

岩盤不連続面の力学的挙動モデルの提案について

A Proposal for Modeling of Mechanical Behavior of Discontinuities in Rock Mass

中川光雄*・蔣 宇静**・江崎哲郎***

Mitsuo Nakagawa, Yujing Jiang and Tetsuro Esaki

The most important problem on the stability analysis of underground opening in discontinuous rock mass lies in application of numerical procedures which can express discontinuity behavior correctly. In this paper, the new modeling method of mechanical behavior of discontinuity, which is based on the results of shear test, is proposed here and is built into UDEC cord. The appropriateness and reliability of this proposed model are explained by means of comparison with Barton-Bandis model, and the verification for this proposed model is carried out by reproducing the experimental behaviors of discontinuity according the different normal stress levels. As the application example, the excavation simulation of opening in discontinuous rock mass is shown.

1. はじめに

地下空間の利用が積極的に進められる今日において、良好な岩盤サイトの激減が懸念されている。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、その力学的特性および水理学的特性を解明することは地下空間の設計・施工・維持管理において重要な課題となる。例えば大規模地下空洞などの掘削における安定性を解析的に評価する場合、空洞周辺岩盤の変形や破壊の大部分が不連続面に沿うせん断やダイレーションに起因すると考えられることから、岩盤不連続面の幾何学的分布特性およ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る。

ここで話題を不連続面の力学的挙動の表現に限定した場合、如何にして妥当性や信頼性のある不連続面挙動モデルを設計するかが課題となる。今日ではBarton-Bandisモデルをはじめとする幾つかの不連続面挙動モデルが提案され、それらの適用例が示されている¹⁾。しかし、それらの妥当性や信頼性はまだ明らかにされていないように思われる。

本報では、実際の不連続面の室内せん断試験結果

に基づいた不連続面挙動モデルを新たに提案し、その特徴を示す。まず、既発表のモデルとしてBarton-Bandisモデルを例に取りこれと比較しながら、著者らの提案モデルが実際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。次にせん断やダイレーションのモデル化の具体的な方法を述べて、ここで構築された定式化を組み込んだ個別要素法解析を用いてせん断試験結果の再現を試みることにより、その妥当性を示す。最後に、本モデルによる解析の適用例として、不連続性岩盤内における空洞掘削シミュレーションの結果を示し、Barton-Bandisモデルによる結果と比較して適切なモデル化の重要性を示す。

以上の検討に有効な解析手段と考える個別要素法は、定式化された不連続面挙動モデルが正確に挙動するよう接触機構を特殊化したUDECが適当であると判断し、本報ではこれを適用した。

2. 不連続面挙動の既存モデルと課題

本報では、既発表モデルの中でも最も代表的な

* 正会員 修(工) (株)CRC総合研究所 西日本事業部 科学システム第1部 係長
** 正会員 博(工) 九州大学工学部 環境システム工学研究センター 助教授
*** 正会員 博(工) 九州大学工学部 環境システム工学研究センター 教授

Barton-Bandisモデル²⁾を例に取る。Barton-Bandisモデルは、任意の実験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平均的な傾向を示すことを意図して提案されている。また、寸法効果で補正したJRC/JCS特性に基づいて、ピーク後の不連続面の損傷による載荷履歴の効果をJRC_m（ピーク時においてJRC_m=JRC_p）の変化で考慮した非線形で表現される点が特徴的である。ここでは、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_p に対応するせん断応力 τ は実験帰納的に式（1）で与えられ、また、せん断挙動の傾向は図-1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。

$$\tau = \sigma_n \cdot \tan (JRC_m \cdot \log_1(JCS_m / \sigma_n) + \phi) \quad (1)$$

また、式（2）よりピークせん断変位 δ_p が求められる。ここで、 L_n は現位置における不連続面の寸法を表わす。

$$\delta_p = L_n / 500 \cdot (JRC_n / L_n)^{0.33} \quad (2)$$

(δ/δ_p) の値に対応して図-1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を式（1）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。

さて、せん断挙動の傾向を表現する無次元相関曲線の形状は、不連続面の個々の特性が反映されない定式となっている。また、粗さを表現するJRCの決定に主観的な傾向があることは否めず、さらには不連続面の凹凸の乗り上げ（ピークまでと定義されている）と損傷（ピーク後と定義されている）は物理的意味が異なり、JRCという同一パラメータで統一的に表現することには問題があるように思われる。ピークせん断変位を L_n とJRC_nのみで決定している式（2）についても信頼性が明確化されているとはいえないであろう。

b) ダイレーションモデル

ダイレーションは、垂直応力 σ_n とJRC_mの関数として式（3）で実験帰納的に定式化され、せん断挙動と連動している。

$$\psi = 0.5 \cdot JRC_m \cdot \log_1(JCS_n / \sigma_n) \quad (3)$$

ここで、図-1より、ダイレーションの発生開始点は $(\delta/\delta_p)=0.3$ であると定式化されている。しかしながら、不連続面のせん断試験によると、せん断初期に垂直変位が少し減少した後、増加するダイレーションの傾向を示すように、図-1に示した定式とは異なっ

