

拘束圧下にある単一岩盤き裂の開口幅分布と透水特性†

楠見晴重* 金田俊哉**

西田一彦* 上枝和司***

Characterization of Aperture Distribution and Permeability
in Single Joints under Confining Pressure

by

Harushige KUSUMI*, Toshiya KANEDA**, Kazuhiko NISHIDA*
and Kazushi UEEDA***

Hydromechanical behaviour of rock masses is influenced in a decisive way by the presence of joints. It is largely responsible for the seepage occurring through the rock mass and is the most sensitive elements with respect to deformation under stress changes. Hydromechanical studies of fractured rock masses must therefore pay special attention to the role of joints and to correct assessment of their properties.

In this paper, an experimental study was carried out in granite specimens included a single joint with the purpose of obtaining the hydromechanical properties under hydrostatic stress conditions. The test results are then presented and analyzed, and the relationship between the roughness of joint surface and hydromechanical properties are discussed.

Key words : Single joint, Permeability, Discontinuity plane, Fractured rock

1 ま え が き

一般に岩盤にはき裂が多数存在しており、特に硬い岩盤では、岩盤の強度変形特性や透水特性は、き裂の方向、分布ならびにそれらの性状に支配されている。^{1), 2)} この中で、岩盤の透水特性、すなわちき裂の透水特性については、一般的にはき裂を平行平板のような単純化した三乗則が有名である。³⁾ しかしき裂面を平行平板のような単純な面で置き換えることには無理があり、一般的なき裂面は複雑な形状を有しており、その形状が少なからずき裂の透水特性に影響を及ぼしていることは明らかである。これらのことに関しては、いまだ不明な点があり、解明されなければならない問題が数多く残されている。岩盤の透水特性には、き裂の幅、間隔、方向などの幾何学的要素が影響を及ぼしており、またき裂そのものの内部構造を示す、その形状の粗さ、き裂の接触程度、開口部分などが透水挙動に大きな影響を与えている。

単一き裂の透水特性に対して様々な研究が行われているが、代表的なものでは、透水試験結果より得られる単一き裂を平行平板と仮定し、理論的な開口幅を表す水理学的開口幅を求め、実際のき裂変形の計測より得られる力学的開口幅との関係について議論されている。³⁾ しかし、計測されるき裂変形は間接的でありき裂内部の状態を十分に把握できておらず、単一き裂の透水特性に対してその形状が及ぼす直接的な影響は明らかにされていない。

本研究では、岩石供試体に人工的に単一き裂を作成し、拘束圧下において透水試験を行った。また、単一き裂を

有する供試体に対してせん断試験を行い、き裂形状に変化を与え、多種の形状について透水試験を実施した。き裂形状については、レーザー変位計を用いて、き裂を構成する両き裂面に対して計測を行い、それらのデータを重ね合わせることによって開口幅を算出している。このき裂形状計測結果に実際のき裂変形の測定結果を関連づけることによって、拘束圧下のき裂状態を開口幅分布を用いて表し、その統計量と透水性との関係について考察を行った。

2 実験方法

2.1 供試体

実験には稲田花崗岩を用い、供試体は、直径5cm、高さ10cmの円柱状に整形した。そのインタクト供試体7試料に対して圧裂試験を行い、ほぼ直径上にき裂を人工的に作成した。これらの供試体に対して Table I に示すような実験を実施し、105回の透水試験を行った。

2.2 透水試験

Fig. 1 は、高圧三軸試験機を改良した透水試験機の概略図を示している。透水試験は、変水位透水試験であり、透水压を供試体上面に作用させることによって、通水を行った。その際、応力状態は、拘束圧を 10kgf/cm^2 ずつ最大 50kgf/cm^2 まで作用させ等方圧状態とした。透水試験は各拘束圧下で行った。この透水試験結果で、一定の透水量を流し、その透水時間を計測し、流量を求め、透水係数を式 (1) より算出した。

$$k = \frac{q}{wf} \quad (1)$$

† 原稿受理 平成 10 年 7 月 14 日 Received July 14, 1998

* 正会員 関西大学工学部土木工学科 〒564-8680 吹田市山手町, Dept. of Civil Eng., Kansai Univ., Yamate-cho, Suita, 564-8680

