

地下空洞安定解析における岩盤不連続面の 力学的挙動モデルの提案と適用

中川 光雄¹・蔣 宇静²・江崎 哲郎³

¹正会員 工修 (株)CRC総合研究所 関西支社 課長役 (〒541-0056 大阪市中央区久太郎町4-1-3)

²正会員 博(工) 九州大学助教授 工学部 付属環境システム科学研究センター
(〒812-0053 福岡市東区箱崎6-10-1)

³正会員 工博 九州大学教授 工学部 付属環境システム科学研究センター

地下空洞の力学的安定性を数値解析を用いて適切に評価し設計へ導入するには、信頼性のある不連続面挙動モデルを組み込んだ個別要素法の適用が有効であると考えられる。本論文は、既往の代表的な不連続面の力学的挙動モデルを分類し、定式上の問題点などを考察することにより定式化が妥当性や信頼性を有する条件を示す。次に、これに基づいた新たな挙動モデルを提案し、室内せん断試験の結果や既往のモデル(Bartonらのモデル)を用いた計算結果と比較することにより、その妥当性や信頼性を検証する。また、空洞掘削シミュレーションへ適用した例を示す。

Key Words : *discontinuities, mechanical behavior, modeling, shear test, distinct element method(DEM), simulation*

1. はじめに

大規模地下空洞などの掘削に伴い発生する空洞周辺岩盤の変形や破壊の大部分は、不連続面に沿うせん断やダイレーションに起因することが多いと考えられる。この点から、不連続性岩盤内に空間の立地を考える場合、不連続面の幾何学的分布特性を把握することと同時に、その力学的特性や水理学的特性を把握することは、掘削時をはじめ空洞の安定性の評価において重要な課題となる。今日ではコンピュータの利用技術が飛躍的な進歩を遂げ、数値解析を用いて安定性を評価する試みが数多くなされるようになった。ここで、不連続性岩盤を取り扱う数値解析手法を大別すると、1つは、岩盤を等価な連続体として取り扱う方法があり、もう1つは、岩盤不連続面を1つ1つ具体的に表現する不連続体として取り扱う方法がある。何れの場合も、岩盤不連続面の幾何学的分布特性及び力学的挙動特性を正しく表現できる数値解析手法を適用することが重要となり、現在においてもこれらの特性の把握に精力が注がれている。前者では、有限要素法解析の延長上にあり、現場計測に合うように力学特性を決定するなど調査から解析までの手順はほぼ確立していると言えよう。しかし、後者では、現場で遭遇する

独自性を持つ不連続面からどのようにしてそれらの特性を把握し、モデル化し、解析を実施するかについては、未だ多くの問題が残っていると言えよう。

さて、不連続性岩盤を不連続体として取り扱うことが有効な手段と考えて不連続面の力学的挙動の特性に焦点を当てると、原位置不連続面の実際の挙動を如何にして精度よく再現するかという命題に基づき、今日までにいくつかの不連続面の力学的挙動モデルが提案されている。その中でも代表的な提案をレビューすると、Goodman(1970)¹⁾は、一定垂直応力のもとでせん断を受ける不連続面に対するせん断応力-せん断変位の関係を論じ、これをジョイント要素という形で有限要素法解析に組み込んだ。Patton(1966)²⁾は、規則的な三角形の凹凸を有する石質不連続面のせん断試験に基づいて、双一次関係のせん断強度モデルを提案している³⁾。続いてLadanyiとArchambault(1969)⁴⁾は、不連続面の実際の破壊は表面のすべりと凹凸自身の破壊が混在しているとして、エネルギー収支の考察からせん断強度式を提案している⁵⁾。最近では、SaebとAmadei(1992)⁶⁾さらにSouleyら(1995,1996)⁷⁾がGoodmanのジョイント要素を一般化した定式を提案し、室内せん断試験の結果と比較した例を示している。以上の提案は全て、導入され

たある仮定に基づいた物理モデルである。これに対し、Jaeger(1971)はPattonの提案に対して連続的に変化する経験的なせん断強度式を与えている⁹⁾。また、Barton(1971)⁹⁾らは、不連続面のせん断時の真の接触面積は表面積全体に比べて極端に小さく、見掛けの応力を用いて挙動を正しく表現するには物理モデルでは不相当であると考えて、実験結果を統計的に処理した経験的な定式を提案した。ノルウェーにおける6.2m大スパンの岩盤空洞のアイスホッケーアリーナ建設の事前調査¹⁰⁾には、彼のモデルを用いた個別要素法解析が適用されている。

ところで、上述した不連続面モデルの定式化に導入された仮定の妥当性や解析結果の信頼性は、必ずしも明確には示されていないようである。さらに、定式化に不明瞭な経験的概念が含まれているようにも見受けられる。また、実際に不連続体解析が必要と考えられるケースは、空洞の安定に大きく影響すると想定される挙動特性を有する不連続面が存在する場合であり、その観察、各種試験を行って、その特徴を把握して解析に反映させることが調査から解析までのあるべき姿と考える。

本論文は、プロトタイプに忠実で信頼性を有する不連続面の力学的挙動モデルを構築するには、実際の応力状態やせん断履歴などを再現した室内せん断試験結果に基づいて定式化するアプローチが有効であるとの著者らの考えに基づき、不連続面の力学的挙動モデルを新たに提案するものである。なお、具体的な定式化を述べるに先立ち、著者らは、今までに提案されている力学的挙動モデルを不連続面の凹凸の取り扱い方などに基づいて、3つのカテゴリーに分類した。各々のカテゴリーに該当する代表的なモデルを取り上げて問題点を明かにし、これに基づいて、モデルの定式化が妥当性を有するための条件を考察する。続いて、岩盤不連続面の挙動の室内せん断試験について著者らが実施した人工および自然の不連続面の供試体を用いた室内せん断試験結果について考察する。以上の考察に基づいて、岩盤不連続面の新たな挙動モデルを提案し、その定式化（以下、提案モデルと呼ぶ）が不連続面の室内せん断試験結果に基づいて構築されたことの意図を妥当性や信頼性という観点から述べる。また、ここで構築した定式化を個別要素法解析における不連続面の構成モデルとして組み込み、室内せん断試験結果の再現を試みることにより、また既往の代表的な力学的挙動モデルであるBartonらのモデルを用いた計算結果と比較することにより、その妥当性を検証する。最後に、不連続性岩盤内における空洞掘削シミュレーションを行い、適切な不連続面挙動のモデル化の例を示し、モデル化された不連続面の特性が解析の結果に如

表-1 既発表モデルの分類

カテゴリ	分類	特徴	提案者
(I)	実験的モデル	<ul style="list-style-type: none"> せん断を受ける不連続面の凹凸形状の変化を定量的に評価する。 特定の供試体や現場の状況を反映する。 	Kimura et al. ⁸⁾ 杜, 他 ⁹⁾ Jing ^{10), 11)}
(II)	理論的モデル	<ul style="list-style-type: none"> 不連続面の表面の凹凸形状を理想化する。 結果の信頼性が理想化の妥当性に大きく依存すると考えられる。 	Goodman ¹⁾ Patton Ladanyi Archambault Plesha ¹²⁾ Saeb Amadei
(III)	経験的モデル	<ul style="list-style-type: none"> 室内試験や原位置試験結果をもとに定式化される。 定式化が経験に基づくため、実際の不連続面の挙動を忠実に再現できない恐れがある。 	Barton ¹³⁾ Jaeger

何に反映されるかを考察する。

以上の検討において提案モデルを実現する数値解析手法としては、不連続面を境界面として取り扱いかつ挙動に対して大変形を許容する個別要素法を用いた。また、実際の適用には、定式化された挙動が忠実に機能するよう接触判定機構を特殊化した代表的な個別要素法コードUDE C⁷⁾を利用した。

