

(17) 岩石割れ目の透水性の応力・温度依存性 — 充填物の影響

東京大学 工学部

小島 圭二

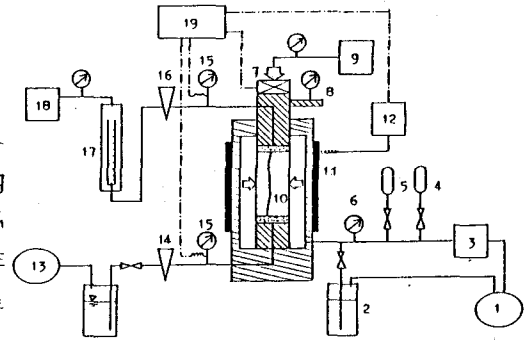
○ 小池 豊

1. はじめに

近年地下空間の開発に對する需要が高まるにつれて、岩盤内地下水流れの予測と制御の問題が大きクローズアップされてきている。岩盤内地下水流れは断層・節理をはじめとする地質分界面を主要透水経路とすることから、この問題の検討にあたってはこれら分界面の分布、性状に関する考察、またこれらが存在する場における応力・温度分布等に関する考察が必要である。ところで岩盤の割れ目中には一般に変質粘土をはじめとする種々の充填物が介在しており、水みちとしての割れ目面性状はさきわめて複雑である。そこで筆者らは岩盤内地下水流れの解析にあたって、透水性に影響を与える要因を総合的にとらえる研究の一環として、高温高压型の透水試験機を作製し、特に充填物の性状、応力状態に焦点をあてた実験を行な、てきた(小島・小池1983a, 1983b)。ここでは放射性核廃棄物の地層処分問題に関連し、地下深部の高温高压下での岩盤中の透水性を評価するにあたっての基礎データを得ることを目的に、特に割れ目充填物の性状に焦点をあて、岩石割れ目の透水性における応力条件と温度条件について検討した結果について報告する。

2. 実験装置について

今回の実験では2種の透水試験機を併用した。一方は、動燃事業団、鹿島建設技研などによって開発されたものを基本にして作製した高温高压三軸拘束型透水試験機である(Fig-1)。本試験機の応力は、周圧最大500 kgf/cm²、温度最高200℃であることに加え、試料中にトレーサなどの物質を注入できる。透水係数の測定限界としては 1×10^{-10} cm/sec程度である。もう一方は中圧三軸拘束型透水試験機(最大周圧20 kgf/cm²)であるが、概念的には前者とほぼ同じである。



- | | |
|--|--|
| 1. Air Compressor | 10. Sample (φ=5cm, L=10cm) |
| 2. Oil Tank | 11. Heater (Max. 200°C) |
| 3. Confining Pressure Controller | 12. Heater Controller |
| 4. Accumulator (for 20-100 kgf/cm ²) | 13. N ₂ Gas or Air Compressor (Max. 250 kgf/cm ²) |
| 5. Accumulator (for over 100 kgf/cm ²) | 14. Tracer Injection Valve |
| 6. Confining Pressure Meter (0-500 kgf/cm ²) | 15. Pore Pressure Meter |
| 7. Load Cell (Axial Pressure) | 16. Tracer Sampling Valve |
| 8. Dial Gauge | 17. Flow Meter |
| 9. Oil Jack (Pressure Meter) | 18. Back Pressure Controller |
| | 19. Automatic Recorder |

Fig-1

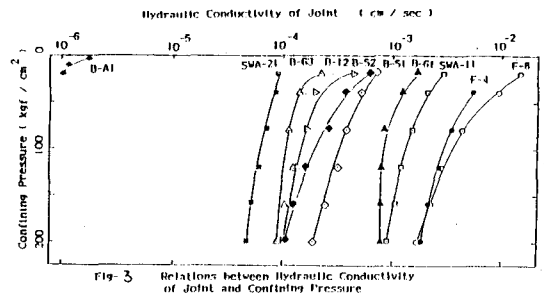
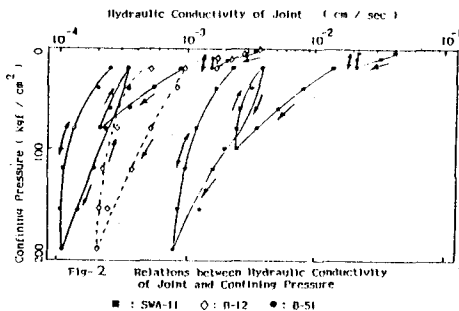
3. 応力と透水性に関する実験

