

岩盤不連続面の表面形状と透水係数に関する研究

A Study on Relation Between Permeability and Surface Morphology Characteristics of Rock Discontinuities

清水 泰弘*・立松 秀樹**・アイダン・オメル***・渡嘉敷 直彦****

Yasuhiro SHIMIZU, Hideki TATEMATSU, Omer AYDAN, Naohiko TOKASHIKI

Abstract

It has been great importance for assessing the stability of underground structures in discontinuous rock mass to estimate the hydraulic and the mechanical properties of discontinuous rock mass. This paper presents the relation between permeability and surface morphology characteristics of rock discontinuities created in granite samples. In this research, permeability test and measuring surface profiles of the discontinuities in rock specimen using laser profilometer are carried out to investigate the hydrological characteristics of discontinuous rock mass. The experimental results are presented and discussed.

1. まえがき

土木構造物が岩盤内部に及ぶにつれて、不連続面を内包する岩盤の水理・力学特性の解明は、重要な問題となっている。例えば廃棄物の処分あるいは放射性廃棄物の貯蔵処理、エネルギー備蓄としての石油地下貯蔵、貯水池やダムへの遮水性の検討あるいはトンネルの湧水の予測等さまざまな問題がある。岩盤の水理特性は、岩盤内に存在する不連続面に大きく支配され、そのモデル化に際しては、岩盤中の不連続面の幾何学特性の解明が必要となってくる。

本研究では、岩盤不連続面の表面形状と透水性の関係に着目し、花崗岩を用いた供試体を割裂して不連続面を作成し、自然な不連続面の状態に近い岩盤不連続面の表面形状と透水係数の関係を明らかにする事を目的とする。この研究では、岩盤不連続面の水理学的特性を明らかにするため、これまでに行なった透水実験¹⁾で得られた各供試体の間隙幅の、より正確な測定と定水位法による不連続面の透水試験およびレーザー式変位計による不連続面の表面形状の測定とその定量化についてまとめ考察を加えた。

2. 実験方法

本実験で使用する透水実験装置は、荷重装置と透水試験器に分かれている。透水試験器は人工的に不連続面を作成した供試体の4側面を不透水面として包括し、不連続面の間隙幅を変化させて透水試験を行なうこ

* 正会員 名城大学助教授 理工学部土木工学科
** 学生会員 名城大学大学院理工学研究科
*** 正会員 東海大学助教授 海洋学部海洋土木工学科
**** 正会員 琉球大学助教授 工学部環境建設工学科

とができるように設計された装置である。荷重載荷装置は不連続面に対して垂直方向に荷重を任意に加えることができる装置である。また、表面形状の測定には、透水実験後に不連続面で分離した供試体を非接触で計測することのできるレーザー式変位計を用いた非接触型表面形状記録装置を使用した。

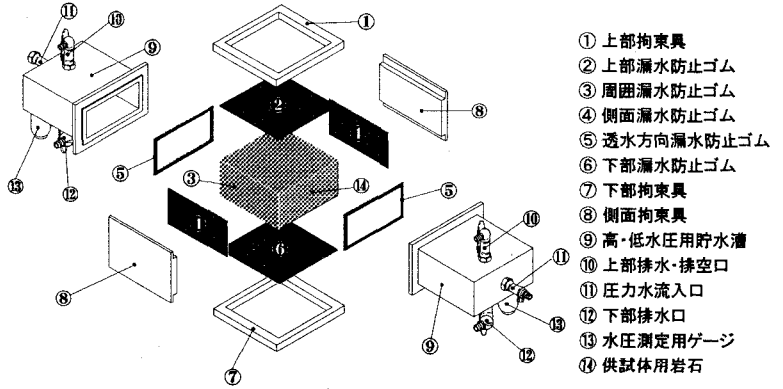


図-1 透水試験器の分解図

3. 岩石供試体

岩石供試体には荒目、中目、小目と呼ばれる結晶粒子の大きさが異なる3種類の岐阜県蛭川産の花崗岩を各2個ずつ使用して実験を行なった。供試体の各名称は粗目を99L-1と99L-2、中目を99M-1と99M-2、小目を99S-1と99S-2とする。実験に用いた花崗岩の物性を表-1に示す。単位体積重量が平均25.5kN/m³、一軸圧縮強度が平均127MPa、含水比は0.19%である。それぞれの供試体は、縦200×横200×高さ100mmの大きさで、供試体高さの水平方向に石の目が在るように成形した。

