

岩盤の透水性評価に関する実験的研究

Experimental study on permeability in fractured rock

埼玉大学 工学部 正会員 ○渡辺邦夫

" " " 佐藤邦明

はじめに

岩盤中に施工されるダムやトンネルの漏水・湧水といった問題を考えるにあたっては、まず対象岩盤の透水性を十分把握する必要がある。この岩盤の透水性は、主な浸透経路となる crack 系の性状に大きく影響されるものであるが、岩盤の crack 系は非常に複雑で、評価が難しい。そのため、實際上工学的には crack 系の性質を測定のための簡単な間隙率・弾性波速度などの量で表現し、それら諸量と透水性を結びつけ考える方向が採られている。今回の報告は、基礎的に岩石の透水係数を室内実験により測定し、その値と crack 系を表現すると思われる諸量との関係を調べたものである。

1 岩盤中の crack 系

1-1) crack のスケール

岩盤破壊によって生じた不連続面であり、透水性の観点から見たとき、周囲と異った性質を持つものをここでは crack と総称するが、その中には局所的に幅数百メートルもの破碎帯を伴い、長さ数千キロメートルにも達する大断層から、長さが数ミクロン程度のヘキ開、結晶間開口といった micro-crack まで含んでいる。通常、これらの crack をすべて同時に把握することは困難で、対象としている岩盤の大きさとの関係で注目する crack の大きさが選定される。図-1はその関係を模式的に表現したもので、(a)は数百メートル以上の大きさの岩盤を対象としており、注目する crack としては少くとも数十〜数百メートルの長さを持つようなものを考えることになる。この場合、この岩盤中にはそれ以外にも小さな crack が無数に存在しているが、それらはむしろ均質岩盤の一部と扱えられる。一方、小さな岩盤の場合には、(b)、(c)に示すように、強度や透水性にはより小さな crack が問題となってくることになる。これら各種のオーダーの crack 系は、透水性の観点から見た時、必ずしも同様な性質を示すといえない。たとえば、すでに筆者らが指摘したように^{1),2)}、

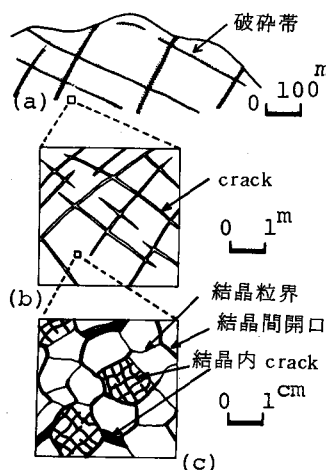


図-1 岩盤スケールと crack 系

岩盤では crack の方向性に支配された透水異方性が問題となるが、その方向性も、(a)のような crack 系では広い地域の応力条件を反映した規則性を持っている。一方、(b)のオーダーの crack の中には、たとえば火成岩に一般的にみられる冷却・固結時の節理系のように、必ずしも外部的応力条件に支配されないものもある。さらに(c)になれば、crack は結晶粒間の形状や結晶鉱物の性質に左右され全体の地質構造との関連がうすくなる。また、crack 内部の状態をみても、(a)では通常破碎帯を伴い、粘土や小岩片で埋められていることが一般であるが、(c)や、前述の節理系では開口した crack となっていることが多い。したがって、岩盤の透水性を考えるにあたっては、まずどんなスケールを問題にしているかを明らかにする必要がある。今回の研究では、最も基本的と思われる(c)のオーダーの micro-crack を対象として考えることとする。

1-2) micro-crack 系

micro-crack 系の性質は、岩質によりかなり異ってくる。たとえば結晶片岩や粘板岩では方向性をはっきりしており、一方、花崗岩や砂岩では相対的には顕著な方向性に乏しい。今回は、その中で花崗岩のように