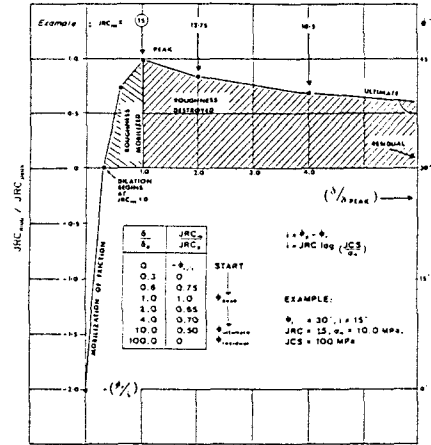


図-1 せん断応力/せん断変位挙動の無次元化モデル

たせん断試験結果³⁾が得られていることから、この定式化により様々な不連続面の特性が反映されないことが分かる。また定式にJRC_mを用いている点もせん断挙動モデルにおける課題と同様である。

3. 新しい不連続面の挙動モデルの構築と定式化

前節で検討したように、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必要条件としては、a) 定式化は、種々の状況に対応した実際不連続面の挙動の再現を可能としたものであること。すなわち、定式に過剰に拘束されて、実際不連続面の挙動を過大評価あるいは過小評価するようなことがあってはならないこと、b) 定式化におけるパラメータの決定が客観性を有すること、が挙げられる。本研究は、これらに満足できる提案を試みた不連続面挙動モデルの概念と定式化を述べる。以下ではこれを提案モデルと称する。

(1) 提案モデル構築の基本方針

岩盤構造物の挙動は不連続面の力学的挙動に大きく依存する。さらに不連続面の力学的挙動に影響を与える要因には、せん断剛性、寸法効果、強度特性、先行履歴、ダイレーションがある⁴⁾。因ってモデル化にあたり、これらの影響要因を反映させることが重要となる。しかし、既発表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はないかと思われる。一方で、実際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、故にそれらの挙動特性を実際に

評価するには実験の手法が有効であると考えられる。そこで、不連続面の室内せん断試験結果に基づくモデルを個別要素法に組み込んで、これを数値解析的に忠実に再現することができれば、せん断剛性、強度特性、先行履歴、ダイレーションの反映が可能となり、因ってかなり信頼性や妥当性を有する評価が可能になると考える。

(2) 提案モデルの定式化

現場から採取してきた不連続面の力学的挙動を正しく表現するために、まず、垂直応力に依存しない唯一のモデルの原型を構築する。このモデルの原型を代表曲線と称する。代表曲線は得られた試験結果に依存し、挙動の傾向を適切に反映する役割を負う。次に代表曲線に任意の垂直応力を施すと、本定式によりモデル化された不連続面の挙動が得られる。これをモデル曲線と称する。モデル曲線が幾つかの垂直応力に対して得られた試験結果を平均的に最もよく再現できれば、提案モデルが不連続面の力学的挙動を適切に表現できたと考える。

a) せん断挙動

せん断応力—せん断変位の関係のモデル化では、各垂直応力に対応した実験結果をピークせん断応力とピークせん断変位で無次元化した無次元化曲線を代表曲線とする。また、実験結果の傾向をより適切に反映させるために、代表曲線は表一1に示すような数列で表現することにした。ここで表中の0.0は原点、また1.0はピーク点を意味する。また、それ以外の数値は、得られた試験結果に依存して変化し、個々の不連続面の特性を反映することが可能となる。さらにモデル曲線は試験結果の原点およびピーク点との整合性をとることを条件とする。以上に基づき構築した定式化を式(4)に示す。

$$\tau_t = B \cdot \sigma_n \cdot \eta_p(\sigma_n) \quad (4)$$

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

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

ここで、 τ_t : 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、 $(U_p)_{\text{rep}}$: 代表ピークせん断変位、 $\eta_p(\sigma_n)$: 試験結果における σ_n と $\tan \phi_p$ の関係を表わす近似式。この近似式は、各垂直応力に対応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せん断応力と一致することを保証しようとしたものである。一方で代表曲線が σ_n に依存しない唯一性を維