透水経路となる不連続面は、供試体の側面に鋼製のくさびをあてがい、そこに荷重をかけて圧裂により亀裂を生じさせ、自然状態に近いと思われる不連続面を人工的に形成した。なお、このとき拘束圧を分離面に垂直にかけて、分離割裂した供試体は不連続面が分離しないよう慎重に取り扱った。

4. 透水試験

割裂した供試体を図-1に示すように、約600×250×150mmの大きさの、試験器内部に供試体を配置、上下左右の周囲4面を硬質ゴム・生ゴム管(周辺長さ約500mm)で包み込み、試験器本体のステンレス製枠と岩石供試体との間の寸法誤差によって生じる隙間からの漏水を防止した。また、供試体の不連続面の両側端部は、ゴム端部をパテによりコーキングを行い水路にならないようにした。パテの硬化後、透水試験器を荷重載荷装置上に置き、加水圧用貯水槽を完全に満たすまで注水した。次に加水圧用ビニール管を接続し、水圧

表-1 岩石供試体の物性

	粗目	小目	中目
一軸圧縮強度(MPa)	119.58	103.14	145.97
含水比(%)	0.20	0.15	0.22
単位体積重量(kN/m ³)	25.03	25.11	25.27

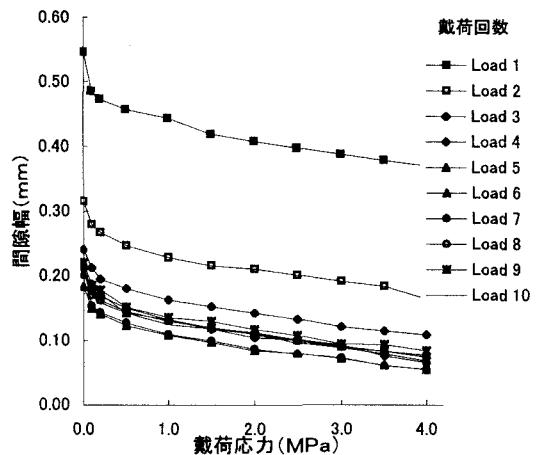


図-2 載荷回数による間隙幅の変化

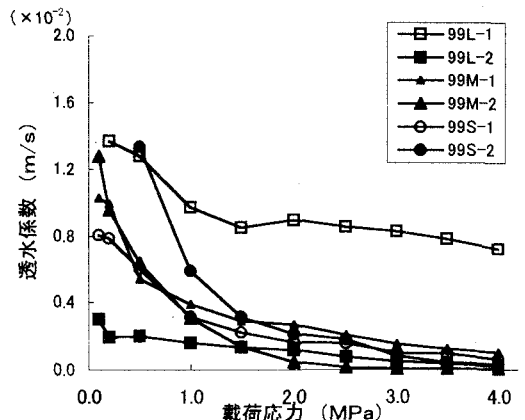


図-3 載荷応力-透水係数(水圧0.1MPa)

ポンプ（最大出力=1MPa）および20ton型ロードセル等を配置した。上下の拘束荷重には50tonの油圧ジャックを用いた。透水実験に使用する加圧水には、水中の気泡を取り除いた脱法水を使用した。

透水実験は定水位試験法で、水圧ポンプにより岩石供試体の注水口と流出口との間に水頭差をつくり、不連続面に対し1方向流れを生じさせ、透水量を計測した。水圧は注水側の値を最高0.4MPaとして段階的に変化させた。また垂直荷重は最高4MPaとして段階的に変化させ、間隙幅の増減による透水量の変化を調べた。透水係数 K は不連続面を平行な平板としてダルシーの法則、 $Q = KAI$ より算出した。ここに Q = 流量 (m³/s)、 A = 断面積 (間隙幅 × 供試体幅)、 I = 動水勾配とする。

