

# 岩の透水性に関する基礎的研究

——割れ目の変形と透水性の変化について——

平 間 邦 興      丸 山      誠  
鈴 木 健 一 郎

## Fundamental Studies on Permeability of Rocks

——Variations of Fracture Deformation and Permeability with Stress——

Kunioki Hirama      Makoto Maruyama  
Ken-ichiro Suzuki

### Abstract

The permeability of fractured rock masses and its variation with stress have been matters of considerable interest. The main objective of the research here is to estimate the permeability of deformable fractures in rocks or rock masses and its variations with stress. For fluid flow through a single fracture, three different kinds of rocks with simulated fractures are subjected to permeability and cyclic compression tests to see their stress-dependent characters. Out of the results, the following were found worthy of being reported;

(1) Experimental results show that one-third of flow rate,  $Q^{1/3}$ , is linearly related to the logarithm of normal stress to a fracture, which follows the relationship based upon the Hertzian theory of deformation.

(2) The dependency of permeability on stress history reflects that of deformation on stress history.

### 概 要

本研究は、岩盤の透水性の応力依存性を割れ目の変形挙動に関する考察から、表現することを目的としたものである。その第一段階として、凹凸を有する単一割れ目に注目し、割れ目の垂直応力～垂直変位関係をモデル化することにより、割れ目に作用する垂直応力の変化に伴う透水性の変化を評価し、実験的に検証を行なった。

人工的な割れ目と天然の割れ目を含む岩石供試体(φ5cm×10cm)について透水試験と変形試験を行なった。その結果、流量の $1/3$ 乗と周圧の対数との間には、線型関係があり、載荷、除荷における同一応力レベルでの透水性の差は割れ目凹凸の塑性変形によると考えられる。そして線型関係の定量化のためには、凹凸の形状の評価手法の確立および岩石基質部の力学特性をもパラメータとして考えねばならないことが判明した。

### 1. はじめに

近年、石油の地下貯蔵や原子力廃棄物の地下処理に関係する問題として、地盤の透水(油)性、核種の移行問題、核種崩壊によるエネルギー発散に伴う熱応力、物性値の変化などに関する議論が活発となっている。これらの問題を考える場合、考慮しなければならないことは、対象とする岩盤の構造特性、例えば、断層、節理、亀裂の存在、地山の応力場の問題、流体、熱の問題などがある。しかも、これらの問題は相互に依存しており、現在、その相互依存性の評価が急務とされている。

本研究の目的は、節理性岩盤の透水性に及ぼす応力場の影響を明らかにすることにある。その場合、岩盤の構造特性と透水性、そして応力場の3者を考慮しなければならない。今回は、まず第一段階として単一の割れ目に注目し、その垂直応力～垂直変位関係のモデル化を行なった。それにより、割れ目に作用する垂直応力の変化に伴う透水性の変化を評価することを試みた。

### 2. 透水性の応力依存性

節理、亀裂といった地質学的不連続面の存在が岩盤力学上の大きな問題となっている。単一の割れ目だけを考

えると、その2次元的な広がり、面の形状、又それを含む基岩の性質などが相互に影響し合い、割れ目を力学的に特徴づけている。ここでは、割れ目の変形性が応力(面に作用する垂直応力)に対してどのように変化するかを考察し、それと流れを結びつけて考えてみる。

2.1. ラフネスのある単一割れ目の変形性

割れ目の凸部を弾性球の一部であると考えた場合、その曲率半径を  $r$ 、基準線から凸頂部までの高さを  $z$ 、その確率密度関数を  $\phi(z)$ 、割れ目表面の単位面積当たりの凸の個数を  $\eta$  として、基準線から距離  $\delta$  の平滑面に接触するときの垂直応力  $\sigma_n$  は、

$$\sigma_n = [4E/3(1-\nu)^2] (\eta r h) (h/r)^{1/2} \int_{\delta}^{\infty} (z-\delta)^{3/2} \phi(z) dz \quad \dots\dots\dots(1)$$

と表わされる<sup>1)</sup>。ここで、 $E$ と $\nu$ は基岩の材料定数、 $h$ は凸高さの標準偏差である。また、(1)式積分内のパラメータは  $h$  で正規化されている。今、凸高さの分布関数  $\phi(z)$  に負の指数関数、即ち  $\phi(z) = e^{-z/h}$  を用いると式(1)中の積分は簡単に  $e^{-\delta/h}$  となり、面の弾性コンプライアンスは、

$$c = d\delta/d\sigma_n = h/\sigma_n \quad \dots\dots\dots(2)$$

となる。この場合、平滑な面と粗な面との接触を考えているので、通常の割れ目に関する弾性コンプライアンスは  $2C$  となることに注意されたい。凸高さの分布を負の指数関数としたのは、式の単純化によるもので、実際には、正規分布であるとの報告がある<sup>2)</sup>。したがって(2)式は、第一近似と考えることができる。