内在するmicro-crack系が著しい方向性を示さない岩石を対象として考える。そのような岩のmicro-crack系、あるいは結晶組織をソフトX線写真によりみたものが図-2である。用いた試料は径約5cm、厚さ5mm程度の円板状のもので、間隙率(λ)は(a)=0.86%, (b)=3.31%で(b)の方がより風化している。写真で黒っぽい部分が雲母、粘土鉱物の多い部分で白い部分は石英・長石である。観察されるcrack系については黒線で強調して示したが、これらは幅数十ミクロン以上の相対的に大きなcrackである。ソフトX線写真は、試料がある程度厚くても観測可能なため全体的な組織をみることに適している。しかし、幅数ミクロン程度の小さなcrack系の観察は困難である。そのため、つぎに染色浸透検傷液によるcrack観察を行ったがその結果を図-3に示す。この方法は従来、主に鋼材の非破壊探傷に用いられたもので、crackに着色液をしみこませ、観察するものである。図-3の(a)、(b)はそれぞれ図-2(a)、(b)と同じ岩石から採取された

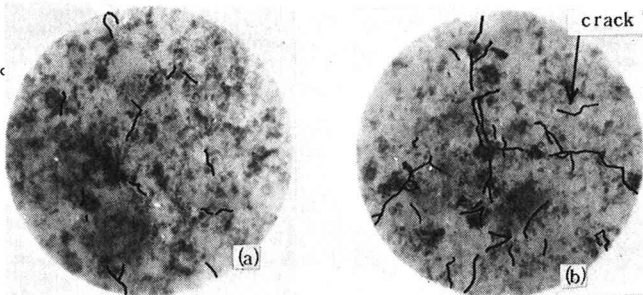


図-2 花崗岩試料のソフトX線写真(間隙率(λ), (a)=0.86%, (b)=3.31%)

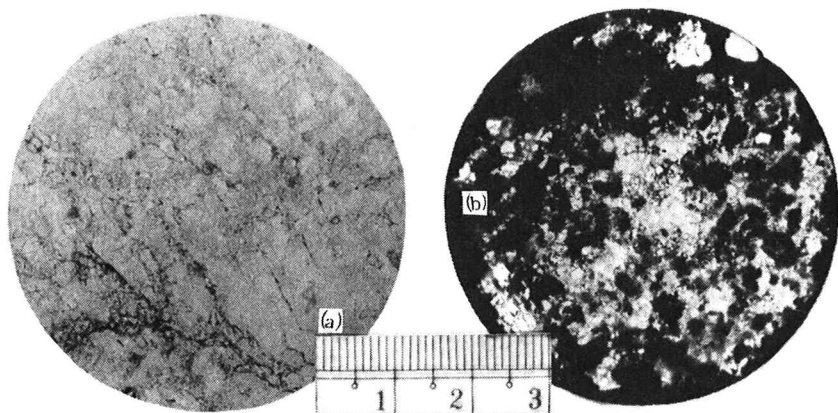


図-3 染色浸透検傷液によるmicro-crackの観察

試料を用いている。この方法によれば、幅数ミクロンのcrackまで観察することが可能で、写真からも網目状に連なったmicro-crack系がみられる。(b)では全体に黒っぽく写っているが、これはこの岩が風化のすすんだもので、粘土化しており粘土中に浸透液がしみこんだことによる。つぎに、このようなcrack系を評価するわけであるが、筆者らは以前確率過程を用いる方法を試みた³⁾。しかし今回は、間隙率、弾性波速度、動弾性係数といった量で全体的に評価し、透水性を表現する方向に重点をおいた。

2 透水実験

2-1) 実験装置

実験は図-4に模式的に示す三軸圧縮型透水試験機を用いて行った。図-5はその全景写真である。この装置を模式図に従い説明すると、径約5cm、長さ約10cmの円柱形試料が三軸室内にセットされ、試料周囲の応力条件が設定される。側圧は三軸室内を満たした水により、10Kg/cm²まで、軸圧は全荷重1ton(約50Kg/cm²)まで可能である。試料には生ゴムスリーブがかぶせられ、三軸室内の水と隔てられる。透水実験に用いる浸透水は、高圧をかけることもあって真空ポンプにより脱気した蒸留水を用い、脱気水槽より試料内に供給される。浸透圧は10Kg/cm²まで可能であり、この圧力は脱気水槽のゴムバルーン内に空気圧を加えることにより伝えられる。なお実験中の水温は、三軸室内に設置された温度計により測定する。試料内を浸透した水はビューレットに導かれ、透水量を測ることにより、変水位試験と同様に透水係数が算定される。

