

(54) 岩盤不連続面の表面形状の計測とその特徴

国立環境研究所 正会員 木村 強

九州大学工学部 " 江崎哲郎

Measurements and Characteristics of Surface Roughness of Fractured Rocks

Tsuyoshi KIMURA

National Institute for Environmental Studies

Tetsuro ESAKI

Faculty of Engineering, Kyushu University

Abstract

The mechanical and hydraulic properties of rock fractures strongly depend on the surface conditions. Two sets of apertures between the both surfaces of fractures were obtained by measuring the surface roughness with a laser displacement meter. The apertures between matched surfaces obeyed a normal distribution, and ones between unmatched surfaces a log-normal distribution and so on. Flow through a fracture system with the obtained apertures was calculated using the finite differential method. The results show that the effect of flow path tortuosity on flow rates increases with increasing closure of the rough surfaces. This tortuosity causes anisotropy in flow. In addition, it was indicated that the relationship between Q/Q_a and d_m/σ is independent on the degree of surface correlation, where Q is a flow rate calculated considering path tortuosity, Q_a one calculated using the arithmetic average of apertures, d_m a mean separation between the surfaces, and σ the standard deviation of apertures.

1. まえがき

岩盤内には数多くの不連続面（割れ目）が存在し、その接触および隙間の状態により岩盤の力学的性質、水理学的性質が規制される。このため、割れ目の表面形状を考慮した力学モデルや水理学モデル、さらには力学-水理学の連成モデルが提案されてきた。例えば、Gangi¹⁾は、平行平板の間に長さの異なる多数のロッドを介在させた“bed of nails”モデルを提唱している。そのモデルでは、割れ目の閉塞は凹凸の弾性圧縮に起因し、载荷初期段階の低剛性は、数少ない凹凸の接触のために生じる。彼は、このモデルによって、割れ目に作用する有効応力と割れ目の閉塞量の関係を見出し、これをもとに有効応力と透水性の関係を導出した。TsangとWitherspoon²⁾は、割れ目中の空隙を細長い楕円形クラックとみなし、その弾性変形に基づいて、割れ目の剛性から隙間幅の分布が得られることを示している。また、ElsworthとGoodman³⁾は、割れ目のプロファイルをサイン波およびのこぎり波で理想化し、せん断変位を伴う割れ目の透水性を議論している。これらのモデルでは、表面形状あるいは隙間幅の特徴を厳密に考慮していないのが欠点である。渡辺と星野⁴⁾は、隙間幅が一様分布であることを仮定して、また実際に計測した隙間幅の分布をもとに数値実験を行い、表面形状の粗度が大きくなると透水係数は、隙間幅の算術平均から予想されるものよりも大きく低下することを指摘している。ただし、彼らの数値実験では、隙間幅が所定の分布になるように乱数によって割れ目のモデルを作成しており、そのため隙間の連結性の取り扱いが曖昧になっている。

本研究では、まず実際の割れ目両面の形状を2次元的に計測し、それらを重ね合わせることで隙間幅を求めた。次に、その隙間幅の分布を用いて数値シミュレーションを行い、割れ目の垂直変位に伴う水理学的挙動を検討した。

2. 凹凸の計測方法

計測に用いた岩石は、砂岩および花崗岩の2種類である。直径30mm、高さ30mmの円柱形岩石に、圧裂引張によって人工的な割れ目を作成し、それぞれ1組ずつの試験体を用意した。次に、試験体を2軸可動式の微動ステージ（ニコン製：作動範囲50mm×50mm、精度1 μ m）の上に置き、円柱形の軸方向（X軸）に20mm、それと直角な方向（Y軸）に20mmの範囲で表面形状を計測した（図-1を参照）。そのとき、X軸方向およびY軸方向にそれぞれ直線的に0.1mmの間隔で読み取る1次元計測と、平面的に1mm×1mm間隔で読み取る2次元計測を実施し、これを割れ目の両面について行った。これらの凹凸の計測には、非接触タイプのレーザー変位計（キーエンス製、LCシリーズ：測定範囲 $\pm$ 8mm、スポット径0.1mm、分解能0.5 μ m）を用いた⁵⁾。