また、透水係数を求める上で必要となる間隙幅は、荷重の繰り返し回数によって図-2の様に変化をことが分かった。この図から荷重一回目から二回目の間隙幅の変化が最も大きくなり、以下回数を重ねるごとに変化の度合いが減少していくことが見られる。これは、割裂によってつくられた不連続面内で、その作成段階において発生した破砕片等により当初かみ合いが悪く、荷重回数を増すにつれ破砕片が細分化あるいは移動していくことが考えられる。このことから透水実験には、荷重回数によって荷重応力-間隙幅曲線の値がほぼ収束したと思われる、荷重4回目以降の供試体を使用した。実験によって得られた透水係数は図-3のようである。垂直荷重の増加によって、どの供試体でも透水係数が減少している事がみられる。全体的に見ると荷重後1.0MPaにいたるまでの減少の度合いが大きい。これは測定した間隙幅の減少も同様である。

5. 間隙幅の測定

不連続面の間隙幅は割裂直後、透水試験器による拘束あるいは拘束の解除などの各条件によって変化する。そこで、拘束状態の間隙幅を測定するために、透水実験終了後に透水器の高水圧・低水圧の水槽を取り外した状態で、透水実験と同一の荷重を行い、間隙幅の変化をマイクروسコープ（最小目盛0.01mm）を用いて直接測定した。測定箇所は供試体の注水側、流出側それぞれ各5点ずつで計10点を取り、それぞれ平均値をもとめた。その計測結果を図-4に示す。この図から荷重の増大によって間隙幅が減少していくことがわかり、特に荷重後1.0MPaまでの間に大きく間隙幅が減少し、その後は徐々に減少していくことがわかる。

6. 不連続面の表面形状測定

不連続面の表面形状を計測するための測定装置は、1400×840×760mmの大きさで鋼製の枠組みの中に計測

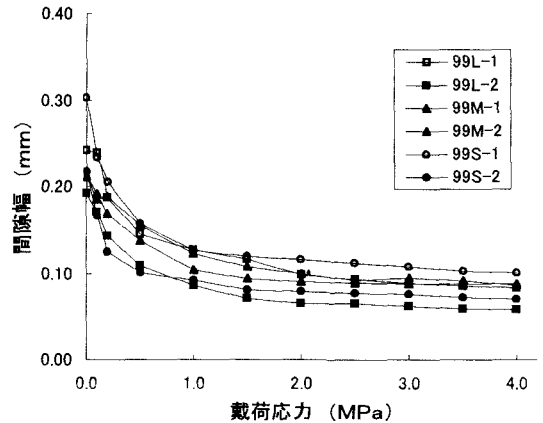


図-4 各供試体の載荷応力-間隙幅

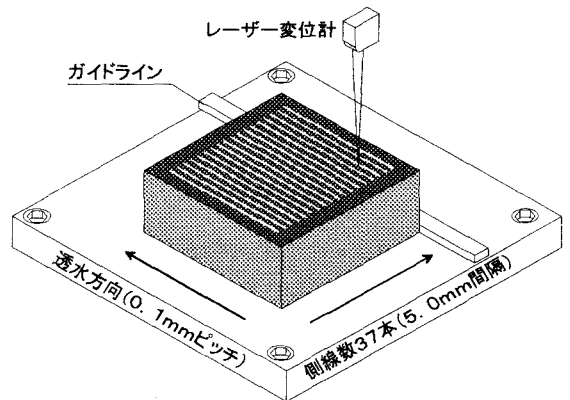


図-5 レーザー変位計による形状測定

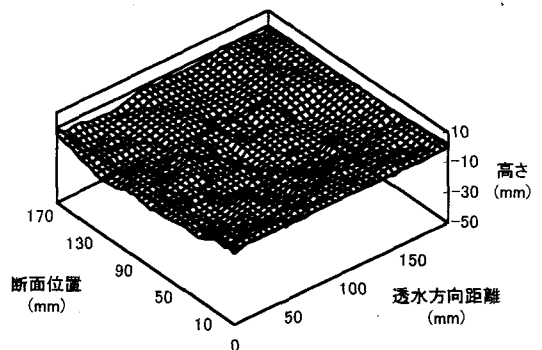


図-6 不連続面の表面形状 (99M-1)

部と岩石試料取出し部を持ち、枠組みの上部に水平移動用のスケールセンサ（分解能 0.1mm）と非接触型のレーザー式変位センサを取り付けマイコン制御で測定するものである。枠組みの中には 1200mm の長さのレールがあり、その上にある図-5 に示す 500×500mm の岩石試料台があり、岩石試料を固定して計測を行なう。

