

(41) トランジェント・パルス法による高温下透水試験

清水建設㈱ 技術研究所 正会員 ○斎藤 章

清水建設㈱ 大崎研究室 正会員 奥野 哲夫

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物地層処分施設の建設や高温岩体発電施設の開発に際しては、原位置試験も含めた高温下岩盤の透水性評価が問題となってくる。

高温下における室内透水試験については、これまで主として海外において石油開発、高温岩体関係で実施されており、温度変化に伴ない固有浸透係数が変化することなどが報告されている。

著者らはこれまで、Braceらが提案しているトランジェント・パルス法¹⁾を用いて室温下における透水試験方法の検討を行ってきており、透水性の低い岩石でも比較的短時間で測定が実施できる、目詰まり現象を生じる可能性が少ないなどの長所が明らかになっている²⁾。そこで今回、高温下におけるトランジェント・パルス法の適用性について検討を行うと共に、同法を用いてインタクトな岩石の高温下透水試験を行ったので報告する。

2. 高温下におけるトランジェント・パルス法の検討

2. 1 試験方法の検討

系が閉じられたトランジェント・パルス法では温度変化により圧力変動が生じるため、温度の制御精度が非常に重要なポイントとなる。著者らの使用している試験装置²⁾では配管系統全体の1℃の温度変化に対して約4kgf/cm²の圧力変動が生じることが確認されている。しかし、系の容積の大半を占める貯留槽(高压側、低压側共に1000cc)の温度を独立に制御(25℃で制御)しているため、三軸室を含む他の配管系統の温度が短周期で変化しても圧力変動は計測誤差範囲内に止まっており、最大±2kgf/cm²程度の日変化があるのみである。一方、高温下で系全体の温度を高精度で制御することは極めて困難なため、著者らは三軸室内のみを高温とし貯留槽内は室温で制御する方法を採用した。なお、三軸室内の温度制御精度は±2℃以内である。

当方法では高温水の移動による熱平衡の崩れが引き起す圧力変動が問題となるが、水の移動量が僅かなものであるため圧力変動は無視しうる。

2. 2 透水係数の算定方法の検討

Hsiehらは岩石の比貯留量を考慮した透水係数の算定方法を示しており³⁾、これに対してBraceらはこれを無視した方法を示している¹⁾。この違いは、貯留槽内と岩石供試体内の貯留量の比(以下で示す β)の違いによって、求まる透水係数に影響する。すなわちBraceらの方法で求めた透水係数は、貯留槽内の貯留量が岩石内部のそれに比べて十分大きな場合に、Hsiehらの理論解に近づくものである。しかし、両方法とも水の物性はすべて同一と考えており、系全体が均一な温度の場合には高温の条件にも適用できるが、今回のように貯留槽と空隙内の水の温度が異なり物性も異なっている場合、Hsiehらの方法では密度について、Braceらの方法では密度と圧縮率について何らかの補正が必要と考えられる。そこで各部の水の物性を独立に計算に取り入れることのできるFEM解析により、トランジェント・パルス法のシミュレーションを行い、得られた貯留槽圧力の経時変化から今回行ったBraceらの方法で固有浸透係数を計算し、補正方法を検討した。

FEM解析は円筒形の岩石供試体を軸対称と考え、非定常解析として時間域の漸化式から逐次計算を行うものである。この場合、貯留槽への流入・流出により供試体両端の境界条件(圧力)が随時変化することになる。そのため時間ステップを十分小さくし、各ステップの貯留槽への流入・流出量から貯留槽圧力を求め、それを次のステップの境界条件として計算した。当解析方法の精度を確認するため、表-1に示した室温下の稲田花崗岩ならびに水の物性を用い、表-2に示す4ケースの貯留槽体積で解析した。その結果を図-1

に示すが、この解析が非定常解析であることから、ここでは比貯留量を考慮したHsiehらの理論解と比較している。ただし、用いた比貯留量は次式で算定している。

$$S_s = \gamma_w [n C_w + C_{eff} - (1 + n) C_s]$$

S_s : 比貯留量 (cm⁻¹)
 γ_w : 水の単位体積重量 (kgf/cm³)
 n : 間隙率
 C_w : 水の圧縮率 (cm²/kgf)
 C_{eff} : 岩石の圧縮率 (cm²/kgf)
 C_s : 鉱物の圧縮率 (cm²/kgf)