3-1 用いた試料

今回用いた試料は天然の充填物を挟在する割れ目、および圧裂引張により人工的に作、た割れ目をそれぞれ含有する花崗岩で、寸法は直径5cm、長さ10cmである。これら試料の性状をTable-1に示す。表中、B-12, B-61, B-63は日本の白亜紀の花崗岩であり、充填物は薄い砥礫物質が熱水変質を受けたものと考えられ、石英・長石の細片を多く含み、緑色を帯びた白い変質粘土を伴う。又、固結度は低い。B-51, B-52は前者と同一地域の花崗岩で緑色のより固結した変質粘土を挟在している。SWA-11, SWA-21はスウェーデンの先カンブリア時代の花崗岩であり、充填物は暗緑色を呈し、完全に固結している。また黄鉄鉱の微晶が多く認められる。これらの花崗岩の充填物はX線分析の結果によると、どれも緑泥石類を主体としている。またこれら充填物の固結の程度を表中、一種の変形性Dで示している。これは充填物表面に直径2mmの丸棒を貫入し、剛体円板の載荷に伴う弾性変形の式を用いて、変形係数相当量を求めたものである。F-4, F-8は日本の白亜紀の花崗岩で、圧裂引張により人工的に割れ目を生じさせたもの(clean jointに相当)である。

Sample	Width of Joint (cm)	Clay Min. & Color	b. cal (cm)	k at CP=200kgf/cm ² (cm/sec)	k _{j1} at CP=200kgf/cm ² (cm/sec)	k _{j2} at CP=200kgf/cm ² (cm/sec)	D of Infillg (kgf/cm ²)	D of Granite (kgf/cm ²)
B-12	0.06	ch (width 0.2, Rel) [white]	1.2×10^{-4}	4.3×10^{-9}	1.4×10^{-4}	2.8×10^{-7}		
B-61	0.08	"	3.1×10^{-5}	6.0×10^{-8}	7.7×10^{-4}	3.0×10^{-7}	800	10000
B-63	0.06	"	9.7×10^{-5}	2.1×10^{-9}	8.8×10^{-5}	1.4×10^{-7}	"	"
B-51	0.02	ch (green)	1.6×10^{-4}	8.2×10^{-9}	2.0×10^{-4}	1.6×10^{-6}	1400	20000
B-52	0.02	"	7.5×10^{-5}	3.0×10^{-9}	1.0×10^{-4}	3.7×10^{-7}	"	"
SWA-11	0.15	ch (dark green)	3.3×10^{-4}	7.6×10^{-8}	8.9×10^{-4}	2.0×10^{-6}	7500	50000
	0.03	Width of Open Space Only	3.3×10^{-4}	7.6×10^{-8}	8.9×10^{-4}	9.8×10^{-6}		
SWA-21	0.13	"	7.5×10^{-5}	8.9×10^{-10}	4.7×10^{-5}	2.7×10^{-8}		
F-4			1.6×10^{-3}	2.0×10^{-7}	4.8×10^{-4}			

Table-1 Results of Experiments b. cal: Aperture Calculated from Cubic Law, k: Groval Hydraulic Conductivity k_{j1}: Hydraulic Conductivity of Joint Calculated from Cubic Law, k_{j2}: Hydraulic Conductivity of Joint Calculated from Width of Joint Infill, CP: Confining Pressure, D: Deformability, ch: Chlorite