2.2. 平行平板間の層流

等方均質ニュートン流体の運動を考える場合、その支配方程式は、

$$\rho_{,0} + (\rho v_i)_{,i} = 0 \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$\sigma_{ij,j} + \rho f_i = \rho (v_{i,0} + v_{i,j} v_j) \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$\sigma_{ij} = -p \delta_{ij} + \lambda \delta_{ij} D_{kk} + 2\mu D_{ij} = \sigma_{ji} \quad \dots\dots\dots(5)$$

の三つである。ここで、 $\rho$ は流体密度、 $v_i$ は流速ベクトル、 $f_i$ は物体力、 $D_{ij} = \frac{1}{2}(v_{i,j} + v_{j,i})$ は変形速度テンソルである。(,)は時間に関する偏分を意味する。(3)式は連続の式と呼ばれる局所的な質量保存則、(4)式は、運動方程式、すなわち局所的な運動量保存則である。角運動量は(5)式の  $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$  より保存され、エネルギーは、(5)式なる構成式を用いることで自動的に保存される。体積粘性率  $\lambda + \frac{2}{3}\mu$  が0であるという Stokes の関係を用いると、(4)式は(5)式の代入により Navier-Stokes の方程式を得る。非圧縮性流体の無限平行平板間の定常流を考えて、N-S 方程式を解き、単位長さ当たりの奥行に対して流量  $Q$  を考えると、

$$Q = \frac{1}{12\mu} I a^3 \quad \dots\dots\dots(6)$$

を得る。 $a$ は平板間隙幅、 $I$ は動水勾配である。

ここで、(2)式を積分し、(6)式に代入して整理すると、

$$Q^{1/3} = \frac{1}{12\mu} I (-A \ln \sigma/B) \quad \dots\dots\dots(7)$$

となる。 $A, B$ は定数である。本報告は(7)式の実験的検証を行なったものである。

3. 実験

3.1. 試験試料

試験に使用した試料は、泥岩、花崗岩、砂岩の3種であり、それらの採取場所、ならびに基本性状を表-1にまとめる。

試料名	黒雲母花崗岩	泥岩	砂岩	凝灰質砂岩
採取場所	茨城県笠間市	東京都町田市	静岡県藤枝市	兵庫県神戸市
真比重 Gs	2.68	2.59 2	2.617	2.506
含水比 w (%)	0.1	28.7	1.34	2.75
間隙率 n (%)	1.96	44.5	14.5	19.67
単位重量 $\gamma$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.62	1.85	2.54	2.068
軸圧縮強度 $\sigma_c$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	1591	37	1419	513
静的弾性係数 $E_{so}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$3.1 \times 10^5$	$8.0 \times 10^3$	$2.27 \times 10^5$	$6.44 \times 10^4$
弾性波速度 $V_p$ (km/sec)	3.89	1.55	3.91	2.94

表-1

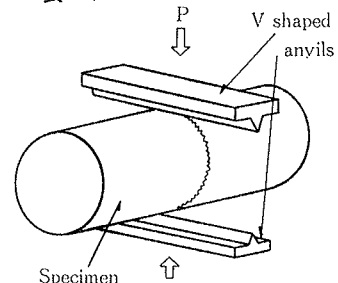


図-1 変形試験における割れ目作成概略図

泥岩および砂岩は、堆積面の方向によりその力学的性質がかなり異なるので、透水試験、変形試験においては、割れ目を層理面に平行に入れるか、あるいは割れ目が層理面と平行な試料を用いた。また、花崗岩については、岩目の方向は考慮しなかった。