** アジア航測 関西コンサルタント部 〒564-0063 吹田市江坂町, Dept. of Kansai Consultant, Asian Air Survey, Co., Ltd., Esaka-cho, Suita, 564-0063

*** 関西大学大学院 〒564-8680 吹田市山手町, Graduate Student, Kansai Univ., Yamate-cho, Suita, 564-8680

Table I. Diagram of testing procedure.

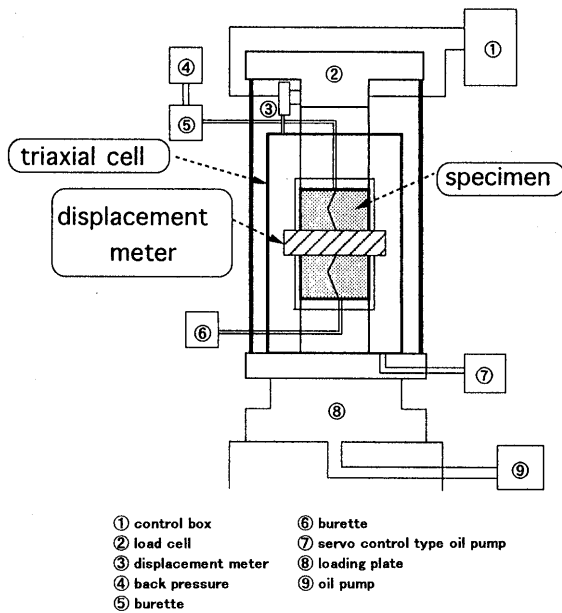
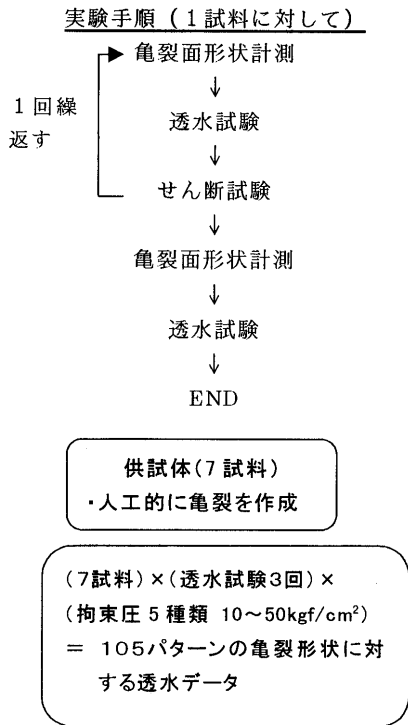


Fig. 1. Testing apparatus.

ここで, q : 流量

w : き裂幅

J : 動水勾配

また, 応力状態の変化によるき裂に対する直角方向の変位をカンチレバー型直径変位計によって測定した。なお, 様々な形状のき裂を作成するため, 直接一面せん断試験機によってせん断試験を各供試体に対して行った。せん断試験は, き裂面の形状を変化させるために実施した。

2・3 き裂面形状測定

Fig. 2 は, き裂面形状測定装置を示している。X-Y ステージ上に設置したレーザー変位計によって, き裂面の

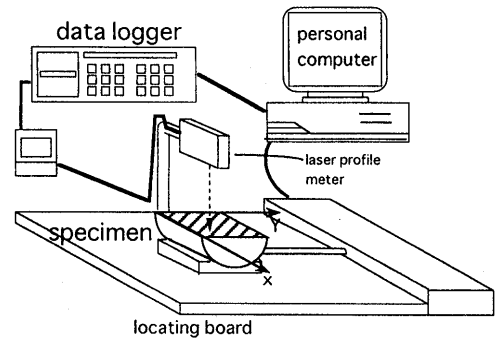


Fig. 2. 3-D roughness profiler.