3-2 結果と考察

Fig. 2はB-12, B-51, SWA-11の各試料について三軸ベッセル中で等方圧を段階的に負荷した場合の割れ目の透水係数 k_j の変化を示したものである。温度はいずれも20℃に保ち、圧状態を測定を行なった。また、試験機の構造上、底力の変化に伴う割れ目の変位は直接測定できない。従って、割れ目の透水係数は、充填物が存在するものについてもその流量に等価な平行平板割れ目を考えた場合のいわゆるCubic Lawより求めた値を用いている。ここで行なう繰り返しの載荷は試料のはじみの向上とゆるみの除去を目的とするが、ゆるんだ割れ目が閉塞していく載荷時の透水係数の変化曲線は、屈位置変形試験(ジャッキテスト)の変位と同様に段階荷重の包絡線と示されるいわゆる屈曲曲線と、ある荷重レベルでのゆるみの解消や充填物の圧密が終了した時点での曲線とに区別される。後者の曲線は荷重レベル200kgf/cm²程度に達すると、最大荷重の増分に対する透水係数の変化が小さくなり、一定の曲線に近づく傾向を示す。前者の屈曲曲線が試料中に存在するゆるみの最大値を示すのに対して、後者の曲線は割れ目の最も締った状態を示す。従って、逆に試料にゆるみが発生した場合の透水係数のばらつきの範囲は、この2曲線で囲まれる領域と考えることができる。また、この曲線の形態は、充填物の種類によらずいずれも同様な傾向を示している点はきわめて興味深い。これらの傾向は、Fig. 2に示した試料以外についても認められるものである。以上の様な現象は岩盤中の断層や破砕帯についても成立するであろうから、岩盤中に空間を掘削する場合のゆるみに伴う地下水流れの変化の予測において、きわめて有用な示唆と与えるものである。次にFig. 3は、充填物の性状による透水性の差異を検討するため、Table-1に示した各試料について透水試験を行ない、Fig. 2の最終段階の載荷に相当する曲線のみを抜き出して併記したものである。すなわちこの図は、いわゆるゆるみのはい新鮮岩体中の割れ目の透水係数の深度変化に対応するものである。各割

れ目についてみると、F-4、F-8は人工割れ目(clean joint)である。SWA-11はスウェーデンの花崗岩で、固結した充填物 (Table-1, Dの値) 中に開口割れ目を生じているもので、F-4、F-8と同様、充填物を含まない clean joint の透水係数と同じような値を示す。B-51、B-52、B-12、B-63は日本の花崗岩で充填物の固結度は低く、clean joint のグループに比較して透水係数は約1オーダー小さな値を示している。SWA-21はSWA-11と同地点のものであるが、固結した充填物で割れ目が充填されているため、さらに透水係数は小さな値を示している。B-61は柱状、固結度等から考えてB-51のグループに属すると考えられるものであるが、透水係数は比較的大きな値を示している。これは割れ目部の欠損等に起因する二次的な水みちの形成の可能性があるものである。さらにB-A1は、断層破砕帯物質を採取し、ふるい分けした後B地点の花崗岩に挟み込んで透水試験を行なうもので、地表からの未固結流入粘土を想定したものである。この透水係数はさらに小さく、地下深部においては殆んど透水経路にはなり得ないであろう。しかし、地表付近では、粒子の粘着力と土圧との和を越える間隙圧が発生した場合、急激に水みちを形成することがある(水島・水池1983a)ので重要である。以上の応力と透水性に関する実験から得られた結果から考えて、透水性の面から割れ目を 1) cleanな割れ目、2) 変質粘土等を挟在する割れ目、3) 流入粘土を挟在する割れ目の3つに分類し、地下水流れを検討していくことは、特に岩盤のモデル化にあたって有効な手段と言えるであろう。

4. 温度と透水性に関する実験

4-1 実験方法と用いた試料

温度が上昇することによる地下水流れの変化の予測にあたっては、水の膨張および粘性変化、岩石や充填物の膨張、間隙圧の発生をはじめとし、長期的にはさらに岩石、充填物の溶解や割れ目壁面への沈着など種々の要因の検討が必要である。ここでは温度に関する実験の第一段階として、温度の変化範囲を20~100℃に限定し、透水性の変化を調べた。実験にあたっては試料に対してあらかじめくり返し載荷を行ない、ゆるみの影響を取り除いた後、周圧を一定に保ち温度を20、50、80、100℃のステップで変化させ透水性を測定した。用いた試料は3の応力の項で用いた岩石と同一地点にて採取されたものである (Fig-4, Table-1)。F-8、F-4Dは圧裂引張により人工的に作った割れ目であり、clean joint に相当する。B-8はB-12と同様な種類の充填物、すなわち薄い破砕物質が熱水変質を及ぼすもので固結度の低いものを挟在している。

