

## 不連続面の特性が岩盤の巨視的挙動に及ぼす影響に関する研究

STUDY ON THE EFFECTS OF DISCONTINUITY PROPERTIES  
ON THE BEHAVIOR OF ROCK MASS

吉田秀典\*・山崎卓哉\*\*・井上純哉\*\*\*・平川芳明\*\*\*\*・森 聡†

Hidenori YOSHIDA, Takuya YAMASAKI, Junya INOUE, Yoshiaki HIRAKAWA and Satoru MORI

\*正会員 博士 (工学) 香川大学教授 工学部安全システム建設工学科 (〒 761-0396 香川県高松市林町 2217-20)  
 \*\*香川大学大学院生 大学院工学研究科安全システム建設工学専攻 (〒 761-0396 香川県高松市林町 2217-20)  
 \*\*\*正会員 博士 (工学) 東京大学助教授 大学院工学系研究科社会基盤学専攻 (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)  
 \*\*\*\*正会員 博士 (工学) (株) ニュージェック 技術開発グループ (〒 542-0082 大阪市中央区島之内 1-20-19)  
 †正会員 修士 (工学) (株) ニュージェック 技術開発グループ (〒 542-0082 大阪市中央区島之内 1-20-19)

The mechanical and hydraulic properties of discontinuous rock mass are strongly influenced by the geometrical properties of discontinuity, such as the surface roughness and asperity of the discontinuity. Moreover, the mechanical and hydraulic behaviors of the discontinuous rock mass are considered to have interactions each other, which makes it difficult to understand the behaviors of the discontinuous rock mass. Above all, the coupling concepts of the mechanical and hydraulic behaviors of the discontinuous rock mass have not been studied yet. Thus, in this study, the geometrical properties which seem to affect the coupling the behaviors of the discontinuous rock mass are listed and the numerical analyses with considering such properties are conducted. The numerical results suggest that the geometrical properties of discontinuity are quite important to seize the accurate behaviors of the discontinuous rock mass and should be included in modeling of its behaviors.

**Key Words :** *discontinuous rock mass, mechanical and hydraulic behaviors, geometrical properties of discontinuity*

キーワード：不連続性岩盤，力学および水理挙動，不連続面の幾何学的特性

## 1. はじめに

岩石／岩盤，コンクリートと言った脆性材料においては，それらの巨視的な挙動は内在する不連続面の挙動，例えば不連続面（クラック，亀裂，節理など）の発生，連結，成長／進展というような挙動に強く影響を受けることが知られている．したがって，岩石／岩盤，コンクリートなどの力学的挙動を精度良く予測するには，不連続面の変形特性，強度特性，そして幾何学的特性などを的確に把握することが必要となる．

ここで，不連続面の各種特性と材料／構造物の挙動との関係を考える意味で，事業が進みつつある放射性廃棄物の地層処分問題に焦点を当てる．放射性廃棄物の地層処分事業における安全性評価は，放射性廃棄物が地下水により生態圏に運搬される時間と流量で評価されるため，地盤内を流れる地下水の経路長と流速を評価する必要がある．対象地盤は岩盤であり，場合によっては不連続面を有する地点が候補となりうる場合もある．こうした不連続性岩盤における地下水は，一般に亀裂，節理，破砕帯などの主要な水みち，つまり主として不連続面内を移動する．不連続面内における地下水の流動モデルとしては平行平板モデルなどが挙げられるが，この場合，地下水の流動は不連続面の幾何学的特性や粗度などの影響を強く受ける．円管を流

れるようなモデル（Hagen-Poiseuille 流れ）においても，管内の内部摩擦などは重要なパラメータとなる．

岩盤の不連続面に関する研究としては，岩盤の力学的挙動が断層・破砕帯・亀裂などの不連続面の変形に支配されることから，Mohr-Coulombの破壊基準を始め，不連続面の変形特性や強度特性を推定する方法を中心に進められてきた．多くの研究の中でも，Patton<sup>1)</sup>，Barton<sup>2)</sup>，Bandis<sup>3)</sup>らは不連続面自体の起伏という幾何学的特性の影響に着目し，岩盤不連続面の強度推定式を提案している．しかしながら，これらの提案式の多くは，不連続面自体の起伏を評価し，それがせん断強度に及ぼす影響のみを評価しており，起伏の存在が変形特性に及ぼす影響は評価していない．また，起伏が存在した場合，載荷方向によってはみかけのせん断強度は増加するが，不連続面自体の表面のせん断強度は変化しないので，載荷の方向によってみかけのせん断強度は変化する<sup>4)</sup>．空洞掘削にともなう解放応力の方向が様々であることを考慮すると，全ての不連続面の強度特性を，上述した提案式などで一意に評価することには疑問が残る．また，短期的な力学的挙動だけでなく，クリープなど長期的な力学的挙動や後述する水理学的挙動を考えるにあたっては，局所レベルにおける不連続面の粗度（表面摩擦）と巨視レベルにおけ