レーザー式変位センサは、キーエンス製の LB60 型で半導体レーザーを用いた高低計測範囲が±40mm、分解能が 40μm のものである。また、測定距離にはキーエンス製の光スケールセンサーで分解能が 0.1mm (1 パルスあたり) のものを用いた。計測は 0.1mm 間隔でデータの採取を行い自動的に計測し、パソコンに記録する。供試体の計測方向と直角方向の移動にはデジタルスケールを設置して計測間隔を 1/10mm までの精度で移動できるようにしてある。

供試体を分割する際に、不連続面作成時に発生した微破砕片の剥離や移動を極力最小限に抑えるように努めた。不連続面の表面形状のかみ合わせを調べるために上下両面について計測を行なった。側線は分割された供試体片面につき長さ 18cm の測線を 5mm 間隔で 1 方向に 37 本、上下面の同じ位置に設けた。また、岩石供試体の端部 1cm は、不連続面作成時のくさびによる破損、透水試験器組み立て時のコーキング剤の不連続面への流入などの理由により、亀裂部の損傷があり真の間隙幅ではないと考えられたため、計測からは除外した。表面形状の一例を図-6 に示す。

計測した不連続面の上下のかみ合わせ状態の評価として上下面の凹凸の相関関数とかみ合わせ係数²⁾を表-2 に示す。これらの値は上下に分割した供試体にズレがなくかみ合わせ位置が一致していることを条件に求められている。相関関数は 0.982~0.882 と供試体によってばらつきが見られる。

間隙幅を求めるためには測定した不連続面の上下両面の位置関係を決めなければならない。そこで上下各不連続面の表面形状の波形を徐々に接近させ、図-7 (a) のように、ある地点で最初に接地した状態を仮定して間隙幅を算定した。この算定方法は接地点を除いて不連続面全体を間隙幅とすることができるので、接地点以外はすべて透水可能領域とすることができる。しかし、当然のことながら不連続面がただ一地点のみで接触していることになり、実際の接地状態とは異なる。また不連続面の全面が透水部分であるとは考えにくく、部分的な透水経路（チャネリング）という観点からも多数の接触点をもつと考えられる。そこで、図-7 (b) のように不連続面の上下位置関係を割裂前の高さを基準にした状態を考える。その条件において理論上間隙幅は測定全域についてゼロになっている

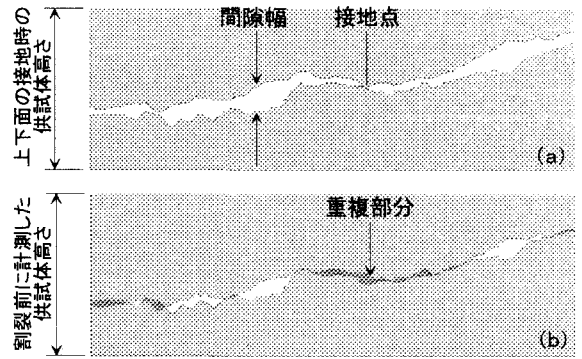


図-7 供試体の間隙幅の上下の基準位置
(a)接地したときを基準 (b)割裂前の供試体高さを基準

表-2 不連続面のかみ合わせ評価

	99L-1	99L-2	99M-1	99M-2	99S-1	99S-2
上下面の相関関数	0.894	0.971	0.938	0.882	0.982	0.960
かみ合せ係数	0.888	0.914	0.908	0.893	0.745	0.887

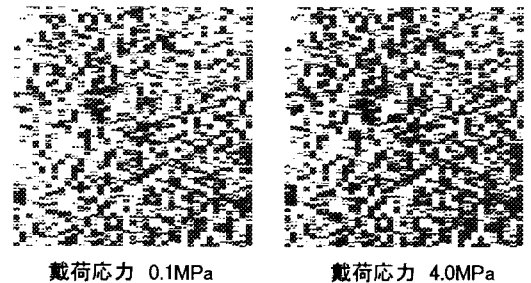


図-9 透水経路の部分的経路の一例
(供試体 99L-1)