3.2. 変形試験  
変形試験は、花崗岩と砂岩について行なった。その作製方

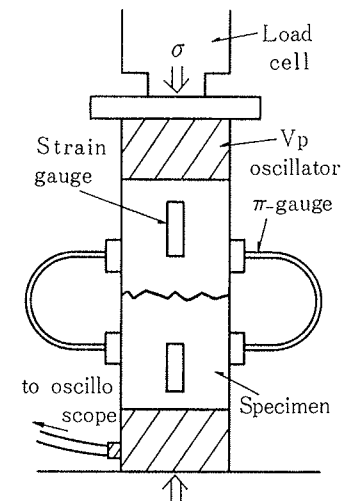


図-2 変形試験概略図

法を図一1に示す。割れ目付近の変形を測定するために $\pi$ ゲージ ( $10^{-6}$  m 精度) を貼り付け、岩石基質部の変形を測定するためにひずみゲージ (4箇所) を用いた。その概略図を図一2に示す。測定は静ひずみ測定器 (TDS-301) を用い、計算処理はパソコン (PC-9801) によって行なった。

### 3.3. 透水試験

透水試験は、泥岩、花崗岩、砂岩について行なった。泥岩と花崗岩の割れ目には2種類ある。花崗岩の場合の割れ目面を写真一1, 2に示す。写真一1は、圧裂試験によって作成した割れ目 (TC シリーズ) であり、写真一2は、岩石用カッターで切断した割れ目 (SC シリーズ) である。砂岩については、コアボーリング試料の中から円柱の回転軸を含むような割れ目を持つ試料を選んで実験を行なった。

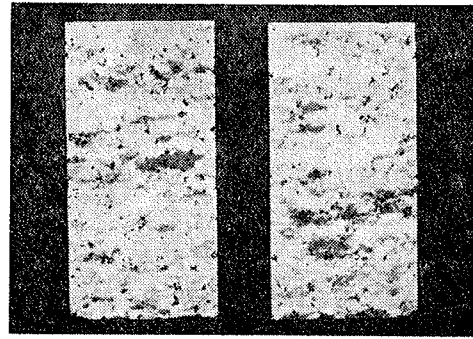
以上の試料を用いて、実施した透水試験の概略図を図一3に示す。供試体の周囲に作用する周圧は、基本的にはゴムジャケットと供試体との間の通水を防ぐためのものである。これを 0.3, 0.5, 0.75, 1.0, 2.0, 3.0 MPa と段階的に上げることにより、各段階での周圧の影響による透水量の変化を測定した。この周圧は、図のような割れ目に対して、面への垂直応力として作用する。浸透圧は 0.1 MPa で一定とし、時間~透水量関係を自記記録計によって自動計測した。

## 4. 結果および考察

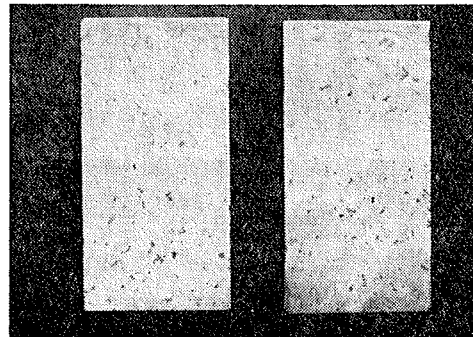
### 4.1. 変形試験結果および考察

花崗岩の変形試験結果を図一4に示す。図中、印付の線が $\pi$ ゲージによる割れ目の変形と岩石基質部の変形の重ね合わされたもの、実線で示したのが、5 mm のひずみゲージによるひずみ量より変位を求めたものである。岩石基質部の変形は、

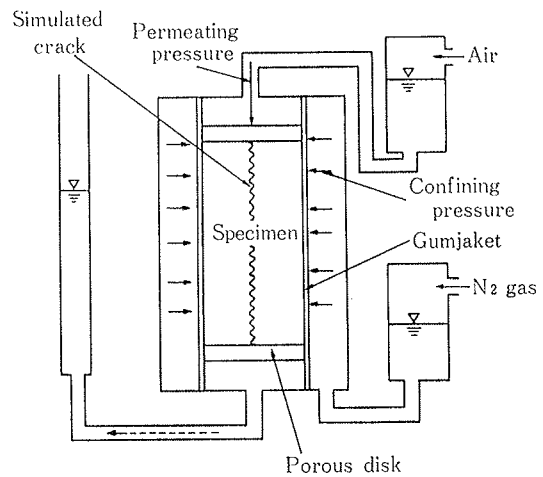
5.5 MPa 程度の繰り返し荷重ではほぼ弾性的である。図一5は $\pi$ ゲージによる変位量より岩石基質部の弾性変形量を引いたもの、すなわち割れ目自身の変形量を示したものである。割れ目自身の変形量の変化は、逆に考えれば開口量の変化に等しい。開口量が0となれば割れ目はそれ以上は変形しなくなり、応力軸と平行になる。その時の変形