る不連続面の幾何学的特性（起伏）をきちんと整理する必要がある。

不連続面の力学的挙動を解明する研究が多いのに対し、透水挙動については簡素化したものが多く、不連続面の変形が透水特性に及ぼす影響などを評価している事例は極めて少ない。そのため、近年、不連続面内流れの特性を把握することを目的にした数多くの室内試験や数値実験などの研究が国内外で行われており、それらの結果より、不連続面内の流れは簡略化された平行平板モデルと異なり、多数の水みちを形成する事でチャンネル化されること、そして不連続面内の透水特性は不連続面の凸凹、不連続面の変形（開口やせん断変形）に大きく左右されることが明らかになってきている。著者の一部も、不連続面の変形および強度特性とその面の粗さを表すために導入した統計的なパラメータとを関連付けることにより、不連続面の力学的挙動にともなう透水特性の変化を捉えることができる手法（SJAP法）<sup>5)</sup>を提案しているが、前提として、不連続面の変形が透水特性に及ぼす影響を的確に評価する必要がある。木村ら<sup>6)</sup>も不連続面の表面形状が不連続面自体の変形および水理学的挙動に及ぼす影響を様々な角度から議論しているが、変形を受ける不連続面については今後の課題としている。

そこで本研究では、巨視的レベルにおける不連続面の幾何学的特性（起伏）が不連続性岩盤の挙動に与える影響について数値解析的な検討を行い、この分野におけるこれまでの問題点と今後の課題を整理することを目的とする。

## 2. 構成モデル

本研究では、岩盤がその中に不連続面を含み、その不連続面が摩擦すべりを生じるという問題を扱うことから、こうした摩擦すべり現象を表現できるモデルが必要となる。不連続面の接触挙動を解析する方法としては、有限要素解析などで用いられる接触モデルと、剛体ばねモデルのような離散モデルを用いる方法に大別される。前者については、モデル化や計算が複雑になることから、設計において用いられることは稀である。一方、後者について考えると、その手法の1つである剛体ばねモデルは、2つの物体間にバネを挿入し、それを介する力を表面力として扱うことから不連続面の摩擦すべりなどを上手く再現できるが、弾性変形の精度は有限要素法と比較して劣るという欠点がある。そこで近年では、剛体ばねモデルに弾性変形の自由度を持たせたハイブリット型ペナルティ法（HPM）<sup>8)</sup>のような混合型モデルも提案されている。HPMにおいては、弾性変形の精度をある程度確保しつつ不連続面の摩擦すべりなどの解析ができるが、本研究のような構造解析問題では、不連続面以外は連続体としてモデル化したい

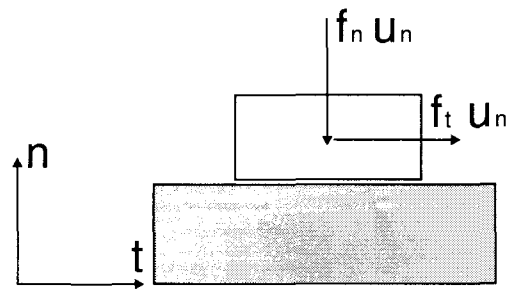


図-1 物体に作用する接触力

ため、その場合、前者の有限要素解析などで用いられる接触モデルを採用する方が都合が良い。そこで本研究では、不連続面に相当する箇所、その摩擦すべりを表現できる要素（以降、「摩擦すべり要素」と呼ぶ）を導入し、それ以外の岩盤基質部には、Drucker-Prager型の弾塑性モデルを適用した。

まず、不連続面に相当する箇所に導入する摩擦すべり要素であるが、本研究では、変形する物体が2つ存在し、その物体の間に、古典的摩擦則であるクーロン摩擦則を採用することとした。実際の固着—すべりメカニズムは高い非線形性を有し、物体の弾塑性特性に著しく依存する他、異なる物体間における接触問題においては、両者の摩擦特性が異なるため、それらが一齐に滑動するとは考え難く、まず部分的なすべりが生じて、それから大きなすべりに発展していくなどの指摘があり、クーロン摩擦則の適用には問題がないわけではない。しかしながら、対象とする2つの材料が全く同じであり、かつ、不連続面の変形と比較して材料の変形が小さい範囲において解析を実施するため、本研究では、導入の簡易性を考慮して、クーロン摩擦則を採用した。本研究は、採用するモデルを用いて不連続面の滑動現象の全てを再現するというようなモデルを提案するものではなく、後述するような問題設定の範疇に限っては、採用モデルでおおよその検討が可能であると考えていることに注意されたい。

クーロン摩擦則によると、図-1に示す2つの物体間の相対すべりは  $\mu|f_n| + c \leq f_t$  を満たすとすべりを生じる。ここに、 $\mu$  は静止摩擦係数、 $f_t$  および  $f_n$  は接触力の接線および法線成分、そして  $c$  は粘着力である。

また、一旦物体はすべりを生じると、物体同士は接触し続ける場合もあるが、非接触（解離）という状態にもなりうる。さらに、一般に接触問題においては、物体の挙動からその状態を判定し、後述するような「貫通」に対する条件を加味する必要などがある。接触については、有限要素法で言う「要素」に対して、その要素の任意の節点を接触可能な節点と定義し、その節点が接触しうる他の要素の節点あるいは辺を定義しておく。物体を構成する要素は通常は2次元問題では3角形あるいは4角形要素、3次元では4面体ある