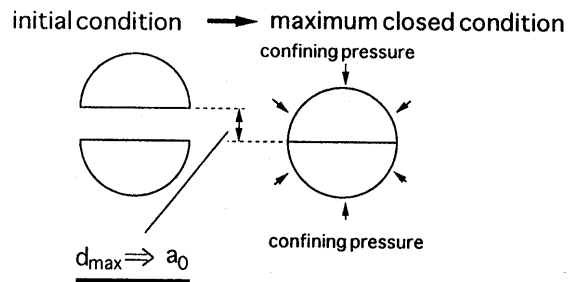


Fig. 3. Representation of initial aperture.

凹凸高さを計測した。図中に示すように X 軸方向に 50mm, Y 軸方向に 100mm のき裂面全域について, 1mm 間隔の格子状に凹凸高さを計測を行うことによって, 約 5000 点の計測データが得られた。これらの計測データより, き裂を構成する両き裂面のそれぞれの同一計測点のデータを重ね合わせることによって, 便宜的に各点の開口幅を算出した。この際, 最小値を示す開口幅を 0 とし, またこの点は接触しているものと考え, この点を基準に各点の開口幅を求めた。

3 解析方法

拘束圧下のき裂内の状態を把握するためには, 各供試体において拘束圧が作用する前のき裂状態を把握する必要がある。Elliot²⁾ は, 透水試験結果とき裂変形計測より, き裂の初期状態を示すものとして初期開口幅を定義している。この概念は, 単一き裂に対してまず, 透水試験結果から得られる流量より, 式 (2) を用いて水理学的開口幅 e が算出される。

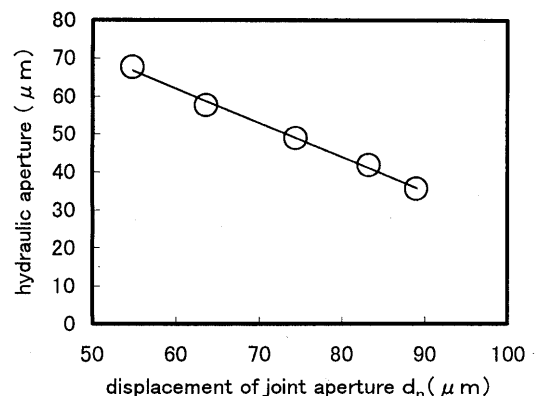


Fig. 4. Relation between e and d_n .

$$e = 3 \sqrt{\frac{12q\nu_w}{gJw}} \quad (2)$$

ここで、 e : 水理的開口幅

q : 流量

ν_w : 動粘性係数

g : 重力加速度

J : 動水勾配

W : き裂幅

次に、Fig. 3 に示すように、応力作用によるき裂の最大閉塞状態で水が流れなくなると考え、各拘束圧下のき裂変位 d_n を求め、水理的開口幅 e との線形関係より、 $e = 0$ のときの最大き裂変位 d_{max} を求め、初期開口幅と定義する。Fig. 4 は、本研究における水理的開口幅 e とき裂変位 d の関係を示したものである。き裂変位 d_n が増加するにしたがい、水理的開口幅 e は減少している。また、これらの関係を式 (3) で直線近似し、最大き裂変位 d_{max} を求め、各供試体の初期開口幅 a_0 を定義した。 F は係数、 e_m は切片である。

$$e = -F \cdot d + e_m \quad (3)$$

各拘束圧下の開口幅は、式 (4) に示すように算出した初期開口幅 a_0 からき裂変位 d_n を差し引くことによって求められ、力学的開口幅 a_n が得られる。

$$a_n = a_0 - d_n \quad (4)$$

き裂形状計測結果を用いて得られたき裂の開口幅は、き裂が一点のみで接触した場合を仮定しているの、応力が作用していないき裂の初期状態を示す開口幅であると考える。この開口幅の初期状態と、透水試験結果より得られたき裂の初期状態を表す初期開口幅が同一状態を示すと仮定し、これらに関連づけて拘束圧下のき裂の開口幅の状態を定義した。以下にその方法を示す。