2. 既存の不連続面挙動モデルの考察

現在までに提案されている単一不連続面の力学的挙動モデルを、不連続面の凹凸の取り扱い方やせん断による損傷の考え方の相違という点で、表-1に示す3つのカテゴリーに分類した。

カテゴリー(I)は、室内試験において不連続面の凹凸形状(ラフネス)の詳細な情報を得て、これに基づいた力学的挙動をモデル化した研究である。Kimuraら(1995)⁸⁾は、BartonとChoubeyによって提示されたプロファイルを有する石筍不連続面を用いたせん断試験を実施し、せん断前後の表面形状を計測した。彼らは、この実験結果に基づいてせん断強度 τ_p を式(1)のように評価することを提案し、その妥当性を検証した。

$$\tau_p = \sigma_n \tan(\phi_r + \phi_m) \quad (1)$$

ここで、 σ_n は垂直応力、 ϕ_r は残留時の摩擦角、 ϕ_m はプロファイルの中である基底長における斜面の最大勾配

である。さらに杜ら(1997)⁹⁾は、Kimuraらの研究の成果に基づいて、式(2)に示す岩盤不連続面のフラクタルモデルを提案している。

$$\tau_m = \sigma_n \tan \left\{ a [U(h)]^c \log \left(\frac{\sigma_j}{\sigma_n} \right) + \phi_b \right\} \quad (2)$$

ここで、 τ_m はせん断強度、 σ_n は垂直応力、 $U(h)$ は平均ラフネス角、 σ_j は壁面圧縮強度、 ϕ_b は基本摩擦角、 a と c は実験定数である。この提案では、フラクタルパラメータおよび平均ラフネス角とせん断強度との関係について考察されている。このカテゴリーにおけるアプローチは、複雑である不連続面の凹凸形状の特性を忠実に微視的に取り入れたものである。また、モデル化された挙動が特定の供試体や現場にしか適用できないものの、これはその現場を反映するものであると言える。試験のばらつきやカテゴリー(II)、(III)の一般的な不連続面との対比、位置付けが今後の課題である。

カテゴリー(II)は、不連続面の表面の複雑な凹凸形状を理想化することにより、その力学的挙動を理論的に検討した研究である。前述のPattonのモデルやLadanyiとArchambaultのモデルはこのカテゴリーの研究に該当しよう。Plesha(1995)¹²⁾は、まず、図-1に示すように不連続面を巨視的に捕えて、弾塑性理論における流れ則をアナロジー的に導入することにより、不連続面の応力-変位関係を式(3)のように定式化した。

$$d\sigma = E^{es} dg \quad (3a)$$

ここで、 $d\sigma$ は不連続面における応力増分テンソル、 dg は相対変位増分テンソル、 E^{es} は次式(3b)~(3c)に示す不連続面の剛性マトリックスである。

$$E^{es} = E \quad \text{if } F < 0 \text{ or } dF < 0 \quad (3b)$$

$$E^{es} = E \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial G}{\partial \sigma} \bigg| \frac{\partial F}{\partial \sigma} \\ \frac{\partial F}{\partial \sigma} \bigg| \frac{\partial G}{\partial \sigma} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E \\ -H \end{bmatrix} \quad \text{if } F = dF = 0 \quad (3c)$$

ここで、 E は不連続面の弾性剛性マトリックス、 F は不連続面のすべりの発生を規定する関数、 G は不連続面のすべりのポテンシャル関数、 H は硬化-軟化パラメータである。次に、図-2に示すように不連続面を微視的に捕えて凹凸形状を理想化することにより、式(3c)における F と G をそれぞれ式(4)、式(5)

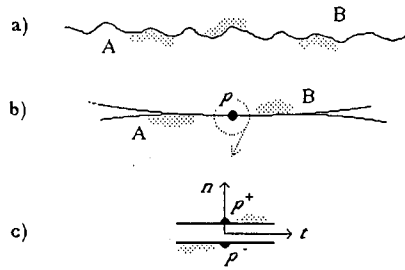


図-1 巨視的に捕えた不連続面の接触¹²⁾
a) 噛み合わせがよく粗い接触面、b) 巨視的に捕えた接触面；pは初期の接触点、c) 接触点p付近の拡大；tとnはそれぞれ巨視的に捕えた接触面の接線方向と垂直方向。

図-1 巨視的に捕えた不連続面の接触¹²⁾

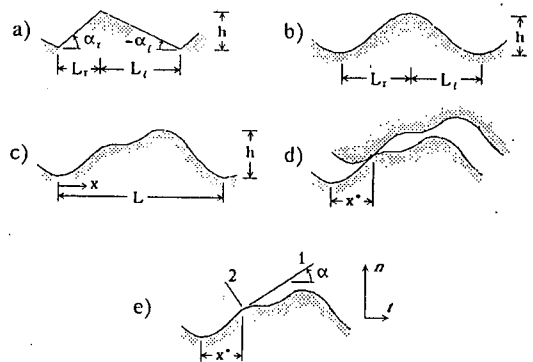


図-2 微視的に捕えた不連続面の凹凸の理想化¹²⁾
a) 表面が鋸型の場合、b) 表面が正弦波の場合、c) 表面が一般的に見られる周期的な場合、d) 表面c)におけるずれ発生後の上面の状態、e) 状態d)における上下面の接触の幾何学特性。

図-2 微視的に捕えた不連続面の凹凸の理想化¹²⁾

に示すように決定した。

$$F = |\sigma_n \sin \alpha + \sigma_t \cos \alpha| + \mu (\sigma_n \cos \alpha - \sigma_t \sin \alpha) \quad (4)$$

$$G = |\sigma_n \sin \alpha + \sigma_t \cos \alpha| \quad (5)$$

ここで、 σ_n と σ_t はそれぞれ不連続面の垂直方向とせん断方向の応力、 μ は不連続面の摩擦係数、 α は凹凸の乗り上げ角度である。また、 α は、図-2に示した各種の理想化の方法に依存して決定される。例えば、図-2のc)に示した凹凸形状に該当する α は、次式(6)のように示される。

$$\alpha = \alpha_0 \exp(-cW^s) \quad (6)$$

ここで、 α_0 は凹凸の乗り上げの初期角度、 c は実験により決定される定数、 W^s は単位体積あたりのすべり仕事である。彼は、損傷による凹凸の形状変化をどのように捕えるかということが、凹凸形状の理想化の様式

に関係していると述べている。ところで、このモデルでは、損傷の形態が凹凸表面の摩擦に限定されているため、せん断による損傷破壊は考慮されない。このため、定式化により許容されるせん断変位は凹凸を乗り越えない程度の微小な範囲に限定される。このことは、このモデルが大きな凹凸を有する不連続面や大きな変位を生じる場合には適用できないことを意味する。総じてこのカテゴリーのモデルは、室内試験結果にフィットするようパラメータの試行的な決定を要する傾向があり、このモデルのcのように物理的な意味が不明確なパラメータを導入せざるをえない場合がある。また、如何にパラメータを試行的に決定しようとも、結果の信頼性、すなわち各種の状況に対応した不連続面の挙動を再現することが可能かどうかは、その理想化の妥当性に大きく依存すると考えられる。