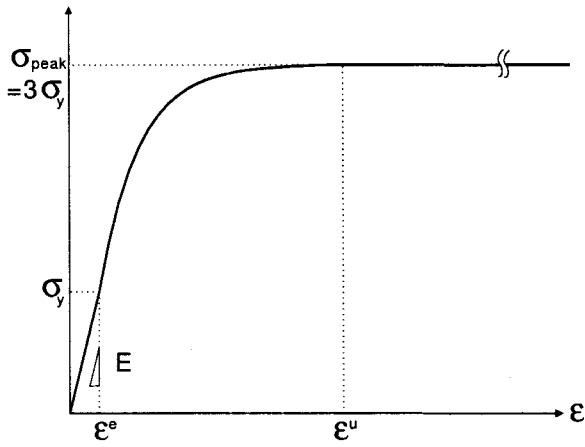


図-2 構成モデル

いは6面体要素)で定義する。計算ステップごとに各接触可能な節点が接触相手の節点あるいは辺にどれほど近接しているかを調べ、接触の判定を行う。本解析では、もっとも大きさが小さい要素の辺に対し、その長さの5%以内であれば接触、それを超えると非接触になるものとした。なお、計算ステップが粗い場合は、その節点が接触可能な相手の辺を越えて要素内に入るのような貫通状態となるため、貫通状態にならない程度の計算ステップが必要となる。節点間の力が負である場合は接触状態と判断し、逆に、節点間の力が正である場合は、当該節点は接触可能な要素から解離することとなる。この際、接触中に節点間で作用していた反力は内部要素との釣り合いを失い、残差力として作用させ、物体内部では応力再配分が起こる<sup>9)</sup>。

次に、連続体、つまり岩盤基質部についてであるが、起伏のような巨視的レベルにおける不連続面の幾何学的特性が不連続性岩盤の挙動に与える影響について考察することが本研究の目的であることから、本解析では、摩擦すべりを生じピーク荷重に達した後に軟化するような領域までは対象としない。したがって、岩盤基質部を弾性体と仮定することでも対処が可能であると思われる。しかしながら、起伏角度によっては、摩擦すべりを生じる前後付近で部分的に岩盤基質部が破壊する場合もあるため、ピーク前における弾塑性挙動は考慮に入れ、岩盤基質部については、次式に示すような Drucker-Prager 型の弾塑性モデルを適用することとした。

$$\alpha I_1 + \sqrt{J_2} - k_c = 0 \quad (1)$$

ここで、 $I_1$ 、 $J_2$  は不変量であり、また  $\alpha$  および  $k_c$  は次式で定義される。

$$\alpha = \frac{2 \sin \phi}{\sqrt{3}(3 + \sin \phi)} \quad (2)$$

$$k_c = \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{3}} = \frac{6c \cos \phi}{\sqrt{3}(3 + \sin \phi)} \quad (3)$$

ここで、 $c$  は粘着力、 $\phi$  は内部摩擦角、 $\bar{\sigma}$  は相当応力を

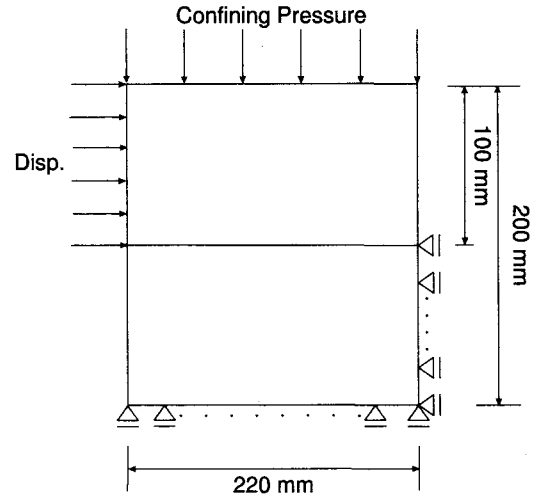


図-3 せん断試験概念図

表-1 実験<sup>11)</sup>における材料特性

岩石 (花崗岩)	単位体積質量 (kg/m <sup>3</sup> )	2.68
	弾性係数 (MPa)	68,900
	ポアソン比	0.22
	一軸圧縮強度 (MPa)	156
不連続面	垂直剛性 (MPa/m)	48,950
	せん断剛性 (MPa/m)	1,060
	せん断強度 (°)	36

表す。

応力-ひずみ関係 (構成モデル) については、文献<sup>10)</sup>を参考に、図-2 に示すような構成モデルを考えた。図に示す通り、この構成モデルにおいては、ピーク圧縮強度 ( $\sigma_{peak}$ ) の 1/3 の応力を初期降伏圧縮応力 ( $\sigma_y$ ) とし、この応力に至るまでは弾性的に挙動するものとしている。また、応力がピーク応力に達した時のひずみ ( $\epsilon^u$ ) は、後述する参考実験<sup>11)</sup>の実験結果と整合するように 0.2% に設定し、初期降伏後、ピークに至るまでは、図に示すようなひずみ硬化挙動 (等方硬化) を呈するものとしている。ピーク後は、応力を一定に保ちながらひずみだけが增大するものとしている。なお、本研究では、数値解析の対象が不連続面に対する一面せん断試験であり、この場合、大きな引張応力が生じることが考え難いことから、圧縮側も引張側も同じ挙動をするものと仮定し、引張破壊に対して特別な措置は講じていない。