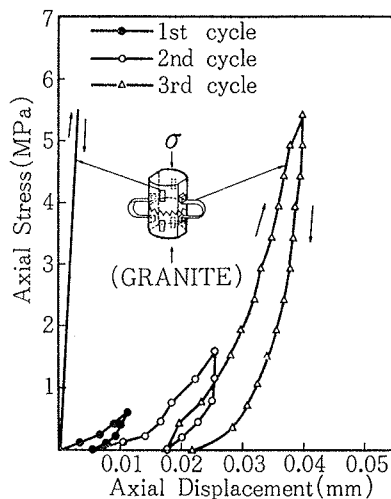
写真一1  
圧裂試験により作成した割れ目表面



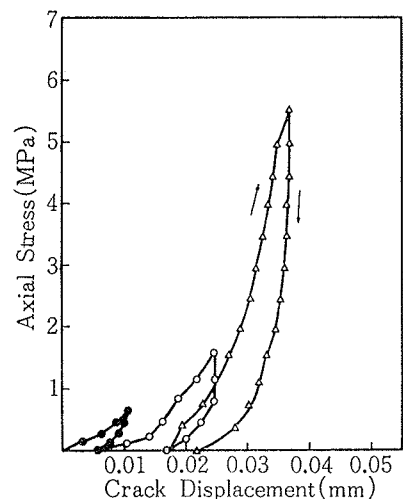
写真一2  
岩石用カッターにより作成した割れ目表面



図一3 透水試験概略図



図一4  $\pi$ ゲージおよび歪みゲージによる変形試験結果 (垂直応力~変形量関係)



図一5 割れ目の変形曲線 (垂直応力~垂直変位関係)

量が、Goodman ら<sup>3)</sup> が定義している最大可能閉塞量あるいは初期開口量である。本実験では、最大 50 MPa の応力でも、割れ目の変形曲線は、応力軸と平行になることはなかった。また、岩石基質部がほぼ弾性域にあるにもかかわらず、割れ目に関しては塑性変形がみられる。割れ目表面の凹凸の部分的な接触によりその部分に応力集中が起こり、接触部においては既に塑性域に達していると考えられる。割れ目の凹凸の接触度合を見るために、感圧紙を割れ目の間に挿入してその接触率を試みに計測したのが図-6 である。これによると載荷時と除荷時における同一応力レベルで比較した場合の接触面積の違いがわかる。さて、割れ目の変形性が式(2)で近似し得るかを確かめるために図-5 を横軸に応力の対数をとって、縦軸に変形量をとって書き直したのが図-7 である。5 MPa 程度の応力レベルでは応力～変形量関係はほぼ直線と考えてよい。

4.2. 透水試験結果および考察

二つの異なる割れ目形状を持つ泥岩の試験結果を図-8 に示す。縦軸に動水勾配 100 当たりの流量の 1/3 乗をとって、横軸に応力の対数をとって整理している。周圧を 0.3 MPa から 3.0 MPa まで段階的に載荷した後、再び 0.3 MPa まで除荷した。○印が圧裂試験によって作成した割れ目の結果であり、●印がカッターで切断することにより作成した割れ目のものである。破線で示した直線は、割れ目を持たない別の試料より得られた関係である。したがって、泥岩自身の透水性の応力依存性を示す一つの目安となるものである。泥岩の変形係数は花崗岩、砂岩のそれに比べてかなり小さく、強度も小さいため、3.0 MPa の最大応力履歴でも塑性変形はかなり進行していることが予想される。まず図-8 において、圧裂試験によって作成した割れ目を持つ供試体の試験結果について考えてみる。0.3 MPa の周圧では、ある程度の透水量があり、周圧の増加とともに急激に透水性は低下し、2.0 MPa 近くになると人工的な割れ目を持たない試料の場合とほぼ等しくなる。除荷段階においては、透水性はまったく回復せず、泥岩自身のそれとほぼ等しい。すなわち、ほとんどすべての凸部が塑性変形し、応力を解放しても変形量が回復しないであろうとの予想通りの結果である。次にカッターで切断した割れ目を持つ供試体についての試験結果を考えてみる。割れ目面の凹凸が小さいため、初期の透水性は小さい。同一開口量を持つ割れ目ならば、凹凸の小さい方が抵抗が少ないために透水性はよいが、ここでは、割れ目の開口量を支配しているのが主に凸部の高さであるためにこのような結果が得られた。○印と比較すると、●印の方が減少率も小さいが、応力の除荷とともに多少透水性が回復している。これは、

