

(26) 低拘束圧下での岩盤不連続面のせん断特性とラフネスの関係

京都大学工学部	正会員	谷本	親伯
京都大学大学院	学生員	○ 森岡	宏之
京都大学大学院	学生員	岸田	潔
京都大学工学部	学生員	梅沢	孝行

Roughness and Shear Behavior at Rock Joint under Low Confining Pressure

Chikaosa TANIMOTO, Kyoto University
Hiroshi MORIOKA, Kyoto University
Kiyoshi KISHIDA, Kyoto University
Takayuki, UMEZAWA, Kyoto University

Abstract

Considering "roughness" in the two dimensional length domain as "wave" in the length-time domain, roughness can be expressed uniquely by two parameters in terms of FFT(Fast Fourier Transform) analysis. Based on the numerical determination of the roughness with FFT, the relationship between roughness and shear behavior has been discussed in two manners. One of them is a numerical simulation combining the Patton's model with the Coulomb's yield criterion and another is an experimental approach by means of the newly developed rock shear machine, which can convert between constant normal load and constant volumetric condition at any loading level. Numerical and experimental approaches have agreed well each other, and the shear behavior of jointed rock can be expressed satisfactorily in association with the support effect in tunneling under low confining pressure condition.

1. はじめに

トンネルや岩盤斜面を対象とする支保工の最適な設計・施工を行っていく上で、まず問題となるのは、地山の力学的挙動の予測である。しかし、実際の岩盤では、それらの挙動を支配する不確定要素が数多く存在するため設計モデルは複雑となり、非常に困難をきたしている。これらの問題を解決するには、個々の不確定要素が力学的挙動に対して与える影響について究明するとともに、各現場における力学的挙動を念頭においた評価方法、また施工に対応する地山分類の設定を行う必要がある。

原位置岩盤の力学的挙動において、特に影響が大きいと考えられるのは、岩盤中の不連続面である。中でも、掘削により新たに発生した自由面近傍に生ずる「緩み」と「不連続面の力学的挙動」については十分解明されているとはいえない。そこで本研究では、このような低拘束圧下での不連続面の挙動に大きな影響を及ぼす不確定要素の一つとして、特にラフネス（表面粗さ）に着目し、まずその定量的な評価方法について検討し、次にその力学的特性（せん断特性）を見いだすために、実験および考察を行った。定量化の方法としては、波動現象に使われるスペクトル解析を用いた。また、ラフネスと力学的特性の関係を調べるために、人工的に作った規則的なラフネスを有するモデルを用いて拘束圧一定および等体積での一面せん断試験とせ

ん断破壊に関するシュミレーションを行った。

2. ラフネスの計測と定量化

原位置岩盤内に存在する不連続面でのせん断特性は、特に著者らが着目している低拘束圧状態では、その不連続面のラフネスが大きな影響を及ぼすと考えられる。不連続面のラフネスには、造岩鉱物の粒子レベルの小さな凹凸から長い周期を持ったうねりに相当するものまで幅広く含まれる。しかし、現状ではどれぐらいのラフネスがせん断挙動に対して影響を与えるのかは解明されていない。また、ラフネスの定量的評価も不十分である。そこで、ラフネスに関係する起伏の高さや幅といった形状についての情報を調査する方法として、高速フーリエ変換 (FFT) によるスペクトル解析を行った。FFTは、時間-変位の座標系 (時間領域) で定義された関数に対してフーリエ変換を施し、周波数-振幅の座標系 (周波数領域) へとスペクトル分析を行うものである。この周波数特性により、不連続面の表面形状を一意的に定めることができ、起伏の分布状況を見ることができるわけである。

そこで、まず規則的なラフネスを有するモデルについてその周波数特性を調べ、その傾向を分析した。表面形状の記録には、接触型変位計を利用した測定装置を用いた。測定間隔は、測定長に対し1024点のプロットを行うものであり、今回は測定長を実際のせん断試験を行う供試体の直径である50mmにあわせ、80秒間で計測を行った。その測定結果を図-1、2に示す。周波数特性はパワースペクトルとして面対数軸上に示した。図-1は起伏の周期を等しく高さ(H)を変化させたもの (Case A)、図-2は起伏高さを一定にして起伏の幅(1)を変化させたもの (Case B) について計測を行った結果である。さらに、様々な規則的なラフネスを有するモデルについての計測を行った結果、起伏の高さはパワースペクトルの強さとなって現れ、起伏の幅の影響は幅が大きくなるにつれてパワースペクトル曲線の卓越値を結んで得られる直線の傾きが急になることがわかった。このことから、ラフネスを評価する方法として、この直線を用いて表すことができる。ここでは、定量化した量を一般化するために「1mmを1波長とする波を1Hzとする空間周波数」という量を定義し、変数変換を行うことにより次のような式で置き換えられる。