① き裂面形状測定より得られたデータを便宜的に重ね合わせることによって、き裂面全域について 5000 点の開口幅データ A_i が得られる。そのデータより各供試体について、開口幅の平均値 A_{ave} が式 (5) より算出される。なお、この A_{ave} は、拘束圧が作用していない初期状態を表していると仮定する。

$$A_{ave} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N A_i \quad (5)$$

② 各供試体のき裂変形の特徴を取り入れるため、初期開口幅 a_0 と力学的開口幅 a_n を用いて、初期状態の開口幅から各拘束圧における開口幅への変化率を式 (6) で表す。この変化率は、拘束圧下におけるき裂の平均的な変化を表していると考えられる。

$$(\text{力学的開口幅の変化率}) = \frac{a_0 - a_n}{a_0} \quad (6)$$

③ 実際のき裂状態を示していると考えた開口幅の平均値 A_{ave} に実際のき裂変形を表すと考えられるき裂の変化率 $\frac{a_0 - a_n}{a_0}$ を乗ずることによって、き裂閉塞量 b_n が式 (7) より算出される。この b_n は、 A_{ave} より求められるため、き裂の約 5000 点の開口幅についての平均的なき裂閉塞量であると考えられる。

$$b_n = A_{ave} \times \frac{a_0 - a_n}{a_0} \quad (7)$$

④ Fig. 5 に示すようにき裂の全計測点について拘束圧による局所的な変化が起こらないと考え、各点の形状計測データ A_i よりき裂閉塞量 b_n を減じることによって、各拘束圧下における各計測点の開口幅 A_i^* が、き裂面の 5000 点について式 (8) より算出され、これを数値的開口幅と定義する。なお、 A_i^* が負の値となるものはき裂が接触しているものとみなした。

$$A_i^* = A_i - b_n \quad (8)$$

以上の解析結果より、各拘束圧下のき裂内の状態を接触部分と開口部分によって表すことができる。

4 実験結果

数値的開口幅 A_i^* が負の値となった計測点を接触点とみなし、その全接触点数を用いて、各拘束圧下における両き裂面の接触率 CR (Contact Rate) を次式によって定義した。

$$CR = \frac{N_{CR}}{N} \times 100 \quad (9)$$

ここで、 N_{CR} : 接触点数

N : 全計測点数

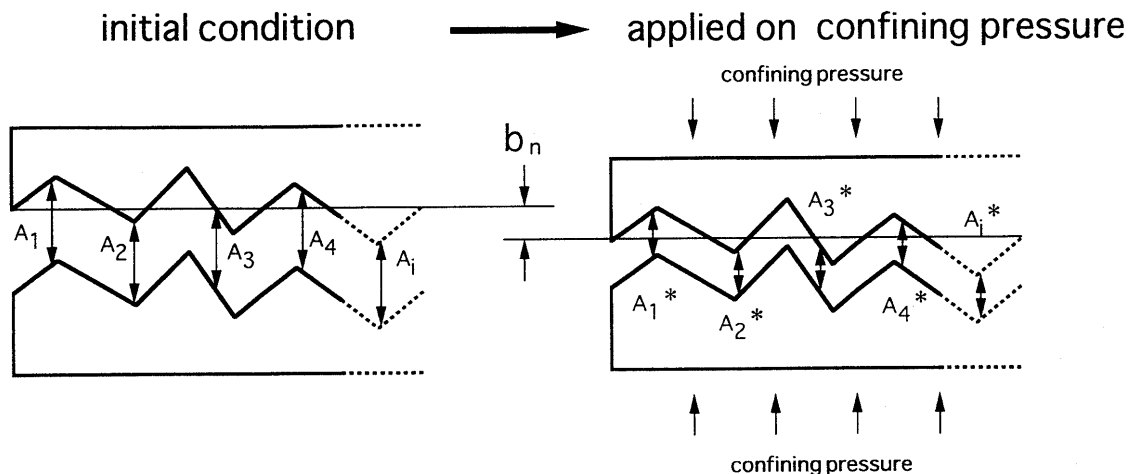


Fig. 5. Concept of numerical aperture.