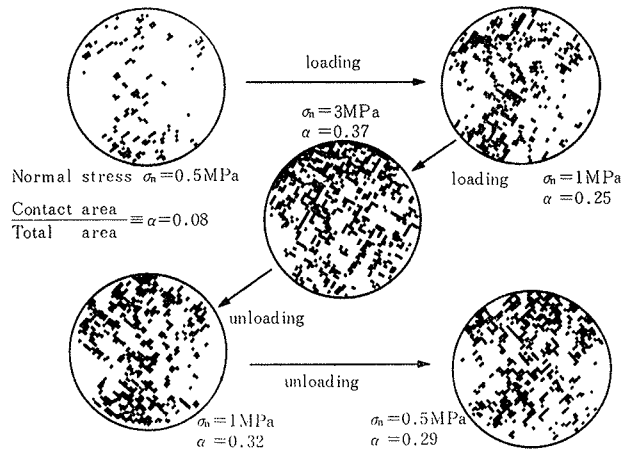


図-6 感圧紙による接触面積測定結果

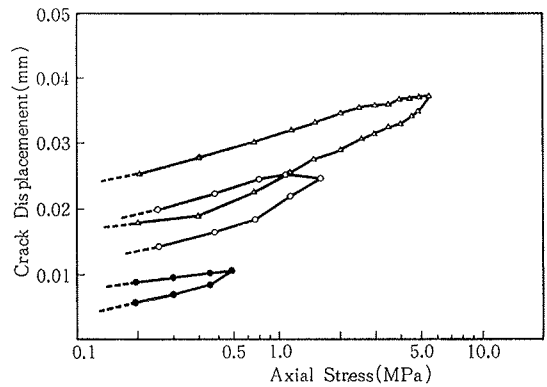


図-7 割れ目の変形量～垂直応力の対数関係

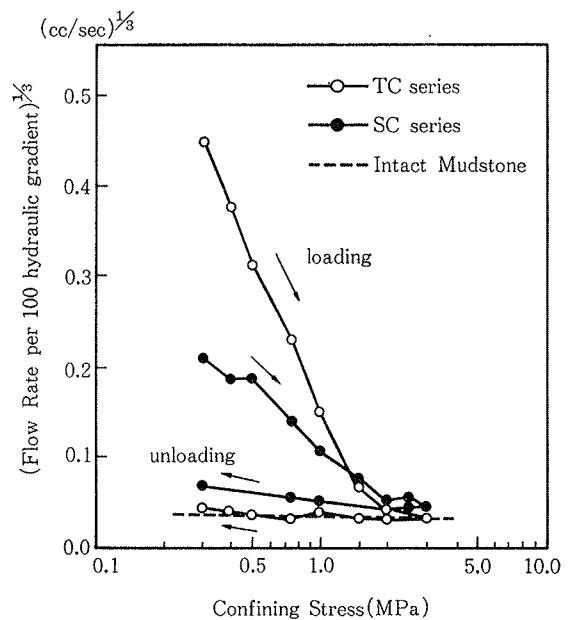


図-8 (流量)<sup>1/3</sup>～周圧の対数関係(泥岩)

凸高さの分布に大きな山があるために接触面積が大きく応力の集中度が小さく、塑性変形がさほど進行しないということが考えられる。しかし、両者とも流量の1/3乗と応力の対数との間に線型関係が成り立つことが確認された。

次に花崗岩の試験結果を図-9に示す。泥岩の場合と同様、二つの異なる割れ目形状を持つ試料の試験結果である。破線は、他の人工的な割れ目を持たない試料の透水試験結果であり、岩石基質部の透水性の目安として併記した。図-7の変形試験の結果からわかるように、○印の場合、3.0 MPa程度の応力では、泥岩と比較して塑性変形は小さく、除荷時の透水性はかなり回復している。●印では、応力に対する透水性の変化の度合は○印に比べ大分小さい。これも泥岩の場合と同様に、割れ目の開口量が凹凸の高さに支配されるため、応力の対数に対する透水性の線型的減少が確認された。また、泥岩と花崗岩の試験結果の比較より、その線型性を特徴づける主なパラメータとして凹凸の高さの他、岩石基質部の変形を特徴づける弾性係数のようなものが必要であることがわかった。

最後に砂岩における天然の割れ目について行なった実験結果をこれまでと同様の整理をした結果を図-10に示す。○印が1回目の载荷過程における結果であり、その後周圧を0まで下げ、ふたたび载荷した時の結果が●印である。泥岩、花崗岩の場合と同様に応力の対数に関する流量の1/3乗は線型関係にあることが確認された。