表一1 代表曲線の概念

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

持する必要から、ピークせん断変位を σ_n の関数で表現することはできない。ここでは試験結果の各ピークせん断変位を平均することにより代表的なピークせん断変位 $(U_p)_{\text{rep}}$ を決定し、これを用いることとした。モデル曲線のピークせん断変位が試験結果のピークせん断変位と一致する保証は得られないが、ここでは試験から得られる垂直応力によるピークせん断変位のばらつきは小さいと仮定する。

b) ダイレーション

垂直変位—せん断変位の関係のモデル化では、モデル曲線が代表曲線の役割を兼ねる定式化とした。因ってせん断挙動のモデル化で示したような試験結果の無次元化処理は不要となる。ここでは垂直変位はせん断変位と垂直応力の関数とし、試験結果を最もよく表わすモデル曲線を決定する。この定式化は、式(5)のようになる。

$$U_n = g(\sigma_n, U_s) \quad (5)$$

ここで、 U_n : 垂直変位、 σ_n : 垂直応力、 U_s : せん断変位である。実験結果に基づき式(5)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。

4. 提案モデルの検証

提案モデルの妥当性を検証するために、花崗岩に作成した人工的不連続面の室内せん断試験結果³⁾を利用して、定式化を組み込んだUDE Cを用いて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た。また、Barton-Bandisモデルによる同様のシミュレーションの結果も示し、それらと比較する。

試験体として使用した岩石は韓国南原産花崗岩(比重2.61、一軸圧縮強度162MPa)で、縦120mm、横100mm、高さ80mmの直方体である。試験は不連続面を人工的に作成した後、それぞれ垂直応力1MPa、5MPa

，10MPa，20MPaで最大変位20mmのせん断を行った。得られたせん断応力-せん断変位の関係を図-2に示す。これより、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る、先行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-せん断変位の関係を、図-3に示す。これより、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、本定式に要するパラメータを決定するために、試験結果より得られたピーク時の情報を表-2に示す。これより、 $\eta_p(\sigma_n)$ と $(U_p)_{rep}$ が次式のように求められる。

$$\begin{aligned}\eta_p(\sigma_n) &= 1.858 \sigma_n^{0.194} \quad (6) \\ (U_p)_{rep} &= (1.2+1.0+0.6+0.8)/4 \\ &= 0.9 \text{ (mm)}\end{aligned}$$

代表曲線の数列表は紙面の都合で掲載しない。また、Barton-Bandisモデルに要するパラメータは、Bartonらが示した不連続面特性評価データシートに従って試験結果より表-3に示すように求めた。以上の解析によるせん断応力-せん断変位の関係を図-2に、また垂直変位-せん断変位の関係を図-3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 (図-2) : 提案モデルの結果は全ての垂直応力に対して試験結果と概ね良好な一致を示している。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Barton-Bandisモデルの結果は、ピークが全く見られない。また、残留応力レベルは、試験結果と比較してどの垂直応力でもほぼ1/2程度の低い結果が得られている。

b) 垂直変位-せん断変位 (図-3) : 提案モデルは全ての垂直応力に対して試験結果と概ね良好な一致を示している。せん断変位が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-Bandis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、かなり異なる傾向となった。

以上より、試験結果は、Barton-Bandisモデルよりも提案モデルにより適切に再現され、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。

表-2 試験結果 (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

表-3 B Bモデルのパラメータ

JCS ₀	JRC ₀	Ln	Lo	ϕ_r	σ_c
(MPa)		(m)	(m)	(deg)	(MPa)
111.52	3.66	0.1	0.1	18.0	162.0