$$\sqrt{S} = b \cdot f_r^{-a}$$

ここに、 S : パワースペクトル密度 ($\text{mm}^2 \cdot \text{mm}$)

f_r : 空間周波数 (1/mm)

ここで示された2つの定数の物理的な意味は、 a がスペクトル曲線の傾き、 b がパワースペクトルの強さを示す量となる。この方法により図-1、2のモデルについて定量化した量を表-1に示す。

そして、実際の不連続面を持つ供試体 (和泉砂岩)

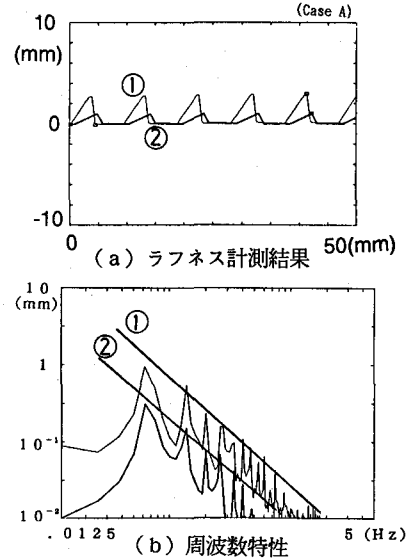


図1 規則的ラフネスと周波数特性

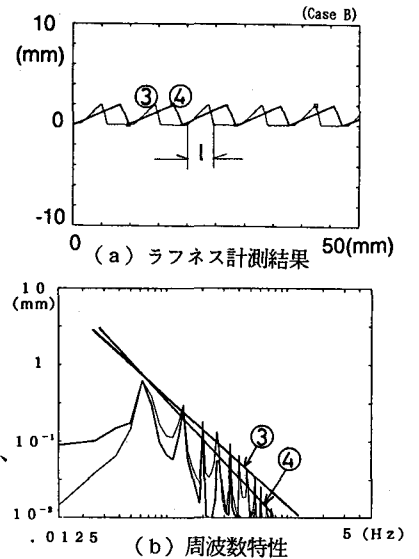


図2 規則的ラフネスと周波数特性

表1 規則的ラフネスの諸量

	起伏高さ(mm)	起伏幅(mm)	a	b ($\times 10^{-8}$)
①	3.0	4.62	1.41	13.98
②	1.0	4.62	1.36	4.70
③	2.0	4.62	1.49	7.18
④	2.0	9.24	1.75	3.29

について、これらの方法で計測を行った一例を図-3に示す。この場合、スペクトル解析より得られる量は $a = 1.35$ 、 $b = 2.57 \times 10^{-3}$ となる。

3. 規則的なラフネスを有するモデルの一面せん断特性

岩盤不連続面の力学的挙動に対するラフネスの影響は、自然のラフネスについて力学的挙動を考慮した定量化がまだ確立していないため、現状では不明瞭である。そこで、前章でも用いた規則的なラフネスを有するモデルについて、数値シミュレーションとモルタル供試体を用いた一面せん断試験を行った。

シミュレーションは、Patton[1]によるすべり破壊の規準式とCoulombによるせん断破壊に対する規準式と力のつりあい式から、破壊線とダイレイタンスを計算により求めるものである。シミュレーションに用いた規則的なラフネスの幾何学的パラメータを図-4に示す。これらの幾何学的パラメータや材料定数(c , ϕ)などの入力パラメータを変化させた場合の破壊強度への影響についてはすでに考察した[2]。その結果から、入力パラメータの中で個々の起伏の形状を示すもの(起伏の前方傾斜角 i 、後方傾斜角 γ 、高さ H)は低拘束圧でのせん断に、粘着力 c や規則的なラフネスの配置間隔を決める定数 f (以下配置係数と呼ぶ)などは高拘束圧でのせん断に、摩擦角 ϕ は全体に影響を与えるパラメータであることがわかった。