この実験装置の問題点は、三軸室内の側圧供給用の水が生ゴムスリーブを通して岩石試料内に直接流入す

ることの防止と、試料と生ゴムスリーブの間を通過する水の止水である。岩石の透水係数は一般に非常に小さいためこのようなわずかの実験条件の不備が、結果に大きな影響を与える。そのため、今回実験を行うにあたってあらかじめそれらの影響を調べた。その結果、まず生ゴムスリーブを通過する水の影響は、岩の透水係数が $10^{-7} \sim 10^{-8} \text{ cm/sec}$ 以上であればほとんど問題にならず、それ以下の透水係数であれば、スリーブを何枚か重ね、その間にシリコングリスを塗り込むことにより防ぎうるということがわかった。また、試料と生ゴムスリーブとの間を通過する水は、側圧が浸透圧より $1.5 \sim 2.0 \text{ Kg/cm}^2$ 以上高ければ、生ゴムスリーブが試料表面に強く密着し、ほとんど影響を与えないことがわかった。さらに、この場合試料表面にシリコングリスを塗ればより効果的である。そのため、実験にあたっては以上の結果を十分配慮して行うこととした。しかし、このような注意をしても、岩の透水係数が 10^{-12} cm/sec 程度となると、やはり、漏水の影響がみられ、この実験装置の測定限界が、 10^{-11} cm/sec 程度であると考えられる。

2-2) 実験条件

岩盤の透水係数は、周囲の応力状態、間隙圧の変化により、crack 幅などが変化するため、大きく影響されることが考えられる。これらはいわば外的要因の影響であるがこの他にも、目づまりによる透水係数変化など多くの影響要因が考えられる。このため透水実験を行う上で、どのような条件で行なうのかを明らかにしておく必要がある。ここではまず、透水係数に与える種々の要因の影響を調べ、その上で実験条件を検討する。図-6は、透水係数の時間変化を途中動水勾配を種々変えてみたものである。図中横軸は時間(t)、縦軸は初期透水係数との比 (k_t/k_0) を示す。試料はすべて花崗岩で、(a)は間隙率(λ) = 7.05%であり、初期に動水勾配 I を 88.6 とし、その後の変化をみたものである。また(b)、(c)はそれぞれ $\lambda = 2.79$

1.89%で途中動水勾配を変えた。これらを見ると、透水係数は時間的にかなり変化し、とくに(a)では3時間後に初期透水係数の6割程度となり、まだ定常状態に達していない。一方、(b)、(c)では、動水勾配を変化させた時透水係数が急増し、その後徐々に低下してほぼ30分~1時間後に定常となっている。低下度は、(c)の間隙率の小さいものの方が少く、また動水勾配を上げた時より下げた時の方が大きくなっている。このような透水係数変化の理由として、(1)図-7(a)に模式的に示すような、crack 壁に付着した小岩片、粘土の流動による目づまり、(2)図-7(b)に示すような間隙圧変化による crack 幅の変化、(3)浸透圧を変化させても、試料内の圧力分布が定常になるまで時間がかかる(定常安定時間)、(4)岩石に応力変化を与えた場合に起こる間隙水のしぼり出し(圧密)などの原因が考えられ