### 3. 準備解析

本章では、前章で示した解析モデルを用いた場合、どの程度のパフォーマンスがあるのかを調査する目的で、

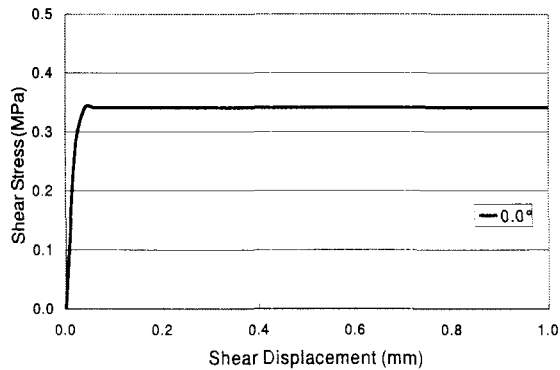


図-4 せん断変位-応力関係 (解析)

既存の実験結果<sup>11)</sup>の再現を試みることにする。解析の対象とした実験は、単一不連続面を有する岩石供試体に対する室内せん断試験で、その概況を図-3に示す。供試体のサイズは、幅 220 mm、高さ 200 mm、奥行き 110 mm で、不連続面はカッターを用いて平坦な分離面としている。岩石および不連続面に関する特性を表-1に示す。

せん断試験は、供試体をせん断試験装置にセットした後、所定の垂直応力 (0.5 MPa) となるように垂直荷重を作用させ、垂直応力一定の状態でせん断方向に載荷 (変位速度 1 mm / min) している。実験の結果、弾性変形に相当するような変形はかなり小さく、早い段階から不連続面が部分的にせん断すべりを生じ、ピーク応力到達後は、せん断応力が増大することなく、せん断変位のみが増大するという状況を呈している。この時のせん断応力 (ピーク応力) は約 0.35 MPa であった。実験に関する詳細は、文献<sup>11)</sup>を参照されたい。

一方、解析では、境界条件、載荷条件および岩石=材料基質部のパラメータについては実験と同じ値を設定し、不連続面については、摩擦係数を 1.0、粘着力を 0.0 MPa と仮定した。摩擦係数の値は、実験における不連続面のせん断強度 (内部摩擦角 = 36°) より類推されるものより大きめである。一般に、実際の不連続面においては、少なからず粘着力が存在するものと思われるが、文献には粘着力に関する記載が無かったので、本解析では、実際の不連続面の内部摩擦角より類推される摩擦係数より大きめの値を用い、一方、不明である粘着力については 0.0 MPa と仮定することで、強度自体が過剰な値にならないように設定した。解析においては、不連続面に接する要素 (上下 22 個ずつの計 44 個) に前述の摩擦すべり要素を用いた。なお、総要素数は 440 個、総節点数は 506 個で、実際の試験と近い状態を模擬するために解析は 2 次元平面応力の条件下で実施した。

解析におけるせん断変位 (載荷変位量) とせん断応力 (下の供試体の右側境界における反力を面積で除し

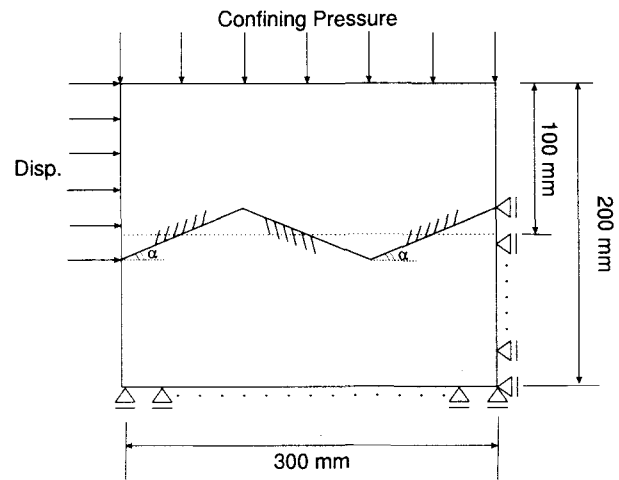


図-5 解析概念図

た値) の関係を図-4に示す。載荷にともなって、載荷面に近い方から不連続面がすべりはじめ、載荷 0.1 mm 程度で不連続面全体がすべるという状況を表している。こうした挙動は、前述の実験結果とほぼ同じ挙動であった。このことより、前章で示した手法を用いることにより、おおまかではあるが、不連続面を有する岩盤供試体のすべり挙動を再現できると判断し、次章では、巨視的レベルにおける不連続面の幾何学的特性および表面粗度などが不連続性岩盤の挙動に与える影響について数値解析的な検討を実施する。

#### 4. 感度解析

本章では、前章で実施した手法の妥当性に関する検討を受け、巨視的レベルにおける不連続面の幾何学的特性が不連続性岩盤の挙動に与える影響について数値解析的な検討を行う。巨視的レベルにおける不連続面の幾何学的特性を考慮するために、本研究では、図-5に示すように不連続面がフラットではなく、起伏を有するものとした。これは、一般に岩盤内に包含される不連続面は完全なる直線ではなく、多かれ少なかれ、雁行していることに対応するものである。こうした起伏の傾き=起伏角度 (図-5の  $\alpha$ ) については、0, 1, 5, 10, 15, 30° という 6 ケースを考えた。いずれもケースも、供試体の幅 300 mm に起伏が規則正しく 1.5 個、つまり、波長 200 mm の三角波のような起伏が存在するものとした。したがって、0, 1, 5, 10, 15, 30° の起伏を有する三角波の振幅はそれぞれ、0.9 mm, 4.4 mm, 8.8 mm, 13.4 mm, 28.9 mm となる。