カテゴリー(Ⅲ)は、理論や理想化によらず、過去の多くの室内試験結果や原位置試験結果をもとに経験的に捕えた力学的挙動をモデル化する研究である。Bartonらは、任意の実際的な垂直応力レベルと任意のブロックサイズに対応した多くの不連続面の挙動を平均的な傾向として示すことを意図したモデルを提案している。これはまた、寸法効果で補正した JRC_n/JCS_n 特性に基づいて、ピーク後の不連続面の損傷による载荷履歴の効果を JRC の変化 (ピーク時において $JRC_m = JRC_p$) で考慮した点が特徴的である。ここで、 JRC は、不連続面の壁面の粗さ係数、 JCS は、不連続面の壁面の圧縮強度、インデックス s_n, m, p は、それぞれ原位置、可変性、ピーク時を意味する。以下では、せん断挙動とダイレーションの定式化を概説する。

a) せん断挙動モデル

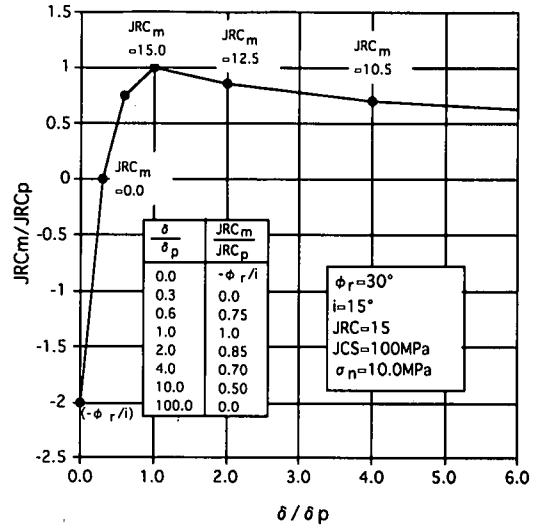
垂直応力 σ_n の下でせん断変位 δ に対応するせん断応力 τ は実験帰納的に式(7)で与えられ、また、せん断挙動の傾向は図-3に示される種々の垂直応力レベルに対応した無次元相関曲線で規定される。

$$\tau = \sigma_n \tan (JRC_m \log_{10} (JCS_n / \sigma_n) + \phi_r) \quad (7)$$

ここで、 JCS_n は不連続面の圧縮強度、 ϕ_r は残留摩擦角である。また、式(8)よりピークせん断変位 δ_p が求められる。

$$\delta_p = L_n / 500 (JRC_n / L_n)^{0.33} \quad (8)$$

ここで、 L_n は原位置における不連続面の長さを表わす。 (δ / δ_p) の値に対応して図-3の表から (JRC_m / JRC_p) の値が決定される。これより計算された JRC_m



(横軸) : ピーク時のせん断変位で無次元化したせん断変位。
(縦軸) : ピーク時の JRC で無次元化した粗さ係数。

図-3 不連続面のせん断挙動を表すBartonらのモデルの一例¹³⁾ (著者らが一部加筆)

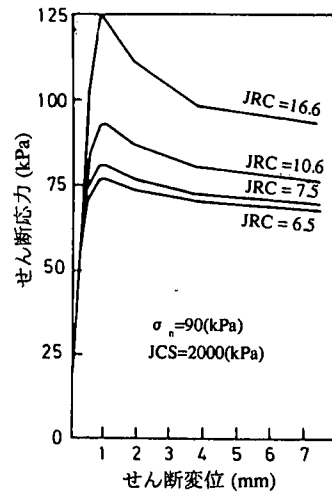


図-4 Bartonらのモデルに基づくせん断挙動の例¹³⁾

を式(7)に代入すれば、せん断変位 δ に対応したせん断応力 τ が決定される。図-3の無次元相関曲線に基づいてモデル化されたせん断変位-せん断応力関係の例を図-4に示す。この図では、 JRC で表現される表面の粗さの違いがパラメータとなっており、粗い不連続面ほど高いピーク強度を示す傾向が表現されている。

図-3の無次元相関曲線は、せん断挙動の傾向を表現する役割を担っている。この曲線を支配する δ / δ_p

と JRC_m/JRC_p の関係を示す表中の数値は、個々ではなく多数の不連続面のデータに基づいた平均的な関係として提案されたものである。また、粗さを表現する JRC の決定には主観的な傾向があると指摘されており¹⁴⁾、さらに、ピークまでと定義されている不連続面の表面凹凸の乗り上げとピーク後と定義されている表面凹凸の損傷は、物理的にも意味が異なり、 JRC で統一的に表現することにはいくらかの問題が含まれるように思われる。ピークせん断変位を L_n と JRC_n のみで決定している式(8)についても信頼性が明確化されているとは言い難いであろう。

b) ダイレーションモデル

ダイレーションは、せん断変位の増分に対する垂直変位の増分の比($\tan\psi$)におけるダイレーション角 ψ として、式(9)のように実験帰納的に定式化されている。

$$\psi = 0.5JRC_m \log_{10}(JCS_n/\sigma_n) \quad (9)$$

ここで、 ψ は垂直応力 σ_n と JRC_m の関数で表現され、せん断挙動と連動している。

図-3より、ダイレーションの発生開始点が(δ/δ_p)=0.3である δ に固定されていることが分かる。不連続面の室内せん断試験結果¹⁵⁾の中には、せん断初期に垂直変位が少し減少した後増加するようなダイレーションの傾向を示す例も見受けられるが、式(9)は、前述のせん断挙動の場合と同様に個々の不連続面の特性を反映するものではなく、平均的な傾向を示している。また、定式化に凹凸の乗り上げと損傷の両方を JRC で統一的に表現する課題もせん断挙動モデルの場合と同様である。

以上の考察に基づけば、カテゴリ(I)の挙動モデルは、現場で遭遇する具体的な挙動特性を反映するが、Bartonらのモデルに代表されるカテゴリ(III)は、多数の不連続面のデータに基づいた平均的な挙動を示すなど、それぞれ独自の観点から定式化が行われていることが言えよう。

3. 室内せん断試験による不連続面挙動の考察

不連続面の状況は現場によってさまざまであり、複雑な分布や特性を有するので、変形特性や強度特性を室内試験によって把握することが今までにも多く実施されてきた¹⁵⁾¹⁶⁾¹⁷⁾。室内試験は、要求される応力や変形に応じて適当に再現し、それを計測できる特徴を有することから、いろいろな応力状態で受けているせん断履歴による原位置不連続面の特性を

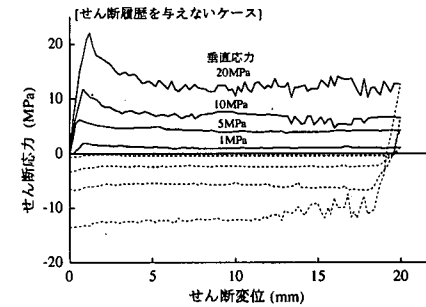
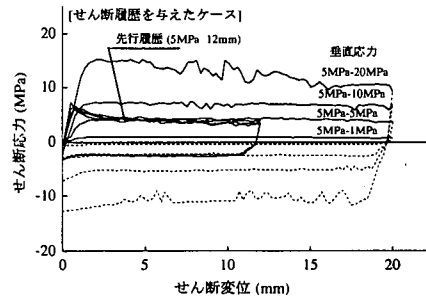


図-5 人工的不連続面のせん断応力-せん断変位曲線 (垂直応力: 1, 5, 10, 20MPa)

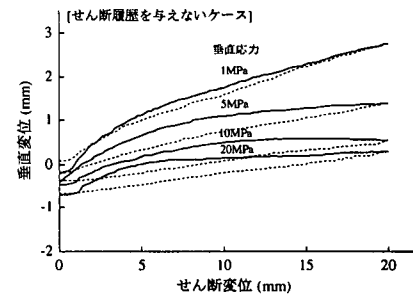
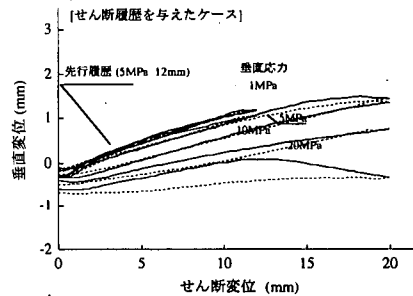