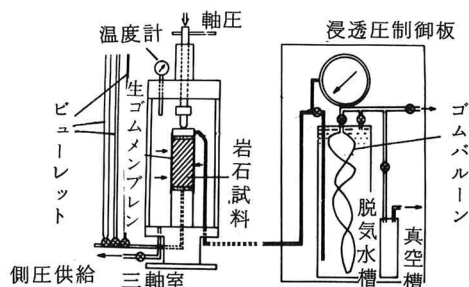


図-4 三軸圧縮型透水試験機模式図

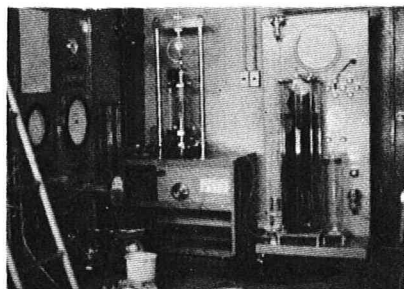


図-5 実験装置全景

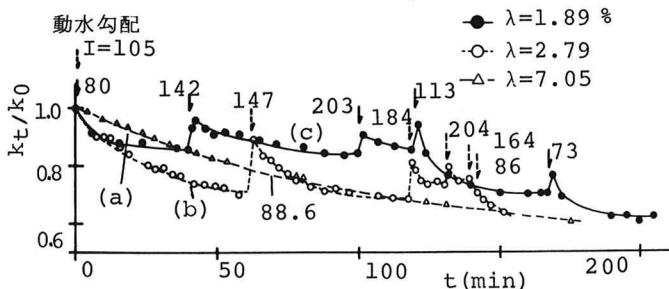


図-6 透水係数の時間的変化

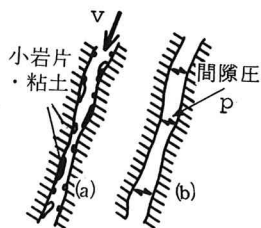


図-7 crack の変化
(a); 目づまり
(b); 間隙圧の変化

る。このうち(2), (3)の原因は、浸透圧（動水勾配）を上昇させた時、透水係数が安定状態になるまで徐々に増加するような性質を持つもので、今回の透水係数低下現象を説明できない。また(3)の定常安定時間は式、

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{\mu}{k} \left\{ \left(\frac{\partial \eta}{\partial t} \right) + \beta \eta \left(\frac{\partial p}{\partial t} \right) \right\} \dots\dots\dots (1)$$

を解けば得ることができる。⁴⁾ ここに p = 圧力, k = 透水係数, η = 間隙率, β = 水の圧縮率であり x は試料長さ方向である。これによって計算すれば(a), (b), (c)の各試料についてせいぜい2~3秒であり、数十分もの変化時間を説明できない。また(4)の要因も浸透圧の上昇は有効応力の減少をもたらすから、浸透圧上昇後に圧密現象が起こるとは考えにくく、透水係数の減少を説明できない。従って、この現象は(1)の目づまりによる可能性が高いが、こういった性質は、透水係数としてどの時点の値を採用すれば良いのかという問題を提起する。この現象が目づまりであれば、透水係数としては、初期の値を採用すべきであろうが、この値は正確にはとらえにくく、今回は定常状態に達した時の値をとることにした。また動水勾配を低下させた時に透水係数の低下が大きいことから、測定にあたっては、動水勾配を上昇させた時の値を採用した。

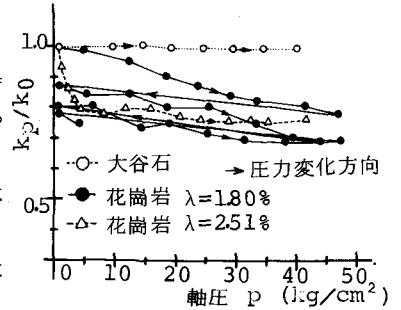


図-8 軸圧変化と透水係数

つぎに問題となるのは、試料周囲の応力状態の影響である。これについては筆者らが報告し²⁾、また従来からも多くの研究がある。^{4), 5), 6), 7)}。とくにMorgensternは⁵⁾、 A , T , N を定数として、