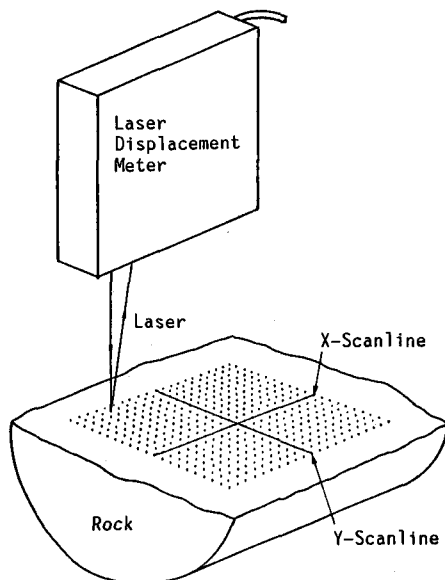


図-1 凹凸の計測

3. 計測結果

砂岩のY軸方向に計測したときのプロファイルおよび隙間幅を図-2に示す。また図-3には、砂岩の2次元計測による隙間幅の分布を示す（隙間幅を5倍に誇張している）。割れ目両面の凹凸を用いて、初期（割れ目を開く前）の隙間の状態を再現するには、まず、それぞれの面で計測した位置が2次元的に完全に一致していなければならない。このことを調べるために、両面において計測位置が同じとした凹凸について相関係数 ρ を求めると、2次元計測の砂岩では $\rho = 0.977$ 、花崗岩では $\rho = 0.840$ であった。また以下に述べる標準偏差の値から、砂岩については、計測の位置は割れ目の両面でほぼ一致しており、これらの凹凸分布をそのまま重ねることで、割れ目を開く前のかみ合った状態が得られると考えられる。ところで、本計測のように割れ目を1度開く方法では、隙間幅の絶対値を求めるのは困難であり、他の方法^{6) 7)}を用いる必要がある。そこで、本研究では便宜上、計測結果の中で隙間幅が最小となる点を接触点とみなして0mmとし、この点を基準に他の隙間の幅を決定した。図-2および図-3の隙間幅は、このようにして求めたものである。割れ目表面の凹凸は、長周期と短周期とで構成されているが、かみ合った割れ目の隙間では、長周期の成分が消えているのがわかる。

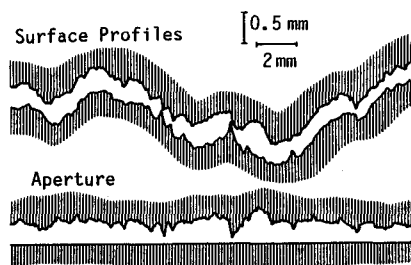


図-2 割れ目のプロファイルと隙間幅

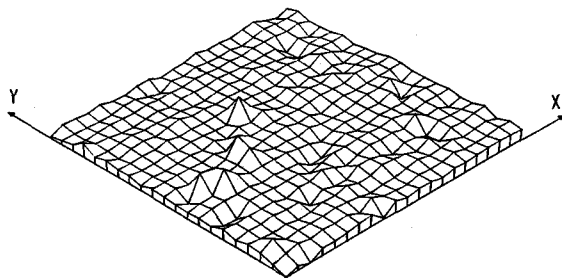


図-3 2次元計測による隙間幅の分布

図-4は、砂岩および花崗岩の1次元計測、2次元計測で得られた隙間幅のヒストグラムである。ただし、階級幅は砂岩、花崗岩でそれぞれ0.02mm、0.05mmと異なる。砂岩については、1次元計測および2次元計測とも同じ傾向を示しており、正規分布で近似することができる。これに対して花崗岩は、それぞれの計測で分布が異なり、砂岩に比べて標準偏差が大きいことが特徴である。表-1は、2次元計測による凹凸および

隙間幅の標準偏差を示している。2つの面の凹凸を重ね合わせて隙間を表現するとき、標準偏差 σ_1, σ_2 を有するそれぞれの面の凹凸がランダムに組み合わせられれば、隙間幅の標準偏差は $(\sigma_1^2 + \sigma_2^2)^{0.5}$ となる。また、隙間幅の分布がデルタ関数に従うときにはその標準偏差は0である。このように隙間幅の標準偏差は相関係数とともに、かみ合いの状態を示すパラメータであり、花崗岩の場合には両面での計測位置が完全には一致していなかったために、かみ合った状態が十分には再現できていないことが推察される。隙間幅の分布は、対数正規分布であるとの報告が多く^{6) 7)}、花崗岩のX軸方向の計測でもその傾向を示している。この対数正規分布が割れ目のかみ合いの状態とどのような関係にあるのか、精度のよい計測をさらに行う必要がある。