図-6 人工的不連続面の垂直変位-せん断変位曲線 (垂直応力: 1, 5, 10, 20MPa)

評価することが可能である。故に試験の結果を不連続面の力学的挙動モデルの信頼性の検証に用いることには妥当性があり、比較検討による両者の整合性は、定式化が妥当性を有する重要な要因であると考えられる。この観点より、ここでは、垂直応力をパラメータとしてせん断履歴の有無による不連続面挙動の違いを室内せん断試験により明かにした研究¹⁹⁾の概要と考察を示す。

(1) 人工的不連続面の室内せん断試験

原位置の不連続面はサンプルの数が限られるという理由から、再現性が確保できる人工的不連続面を用いた実験を実施した。試験体として使用した岩石は韓国南原産花崗岩（密度 2.61 g/cm^3 、一軸圧縮強度 162 MPa ）で、縦 120 mm 、横 100 mm 、高さ 80 mm の直方体である。試験体高さの中央位置には常に同じとみさせるJRCを有するような不連続面を作成するために、深さ 10 mm 、幅 1 mm のスリットが試験体の4側面に入れられており、垂直荷重を載荷した状態でこのスリットに2方向からくさびをあて、垂直荷重を徐々に徐荷することにより不連続面を作成する。試験は垂直応力の違いにより不連続面の諸特性を調べるため、それぞれ垂直応力 $1, 5, 10, 20 \text{ MPa}$ で最大変位 20 mm のせん断を行った。ただし、人工的に先行履歴を与える場合では、垂直応力 5 MPa のもと、せん断速度約 0.1 mm/sec で変位 12 mm に達した後、逆方向にせん断して変位 0 mm に戻す操作を行う。そのせん断履歴を受けた試験体を使って各々垂直応力 $1, 5, 10, 20 \text{ MPa}$ で最大変位 20 mm のせん断を繰り返して行った。

図-5にせん断応力-せん断変位曲線を示す。せん断応力の計算に際しては、せん断による面積の変化を補正した。まず、4本の試験体の先行履歴に差が無いことが分かる。履歴を与えた不連続面では、履歴以下の垂直応力のみならず、垂直応力 20 MPa のケースを除いて明瞭なピークは現われず、残留応力に達する。これは、初めに与えた履歴によって凹凸の表面が滑らかになったことが原因であると考えられる。また、履歴を与えた不連続面と履歴の無い不連続面の残留強度は一致していることが分かる。

図-6に垂直変位-せん断変位曲線を示す。ここでは、不連続面の初期の間隙幅を垂直変位の初期値としている。履歴を与えた不連続面に関して、せん断変位 12 mm までは履歴の無い不連続面に比べて全ての場合でダイレーションは小さくなっているが、せん断変位 12 mm 以降はその限りではない。このことから、せん断変位 12 mm までは、明らかに初めに与えた履歴（垂直応力 5 MPa 、せん断変位 12 mm の曲線）の影響を受けていることが分かる。また、先行履歴より

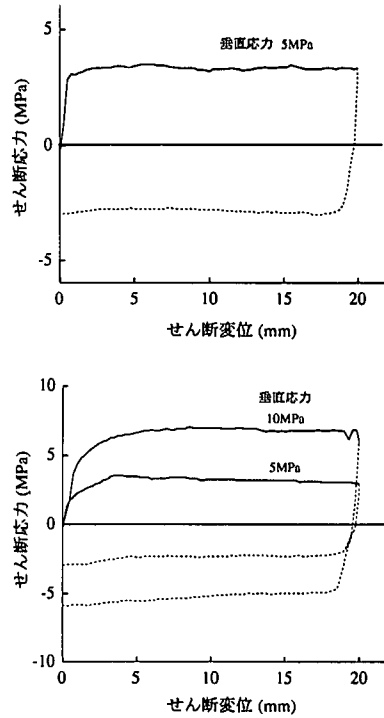


図-7 自然不連続面のせん断応力-せん断変位曲線
(上段：試験体A 下段：試験体B)

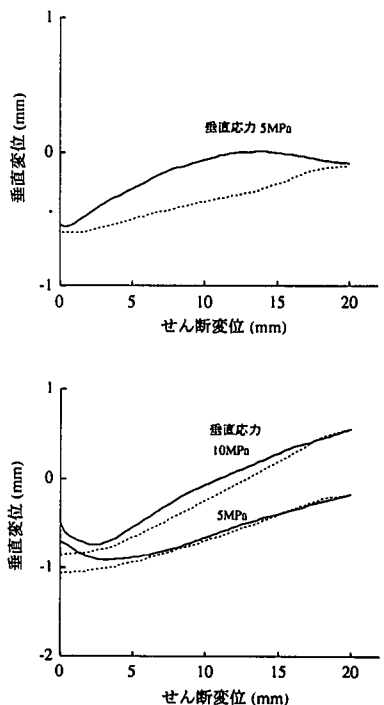


図-8 自然不連続面の垂直変位-せん断変位曲線
(上段：試験体A 下段：試験体B)

も小さな垂直応力 (1MPa) を与えた場合は、履歴の無い1MPaに比べて挙動は大きく変化し、大きな垂直応力 (20MPa) を与えた場合は、履歴の無い20MPaに比べて変化の割合が小さくなっている。

(2) 自然不連続面の室内せん断試験

ある現場の地下深部のボーリングにより採取された花崗閃緑岩の不連続面を用いた実験を行った。この不連続面を観察すると、サンプル採取以前に既にせん断履歴を受けており、上下のかみ合わせの最も良い状態から約12mm程度変位していることが推測されている。

せん断試験は、2つの試験体A、Bを用意し、垂直応力5MPaの下でかみ合った位置から、変位履歴の方向に最大変位20mmまでせん断した。試験体Aに関しては試験終了後、凹凸が大きく破壊され、ダイレーションの傾向も示さなくなったため、ここで実験を終了した。試験体Bに関してはダイレーションの傾向を示したためそこからさらに垂直応力10MPaの下同様のせん断を実施した。

図-7にせん断応力-せん断変位曲線を示す。全てのケースでせん断応力はピークを示さず、残留応力に達する。垂直応力5MPaの時、試験体A、Bの残留応力はほぼ一致する。試験体A、Bのどちらもせん断初期においてほぼ線形的な挙動を示した後、せん断剛性が減少し、残留域に達する。ただし、残留域に達するまでのせん断変位は試験体Aに比べて試験体Bが大きくなっている。このことは上下面の凹凸が乗り上げ初めてから乗り上げてしまうまでの区間が長くなっていることを示しており、試験体Aに比べてBの凹凸が周期の長い滑らかな凹凸によって支配されていることを裏付けている。

図-8に試験体A、Bの垂直変位-せん断変位曲線をそれぞれ示す。試験体Aにおいて垂直変位はせん断初期に少し減少した後、増加してダイレーションの傾向を示すが、せん断変位13mm付近から再び減少している。これはせん断変位13mm付近で周期の大きな凹凸が基底部から破壊されたためであると考えられる。これに対し試験体Bは垂直応力5MPa、10MPaのどちらもせん断初期で緩やかに垂直変位が減少した後、増加し、せん断変位20mmまで一貫してダイレーションの傾向を示す。これは凹凸の初期形状、および現場で受けた先行履歴の違いにより試験体Bの凹凸が試験体Aに比べて滑らかであったことが原因と考えられる。また垂直応力5MPaに比べて垂直応力10MPaではダイレーションはかなり小さくなり、せん断初期における垂直変位が減少する区間は長くなっている。このことから垂直応力10MPaでは

