で厳密解を求め、式(6), (7)を示している³⁾。これは時間、圧力、貯留量を無次元化し、貯留槽の圧力 P_1 , P_2 の変化を圧力水頭比 h_u/H , h_d/H で示したものである。

$$\frac{h_u}{H} = \frac{1}{1 + \beta + \gamma} + 2 \cdot \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\exp(-\alpha \phi_m^2)}{(\gamma^2 \phi_m^4 / \beta^2 + (\gamma^2 \beta \gamma^2 + \gamma + \beta)) \cdot \frac{(\beta + \gamma^2 \phi_m^2 / \beta)}{\phi_m^2 / \beta + (\beta^2 + \gamma \beta + \beta)}} \quad \dots(6)$$

$$\frac{h_d}{H} = \frac{1}{1 + \beta + \gamma} + 2 \cdot \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\exp(-\alpha \phi_m^2)}{(\gamma^2 \phi_m^4 / \beta^2 + (\gamma^2 \beta \gamma^2 + \gamma + \beta)) \cdot \frac{(\beta + \gamma^2 \phi_m^2 / \beta)}{\phi_m^2 / \beta + (\beta^2 + \gamma \beta + \beta)} \cos \phi_m} \quad \dots(7)$$

ここで、

- h_u : 高圧側貯留槽の圧力水頭変化 (cm)
 H : 圧力パルス (圧力水頭) (cm)
 h_d : 低圧側貯留槽の圧力水頭変化 (cm)
 ϕ_m : $\tan \phi = (1 + \gamma) \phi / (\gamma \phi^2 / \beta - \beta)$ の根
 α : 時間 ($= kt / L^2 S_u$) (無次元量)
 β : 貯留槽と供試体の貯留量の比
 $\quad (= S_d AL / S_u)$ (無次元量)
 γ : 高圧側と低圧側の貯留槽の貯留量の比

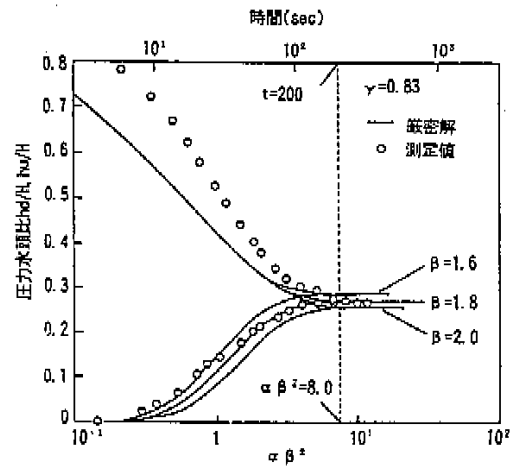


図3 Hsieh らの透水係数の評価方法
(三城目安山岩の場合)

($= S_d / S_u$) (無次元量)

S_u : 高圧側貯留槽の貯留量 (cm³)
 $\quad (= C_w \gamma_w V_u)$

S_d : 低圧側貯留槽の貯留量 (cm³)
 $\quad (= C_w \gamma_w V_d)$

V_u : 高圧側貯留槽の体積 (cm³)

V_d : 低圧側貯留槽の体積 (cm³)

Hsieh らの方法によって透水係数を求める場合、次のような手順で行う⁴⁾。

- ① 縦軸に h_u/H , h_d/H 、横軸に時間 t の対数をとって測定結果をプロットする。(図3の白丸)
- ② 貯留槽の体積の比より求められる γ を式(6), (7)に代入し、 β をパラメータとして厳密解を求め、縦軸に h_u/H , h_d/H 、横軸に $\alpha \beta^2$ の対数

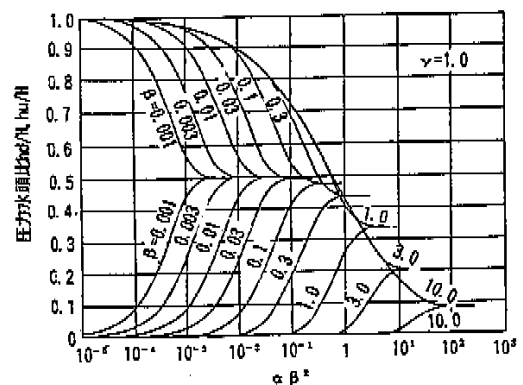


図4 水頭比と $\alpha \beta^2$ の関係²⁾

表1 岩種別の諸物性値と β ⁵⁾(供試体サイズ $\phi 50\text{mm} \times 100\text{mm}$, 貯留槽容積 1000cm^3)