$$k = A / (\sigma'_m + T)^N \dots\dots\dots (2)$$

の関係式を実験的にもとめた。ここに σ'_m は平均有効主応力である。また同様にNelson⁶⁾らは、

$$k = A + B (P_c)^{-n} \dots\dots\dots (3)$$

という式を提唱している。式中 P_c = 等方圧, A , B , n は実験的にもとまる定数である。これらは本質的に同様な性質を示す式である。図-8は今回の実験結果であり、側圧を 4.6 Kg/cm^2 で一定とし軸圧を約 5.0 Kg/cm^2 まで増加させた場合で、試料としては大谷石および $\lambda = 1.80, 2.51\%$ の花崗岩を使用した。大谷石の場合はこの程度の軸圧変化ではほとんど透水係数変化がみられないが、花崗岩では20~30%の低下を示し、応力履歴の影響がみとめられる。この実験結果と(2), (3)式との比較であるが、これらの式はもともとさらに高い応力状態、たとえば(3)式では7~8.0 Kg/cm^2 までの等方圧変化を問題にしており、単純な比較は難しい。ただ傾向はほぼ同じようである。いづれにしても、透水係数に応力依存性があることは、透水係数値の比較にあたって応力条件を合わせる必要性を示している。そのため今回の実験ではすべての試料につきほぼ、側圧 4.6 Kg/cm^2 , 軸圧0の条件で行うこととした。

3 実験結果

今回の透水実験に用いた試料は、主に草木ダムおよび瀬戸内海付近で得られた花崗岩であり、比較のため大谷石を用いた実験を行った。今回の実験はまえがきでも述べたように、間隙率、弾性波速度、動弾性係数など crack 系を表現するような量と透水係数との関係を明らかにすることを主目的として行った。まず図-9は、間隙率と透水係数との関係をみたもので、○, ●は花崗岩, ●は花崗岩の風化したマサ土の攪乱試料, ●は大谷石である。花崗岩のうち●は同一岩塊から同一方向を持って取り出した3本の試料を、マッフル炉で順次交互に強熱（最高 800°C , 2時間）・冷却し、強制的に間隙率を変化させたもので、いわば強制風化状態の試料である。一方, ○は自然風化により間隙率の変化したものである。強制風化状態と自然風化状態試料の相違の一つは、長石・雲母などの鉱物や crack 壁の粘土化である。そのため多少透水性が異なることが考えられる。図よりまず花崗岩試料については、間隙率0.53%という新鮮な岩石から、完全に風化したマサ土に至るまで、かなりはっきりした間隙率-透水係数の関係が認められる。以前筆者らは、強制風化させた花崗

岩について、透水係数(k)と間隙率(λ)がほぼ $k \propto \lambda^{4.2}$ の関係を持っていることを報告した²⁾。このことを考慮して図中、 $k \propto \lambda^4$ 、 $k \propto \lambda^5$ の勾配を示しておいたが、自然風化岩ではむしろ $k \propto \lambda^5$ に近くやや勾配が大きいように見える。また強制風化岩に比べバラつきが大きく、同一間隙率で比べると、透水係数値がやや小さくなっている。これは、前述の粘土化の進行といった要因のあらわれと思われる。しかし、全体的にみれば、ほぼ同様な傾向をもつ。一方、図中の Δ , I, $\blacktriangle$ は従来報告されている値をプロットしたもので、 Δ はイギリスの quartz arenite に属する石炭紀砂岩⁸⁾、I は新潟県大石ダムの花崗岩⁹⁾、 $\blacktriangle$ は古第三紀礫質砂岩¹⁰⁾である。これらは、今回の結果によく合致しているといえる。このように、花崗岩あるいは古い地質時代の砂岩では間隙率-透水係数の間によい対応がみられるようであるが、図中大谷石の値はかなり