凹凸がせん断によって滑らかになり、周期の大きな凹凸による影響を強く受けていることが分かる。

(3) 考察

岩盤の不連続面のせん断挙動は、垂直応力、先行履歴の有無などによって大きく支配されることが、室内試験によって明らかになった。ピークせん断強度、ピークせん断変位、ダイレーションの発生状況、残留強度は、それぞれ、各々現場より採取された供試体によって変わり、Bartonらのモデルのような固定された経験的な曲線を基にして、あらゆる状況に対応した挙動を再現することは不可能であろう。

ここで改めて、単一不連続面の挙動モデルの定式化が妥当性および信頼性を有するための条件を考えると、上述したような岩盤の不連続面のせん断挙動を支配する要因を定式化に忠実に取り入れることが挙げられる。

4. 新しい不連続面の挙動モデルの提案

先の2章および3章で検討した妥当性や信頼性のある単一不連続面の挙動モデルが備えるべき条件に対して著者らの考えを総括すると、

- (a)不連続面の初期の凹凸、せん断履歴など、現場で遭遇する独自性のある表面特性により影響を受ける不連続面の挙動特性を反映できること、
- (b)任意の応力レベルや変位の状況に対応した実際の不連続面の挙動の忠実な再現を可能としたものであること、

となる。本研究は、室内せん断試験結果に基づいてこれらの条件を満足する不連続面挙動モデルの提案を試み、以下にその考え方と定式化を述べる。

(1) 提案モデルの考え方

岩盤不連続面の力学的挙動に影響を与える要因としては、一般に、初期の凹凸特性やせん断に伴うその損傷、垂直応力などが挙げられる。因って、定式化にあたりこれらの影響要因を反映させることが重要となる¹⁹⁾。しかし、既存モデルに見受けられるような粗さなどの数個のパラメータのみから不連続面の力学的挙動を関数的に規定することは困難であると思われる。一方で、実際の不連続面の力学特性は現場によって様々かつ複雑であり、故にその挙動特性を実際に評価するには実験的手法が有効であることは前章でも述べた通りである。そこで、定式化された挙動モデルが不連続面の室内せん断試験結果を忠実に再現することができれば、上述した影響要因を

反映した包括的な表現が可能となり、定式化が妥当性を有すると考える。さらに、これを個別要素法におけるブロック境界面の構成則として組み込むことにより、不連続性岩盤の解析的な評価の信頼性の向上に寄与すると考えられる。

(2) 定式化¹⁹⁾

現場から採取した不連続面の力学的挙動を正しく表現するために、任意の垂直応力レベルに対応可能な定式化を考える。そこでまず、モデル化される不連続面の挙動を支配し、その原型となり得る応力と変位に関する相関関係を考える。この相関関係は室内せん断試験の結果より得られ、1つの不連続面に対して垂直応力レベルに応じて唯一的に得られるものとする。因ってこれにより、現場から採取した個々の不連続面の挙動の傾向がそれぞれ代表されると考える。本論文では、これを曲線の形で表現し、代表曲線と称する。次に、1つの不連続面に対して決定された代表曲線に対して任意の垂直応力を与えると、その不連続面のモデル化された挙動が得られる。このモデル化された挙動を本論文ではモデル曲線と称する。最後に、こうして得られたモデル曲線によって試験結果がよく再現されるならば、提案モデルが不連続面の力学的挙動を適切に表現したと考える。以下に、ここで述べた手順に基づいて、せん断挙動及びダイレーションの具体的な定式化を述べる。

a) せん断応力-せん断変位関係の定式化

室内せん断試験の結果において、せん断応力 τ をピークせん断応力 τ_p で、またせん断変位 U_s を τ_p に対するせん断変位 U_p で無次元化する操作を各垂直応力毎に実施し、図-9に示すような相関関係を生成する。なお、 τ_p が明確でない場合は、残留応力と残留応力に至った時点のせん断変位を用いて代表曲線を作成する方法が考えられる。ここでは、これを代表曲線に採用する。さらに、試験結果の傾向を既成の関数形に拘束されずにより適切に反映させるために、代表曲線を表-2に示すような数列で表現することにした。表中の0.0は原点を、1.0はピークを意味する。それ以外の数値は、得られた試験結果に依存して決定され、個々の不連続面の特性を反映することが可能となる。さらに、モデル曲線と試験結果の整合性を取るために、原点およびピークにおいて両者が一致することを条件とする。以上に基づき構築した定式を式(10)に示す。

$$\tau = B \cdot \sigma_n \cdot \eta_p(\sigma_n) \quad (10)$$

ただし、 $B = \tau / \tau_p = \text{Table}(A)$

$$A = U_s / (U_p)_{rep}$$

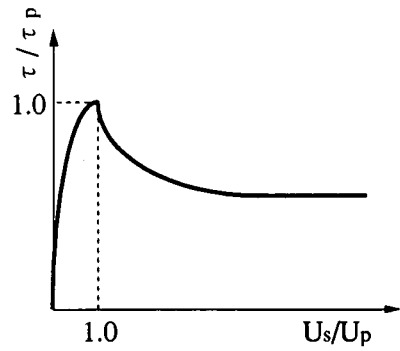


図-9 せん断挙動における代表曲線の概念

表-2 代表曲線の数列表示

A	B
$U_s / (U_p)_{rep}$	τ / τ_p
0.0	0.0
.	.
.	.
.	.
1.0	1.0
.	.
.	.
.	.
.	.

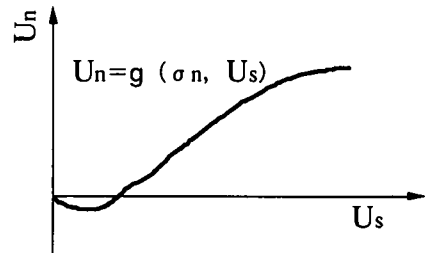


図-10 ダイレーションにおけるモデル曲線の概念

ここで、 τ :せん断応力、 τ_p :ピークせん断応力、 σ_n :垂直応力、 U_s :せん断変位、 $(U_p)_{rep}$:各々の垂直応力レベルに対応する U_p の代表値、Table(A):表-2においてA列の数値をB列の数値に対応させる操作、 $\eta_p(\sigma_n)$:任意の垂直応力における $\tan \phi_p$ を意味し、試験結果における σ_n と $\tan \phi_p$ の関係を表わす近似式であり、 ϕ_p はピーク時の摩擦角を表す。上述したピークに関する条件の要請より、この近似式は、任意の垂直応力に対してモデル曲線のピークせん断応力が試験結果のピークセ

せん断応力と一致することを保証するために導入したものである。一方でせん断変位に対してもピークに関する条件を満足すべきであるが、代表曲線が σ_n に依存しない唯一性を維持する必要から、 U_p と σ_n の関係式を式(10)に導入することはできない。因って、ここでは、試験における各垂直応力に対して得られたピーク時のせん断変位を平均することにより決定した唯一的なピークせん断変位(U_p)_{rep}を定義し、これを式(10)に導入した。モデル曲線のピークせん断変位がせん断試験結果のピークせん断変位と一致する保証は必ずしも得られないが、ここでは垂直応力毎の U_p と(U_p)_{rep}の差は小さいと仮定した。

b) 垂直変位—せん断変位の関係 (ダイレーション) の定式化

一般に、ダイレーションでは、せん断応力—せん断変位の試験結果に見られるようなピークは見られない。そこで、モデル曲線を定式化するための代表曲線概念を導入することは適当ではないと考え、モデル曲線自体に代表曲線の役割を兼ねさせることとした。ここでは、図-10に概念的に示すように、垂直変位 U_n は、せん断変位 U_s と垂直応力 σ_n の関数とし、試験の結果を最もよく表わすモデル曲線を式(11)の形式のように関数的に決定する。

$$U_n = g(\sigma_n, U_s) \quad (11)$$

本論文では、室内せん断試験結果に基づき式(11)における関数 g を決定する際、非線形多変量回帰分析を用いた。

(3) 提案モデルの検証

ここでは、式(10)及び式(11)のように定式化された提案モデルを、図-11に示した個別要素法の計算フローにおける不連続面の構成則に組み込んで、これを用いて室内せん断試験シミュレーションを実施し、試験結果の再現を試みる。合わせて、Bartonらのモデルによる同様のシミュレーションの結果も示し、それらを比較する。