また、図-1及び表-2に示した各パラメータは次のとおりである。

$$\alpha = \frac{k t}{L^2 S_s} \quad \beta = \frac{S_s A L}{S_u} \quad \gamma = \frac{S_d}{S_u}$$

k : 透水係数 (cm/sec)
 t : 時間 (sec)
 A : 供試体の断面積 (cm²)
 L : 供試体の長さ (cm)
 S_u : 圧力パルスを与える容器の貯留量 (cm²)
 S_d : 圧力パルスを与えない容器の貯留量 (cm²)
 H : 圧力パルス (圧力水頭) (cm)
 h_u : 圧力パルスを与える容器の圧力水頭変化 (cm)
 h_d : 圧力パルスを与えない容器の圧力水頭変化 (cm)

この結果から、ここで用いたFEM解析は十分な精度で求められていることがわかる。

この解析方法を用い、間隙水の物性に関するパラメータスタディを行った。その場合、貯留槽の水及び岩石の物性は表-1と同様に一定とし、間隙水の物性として表-3に示す4ケースを与えている。その内CASE 1が岩石温度300℃の場合、CASE 4が岩石温度25℃の場合を設定し、他は段階的に物性を変えている。また、貯留槽体積は、実際の値を用いた。それより得られたP1-Pfと時間の関係を図-2に示す。ただし、P1は圧力パルスを与えた容器の圧力であり、Pfは両貯留槽圧力の収束値である。

表-3 間隙水の物性
(※印は300℃での物性値である)

解析 ケース	粘性(cP)	密度 (g/cm ³)	圧縮率 (cm ² /kgf)
CASE 1	9.04×10 ⁻² ※	0.716 ※	1.97×10 ⁻⁴ ※
CASE 2	9.04×10 ⁻² ※	0.716 ※	0.42×10 ⁻⁴
CASE 3	9.04×10 ⁻² ※	1.00	0.42×10 ⁻⁴
CASE 4	1.00	1.00	0.42×10 ⁻⁴

表-1 試料および水の特性(室温) 表-2 貯留槽体積
(解析精度の確認)

稲田 花崗岩	直径(mm)	50.0	貯留槽体積 (cc)	β
	長さ(mm)	100.0		
	間隙率(%)	0.8		
	岩石の圧縮率(cm ² /kgf)	5.68×10 ⁻⁶		
	鉱物の圧縮率(cm ² /kgf)	1.19×10 ⁻⁶		
水	固有浸透係数(darcy)	1.00×10 ⁻⁶	2240	0.01
	圧縮率(cm ² /kgf)	0.42×10 ⁻⁴	224	0.1
	粘性(cP)	1.00	22.4	1.0
	密度(g/cm ³)	1.00	2.24	10.0

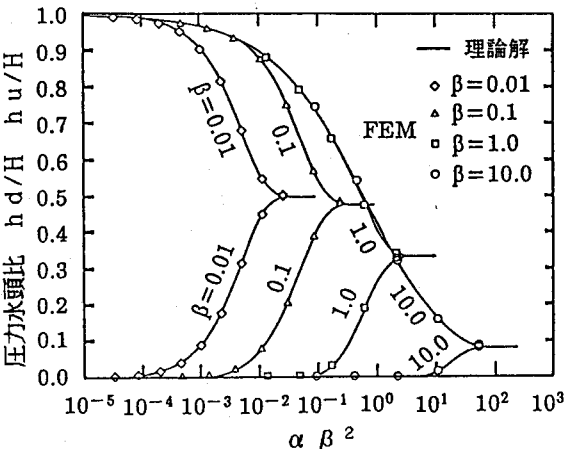


図-1 FEMによる解と理論解の比較
($\gamma=1.0$ の場合)