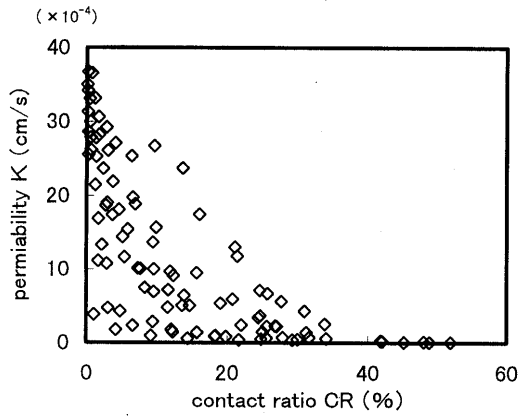


Fig. 6. Relation between K and CR.

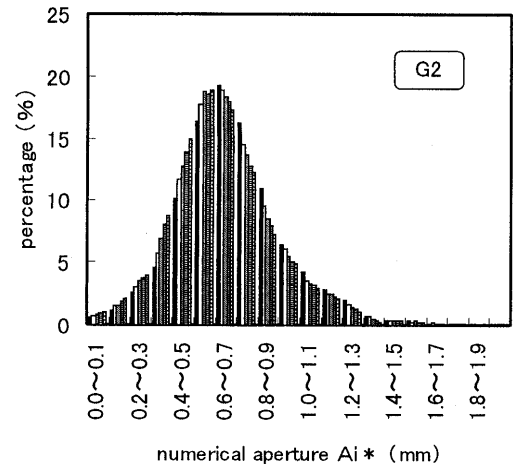
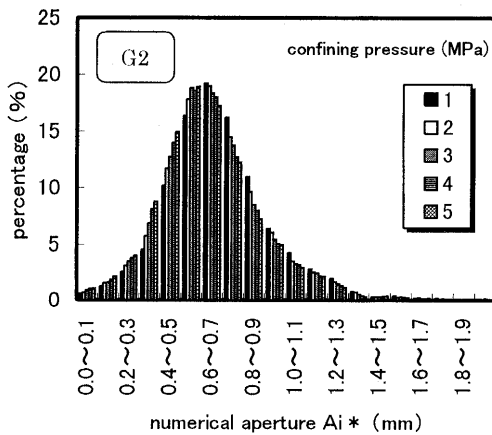
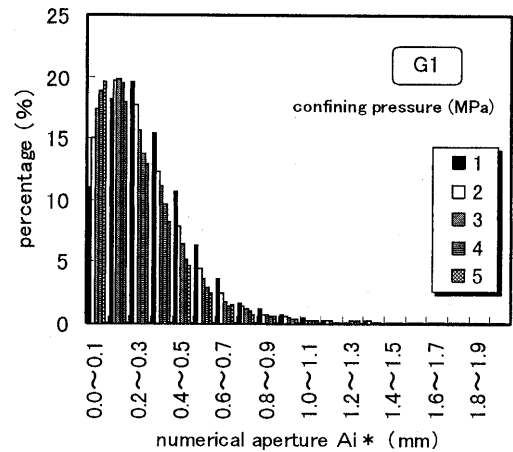


Fig. 7. Distribution of numerical aperture before shearing.