再現の対象とする試験結果は、図-5～図-6に示した人工的不連続面におけるせん断履歴を与えない場合とする。なお、せん断履歴を受けた場合も同様に適用可能である。せん断応力—せん断変位の関係では、全ての垂直応力下でせん断初期に不連続面の凹凸の乗り上げや破壊によるピークが発生し、その後降下して残留応力に至っており、せん断履歴を受けていない不連続面特有の傾向が得られている。また、垂直変位—せん断変位の関係では、全ての垂直応力下でせん断変位5mm付近までは急速に垂直変位

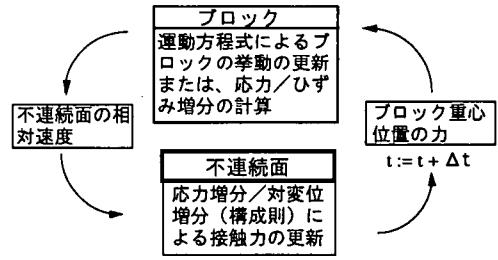


図-11 個別要素法の1計算サイクル Δt のプロセス (Δt は1計算サイクルに要する微小時間増分)

表-3 せん断試験の結果から得られたピーク時の情報

σ_n (MPa)	τ_p (MPa)	$\tan \phi_p$	U_p (mm)
20.0	22.095	1.105	1.2
10.0	11.743	1.174	1.0
5.0	6.155	1.231	0.6
1.0	1.950	1.951	0.8

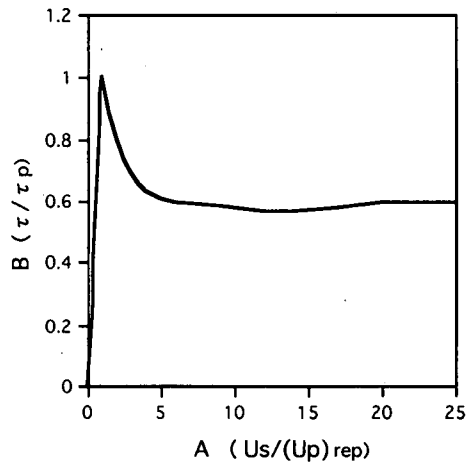


図-12 せん断試験の結果から得られた代表曲線

が増加し、その後20mmまでは緩やかな増加となり一貫してダイレーションの傾向を示す結果が得られている。

さて、提案モデルに要する入力パラメータを決定する。まず、式(10)のせん断応力—せん断変位の関係を決めるために、試験結果より得られたピーク時の情報を表-3に示す。これより、代表曲線は、試験結果より図-12のように得られた。 $\eta_p(\sigma_n)$ は、図-13に示す回帰分析の結果から、式(12)のように決定された。

表-4 B Bモデルのパラメータ

JCS ₀ (MPa)	JRC ₀	L _n (m)	L _o (m)	φ _r (°)	σ _c (MPa)
111.52	11.631	0.1	0.1	33.98	162.0

$$\eta_p(\sigma_n) = 1.858\sigma_n^{0.194} \quad (12)$$

また、 $(U_p)_{rep}$ は、各垂直応力におけるピークせん断変位の平均値であり、式(13)のように決定される。

$$(U_p)_{rep} = (1.2 + 1.0 + 0.6 + 0.8) / 4 \quad (13)$$

$$= 0.9(\text{mm})$$

式(11)の垂直変位-せん断変位の関係は、先に述べた非線形多変量回帰分析により決定された。また、Bartonらのモデルに要するパラメータは、図-5~図-6に示した試験結果や、Bartonらが示した不連続面特性評価データシート²⁰⁾に従った試験結果より、表-4に示すように得られた。

以上の解析によるせん断応力-せん断変位の関係を図-14に、また垂直変位-せん断変位の関係を図-15にそれぞれ重ねて示し、考察すると以下のようである。

a) せん断応力-せん断変位

提案モデルの結果は各垂直応力レベルに対して試験結果を概ね再現していることが分かる。ピークせん断変位に関しては、試験結果と提案モデルの結果に最大0.2mm程度の差が見られるものの、ピークせん断応力は良く一致している。これに対して表-4に示したパラメータに基づくBartonらのモデルによる結果は、垂直応力が高くなる程、試験結果よりピーク強度が低く、また、ピーク後も試験結果に見られるような強度低下を示さない傾向が得られた。これは、垂直応力が大きくなり、また、せん断が進行すれば、実際の現象として不連続面の凹凸は破壊し、JRCは変化するが、Bartonらのモデルでは、これに対する考慮が経験的な方法によるためと考えられる。一方、提案モデルは、試験結果に基づくものであり、これが包括的に再現されたと考えられる。

b) 垂直変位-せん断変位

提案モデルは、全ての垂直応力に対して試験結果を概ね再現していることが分かる。せん断変位10mm以後において波状を呈しているのは、垂直応力10MPaおよび20MPaでの試験結果の傾向が回帰分析により反映されたものである。これに対してBartonらのモデルによる結果は、どの垂直応力においても、垂直変位が試験結果より小さく、また、ほぼ直線に近い増加の傾向を示しており、試験結果とはかなり