また、供試体のサイズは、図に示す通り、幅 300 mm、高さ 200 mm とした。岩石および不連続面に関する特性を表-2に示す。なお、総要素数は 1,116 個、総節点数は 1,326 個 (うち、摩擦すべり要素は計 384 個) で、解析は、前章と同様、2 次元平面応力の条件下で実施

表-2 解析で用いた材料特性

岩石	弾性係数	50,000 MPa
	ポアソン比	0.20
不連続面	摩擦係数	1.0
	粘着力	0.0 MPa
	起伏角度 (°)	0, 1, 5, 10, 15, 30

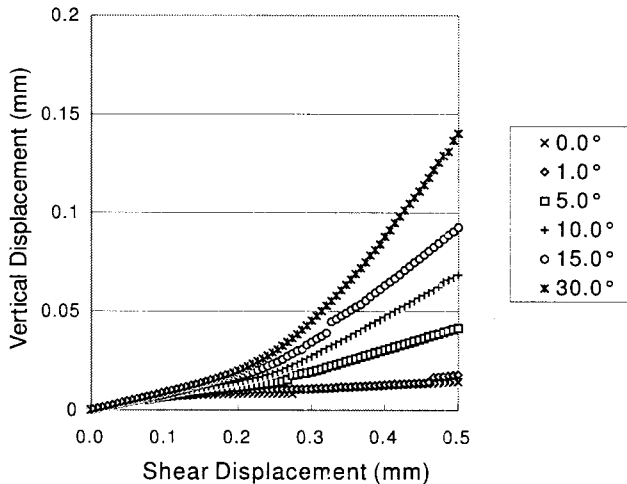


図-6 せん断変位-鉛直変位関係 (起伏角度を変化)

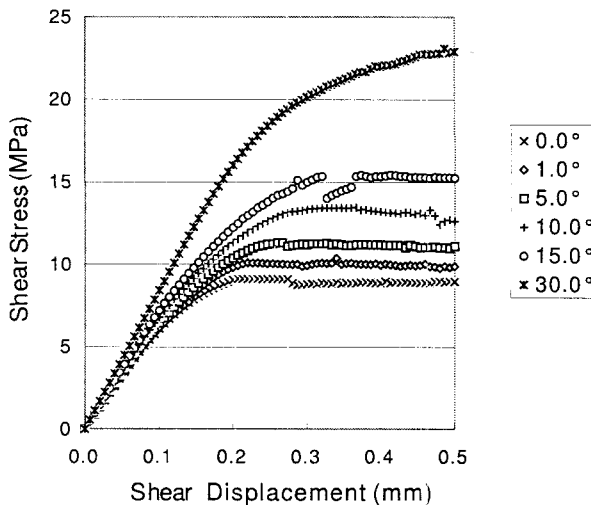


図-7 せん断変位-応力関係 (起伏角度を変化)

した。

#### 4.1 起伏角度の影響

図-6 にはせん断変位 (载荷変位量) と鉛直方向の変位量の関係を、また、図-7 にはせん断変位 (载荷変位量) とせん断応力 (下の供試体の右側境界における反力を面積で除した値) の関係を示す。

図-6 より、不連続面が滑動を開始する载荷変位 0.1 mm まではどのケースもそれほど違いはないが、不連

続面の滑動後は、不連続面の起伏角度が大きいケースにおいて鉛直方向の変位量も大きい。また、すべりが進むにつれて鉛直方向の変位量は大きくなっているが、これは起伏角度が大きいほど顕著となる。起伏角度が異なることから鉛直方向の変位量にも差異が生ずることは当然ではあるが、せん断変位量に対して比例的に増加するわけではなく、非線形的な挙動を呈しており、このような挙動は複雑な表面あるいは幾何学的形状を有する実際の不連続面においても確認される現象である。本解析においては、载荷変位に対して不連続面が载荷面に近い方から徐々にすべりを生ずるため、こうした挙動を呈しているものと考えられる。不連続面内における水理特性の評価においては、不連続面の表面形状や表面粗度だけでなく、こうした不連続面の変形を正確に把握し、与えられた変位あるいは応力に対する不連続面の変形量 (せん断あるいは開口変形) とその際の水理特性を明確にする必要があるものと思われる。

また、図-7 より、不連続面の起伏角度が大きいほど、载荷変位量に対するせん断応力が大きいことが分かる。これは、見かけ上、起伏面を乗り上げるためにより大きな力が必要であることを示している。しかしながら、これは不連続面に対するせん断方向の応力 (すべりを引き起こそうという力) と法線方向の応力 (すべりを拘束しようという力) の大小関係の議論であって、起伏角度の増加とともに、载荷変位量に対する不連続面上のせん断方向応力は小さくなっているだけに過ぎない。1章で紹介した Patton<sup>1)</sup> らの提案式では、こうした起伏角度の大小が不連続面のせん断強度に影響を与える形になっているが、これは構造的な問題であり、起伏角度の大小によって不連続面自体のせん断強度が変化するわけではないと考える。したがって、せん断する方向によってせん断試験の結果も変わってくるものと思われるが、このことについては、文献<sup>6)</sup>においても同様のことが言及されている。