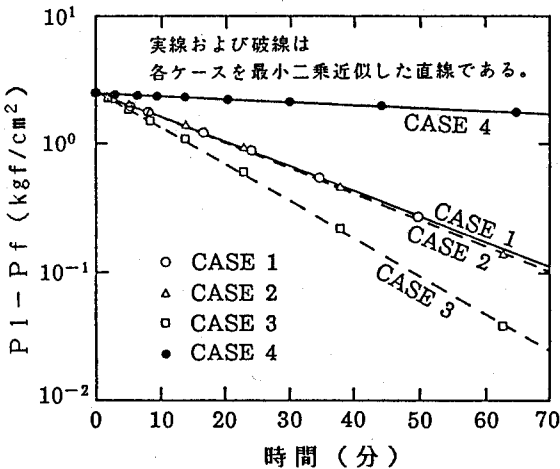


図-2 FEMによるトランジェント・パルス法の解析結果

この結果から、温度変化に伴う間隙水の物性変化が透水性に及ぼす影響は、粘性、密度の順に大きく、圧縮率はあまり影響しないことがわかる。

また、供試体温度25℃のCASE 4の解析結果についてBraceらの方法により固有浸透係数を計算してみると 0.998×10^{-6} darcyとなり、解析に与えた 1.00×10^{-6} とよく一致している。ここでは、系全体を室温とした場合の解析結果との比較を行っているが、系全体が高温の場合もBraceらの仮定が成立することから、同様の結果が得られる。従って、当解析結果をBraceらの方法で評価し、今回行う試験方法を検討できることが確かめられた。

次に、粘性、密度、圧縮率共に300℃の値を用いたCASE 1の解析結果について、Braceらの方法により固有浸透係数を計算してみる。計算に用いる定数は、圧縮率については貯留槽の水（25℃）の値とする。当方法では供試体の透過水量を室温状態の貯留槽の圧力変化で評価しているため、大半の容積を占める貯留槽の水の物性を用いるのが妥当と判断したためである。なお、解析結果からも温度変化に伴う間隙水の圧縮率の変化は透水性に殆ど影響しないことが明らかである。また、粘性係数は間隙水(300℃)の値を使用する。これは、Braceらの方法では貯留槽内の水の粘性を考慮する必要がなく、透水性に影響するのは間隙水の粘性だからである。これらから固有浸透係数が算出されるが、当方法ではこの結果に対して更に密度の変化に関する補正を行う必要がある。単位質量当りの水の体積は高温下の供試体内を透過する際に増大し、圧力測定を行っている貯留槽内では減少するため、結果として固有浸透係数を過小評価してしまうためである。そこで、上記の定数を用いて得られた値に室温時と高温時の密度の比を乗じて補正してみる。この方法で求められた固有浸透係数は 1.005×10^{-6} darcyとなり、解析に与えた 1.00×10^{-6} とよく一致している。従って、上に示した算定方法を用いることにより、今回実施した高温下におけるトランジェント・パルス法の試験結果を評価できるものとする。

3. 試験方法

試験方法の概要は基本的に前報告²⁾と同様である。三軸室内温度は内部のヒーターにより室温から300℃までの範囲で制御可能である。高温下で試験を行うためメンブレンは厚さ3mmのバイトン（フ素ゴム）を使用している。供試体には直径50mm、長さ100mmのインタクトな稲田花崗岩を用いた。

固有浸透係数の温度依存性を調べるため、有効応力を30kgf/cm²及び300kgf/cm²に設定した供試体を加熱、冷却する過程で一定温度毎に透水試験を行った。

この際、間隙圧はいずれの場合も100kgf/cm²に設定し、試験の際はこれに対して5kgf/cm²の差圧（圧力パルス）を与えている。なお、昇・降温速度は供試体内の温度差によるクラックの発生を防ぐため20℃/hourとし、室温から300℃の範囲で試験を実施した。また、各試験は三軸室内の温度が所定の温度に達した約1時間後に行った。

4. 試験結果

試験結果を図-3に示す。求めた固有浸透係数はいずれの場合も温度の上昇に伴って逐次増加しており、固有浸透係数に温度依存性があることを示している。

有効応力が低い場合には、熱履歴を受けた後の固有浸透係数が大きく変化しており、特に、50℃付近の低温域では固有浸透係数が1オーダー大きくなっている。この後更に熱履歴を与えた場合に

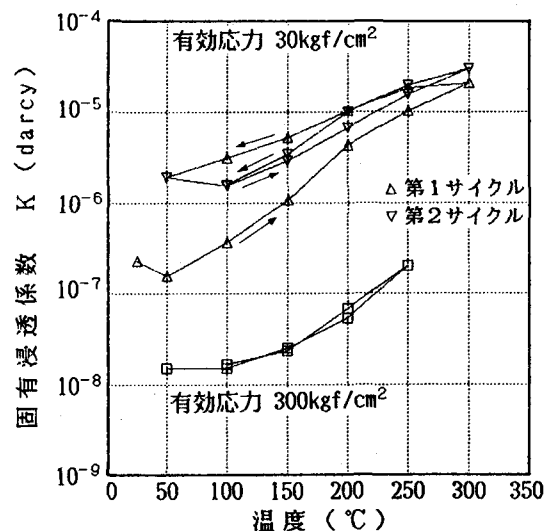


図-3 温度と固有浸透係数の関係

は、大きな変化は認められず、ほぼ一定の傾向に落ち着くようである。

有効応力が高い場合には、低い有効応力の場合に比べ全体的に固有浸透係数が1～2オーダー低下しているが、先に見られたような熱履歴に伴う固有浸透係数の変化は認められない。