### 5. おわりに

以上の結果から、凹凸のある割れ目の変形特性を評価することにより得られた透水量と割れ目に作用する垂直応力との関係式(7)の適用性が実験的に確認された。

今後、次の2点について検討を行ない、多数の割れ目を持つ岩盤の構造特性とのカップリングを考慮する所存である。

(1) 応力に対する開口量と流量の1/3乗の変化の相似性より、開口量  $a$  と流量の1/3乗  $a'$  との間には  $a = \lambda a'$  なる関係が成立する。理論的には  $\lambda = (gD/12\nu)^{1/3}$  である。ただし流出断面積を  $A$  とすると  $D = A/a$  である。

(2) 透水性の応力依存性を表わした(7)式における定数の決定手法の確立。定数は、本報告からわかるように、割れ目表面の形状(凹凸の状態)と岩石基質部の力学特性(変形係数、強度など)に依存している。凹凸の状態については、様々な定量的な評価法が提案されているが、それらは一本一本の割れ目についての評価法であり、多数の割れ目を含む岩盤には適さない。

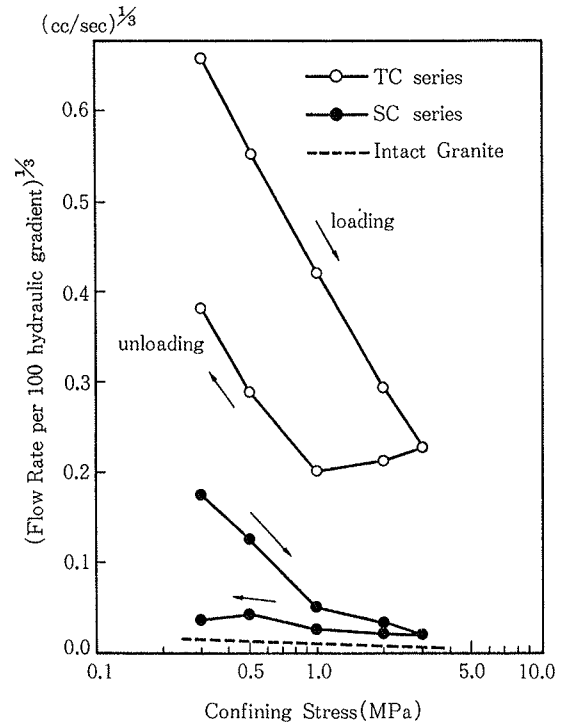


図-9 (流量)<sup>1/3</sup>～周圧の対数関係(花崗岩)

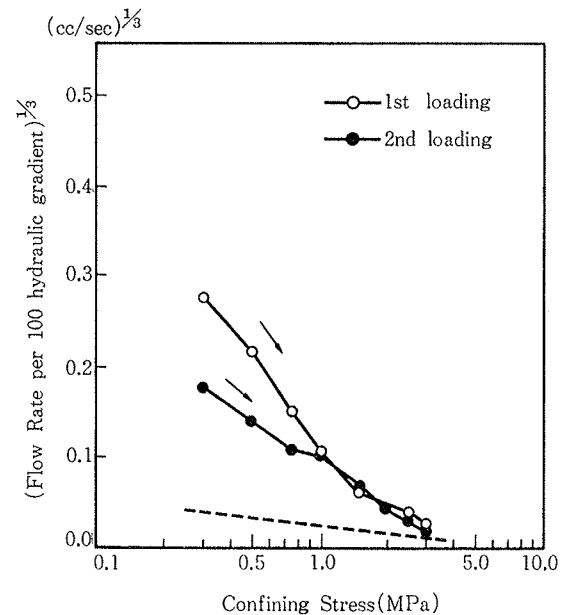


図-10 (流量)<sup>1/3</sup>～周圧の対数関係(砂岩)

### 参考文献

- 1) J. B. Walsh, M. A. Grosenbaugh: A New Model for Analyzing the Effect of Fractures on Compressibility, J. Geophys. Research, Vol. 84, No. 87, (1979), pp. 429~435
- 2) K. Iwai: Fundamental Studies of Fluid Flow through a Single Fracture, Ph. D. Thesis of Univ. of California Berkeley, (1976)
- 3) R. E. Goodman: Method of Geological Engineering in Discontinuous Rocks, West Publishing Co., New York, (1976)