#### 4.2 载荷方向の影響

前節で示したような問題を考察するために、上述した解析では上に位置する供試体の左側面より水平に変位载荷を行っているが、本節では不連続面に対して平行になるような変位载荷、つまり左斜め下方向から右斜め上方向へ载荷するような解析を実施した。図-8 には、起伏角度が 10 度の場合において、半時計周りに 10 度の方向に载荷した際のせん断変位とせん断応力の関係 (図中の凡例は L:10.0°) を、前節で実施した水平载荷の結果 (凡例は L:0.0°) と併せて示した。図より、不連続面に対して平行になるように载荷した場合は、供試体に対して水平载荷した場合に比べみかけの強度が小さく、供試体に対して水平载荷した場合の起伏角度 5.0° 程度の結果しか得られていない。なお、この解析結果が供試体に対して水平载荷した場合における起伏

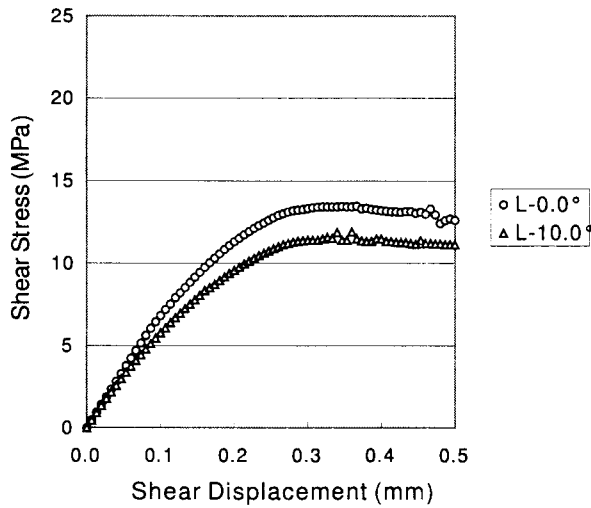


図-8 せん断変位-応力関係 (载荷方向を変化)

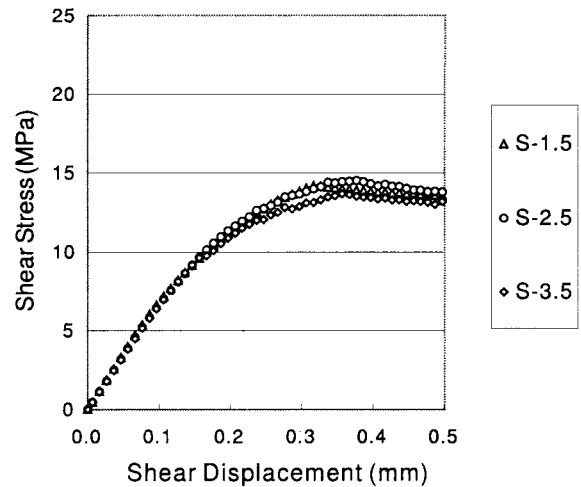


図-10 せん断変位-応力関係 (起伏の数を変化)

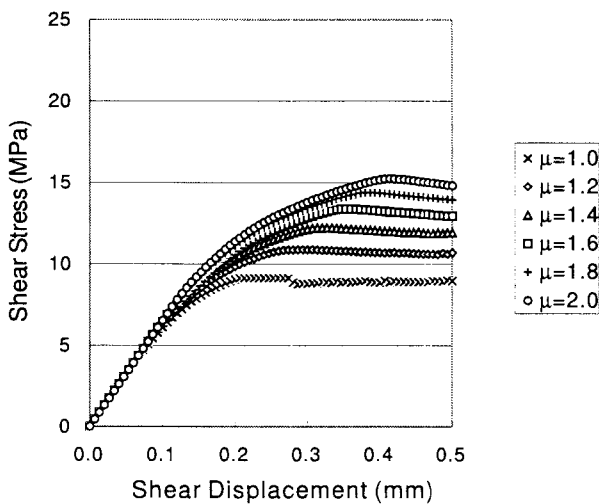


図-9 せん断変位-応力関係 (摩擦係数を変化)

角度  $0.0^\circ$  の解析結果と合致しないのは、供試体に載荷している垂直拘束圧の載荷方法は変化させずに、両解析で同一としているためである。これより、Patton<sup>1)</sup>、Barton<sup>2)</sup>、Bandis<sup>3)</sup>らが提案している岩盤不連続面の強度推定式は、あくまでも単一不連続面のせん断試験における強度を推定するに留まるもので、地下空洞の掘削のような複雑な応力条件下において、こうした提案式で不連続面の強度を評価することには議論が必要であると考えられる。

#### 4.3 摩擦係数の影響

上述したように、不連続面のせん断強度を推定する上で、見かけのせん断強度の中に幾何学的特性に起因する影響を完全に包含してしまうことには議論の余地があるが、一方で、全くそのような特性に起因する影響を排除してしまうことにも問題があると考えられる。例