4. 隙間幅と透水特性

凹凸の計測結果より、砂岩の割れ目はその両面がかみ合った状態、また花崗岩の割れ目は十分にはかみ合っていない状態の隙間が得られたことになる。以下では、これらの隙間幅の分布を用いて、隙間幅と透水特性の関係を数値シミュレーションにより検討する。従来より、岩石の隙間を流れる水の挙動は、その隙間を平行平板とみなし、次式で表される3乗則に基づいて取り扱われてきた。

$$Q = c \cdot d^3 \cdot \Delta H \quad (1)$$

ただし、 Q は流量、 d は隙間幅、 ΔH は動水勾配、 c は粘性係数などに関係する定数である。本シミュレ

ーションは、基本的には渡辺と星野⁴⁾の方法と同じであり、数値モデルの領域を凹凸の計測点に対応して441(=21×21)の要素に分割し、各々の要素内では式(1)の3乗則が成立すると仮定して、差分法により水頭値を求めた。また、境界条件は、向かい合う2つのモデル境界に異なる水頭値を与え、この境界に直角な方向の境界では、水の収支がないものとした。

図-5は、砂岩のX軸方向に水頭差を与えたときの速度ベクトルを表したものである。このケースでは、割れ目の両面が初期状態よりもさらに0.25mm近づくように垂直変位を与えているので、図中の*印で示すように、441のうち35の要素で表面が接触している。流路が複雑に曲がりくねっている様子をみることができる。この流路の曲がり、垂直変位が大きいくほど顕著になり、透水性をより低下させる。次に、X軸方向に水頭差を与えて本シミュレーションにより得られた流量を Q_x (これに対して、Y軸方向に水頭差を与えたときの流量を Q_y とする)、441の要素の隙間幅の算術平均 $\langle d \rangle$ を式(1)に代入して簡略的に求めた流量を Q_a としたとき、それらの流量と垂直変位の関係は図-6のようである。ただし、それぞれの流量は、初期状態での算術平均による流量 Q_{ao} で除し、無次元化している。本図の上部には、図-4のヒストグラムの累積分布も併せて示している。垂直変位が負(両面が初期状態よりも離れている)のとき、 Q_a は、垂直変位に関する3次曲線と完全に一致する。また、垂直変位が正のときでも、この3次曲線にほぼ当てはまる。砂岩の場合には

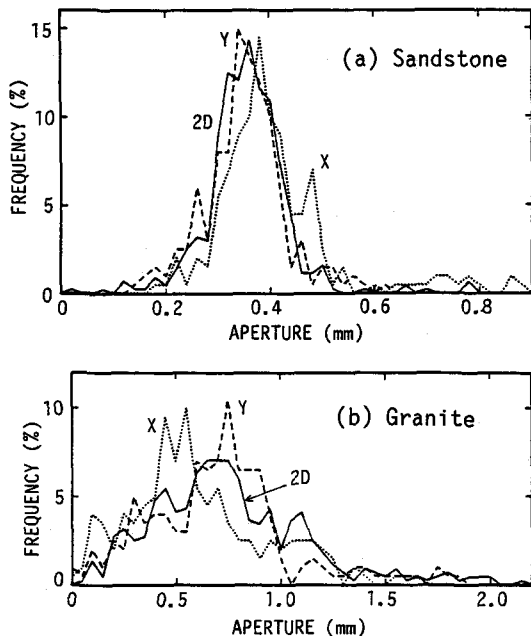


図-4 隙間幅のヒストグラム

表-1 凹凸と隙間の標準偏差

Rock type	Roughness	Aperture
Sandstone	0.371	0.080
	0.377	
Granite	0.714	0.395
	0.672	

Q_x と Q_a の差異はわずかであるが、その比である Q_x/Q_a の値は、垂直変位の増加とともに大きく減少する。すなわち、垂直変位が0.3mmになると、 Q_x は、 Q_a の20%にまで減少し、さらに垂直変位が0.374mmになり接触面積が51%に増加すると、流路が閉塞してX軸方向には全く水が流れず、 $Q_x/Q_a=0$ となる。なお、Y軸方向に流路が閉塞するのは垂直変位が0.324mm、接触面積が37%のときである。花崗岩の場合には、垂直変位の増加に伴う Q_x/Q_a の減少は砂岩ほど急激ではなく、X軸方向で0.681mm(接触面積53%)、Y軸方向で0.440mm(接触面積25%)の垂直変位で流路が閉塞する。このように、流路が閉塞する垂直変位は、かみ合いの状態や流れの方向によって異なることがわかる。