そこで、これらの結果を確認するため、人工的に作成した規則的なラフネスを有する供試体を用いて一面せん断試験を行った。供試体は一軸圧縮強度 500 kgf/cm^2 のモルタルを用い、様々なラフネスを有する直径 50 mm の円柱型枠を用いて製作した。

実験は、起伏の間隔と起伏高さを変化させたものについて行った。実験結果とシミュレーション結果例を図-5, 6に示す。図中の実線部がシミュレーション結果、プロットした点が実験結果を示している。なお、ここで扱っている応力は、起伏の破壊に要した力を供試体の断面積で除して基準化したものを用いている。シミュレーションでの材料の条件は、 $\phi = 37.1^\circ$ 、 $c = 75 \text{ kgf/cm}^2$ を用いた。摩擦角 ϕ については同一配合でラフネスをもたない平坦な不連続面を持つ供試体を作成し、垂直拘束圧を変化させて実験を行い破壊線を引き、その傾きを測定することにより求めた。また、これらのモルタルモデルの一定拘束圧での一面せん断試験より得られた残留強度の分布もこの破壊線上に得られた。このことは、残留強度が不連続面のラフネスには関係なく、材料の性質のみに影響されることを示している。粘着力 c については、実験結果にばらつきの少ない $H=1 \text{ mm}$ のものと一致させるように決定した。

まず、起伏の配置係数 f の影響について見る。個々の起伏の形状は $H=2 \text{ mm}$ 、 $i=30^\circ$ 、 $\gamma=60^\circ$ とした。図-5からわかるとおり、破壊線に

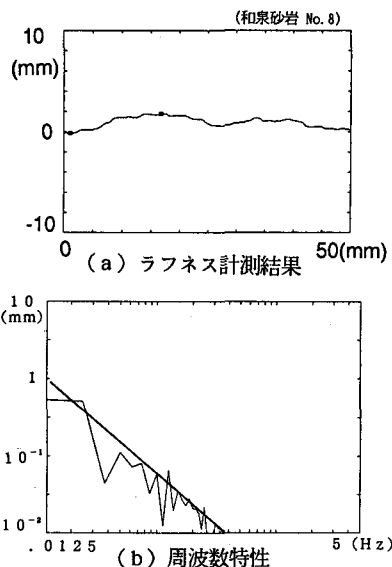


図3 実際の不連続面と周波数特性

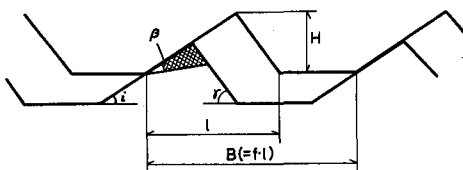


図4 ラフネスの幾何学的パラメータ

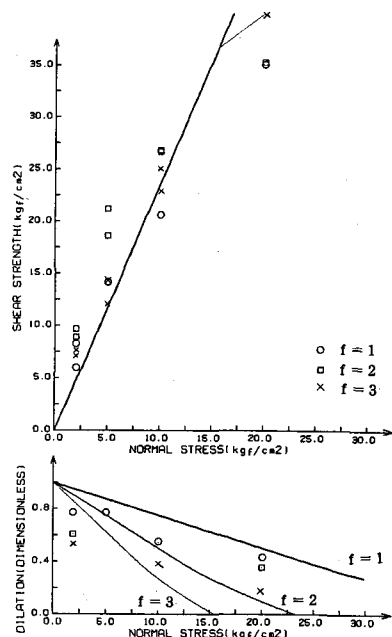


図5 一面せん断試験結果と計算結果

関しては多少のばらつきは存在するものの、起伏の数が異なっているにもかかわらず低拘束圧下では影響は少ないというシミュレーション結果と一致する。このことは、Pattonのすべり破壊の規準式がほぼ適當であることを示している。ダイレイションに関しては、低拘束圧側では全体的に小さな値となっているが、これは実際の供試体が理想化されたシミュレーションのように規則的なラフネスを同時に破壊するとは考えにくく、何段階かに分けて破壊してしまうことによるものと考えられる。