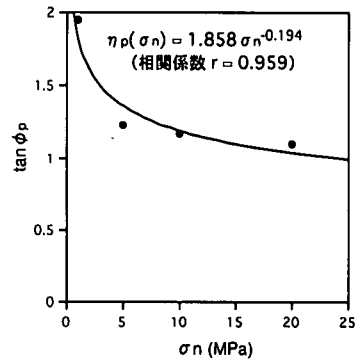


図-13 近似式 $\eta_p(\sigma_n)$ の決定

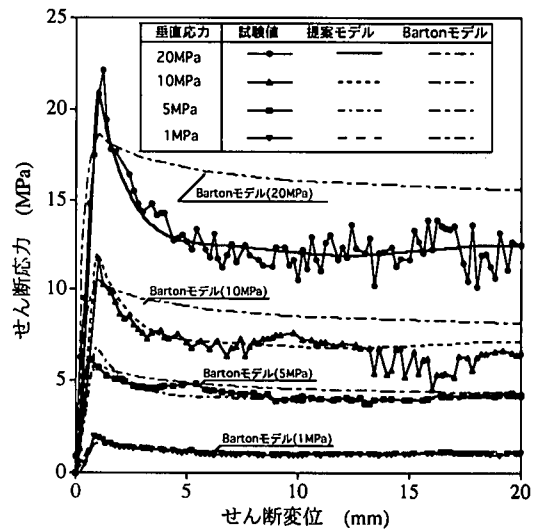


図-14 せん断応力-せん断変位の関係の比較

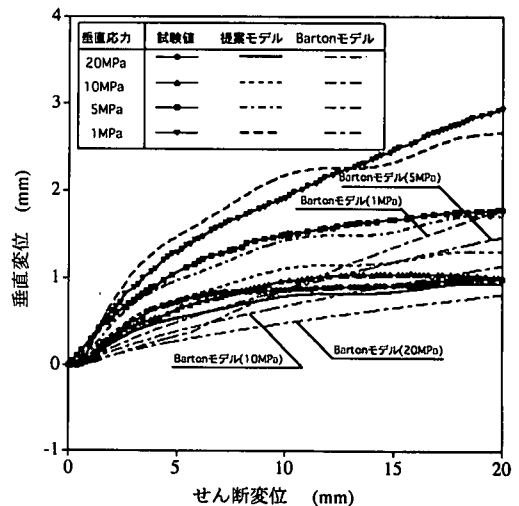


図-15 垂直変位-せん断変位の関係の比較

異なる傾向となった。

以上より、提案モデルは、Bartonらのモデルと比較しても試験結果をより適切に再現しており、提案モデルの妥当性や信頼性が検証されたと考えられる。また、提案モデルは、表-1に示した不連続面挙動モデルの分類において、個々の不連続面の影響要因を包括的に反映している点で、おおよそカテゴリー(I)の範疇に位置付けられると考えられる。

5. 空洞掘削シミュレーションへの適用

提案モデルの実際問題への適用例として、不連続性岩盤内に立地のある空洞を掘削する問題を考える。ここでは、掘削による支保工のない場合の空洞周辺の不連続面の挙動を含む岩盤の変形挙動をシミュレートする。また、Bartonらのモデルを適用して同様の解析を実施する。

(1) シミュレーションの概要

中心が地表面より500mの深さに位置する高さ22m、幅18mの地下空洞の解析モデルを図-16に示す。岩石基質部の力学的特性は弾性体とし、その物性値を表-5に示す。また、不連続面に対しては、提案モデルとBartonらのモデルを同一条件で比較するために、図-14~15で示した力学的特性を適用する。すなわち、提案モデルでは、前章で示した図-12、式(12)、式(13)、関数 g を入力パラメータとして用いた。また、Bartonらのモデルでは、図-16に基づく不連続面の長さは、 $L_n=7.6\text{m}$ と算定される。これ以外のパラメータ JCS_0 、 JRC_0 、 L_0 、 ϕ_r 、 σ_c は、表-4と同一の値を用いた。解析領域は、一般に、圧縮応力場における岩盤の変形挙動が空洞近傍に集中することから、空洞寸法の4~5倍を対象と考えて80m×80mとした²²⁾。さらに、境界条件として、この領域の周囲を岩盤と同一の物性値を有する弾性体の無限地盤を導入した。シミュレーションの手順は、側圧係数 $K_0=1.0$ とした初期地山応力分布を再現させた後、空洞壁面上で掘削相当応力を100%解放した。

(2) 解析の結果と考察

空洞掘削後、最終的に平衡状態が達成された時点において、提案モデルとBartonらのモデルによる結果を比較した。

内空壁面や空洞周辺岩盤の変位は、図-17に示した変位ベクトルにより比較される。これより、Bartonらのモデルによる方が大きな変位が得られてい

表-5 空洞周辺地山の物性値 (岩石基質部)

ヤング係数	70.0(GPa)
ポアソン比	0.25
密度	2.61(g/cm ³)

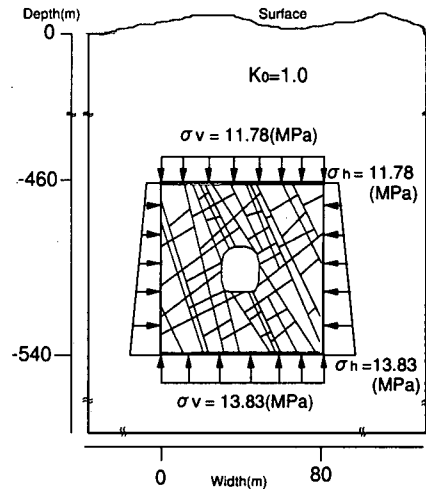


図-16 空洞掘削シミュレーションのモデル

ることが分かる。また、不連続面のせん断変位は、図-18における不連続面に沿った線の幅で示したせん断変位量により比較される。これより、空洞周辺のみならず全体的にも、提案モデルに比較してBartonらのモデルによる方が大きな結果が得られていることが分かる。これは、図-14で示したようにBartonらのモデルでは垂直応力が高くなるに従い試験結果よりピーク強度が低いことや、パラメータ L_n による寸法効果などに起因すると考えられる。

モデル化の相違による空洞周辺の岩盤挙動の相違から、不連続面挙動モデルのピークやダイレーションが、空洞の変位挙動に比較的敏感に反映されることが分かる。

6. 結論

本研究は、不連続性岩盤の挙動を適切に評価するために、室内せん断試験結果に基づく単一不連続面の新しい挙動モデルを定式化し、これを提案した。まず、現在までに提案されている単一不連続面の力学的挙動モデルを3つのカテゴリーに分類してそれらの問題点を考察した。さらに、垂直応力をパラメータとしてせん断履歴の有無による不連続面挙動

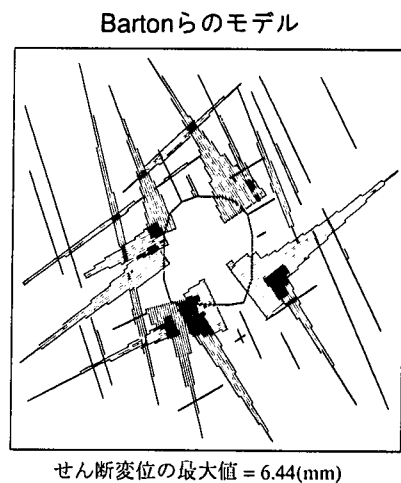
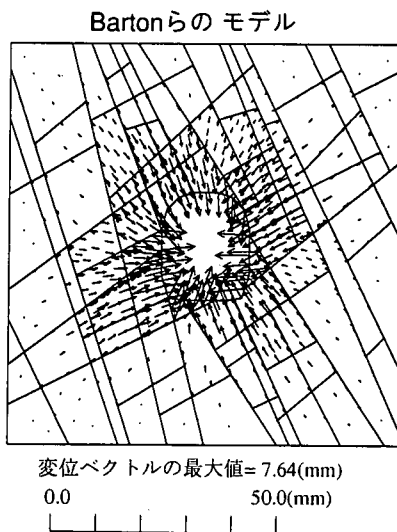
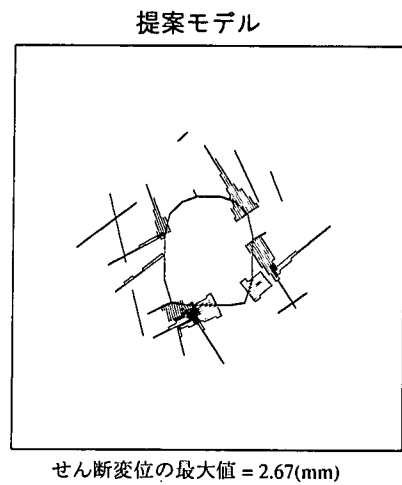
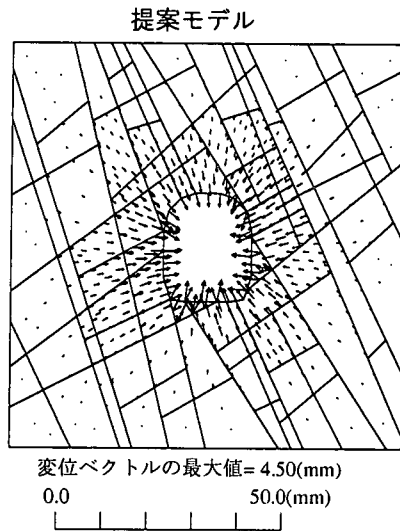


図-17 空洞周辺岩盤の変形の比較
(変位ベクトル)

図-18 不連続面のせん断変位の比較
(不連続面のせん断変位量を不連続面位置での線の幅で表示. ただし, 線の最小幅はせん断変位 0.2mm.)