図-7には砂岩および花崗岩について、 Q_x/Q_a 、 Q_y/Q_a と、隙間幅を表すパラメータである dm/σ の関係を示している。ここで、 dm は

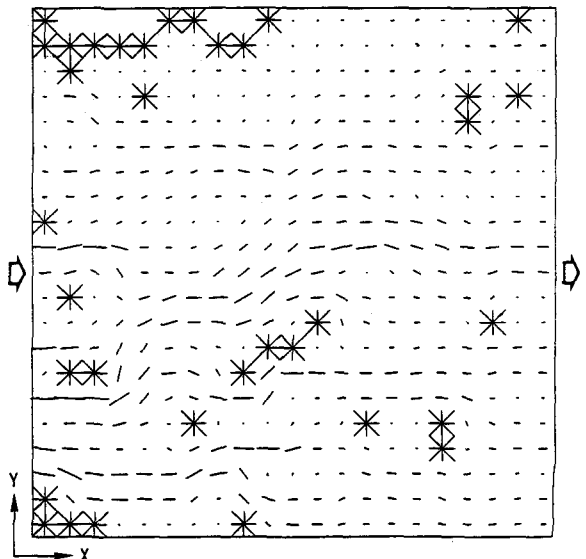
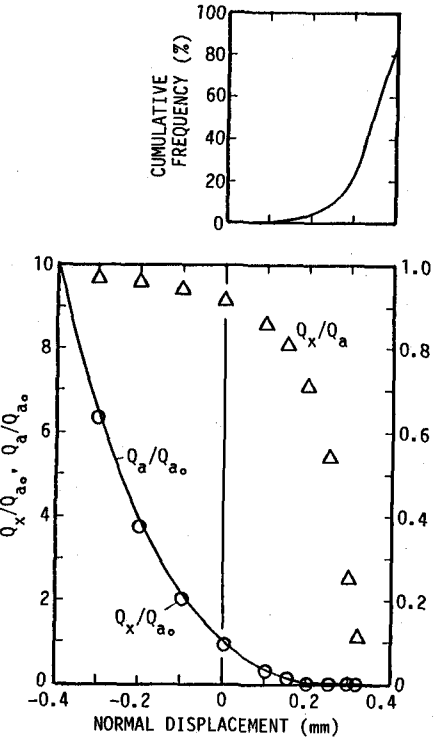


図-5 流れの速度ベクトル (垂直変位: 0.25mm)