次に起伏高さの影響について見る。配置係数は $f=2$ とし起伏の形状は $H=1\text{mm}$, $i=16.1^\circ$, $\gamma=40.9^\circ$ のものと、 $H=3\text{mm}$, $i=40.9^\circ$, $\gamma=69.0^\circ$ の2種類について比較を行った。図-6からわかるとおり、 $H=1\text{mm}$ の場合は破壊線およびダイレイションの双方においてシミュレーションの結果とよく一致している。

次に、起伏の形状が強度以外のせん断挙動にどのような影響を与えているかについて調べてみた。図-7は、起伏高さを変化させた場合のせん断挙動（せん断応力、垂直変位-せん断変位）を示した図である。なお、起伏の配置係数は $f=2$ 、モルタルは同一配合のもので、垂直拘束圧は 10kgf/cm^2 で実験を行った。実験結果よりわかることとして、まず、起伏がせん断破壊に至るまでのメカニズムは次の3つの挙動から成り立っていることが挙げられる。(1)すべりに対する静止まさつ力が働き弾性変形を生じる領域、(2)起伏の斜面上をすべりダイレイションが生じる領域、(3)起伏の強度がすべりに必要な力よりも小さくなり起伏が破壊し、残留状態へと至る領域。そこで注目すべきことは、起伏の高さの影響は(2)のすべりの領域の幅となってあらわれ、起伏高さが低いほどすべり領域の幅は長くなっていることがわかる。また、ピーク強度を比較した場合も、起伏高さが高いほど大きくなる傾向がうかがえる。これは、起伏高さが高い程すべりが生じる角度（ダイレイタンシー角 i ）も大きくなり、すべりに必要な力が大きくなるというPattonのすべり破壊の規準式の考え方を裏付ける結果であると言える。また、これまでに得た研究成果から判断すれば、2章で述べたラフネスを決定する2つの量の中の b 値と、残留強度から破壊強度までの差をとった量とは線形な関係にあると考えられる。

4. 等体積一面せん断試験

前章では、せん断中の垂直拘束圧を一定に保った状態で試験を行ってきた。トンネルなどの支保工の問題を考える場合、開口部付近の不連続面は掘削開始後支保工打設までの期間は、変形を許した状態でせん断され、剛な支保工を打設した後は拘束された状態でのせん断を受けると見なせる。このときの挙動を室内試験で再現する方法に等体積一面せん断試験が挙げられる。

本研究では、規則的なラフネスを有するモデルについて変形を拘束することによる効果を調べた。実験方法は、最初は一定拘束圧の状態でせん断試験を開始し、ある一定の垂直変位が生じたところでダイレイタン