の違いを明かにした室内せん断試験の結果を考察した. 以上2つの考察に基づき, 著者らは, 単一不連続面の挙動モデルの定式化が妥当性および信頼性を有するための条件を以下のように主張した.

1) 不連続面の初期の凹凸, せん断履歴など, 現場で遭遇する独自性のある表面特性により影響を受ける不連続面の挙動特性を反映できること.

2) 任意の垂直応力レベルや変位の状況に対応した実際の不連続面の挙動の忠実な再現を可能としたものであること.

以上の条件を踏襲し, 実際の不連続面の室内せん

断試験結果に基づいた単一不連続面の力学的挙動挙モデルを新たに定式化した. そして, この定式を個別要素法における不連続面の構成則として組み込み, これを用いて室内せん断試験の結果の再現を試みた. また既往の代表的な力学的挙動モデルである Bartonらのモデルを用いた解析結果と比較することにより, その妥当性を検証した. これより,

1) 提案モデルを用いた解析の結果では, 全ての垂直応力に対して室内せん断試験の結果が概ね再現された. 因って, 提案モデルの妥当性, 信頼性が検証されたと考えられる.

2) せん断応力—せん断変位の関係に対するBartonらのモデルでは、ピーク強度が提案モデルほど示されず、試験結果とかなり相違した残留応力が得られた。また、垂直変位—せん断変位の関係においても、どの垂直応力に対しても垂直変位が試験結果より小さく、かなり異なる傾向となった。これは、Bartonらのモデルを用いてあらゆる状況に対応した不連続面の挙動を再現することの困難を示唆するものと考えられる。

3) 空洞を掘削する同一条件の問題に、提案モデルおよびBartonらのモデルを適用して得られた結果を比較した際、明確な相違が見られたことから、モデル化された不連続面の特性が空洞の変位挙動に比較的敏感に反映されることが分かった。

本論文で提案した挙動モデルは、信頼性を有するように、せん断履歴、垂直応力などの実際の不連続面に与える主な影響要因を取り入れた。しかしながら、モデルの信頼性をさらに確たるものとするには、本論文に示したような実際現象の再現のみならず、挙動のメカニズムの理論的、数学的な考察を根拠とするところまで進展させる必要があると考える。また、寸法効果の考慮や繰り返しせん断時のモデル化という課題が残されている。

参考文献

- 1) R.E.Goodman原著, 赤井, 川本, 大西共訳: 不連続性岩盤の地質工学, 森北出版, 1978.
- 2) Saeb, S. and Amadei, B.: Modeling rock joints under shear and normal loading, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 29, pp.267-278, 1992.
- 3) Souley, M., Homand, F. and Amadei, B.: An extension to the Saeb and Amadei constitutive model for rock joints to include cyclic loading paths, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 32, pp.101-109, 1995.
- 4) Souley, M. and Homand, F.: Stability of jointed rock masses evaluated by UDEC with an extended Saeb-Amadei constitutive law, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 33, pp.233-244, 1996.
- 5) Barton, N.: A relationship between joint roughness and joint shear strength, *Rock Fracture -Proc. Int. Symp. on Rock Mechanics*, Nancy, France, paper 1-8, 1971.
- 6) Barton, N.: Predicted and Measured Performance of 62m Span Norwegian Olympic Ice Hockey Cavern at Gjøvik, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 31, pp.617-641, 1985.
- 7) Lemos, J. V., Hart, R.D. and Cundall, P. A.: A generalized distinct element program for modeling jointed rock mass,

- Int. Proc. Symp. fundamentals of Rock Joints*, pp.335-343, Bjorkliden, 1985.
- 8) Kimura, T. and Esaki, T.: A new model for the shear strength of rock joint with irregular surfaces, *Int. Proc. Symp. Mechanics of Jointed and Faulted Rock*, pp.133-138, Austria, 1995.
- 9) 杜 守継, 江崎哲郎, 蔣 宇静, 小林和昭: 岩盤不連続面のフラクタル特性とせん断強度との関係に関する研究, 第28回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.166-172, 1997.
- 10) Jing, L.: Numerical modeling of jointed rock masses by distinct element method for two and three-dimensional problems, Ph.D.Thesis, 1990:90 D, Lulea University of Technology, Lulea, Sweden, 1995.
- 11) Jing, L.: Nordlund E. Stephansson O.: A 3-D Constitutive Model for Rock Joints with Anisotropic Friction and Stress Dependency in Shear Stiffness, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 31, pp.173-178, 1994.
- 12) Plesha, M. E.: *Rock Joints, Theory, Constitutive Equations*, Elsevier Science, 1995.
- 13) Barton, N., Bandis, S. and Bakhtar, K.: Strength, Deformation and Conductivity Coupling of Rock Joints, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 22, pp.121-140, 1985.
- 14) 岸田深, 谷本親伯: 岩盤不連続面のラフネスの評価とせん断強度の推定, 第10回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp.85-90, 1998.
- 15) 江崎哲郎: 岩の不連続面のShear-Flow Coupling試験装置の開発(試験研究(B)(1)), 研究成果報告書, 平成6年度科学研究費補助金, 1995年3月.
- 16) 斎藤敏明, 寺田孚: 岩盤不連続面の表面形状がせん断強度に及ぼす影響について, 第8回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp.97-102, 1990.
- 17) 吉中龍之進, 吉田 淳, 清水昭男, 新井 元, 蟻坂俊英: 岩盤不連続面の強度・変形特性の寸法効果に関する研究, 第8回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp.91-96, 1990.
- 18) 中川光雄, 蔣 宇静, 江崎哲郎: 岩盤空洞の安定解析のための不連続面挙動モデルの検討について, 第27回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.21-25, 1996.
- 19) 中川光雄, 蔣 宇静, 江崎哲郎: 岩盤不連続面の力学的挙動モデルの提案について, 第28回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.194-198, 1997.
- 20) 小杉昌幸, グナービック, ニコラスパートン: JRC/JCS指標によるジョイント特性評価, 不連続岩盤評価の予測研究(第1報), 資源, 第3巻, 第1号, pp.11-21, 1991.
- 21) 小杉昌幸, 中川光雄, 石原幸治: 不連続性岩盤の挙動予測に基づくトンネル支保設計, 土木学会論文集, 第487号/Ⅲ-26, pp.21-29, 1994.

(1997. 9. 10 受付)

**A PROPOSAL AND APPLICATION OF MODELING OF MECHANICAL
BEHAVIOR OF DISCONTINUITIES IN STABILITY ANALYSIS OF
UNDERGROUND OPENINGS IN ROCK MASS**

Mitsuo NAKAGAWA, Yujing JIANG and Tetsuro ESAKI

It is thought that a best way to apply a distinct element method built in reliable mechanical models of discontinuities to the estimation of mechanical stability of underground openings and to bring its results into designs. In this paper, the conditions that formulation has appropriateness and reliability, are shown by means of taking up some representative models in the past and by considering any questions in the formulations. Next, a new mechanical model of discontinuities which is based on that considerations is proposed, appropriateness and reliability of the model are verified by means of comparison among the result of shear test, and the comparison between the proposed model and Barton model in the reproduction analysis of shear test. As an example, simulation of underground opening excavation is tried.