えば、起伏のような不連続面の幾何学的特性を考慮せずに、不連続面を完全なるフラットな面と仮定してしまつた場合は、不連続面の純粋なせん断強度の過大評価につながる可能性もある。不連続面をフラットと仮定し、その摩擦係数のみを変化 ( $1.0 \sim 2.0$ ) させた場合におけるせん断変位とせん断応力の関係を図-9に示す。図-7と図-9を比較すると、摩擦係数が  $1.0$  で起伏角度  $15^\circ$  のケースと、不連続面はフラット (起伏なし) で摩擦係数が  $2.0$  のケースの挙動が近い。不連続面の幾何学的な特性あるいは表面形状などを考慮に入れない場合、摩擦係数が  $1.0$  から  $2.0$  に上昇することはせん断強度 (摩擦角) が  $45.0^\circ$  から  $63.5^\circ$  まで上昇することとほぼ等価であることから、起伏など不連続面の幾何学的特性を考慮せずに不連続面はフラットであるとして巨視的なせん断変位-せん断応力関係よりその強度を評価すると、不連続面が持つ純粋なせん断強度を過大評価する可能性がある。逆に、室内試験、例えば不連続面に対する単一不連続面せん断試験などでは供試体の寸法に制限があるため、実規模における不連続面の幾何学的特性 (規模の大きなうねり/雁行など) を反映できない。したがって、幾何学的特性に起因する二次的なせん断抵抗を加味できずに、不連続面が構造として有する、いわゆる「見かけのせん断強度」を過小評価する可能性もある。室内実験などを行う際には、起伏の程度を評価した上で実験結果を考察する必要があるものと考えられる。

#### 4.4 起伏の個数の影響

さらに、Barton<sup>2)</sup>の提唱する JRC との関連を考察するために、図-5に示すようなパターン (300 mm の幅に起伏の山が 1.5 個) に加え、300 mm の幅に起伏の山が 2.5 個 (起伏角  $10^\circ$ 、波長 120 mm、振幅 5.3 mm)、および 3.5 個 (起伏角  $10^\circ$ 、波長 85.7 mm、

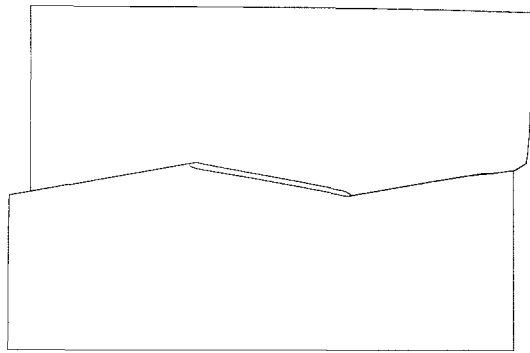


図-11 変形図 (30倍, 起伏 1.5個)

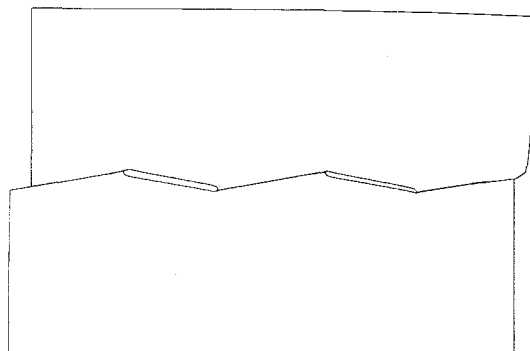


図-12 変形図 (30倍, 起伏 2.5個)

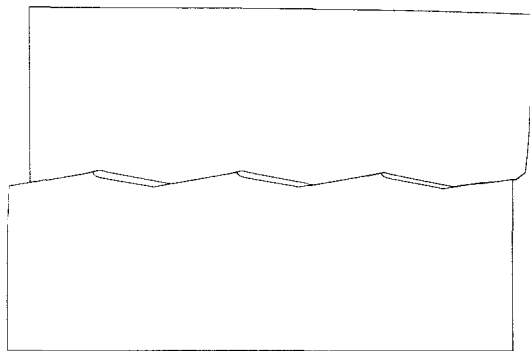


図-13 変形図 (30倍, 起伏 3.5個)

振幅 3.8 mm) のケースについて解析を行なった。これら解析におけるせん断変位とせん断応力の関係を図-10に示す。図より、起伏の個数を変化させてもそれほど大きな差がないことが分かる。しかしながら、本解析で仮定した問題設定は、不連続面の起伏が周期的であることから局所的な応力集中や局所破壊と言った現象が見られないこと、また、一つの面が起伏を乗り越えるというような変形の大きな領域を対象としてないことから、上述した結果より直ちに、起伏の数が多少変化しても全体挙動に及ぼす影響は顕著でないとは言えない。むしろここで着目したいのは、不連続面がすべりを生じた後の変形状況(図-11~図-13)である。図より、起伏に代表されるような不連続面の幾何学的

特性が水理特性へ与える影響が大きいであろうと予想できる。例えば、紙面と直交する方向への水の流れを考えた場合、不連続面全体が主たる水みちとなっておらず、図のように開口した箇所へ地下水流動が集中するようなケースが考えられよう。また、不連続面の起伏角度などの違いによって開口変位量に大小が生ずることは容易に想像がつくが、本解析例より、起伏のパターンによっては、水みちが1つに集中するケースの他に、いくつにも分散するようなケースも起こりうるのではないかと考える。実際の不連続面の局所的な表面起伏および巨視的な幾何学的特性は複雑であることから、変形によってかなり複雑な水の動きが起こるものと思われる。こうした不連続面の幾何学的形状と変形は不連続面内における水理特性に大きな影響を与えるため、不連続面の幾何学的特性とその変形特性を連成して考えることは極めて重要と言えよう。