4-2 結果と考察

本実験で得られた結果をFig-4に示す。図中縦軸は単位水頭に対する単位時間流量、破線は温度変化を示す。さて岩石割れ目の透水性の温度依存性を検討する前に指摘すべき問題がある。オ1は流量が時間とともに減衰していく現象、オ2は昇温時の急激な流量増大、オ3は水の粘性の変化の取り扱いである。オ1の問題はFig-4の上の図に認められるように、clean joint において流量が時間とともに減衰していく様子として観察される。この様な現象は渡辺1983によっても報告されており、割れ目面における物質の目詰りが考えられている。今回の実験では、物質の目詰りが生じにくい充填物を含んだ割れ目にはこのような現象が認められないこと

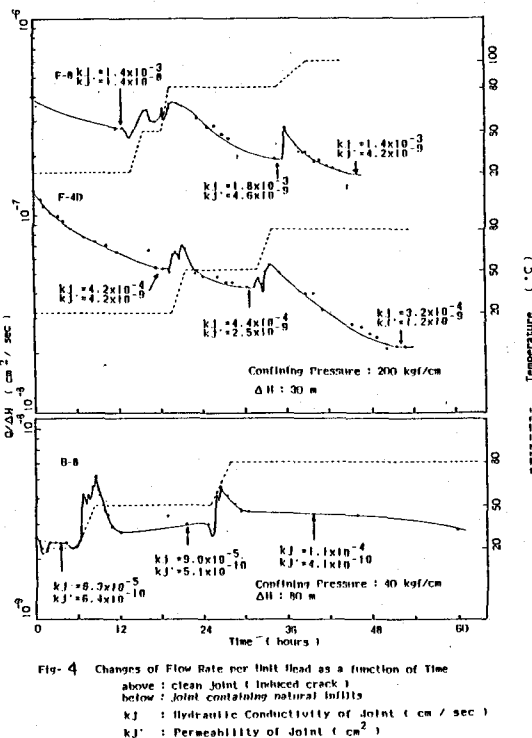


Fig-4 Changes of Flow Rate per Unit Head as a function of Time
above: clean joint (induced crack)
below: joint containing natural fill
kj: Hydraulic Conductivity of Joint (cm/sec)
kj': Permeability of Joint (cm²)

から、浸透水中より遊離した気泡の影響が大きいものと推測される。オ2の昇温時の流量増大であるが、これは急激な温度の上昇による一時的な割れ目中での間隙圧の増加などによるものと考えられる。オ1の問題から透水係数の絶対値を求めるには、試験のなるべく初期の段階での値を用いることが望しい。一方、温度の上昇に伴う透水性の比較にあたり、昇温後の定常状態における透水係数を用いる必要があるが、オ2のような問題がある。そこで今回は流量の変化がある程度収束したと考えられる時点（図中矢印）における値を採用し、いわば温度の上昇に伴う相対的な透水性について比較検討した。また岩盤中の地下水にはかなりの容存空気が存在しているものと考えられるため、本問題は透水性に関する原位置ヒータ試験を行なう際の空気の話りの可能性に関しても重要な示唆を与えるものである。オ3の浸透水の粘性に関して、割れ目の透水係数 k_j (Hydraulic Conductivity) ではなく、粘性の影響をとり除いた物質固有の透水性を示すパラメータである浸透率 k_j' (Permeability, $k_j' = k_j \cdot \mu / \eta$, μ : 動粘性係数, η : 重力加速度) に換算し、比較検討した。以上、3点の問題に対し、上記の検討を行なうことで得られたデータを整理すると次のような結果が得られる。温度を20~80乃至100°Cまで変化させた場合、割れ目の浸透率はcleanな割れ目と充填物を含む割れ目とは異なり、異なる傾向を示す。cleanな割れ目では、浸透率は20°Cにおける値の数10%位に減少していくのに対し、充填物を含む割れ目では浸透率は20°Cにおける値の数10%程度しか減少せず、変化はかばり小さい。これらの現象の原因としては次のようなことが考えられる。cleanな割れ目では花崗岩の熱膨張が割れ目の間隙を減少させるために透水性は大きく変化する。一方、充填物を含む割れ目では、花崗岩の膨張は充填物の存在により拘束されること、充填物自体の膨張もその厚さが薄く(1.6mm程度)試料に負荷されている周圧により拘束されていることなどの理由から、割れ目中の大きな変化は認められず、従って透水性の大きな変化は認められない。一方、4-1で述べた温度上昇におけるその他の要素については今回取扱った範囲では特に考慮を払う必要はないであろう。以上述べてきたように、20~100°C程度の温度変化に対する透水性の変化は、3で述べて応力影響と同様に、cleanな割れ目、変質粘土を含む割れ目の2つについて異なり、異なる傾向を示すことが暗示されるため、岩盤の浸透流解析にあたり、これらの分類に従って検討していくことが有効であると思われる。