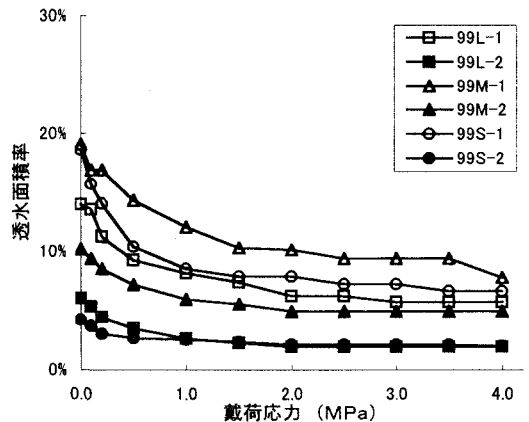


図-10 載荷応力-透水面積率
(チャネリング)

はずであるが、測定の結果では完全にはかみ合わず何割かの部分が閉合しなかった。同図にみられる不連続面の重複部分は計測誤差などと考えられる。そこに図-3に示した間隙幅に合せて不連続面を上下に移動させたものを、垂直載荷ごとの部分透水経路して、間隙部分を透水可能領域、閉合している部分を透水不可能領域として二次元的にパターン化をしてみると図-9のようである。白い部分は透水可能領域、黒い部分は透水不可能領域を示す。これらの垂直載荷ごとの透水不可能領域を全不連続面積の割合を図-10に示す。垂直載荷による透水面積率の減少という点においては間隙幅とほぼ同じ傾向があり、載荷後 1.0MPa までの間に大きく間隙幅が減少し、その後は徐々に減少している。

7. 不連続面の表面形状の定量化

岩盤不連続面の表面構造の幾何学的特性を示すためには、表面高さ、平均傾きなど指標^{3) 4)}が必要となる。そこで、これら不連続面を計測に基づいて表面形状の定量化を行い結果を表-3に示した。CLAHの値から不連続面の水平面に対する歪曲状態がわかり、平均して粗目の値が大きいことがわかる。WAIとRPLは結晶粒子の大きさの違いにより凹凸が大きくなり、粗目の値が大きくなっている。

表-3 表面形状の定量化の結果

	99L-1	99L-2	99M-1	99M-2	99S-1	99S-2
CLAH	1.23	1.60	1.24	0.80	0.82	0.89
WAI	23.64	22.63	21.05	19.68	18.22	18.49
RPL	1.16	1.15	1.13	1.12	1.10	1.10

CLAH(mm) : 不連続面平均高さ (Center-Line Average Height)
WAI(°) : 不連続面傾き平均 (Weighted Asperity Inclination)
RPL : 不連続面の直線長さ (PL) の比 (Rate)

8. まとめ

本研究では、結晶粒子の粗さの異なる岩石供試体を用いて人工的に割裂を行い、不規則的な自然に近い状態の凹凸形状を持たせて、不連続面の透水特性および表面形状の測定とその関連性についての実験的研究を行なった。実験により、載荷応力によって間隙幅を減少させていくと、透水係数の値も減少した。特に載荷後 0.1MPa に至るまでに減少の度合いが大きい。また、不連続面の表面形状を計測してそのかみ合わせを調べ、透水流路を不連続面全面とせず部分的経路であると考え、透水領域と不透水領域に分け二次元的にパターン化した。不連続面全面積に対する透水領域の面積率を垂直載荷ごとに求めたところ、載荷後 1.0MPa までの間に大きく間隙幅が減少し、その後は徐々に減少した。

9. 参考文献

- 1) Y. Shimizu, H. Tatematsu, O. Aydan : The Relation Between Permeability and Surface Roughness of Rock Discontinuities, Proceeding of the 10th Japan Symposium on Rock Mechanics, pp. 97-102, 1998.
- 2) 楠見晴重, 酒井崇, 西田一彦, 中村均史 : 岩盤不連続面の噛み合わせと定量的評価とそのせん断強度式への適用性, 第29回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp. 131-135, 1999.
- 3) O. Aydan, Y. Shimizu : Surface morphology characteristics of rock discontinuities with particular reference to their genesis, Fractography : Fracture topography as a tool in fracture mechanics and stress analysis, Geological Society Special Publication, No. 92, pp. 11-26, 1995
- 4) Y. Shimizu, O. Aydan, T. Kawamoto : The effect of measuring methods on surface morphology characteristics, Proceeding of Korea-Japan Joint Symposium on Rock Engineering, pp. 231-236, Seoul, Korea, 1986.