(a) Sandstone



(b) Granite

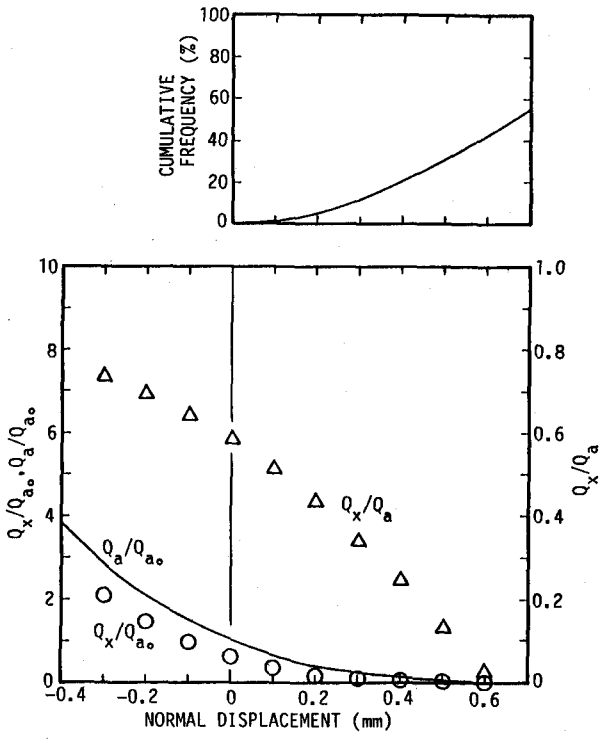


図-6 垂直変位と流量の関係

割れ目両面の平均隙間幅(2つの基準面間の距離), σ は隙間幅の標準偏差である。割れ目の両面が接触していないときには, d_m は上述の $\langle d \rangle$ と同じ値であり, 接触しているときには d_m は $\langle d \rangle$ よりも小さい。垂直変位が0のときの砂岩, 花崗岩の d_m は, それぞれ0.3452mm, 0.7135mmであり, これらの値は図-4のヒストグラムに示した2次元計測による隙間幅の平均値に同じである。図-7には, フラクタルの概念に基づいて割れ目の凹凸をコンピュータシミュレーションで作成し, その隙間を流れる水の量を計算によって求めた Brown⁸⁾の結果も示している。ただし, Brownが用いた σ は, 割れ目表面の凹凸の標準偏差であり, ここでは隙間幅の標準偏差に換算してプロットしている。 Q_x/Q_a の変化を d_m/σ で整理すれば, かみ合いの状態に関係なく1つの曲線でかなりよく表現できる。しかしながら, X軸方向とY

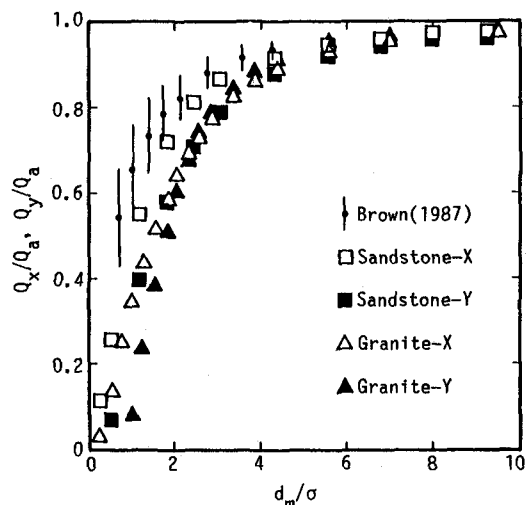


図-7 d_m/σ と流量の関係

軸方向と同じ σ を用いる限り, 流れの異方性に完全には対処できない。割れ目の力学的性質は, 接触部分の面積に支配され, 隣接する部分の相互作用を考慮する必要がないのに対して, 透水性は, 隙間の連結性が重要である。TsangとTsang⁹⁾が透水の不均一性を取り扱うために導入したgeostatisticsは, この連結性を考える上で, 有効な手法となる可能性がある。本計算結果と Brownの結果との違いは, 数値モデルの要素の大きさによると考えられ, 今後は, 計測のサンプリング間隔に関する検討が必要である。

5. あとがき

非接触タイプのレーザー変位計を用いて, 割れ目の隙間幅を調べた。その結果, 隙間幅の分布は, 割れ目両面がよくかみ合っている状態では正規分布, 十分にかみ合っていない場合には対数正規分布などを示すことがわかった。また, これらの分布をもとに, 数値シミュレーションにより割れ目の透水性を検討した結果, 垂直変位の増加に伴って流路に曲がりが生じ, そのために, シミュレーションで得られる流量 Q は, 隙間幅を算術平均して得られる流量 Q_a よりも小さくなること, および異方性が現れることがわかった。さらに Q/Q_a の変化は, 隙間幅のパラメータ d_m/σ で整理すれば, かみ合いの状態によらないで表すことができることを示した。

参考文献

- 1) Gangi, A.F. : Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 15, 249-257, 1978.
- 2) Tsang, Y.W. and P.A. Witherspoon : J. Geophys. Res., 86, 9287-9298, 1981.
- 3) Elsworth, D. and R.E. Goodman : Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 23, 233-243, 1986.
- 4) 渡辺邦夫・星野吉昇 : 応用地質, 21, 60-70, 1980.
- 5) 大森一徳 : 応力に依存した岩の不連続面の挙動とその透水特性, 九州大学修士論文, 1989.
- 6) Gale, J.E. : Proc. 28th U.S. Symp. Rock Mechanics, Tucson, 1213-1222, 1987.
- 7) Hakami, E. and N. Barton : Proc. Int. Symp. Rock Joints, Loen, 383-390, 1990.
- 8) Brown, S.R. : J. Geophys. Res., 92, 1337-1347, 1987.
- 9) Tsang, Y.W. and C.F. Tsang : Water Resour. Res., 25, 2076-2080, 1989.