岩種 物性	稲田花崗岩	三城目安山岩
C_{eff} (cm^3/kgf)	5.68×10^{-4}	1.30×10^{-5}
C_v (cm^3/kgf)	1.19×10^{-4}	1.88×10^{-5}
n (%)	0.8	15.8
β	0.023	0.083

① 式(8)から分かるように AL/V_0 、すなわち供試体の容積と貯留槽の容積の比を変化させることによって供試体の物性とは無関係に β を小さくできる。例えば、 $\phi 50 \times 100\text{mm}$ の供試体で 1000cm^3 の貯留槽を用いた場合、 $AL/V_0 = 0.196$ となる。

② C_{eff} 、 C_v 、 n の値が β に及ぼす影響について、稲田花崗岩と三城目安山岩のデータを用いて、パラメータスタディを行った結果を表-1に示す。

式(8)および表1より、 β に大きな影響を与えるのは AL/V_0 および C_{eff} であることが分かる。これより、 β を小さくするためには、 C_{eff} を小さくするか、 AL を小さくする、あるいは V_0 を大きくする等の方法が考えられる。しかし、 C_{eff} については供試体固有の物性であるため、変えることはできない。また、 AL についても粒径を考慮すると供試体サイズ($\phi 50 \times 100\text{mm}$)をむやみに小さくすることはできない。このため、 β を小さくするには、 V_0 を大きくする方法が唯一の手段となる。 β が0.5を超えるような貯留性の大きな供試体は、試験中に体積変化するため、トランジェントパルス法の測定対象外と考えられている。本開発では、図7に示すシステム全体の測定精度を満たすために、 β の上限を0.1以下と定めた。

(3) 貯留槽の設計

1) 貯留槽の容積

稲田花崗岩と三城目安山岩を例に、貯留槽の容積についての検討を行ってみる。

β が0.1を超えると誤差が大きくなることは前項で述べたが、 β を0.1以下とするためには稲田花崗岩と三城目安山岩では AL/V_0 を以下の値とする必要がある。

稲田花崗岩 $AL/V_0 < 0.85$

三城目安山岩 $AL/V_0 < 0.24$

上記した AL/V_0 より供試体サイズを $\phi 50 \times 100\text{mm}$ として、それぞれに対応する貯留槽の最低容積を算出すると次のようになる。

稲田花崗岩 $V_0 > 230\text{cm}^3$

三城目安山岩 $V_0 > 818\text{cm}^3$

このため、開発した試験装置においては安全率を見込み貯留槽容積を 1000cm^3 とした。

2) 貯留槽の剛性

Brace らの方法を始めたトランジェントパルス法による室内透水試験においては、原則として加圧、減圧に伴う貯留槽および配管部の変形を考慮せず、貯留槽内の試験水の体積変化量のみ取り扱っている。しかしながら、貯留槽の肉厚が相対的に薄く、剛性が不足した場合、見掛け上の試験水の体積変化量の占める貯留槽の弾性変形量分が無視できなくなる可能性がある。このため、試験装置の大きさ、可搬性、メンテナンスの難易度等を考慮し、本開発では内径8cm、肉厚6cmの円筒を加工したものを貯留槽(弾性係数 $E = 2.1 \times 10^{-6} \text{kgf/cm}^2$)に用いた。

(4) 室温変化に伴う間隙圧力の変動

トランジェントパルス法による室内透水試験は計測系を閉鎖し、供試体両端に設置した貯留槽の圧力変化を測定することにより透水係数を求めるため、室温の変化に伴う間隙圧力の変動が透水係数の評価に大きな誤差を与えてしまう可能性がある^{5) 6) 7)}。特に 10^{-12}cm/sec 以下の難透水性岩石を対象とした試験では、試験時間が数日から数十日に及ぶため、試験装置周辺の温度変化の影響が顕著となってくる。この間隙圧力の変動を最小限にとどめる最も効果的な方法は、試験装置全てを恒温水槽の中に設置し、熱容量の大きな恒温水槽内の水温を一定温度に保ち、間接的に試験水の温度制御を行う方法が考えられる⁷⁾。しかし、このような方法はメンテナンス上の問題が残る、試験開始準備に長時間を必要とする等の問題点を有している。

本開発で使用した試験装置では、室温の制御および試験装置本体の温度制御に際して、以下に示す対策を行っている。

- ① 試験室を密閉構造とし、外部環境から隔離する。
- ② 空調機を連続運転し、試験室に隣接した温度制御室から間接的に試験室温度を制御する。
- ③ 貯留槽外壁を銅パイプで取り巻き、この中を試験室温と同温の水を自動巡回させる温度制御装置を設ける。