なお、全ての解析ケースにおいて、不連続面の左端(載荷面とは逆の端)の周辺、あるいは起伏の頂部付近において岩盤の基質部が塑性したが、巨視的な挙動に対して強く影響を及ぼすような領域ではなく、小さな領域に限られたものであった。これは、本解析では、不連続面が破壊条件を満たした後は、上側の供試体が剛体的に滑動するようなモードになるため、それほど大きな応力集中にはならなかったことが原因と考えられる。しかしながら、岩盤の不連続面クリープなどを考慮するにあたっては、塑性化に至るような領域においては、不連続面の摩擦係数などが変化するというようなことも考えられるため、今後、岩盤基質部が塑性化することによる影響についても検討していきたいと考えている。

## 5. まとめ

本研究では、不連続性岩盤を対象に、起伏に代表されるような巨視的レベルにおける不連続面の幾何学的特性が不連続性岩盤の挙動に与える影響について数値解析的な検討を行った。解析対象は、岩盤がその中に不連続面を含み、その不連続面が摩擦すべりを生じるという問題であることから、不連続面に相当する箇所にはクーロン摩擦則に基づく摩擦すべり要素を導入し、また、不連続面以外の岩盤基質部にはDrucker-Prager型の弾塑性モデルを採用して解析を実施した。解析において着目した不連続面の表面形状としては、周期的に変化するのこぎり歯状の起伏を有する形状を考え、その特性として、起伏角度や頻度を考慮した他、不連続面の摩擦係数(粗度)や載荷方向などを変化させた解析を実施した。その結果、以下のような知見を得た。

1. <不連続面の強度特性に関して> 既往の研究<sup>1),2),3)</sup>における岩盤不連続面の強度推定式は、単一不連続面を有する岩石のせん断試験における

強度を推定するには適しているが、経験的な要素が強く、かつ、実際の空洞掘削などにおける複雑な応力状態を勘案すると、こうした強度推定式の適用範囲のようなものを明確にしておく必要がある。

2. <不連続面の水理特性に関して> 起伏に代表されるような不連続面の幾何学的特性が不連続面自体の変形や水理学的性質に影響及ぼすということは周知のことであるが<sup>4),6)</sup>、本研究より、両現象は個々に独立したものではなく、極めて相関の強いものであることが理解できる。これまで、幾何学的特性と不連続面の強度を関係付ける研究や、不連続面の表面形状や粗度と水理特性を関連付ける研究が個々に実施されてきているが、変形過程や変形にともなう生ずる応力再配分などを考慮したモデルを構築すると同時に、こうしたモデルを用いて不連続面の変形や応力再配分によって変化する水理特性を評価することが重要である。

なお、本研究の位置付けは、あくまでも不連続性岩盤内に存在する不連続面の幾何学的特性（起伏）が不連続性岩盤の挙動に与える影響を簡易的に評価し、その問題点や課題点を明らかにすることにあるため、極めて簡易なモデルと問題設定を行っている。また、2章でも言及した通り、本研究は不連続面の滑動現象の全てを再現するというようなモデルを提案するものではない。したがって、本研究で示した解析結果は不連続面の挙動を代表するものではないことから、今後は上述した課題や問題点を踏まえ、実際の不連続面の変形のメカニズムを的確に把握し、現象を再現すると同時によりの確に水理学的挙動をも評価できるモデルの提案を行いたいと考えている。

付記： 本研究の一部は、(財)南海育英会教育研究助成（代表者：吉田秀典）の助成を得て行なった。

#### 参考文献

- 1) Patton, F. D.: Multiple modes of shear failure in rock, *Proc. 1st Cong. ISRM*, Lisbon, Vol.1, pp.509-513, 1966
- 2) Barton, N. R.: Review of a new shear-strength criterion for rock joints, *Engineering Geology*, Vol.7, pp.287-332, 1973
- 3) Bandis, S. C., Lumsden A. C. and Barton, N. R.: Experimental studies of scale effects on the shear behaviour of rock joints, *Int. J. Rock Mech. Mic. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.18, pp.1-21, 1981
- 4) 木村強, 江崎哲郎: 岩盤不連続面の表面粗さ (JRC) とせん断特性, 応用地質, 第 33 巻, 第 5 号, pp.11-18, 1992
- 5) 井上純哉, 杉田博章: 確率微分方程式を用いた単一亀裂透水特性の推定, 土木学会論文集, No.726/II-62, pp.31-39, 2003
- 6) 木村強, 江崎哲郎: 岩盤不連続面の凹凸および開口幅の特徴と水理学的性質, 応用地質, 第 33 巻, 第 2 号, pp.1-10, 1992
- 7) Wriggers, P.: *Computational contact mechanics*, Wiley, 2002
- 8) 竹内則雄, 草深守人, 武田洋, 佐藤一雄, 川井忠彦: ペナルティを用いたハイブリット型モデルによる離散化極限解析, 構造工学論文集, Vol.46A, pp.261-270, 2000
- 9) 宮村倫司, 牧野内昭武: 共役射影勾配法による大規模接触問題解析, 日本計算工学会論文集, Paper No.20020011 (電子ジャーナル), 2002
- 10) 吉田秀典, 高森大資, 和田光真: 非均質性が岩盤構造物の挙動に及ぼす影響と設計に関する研究, 応用力学論文集, Vol.6, pp.387-396, 2003
- 11) 多田浩幸, 若林成樹: ロックボルトのよる岩盤不連続面のせん断補強効果に関する実験的検討, 第 36 回地盤工学研究発表会, pp.1221-1222, 2001

(2004 年 9 月 17 日 受付)