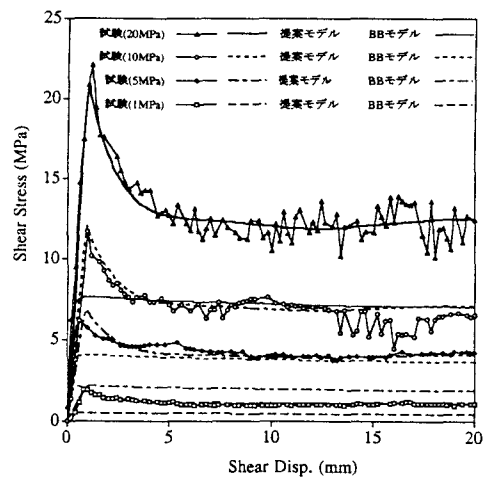


図-2 せん断応力-せん断変位の関係の比較

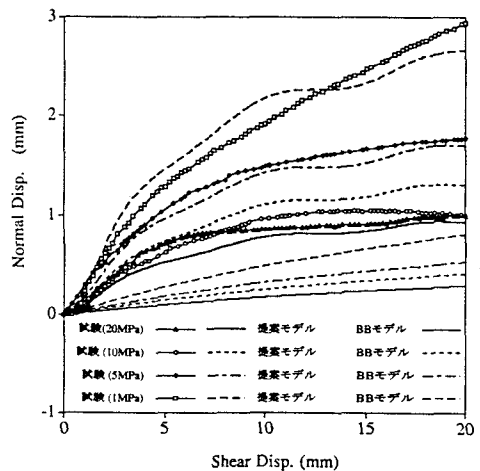


図-3 垂直変位-せん断変位の関係の比較

5. 空洞掘削シミュレーション

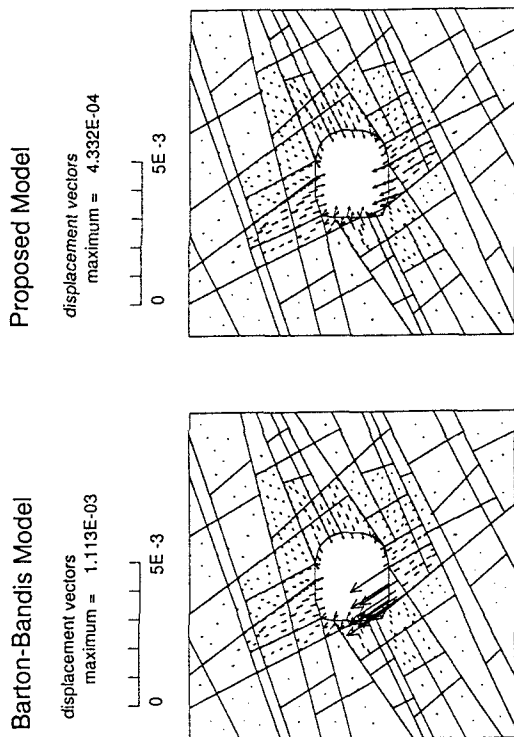


図-4 系の全体的な変形の比較

提案モデルの実際問題への適用例として、不連続性岩盤内の深さ300mの位置に高さ22m、幅18mの空洞を開削する問題を考える。不連続面の力学的挙動は図-2と図-3に示した試験結果から得られた挙動モデルを用いた。また、表-3に示したパラメータを用いたBarton-Bandisモデルによっても同様の解析を実施し、釣合状態における両モデルによる結果を比較した。

図-4に系の全体的な変形の比較を示す。これより、Barton-Bandisモデルによる結果には、右側壁部のくさび型ブロックに比較的大きな移動が見られる。これは、前章で示した同一応力レベルにおけるせん断強度の差によると考えられる。また、図-5に不連続面のせん断変位の比較を示す。これより、せん断変位の全体としての分布は提案モデルの方が大きいと思われる。これも同様に、前章で示したダイレクションの増加率の差によると考えられる。

モデル化の相違による岩盤空洞の挙動の相違から、安定性評価と支保設計を行うにあたって適切な不連続面挙動モデル化の重要性が認識できよう。

6. おわりに

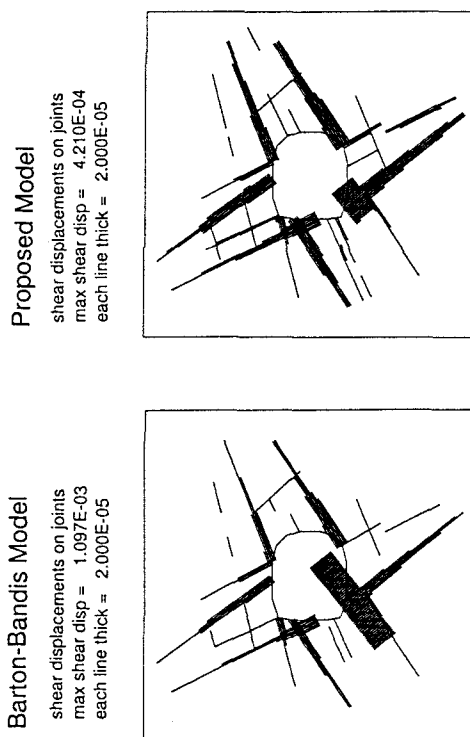


図-5 不連続面のせん断変位の比較

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提案し、定式化を示した。また、室内せん断試験結果を再現することによるモデルの検証と、空洞掘削シミュレーションへの適用を試みた。本研究では、寸法効果の取り扱いやせん断リバーシ時のモデル化という課題が残されている。また、各種の現場への適用の試みも望まれるところである。

参考文献

- 1) Barton N.: Predicted and Measured Performance of 62m Span Norwegian Olympic Ice Hockey Cavern at Gjøvik: Int.J.Rock Mech. Vol.31, No.6, pp.617-641, 1994.
- 2) Barton N., Bandis S., Bakhtar K.: Strength, Deformation and Conductivity Coupling of Rock Joints: Int.J.Rock Mech. Vol.22, No.3, pp.121-140, 1985.
- 3) 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, 平成7年3月.
- 4) 中川光雄, 蔭 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.