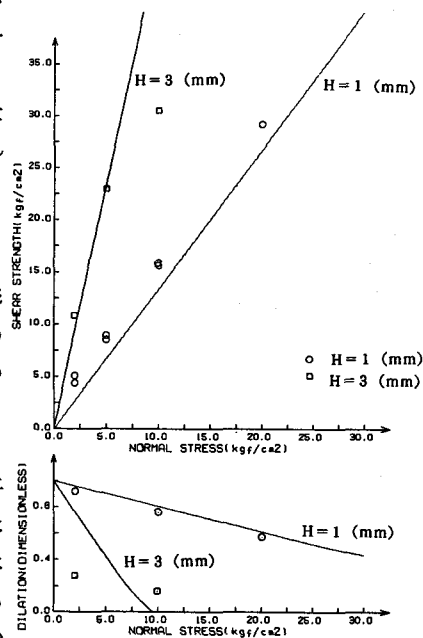


図6 一面せん断試験結果と計算結果

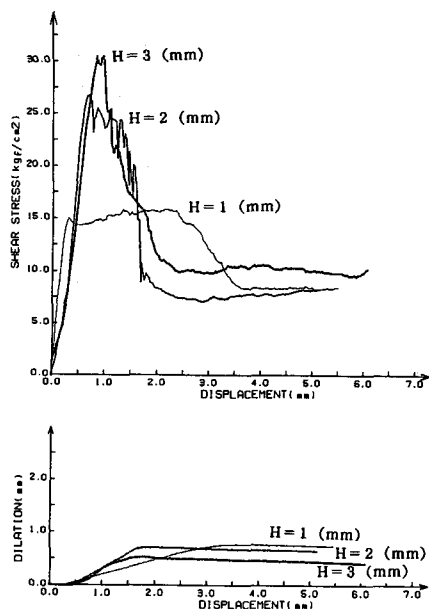


図7 規則的なラフネスの一面せん断試験結果

シーを拘束してさらにせん断を行うものである。実験に用いた供試体は、起伏の状態が $H=1.0\text{mm}$, $i=16.1^\circ$, $\gamma=40.9^\circ$, $f=2$ のものをを用いた。その結果を図-8に示す。垂直変位を拘束せず垂直拘束圧一定でせん断を行った場合には約 8kgf/cm^2 程度しか得られなかったピーク強度は、垂直変位を 0.5mm で拘束した場合には、 40.2kgf/cm^2 に、また、 0.4mm で拘束した場合には 54.8kgf/cm^2 にまで増加する。このことから、ダイレイション（垂直変位）を拘束することにより、低拘束圧状態下であっても著しいせん断抵抗を発揮できことがわかる。これらのせん断抵抗をもたらす要因は、不連続面上のラフネスによるものであることは明らかであり、その形状との関係についてより詳しく調査する必要がある。

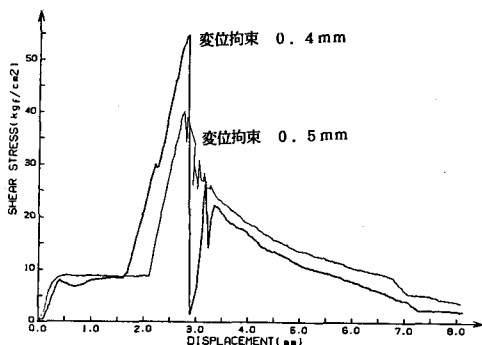


図8 等体積一面せん断試験結果

また、これらの結果について谷本[3]によって示された支保効果と等価な内圧に置き換えたひずみ軟化モデルの数値解析の結果との比較を行った。図-9は、数値解析を行った結果得られた塑性流動域の幅 W_2 と支保反力 P_i の関係を示したものと[4]であり、 C_f は原位置の地山強度比を示している。図からわかることとして、地山強度比の小さい、つまりかぶりが大きく地山の強度が低い場合、塑性流動域は大幅に広がる。しかし、支保工が与えるわずかな内圧にて変形を拘束することにより塑性流動域の広がりを著しく小さくし、結果的に支保反力を軽減させることができる。本実験では、この現象を室内試験により再現したことになる、山岳トンネルでの支保の設計・施工に反映することができると思われる。

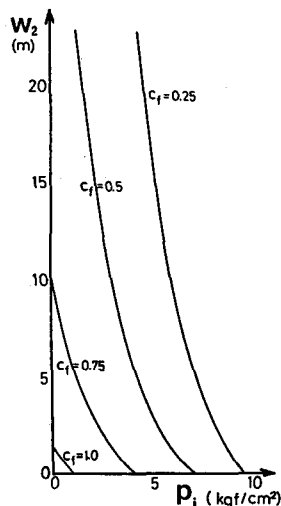


図9 塑性域半径と支保圧の関係

5. おわりに

本研究では、トンネルなどを対象とする支保工の問題についてとり上げ、特に低拘束圧下での不連続面のせん断挙動と、それに影響を及ぼすラフネスについて実験と考察を行った。本研究で得られた知見についてまとめる。①表面形状のパワースペクトルを求めることによってラフネスを定量化することができる。②Pattonによるすべり破壊に対する規準式は、低拘束圧下におけるせん断特性を適切に表現していることがわかった。③等体積一面せん断試験を行うことにより、低拘束圧下においても変形を拘束することで著しいせん断抵抗を発揮させることがわかった。これは、トンネル支保効果を考える上で重要な知見である。

<参考文献>

- [1]F.D.Patton(1966):"Multiple modes of shear failure in rock",Proc.1st Cong. ISRM(Lisbon),Vol.1, pp.509-513, [2]谷本、森岡、岸田(1990):「岩盤不連続面の一面せん断特性とラフネスについて」,第8回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp.103-108, [3]谷本親伯(1984):NATM1,森北出版, pp.161-177, [4]島田、谷、谷本(1989):「初期変形速度に基づくトンネル岩盤分類の適用性評価」,第21回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, PP.271-275.