有効応力が高い場合の固有浸透係数の温度依存性と、有効応力が低い場合の熱履歴を受けた後のそれとは、2オーダーの違いがあるもののほぼ同様の勾配を持っている。

5. 考察

木下⁴⁾によって行われた稲田花崗岩の拘束圧下における熱膨張試験の結果、有効応力200kgf/cm²までは昇・降温の間で残留ひずみが発生するが300kgf/cm²の条件下では残留ひずみが殆ど生じないことが確認されている。これは、供試体の熱膨張に伴う新たなクラックの発生が有効応力依存性を持っているためと考えられる。有効応力30kgf/cm²の場合と300kgf/cm²の場合の固有浸透係数の温度依存性の差はこれに対応したもので、30kgf/cm²の有効応力下で見られた初期の熱履歴に伴う固有浸透係数の変化はクラックの発生によるものと考えられる。

岩石供試体の固有浸透係数が温度依存性を持っていることはCasse, Ramey⁵⁾, Potter⁶⁾などによって報告されている。Casse, Rameyはこの理由を、水と岩石のインタラクシオンの温度依存性に求めており、透水経路を透過する水の実質的な粘性係数が固有浸透係数の算定に用いた粘性係数と異なっているためと考えている⁵⁾。水と岩石のインタラクシオンは、室温下における微速浸透流においても問題になっているが、高温下の浸透流にはさらに複雑な影響を与えるものと考えられ、この点に関する検討は今後の課題である。

6. 結論

以上、稲田花崗岩を用いた試験結果から次の結論が得られる。

- 1) 今回採用した方法を用いることにより、トランジェント・バルス法による高温下透水試験が可能であることが確認された。
- 2) 室温から300℃の範囲で固有浸透係数に温度依存性が認められ、温度の上昇に伴って固有浸透係数が増加する。
- 3) 固有浸透係数の温度依存性は有効応力の影響も受け、有効応力が低い場合にはクラックの発生によると考えられる透水性の増大が認められる。これに対して有効応力が300kgf/cm²の場合は、室温から250℃の範囲で熱履歴を与えても、同様の変化は認められない。

〈参考文献〉

- 1) Brace W.F. et al., Permeability of granite under high pressure., J. geophys. RES. 73, 2225-2236 (1968)
- 2) 奥野, 斎藤, 透水性の低い岩石の室内透水試験方法, 第18回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 381-385, (1986)
- 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. 18, 245-252 (1980)
- 4) 木下, 安部, 拘束圧下における花崗岩質岩石の熱膨張特性に関する研究, 第19回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, (当講演論文集), (1987)
- 5) Casse F.J., II, J. Ramey, Jr., The effect of temperature and confining pressure on single-phase flow in consolidated rocks, J. Pet. Tec, 1051-1059 (1979)
- 6) Potter J.M., Experimental permeability studies at elevated temperature and pressure of granitic rocks, Los Alamos Scientific Laboratory, LA-7224-T, Thesis, (1978)

(41) High Temperature Laboratory Permeability Test
by Transient Pulse Method

by Akira Saito
Tetsuo Okuno
SHIMIZU Construction Co., Ltd.

ABSTRACT

In this paper, the new high temperature laboratory permeability test by using the transient pulse method are proposed, and some test results are presented.

In this method, the triaxial cell is kept at the required exactly high temperature, and the other apparatus such as reservoir and tube are kept at the room temperature.

Then the simulation of this test is performed by using finite element method, and the application of Brace's method to high temperature condition is examined.

Intrinsic permeability were measured for intact Inada granite both at low (30 kgf/cm²) and at high (300 kgf/cm²) effective confining pressure under various condition of temperature, ranged from 25 to 300°C.

Following results have been obtained:

- 1) Intrinsic permeability have the temperature dependence as increases significantly with temperature.
 - 2) The temperature dependence of intrinsic permeability has been affected by the effective confining pressure. In the case of low effective confining pressure, remarkable thermal hysteresis has been observed. On cooling process, the intrinsic permeability shows a permanent increase than its original value. This phenomenon can be explained by cracks induced by thermal stress.
- On the other hand, in the case of high effective confining pressure, no thermal hysteresis has been observed.