5. まとめと今後の課題

以上、岩盤浸透流に影響を与える要因のうち、応力状態、温度の影響について岩石試料を用い室内実験を実施してきた。その結果、岩盤のゆがみに伴う透水性の変化の考え方、温度を変化させた時の透水性の変化の考え方、および、これらの問題における割れ目充填物の有無、性状の影響度および割れ目の分類法に関して有用な指針を提示した。現段階では、特に温度依存性に関しては、まだ検討の余地が残っていると、今後さらに実験を進めていく予定である。さらに今後はこれらの結果と原位置試験結果の対応付けを行なっていくことと並行して、割れ目中での物質移動、さらに温度が上昇した場合の流束の変化等に関する実験を実施し、総合的に岩盤浸透流の解析に発展させていく予定である。

《 参考文献 》

- 小島圭二・小池豊 1983a: 岩石割れ目の透水性に関する基礎的実験, 日本鉱業会昭和58年度春季大会
- 小島圭二・小池豊 1983b: 充填物を含む割れ目の透水性に関する基礎的実験, 日本応用地質学会昭和58年度研究発表会
- 渡辺邦夫 1983: 岩盤割れ目系への地質量を考慮した岩盤浸透流の解析に関する基礎研究, 埼玉大学地盤水理実験施設紀要 No. 2.

(17) Influence of Stress State and Temperature in the Permeability of Rock Core Samples Containing Various Joint Infills

Keiji KOJIMA
Yutaka KOIKE

University of Tokyo

Recently as the growing needs for the development of underground opening, the problems of prediction and control of underground water movement have attracted major interests. Especially in the geologic isolation of radioactive waste, the problem of underground water flow has great influence in radioactive nuclide migration from the repository.

By the way in a rock mass, flow paths are consists of geological discontinuities such as faults and joints, and the distribution and properties of those are generally complicated. From that standpoint, the authors have examined the permeability of jointed rock under the condition of 0 to 19.8 MPa in confining pressure, 20 to 100 °C in temperature. And tested samples contain natural joint with various infills, or artificially induced crack.

As the results, the following things are clarified.

- 1) In sequence of cyclic loading to the joint-containing rock samples, changes of hydraulic conductivity due to confining pressure are indicated as two types of curve. One is curve representing the most loosened condition of the sample and the other is curve which converges at the stress level about 20 MPa. These phenomenon are maybe correspondent to the weathered or geologically unloading condition in actual rock mass.
- 2) Hydraulic conductivities of various rocks greatly differ due to the properties of joint surface and filling materials, but the trend curves to confining pressure mentioned in 1) are almost resemble in regardless of of these properties.
- 3) Increasing the temperature of rock sample from 20 to 80 °C, permeability of clean joint decreases to about one third of the value at 20 °C but altered clay-containing joint doesn't decrease so extremely.