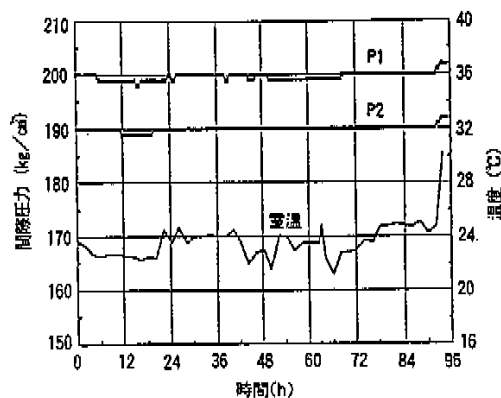


図7 室温変化に伴う間隙圧力の変動

④ 貯留槽とその周辺配管、および圧力センサーを保護容器に納め、この容器内の空間部には断熱材を充填する。

⑤ その他の配管部においても管長を極力短くし、断熱処理を施す。

図7は上記した対策を行った試験装置を用いて、室温変化に伴う間隙圧力の変動を測定した一例である。この試験では圧力容器内にグミーマスターを設置し、室温および貯留槽の温度制御を行うと共に、拘束圧力240kgf/cm²高圧側間隙圧力P₁、200kgf/cm²、低圧側間隙圧力P₂、190kgf/cm²を加え、96時間の連続記録を行った。

当試験装置では貯留槽の温度制御を行わなかった場合、室温1℃の変化に対して4kgf/cm²程度の間隙圧力の変動が確認されている。しかし、この試験では室温が23℃から±2℃変化しているにもかかわらず、間隙圧力の変動は±1kgf/cm²以内にとどまり、貯留槽の温度制御および断熱処理による温度制御効果の高いことが示されている。また、図中の90時間以降の部分は強制的に室温を変化させたものであるが、1℃当りの間隙圧力の変動は0.3kgf/cm²以内にとどまり、室温1℃当りの変化に伴う計測系の温度変化の影響は温度制御を行わなかった場合の0.1℃相当分以下となる。

3.3 試験装置の測定範囲と測定精度

前節までの試験装置の構造および性能に関する検討の結果、開発した室内透水試験装置においてはトランジェントパルス法を用いた場合、以下に示す測定範囲と測定精度が得られた。

測定範囲上限は、解析モデルに起因する誤差および、貯留槽の容積に関する検討から 10^{-7} cm/secオーダーまで、測定範囲下限は室温変化に伴う間隙圧力の変動の測定時間168時間を限度とした場合、 3.7×10^{-12} cm/secとなる。また、貯留槽内の容積変化や温度補正から、全体の測定精度は±10%以内であった。更に、本試験装置は従来法（定水位法）による試験も可能であり、この方法を含めると 10^{-4} cm/secオーダーまで測定が可能である。

4. あとがき

本試験装置の開発終了後、その性能を確認する目的で三城目安山岩を用い、従来法とトランジェントパルス法によって得られたデータの比較・検討、および土岐花崗岩を用いて 10^{-10} cm/secオーダーにおけるトランジェントパルスの再現性の確認のための試験を実施した。この結果、両方法の比較・検討においては、ほぼ等しい値が得られた。また、土岐花崗岩を用いて繰り返し数回行った試験においてもほとんど差異のない再現性の高いデータが得られた。

現在、本試験装置は地下岩盤の水理特性を把握するために各種岩石を用いたデータの取得を実施しつつ、高温透水試験に取り組んでおり、この高温透水試験についても間もなく開発が終了する予定である。

参考文献

- 1) 中野勝志・西澤 京・西川 誠：難透水岩石を対象とした室内透水試験、土質工学会、(現在投稿中、1990)
- 2) Brace, W.F. et al.: "Permeability of Granite High Pressure", J. Geophys. Res., Vol. 73, pp. 2225-2236, (1968)
- 3) 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., Vol. 18, pp. 245-252, (1981)
- 4) 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., Vol. 18, pp. 253-258, (1981)
- 5) 高橋 栄・奥野 哲夫：トランジェントパルス法による高温透水試験、第19回岩石力学に関するシンポジウム講演論文集、土木学会、pp. 196-200, (1987)
- 6) Bernabe, Y.: "Technical note. A Wide Range Permeameter for Use in Rock Physics", int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 24, No. 5, pp. 309-315, (1987)