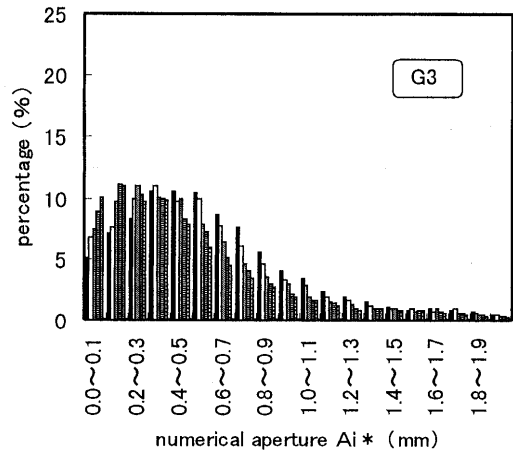
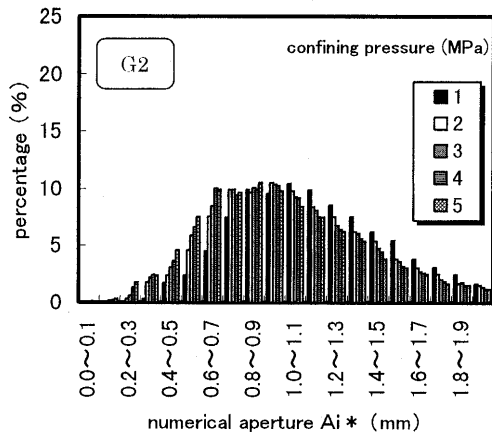


Fig. 9. Distribution of numerical aperture under each confining pressure.

Fig. 8. Distribution of numerical aperture after shearing.

Fig. 6 は、全供試体における接触率と透水係数の関係を示したものである。接触率が増加するにしたがい透水係数が減少しているが、接触率が低い場合には、透水係数に大きなばらつきがみられる。また、そのばらつきは、接触率が増加することによって小さくなっている。このように、単一き裂の透水性に対して、接触率が大きければその影響は強く、透水性は低くなることが十分予測できる。接触率が小さい場合すなわちき裂が開いている場合には、その影響は明らかでない。

き裂の開口部分が透水性に与える影響を評価するため、数値的開口幅を用いて各供試体について各拘束圧ごとにその頻度分布を表した。Fig. 7, 8 はせん断前後により大きな変化がみられた供試体の、垂直応力をパラメータとしたときの数値的開口幅の頻度分布を表している。これらの図より、全体的には分布型は、せん断前後では、大きな変化は見られない。しかし、最頻値における頻度は、せん断前に比べてせん断後の値は、小さくなっていることが認められ、数値的開口幅の分布が広範囲となっている傾向がある。

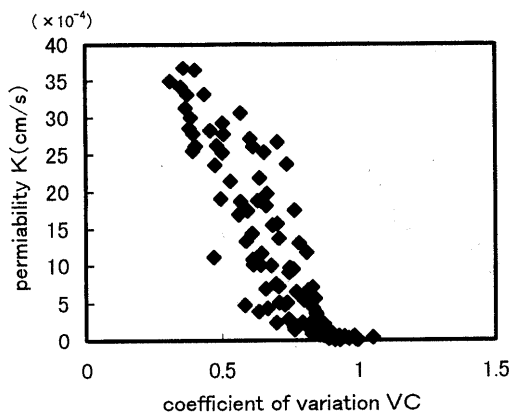


Fig. 10. Relation between K and VC.

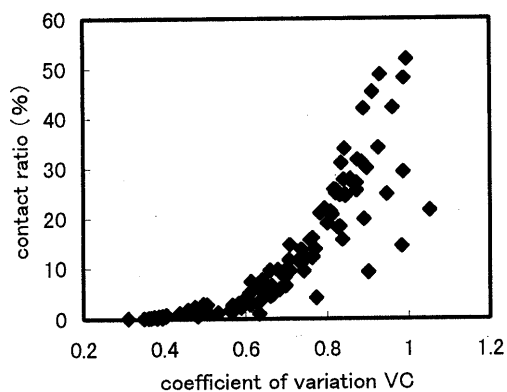


Fig. 11. Relation between contact ratio and coefficient of variation.