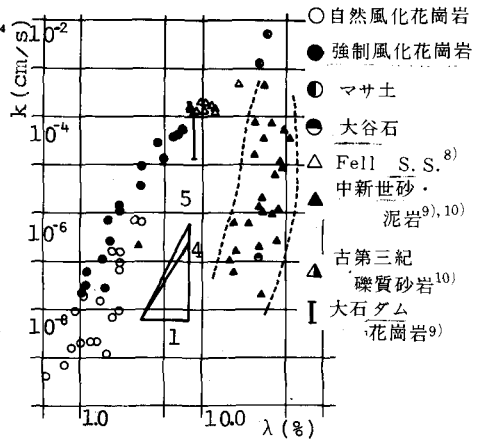


図-9 間隙率と透水係数

外れており、間隙率に比べ透水係数が小さくなっている。また $\blacktriangle$ は中新世の砂・泥岩である¹⁰⁾が、この値も花崗岩で得られた傾向と異なり、むしろ大谷石に近い性質を示している。これは大谷石や中新世程度の新期堆積岩では連結していない独立した pore が多く、また粘土鉱物が多く、粘土の水分子吸着性が無

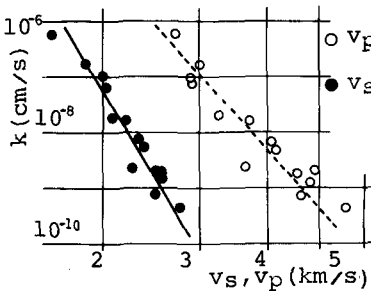


図-10 $k \sim V_p, V_s$ 関係

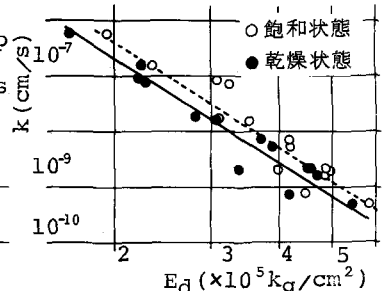


図-11 $k \sim E_d$ 関係

視しえず、crack 浸透と異なる側面を持つからと思われる。つぎに、図-10, 11 は、透水係数と一般的な方法で測定した P 波・S 波速度 (V_s, V_p) および動弾性係数 (E_d) との関係自然風化花崗岩についてみたもので、これらもかなり良い対応を示している。図-10 の $\bullet$ は S 波速度 (V_s)、 $\circ$ は P 波速度 (V_p) であるが、ほぼ $k \propto V_s^{-1.7}$ 、 $k \propto V_p^{-1.0}$ とよみとれる。一方、図-11 では $\bullet$ は乾燥状態試料、 $\circ$ は飽和状態試料の透水係数-動弾性係数関係であるが、それぞれ $k \propto E_d^{-0.6}$ 程度となる。さらに、以上の関係をより明らかにするため、図-12 に間隙率と動弾性係数の関係を示した。これによれば、ほぼ $\lambda \propto E_d^{-1.3}$ 程度の関係をもっていることがわかる。

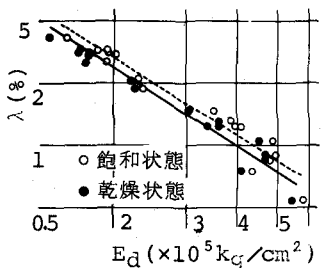


図-12 間隙率(λ) $\sim E_d$ の関係

4 考察

今回の実験によって、花崗岩については透水係数と間隙率、弾性波速度、動弾性係数など crack の性状に結びついた諸量との間に、かなりはつきりした関係がみとめられた。またそれらの関係を検討すると、まず $\lambda \propto E_d^{-1.3}$ であり、自然風化花崗岩についてはほぼ $k \propto \lambda^5$ を仮定すれば $k \propto E_d^{-6.5}$ となる。これは、実験値からもとめた $k \propto E_d^{-6.8}$ とほぼ等しく、これらの量の間には相互に密接な関係をもっているようである。つぎに、このような関係が一般的な岩盤について成立するかであるが、従来の報告を二、三引用すれば、古第三紀以前の砂岩などは少くとも透水係数-間隙率に関する限り、成立する可能性が示された。しかし、大谷石、あるいは中新世程度の砂・泥岩ではかなり異ってきており、一般性を議論することは難しい点がある。

ただ従来より、岩盤を区分するにあたって硬岩—軟岩という分類がなされている。この分類は主として岩盤強度の点から提唱されたものであるが、その分類にあてはめれば、花崗岩や古第三紀以前の続成作用の進んだ砂岩は硬岩であり、中新世砂・泥岩や大谷石は軟岩といってよい。したがって、現段階ではいわゆる硬岩であれば、このような関係の成立する可能性があると考えられる。この点については、今後より多くの岩石について種々の測定を行いさらに検討する必要がある。

つぎに、実験条件で述べた岩盤の透水係数に影響する要因について考える。まず目づまりと思われる透水係数の時間的低下であるが、このことは従来からもダムの漏水調査などからいわれていたことである。今回の結果は、そういった現象が、大きな crack ばかりでなく micro-crack であっても、また浸透水として蒸留水を使用しても起りうることを示している。これは crack 壁面に付着した粘土、微小な岩片の流動によってもたらされるいわば内因的なものと思われ、透水係数を評価する上で十分注意を払う必要がある。この影響は実験結果からみると、間隙率の大きなものほど顕著なようである。つぎに透水係数に与える応力状態の影響であるが、今回の結果でも花崗岩についてはかなり明瞭にあらわれている。一方、大谷石ではこの程度の軸圧変化ではほとんど変っていないが、この相違は筆者らが報告したように²⁾、浸透経路となる間隙構造の違いによるものであろう。ここで、今回の軸圧変化量であるが、 50 Kg/cm^2 では少ないようである。実際、花崗岩では応力—歪関係をみると、一般にかなり風化の進んだものであっても、この程度では弾性変形領域以下の押し固め変形領域にあっており、全体的な性質を示していない可能性もある。今後、応力状態の影響を詳しく調べるためには、より大きな応力変化を与え実験を行う必要があると考えられる。

あとがき

今回の研究により、花崗岩では透水係数と間隙率、弾性波速度、動弾性係数との間に関わりはつきりとした関係があることが明らかとなった。またこの関係は、従来硬岩に分類されているような岩石に適用しうる可能性が示唆された。今後はより多くの岩石試料について透水係数などを測定し、さらに性質を明らかにしてゆきたいと考える。

最後に本研究をすすめるにあたり、有益な示唆をいただいた東京大学高橋裕教授、埼玉大学関陽太郎教授また親密な御討論いただいた東京大学玉井信行助教授に深く謝意を表します。また実験を手伝ってくれた埼玉大学生古田島信義君に感謝を表わす。

参考文献

- 1) 渡辺邦夫・佐藤邦明, 岩盤浸透流の基礎的性質, 第22回水理講演会論文集, pp 297—302, 1978
- 2) 佐藤邦明・渡辺邦夫, 岩盤の透水性に与える種々の crack 性状の影響, 埼玉大学地盤水理実験施設年報, vol. 4, pp 104—118, 1978
- 3) 渡辺邦夫・佐藤邦明, 岩盤浸透流に関与する crack 性状の確率論的評価, 地下水学会秋期講演会予稿集, 1978
- 4) Brace W.F. et al, Permeability of granite under high pressure, *Geophys. Res.*, vol. 73, pp. 2225—2236, 1968
- 5) Morgenstern N.R., Seepage into an excavation in a medium possessing stress dependent permeability, *Proc. Int. Symp. on Percolation through fissured rock*, 1972
- 6) Nelson R.A. et al, Experimental study of fracture permeability in porous rock, *A.A.P.G. Bull.*, vol. 61, pp 227—236, 1977
- 7) Bernaix J., New laboratory methods of studying the mechanical properties of rock, *J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 6, pp 43—90, 1969
- 8) Bell F.G., Petrographical factors relating to porosity and permeability in the Fell Sand Stone, *Q. J. l. Engng. Geol.*, vol. 11, pp 113—126, 1978
- 9) 新潟県, 新潟県地質図説明書, 1977
- 10) 石油技術協会, 日本の石油鉱業と技術, 1973