Fig.9は、頻度分布の大きく異なった3つの供試体の数値的開口幅の頻度分布を示したものである。これらの供試体において、拘束圧の増加に対してその分布性状が変化していることが分かり、各供試体ごとに特徴的な分布性状がみられる。今回用いた全供試体についても、同様にそれぞれ異なった分布性状を示しており、透水性と関連があると考えられる。そこで、各供試体の数値的開口幅の分布性状の違いを定量的に表すため、変動係数を次式より算出した。

$$VC = \frac{s^*}{A_{ave}^*} \quad (10)$$

$$s^* = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (A_i^* - A_{ave}^*)^2} \quad (11)$$

ここで、VC : 変動係数

s^* : 標準偏差

N : 全計測点数

A_i^* : 各測点の数値的開口幅

A_{ave}^* : 数値的開口幅の平均値

Fig. 10は、全供試体について数値的開口幅の変動係数と透水係数の関係を示したものである。この図より、変動係数が増加するにしたがい、透水係数が減少していることが分かる。変動係数は、次元あるいは平均値が異なるデータ間のばらつきを比較することができ、その値が

大きければその分布が大きくばらついていると考えられる。したがって、数値的開口幅が大きくばらつくほど単一き裂の透水性は、低下すると考えられる。

Fig. 11は、変動係数と接触率の関係を示したものである。変動係数が増加するにしたがい接触率も増加しており、これらの関係は非線形的な関係であるといえる。透水性に影響を与える因子は、そのき裂閉塞状況により異なり、接触率が小さい場合には、変動係数がよりき裂の透水性に影響を与えていると考えられる。また、接触率が大きくなると開口部分は様々な大きさの開口幅で構成されると推測される。すなわち、単一き裂内の透水性は、き裂が開いている場合には、そのき裂の開口部の形状に支配されるが、き裂が閉塞するにしたがい、き裂の接触部分と開口部の形状の変化の両者がき裂の透水性に影響を及ぼすと考えられる。

5 ま と め

単一岩盤き裂の透水特性に対して、そのき裂形状が影響していることは明らかであり、本研究ではその形状の一つである開口幅に着目した。また、非接触型のレーザー変位計より直接的に得られたデータと岩石供試体の実際の変形より算出したき裂変位を関連づけることによって、拘束圧下のき裂状態を表す開口幅と接触部分について、数値的開口幅と接触率という新たな指標を提案した。さらに、数値的開口幅の統計量を用いて、各供試体の開口幅分布の特徴を定量化し、これらのき裂形状の評価値と単一岩盤き裂の透水性の関係を検討した。以下に結果をまとめる。

単一岩盤き裂の透水性は、透水係数で表した。その透水係数は、今回定義した接触率が大きいほど小さくなったが、接触率が小さい場合には透水係数にばらつきがみられ、き裂の接触程度の違いによって透水性に与える影響が異なることが認められた。数値的開口幅については、その頻度分布から得られた統計値である変動係数と透水係数の関係より、変動係数が増加するほど透水係数は小さくなり、数値的開口幅の大きさにばらつきがみられるほど、透水性が低下すると考えられる。単一岩盤き裂の透水性を左右する影響因子は、接触部分と開口部分であることが分かった。特に、開口幅の大きさのばらつきは透水性に影響を及ぼし、き裂の接触部分が増加すると開口幅の大きさのばらつきも大きくなり、透水性はこれらの影響を相乗的に受け、非常に低くなることが分かった。

参 考 文 献

- 1) C. Louis, "A steady of groundwater flow in jointed rock and its influence on the stability of rock masses. Ph. D. thesis", (1968) Univ. of Karlsruhe.
- 2) G. M. Elliot, E. T. Brown, P. I. Boodt and J. A. Hudson, Proc. Int. Symp. on Fundamental of Rock Joints, 249 (1985).
- 3) P. A. Witherspoon, J. S. Y. Wang, K. Iwai and J. E. Gale, Water Resources, 16, 6, 1016 (1980).