

(5) 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

Investigation of Joint Behavior Model for Stability Analysis of Rock Mass Opening

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 both appropriate field survey and the construction of the modeling based on the appropriate design of discontinuous behavior. In this paper, the field survey involved Q-system and the appropriate design of modeling of discontinuity behavior with UDEC cord are investigated. A quite different deformation of the entire region of the model between natural discontinuity and B-B model are obtained. It becomes clear that the feature of natural discontinuity is needed to be accounted when making the stability design of the structure in the discontinuous rock mass.

1. はじめに

最近、高レベル放射性廃棄物の地層処分、エネルギー地下貯蔵などの地下空間の利用や深部の資源開発が注目されている。これらは、地下岩盤の強度、密閉性、耐久性、隔離性などの優れた特徴を積極的に活用するものである。その一方で、地下空間の利用が今後更に進められるほど、良好な岩盤サイトは激減することが予測される。この点からも、不連続性岩盤内に空間の立地を考える場合、不連続面の状態、特に、不連続面の力学的特性と水理学的特性の解明は、地下空間の設計・施工・維持管理において重要な課題である。

不連続性岩盤の力学的挙動予測を解析的に実施する場合には、不連続体問題としての取扱いが有効な手段と考えられ、これを直接モデル化できる数値解析手法が望まれる。これには個別要素法 (DEM) をはじめとして、剛体パネモデル (RBSM)、不連続変形法 (DDA)、ブロック理論などが挙げられるが、個別要素法解析コードの中でも特に、接触状態にある不連

続面に対して定量的な挙動モデルの組み込みや破壊後の大変形挙動までの追跡が可能なることから、UDEC¹⁾が比較的有効な解析手法であると思われる。

一方、岩盤構造物の安定性評価を個別要素法解析を用いて実施する場合、如何にして妥当性及び信頼性のある結果を得て、これを設計に有効に反映させるかが課題となる。ここで重要となるのは不連続面の挙動モデルの適切な設計にあると考え、本研究は、室内せん断試験より得られた自然の不連続面の挙動を考慮して設計した挙動モデルを個別要素法解析コードに組み込むことにより、仮想的な不連続面挙動を取り扱った Barton-Bandisモデル (UDEC-BB) に対して妥当性及び信頼性があるかどうかを検討した。また、解析モデルシミュレーションより、適切な不連続面の挙動モデルを検討する。

2. 不連続性岩盤の安定解析の課題

今までにも不連続性岩盤の挙動を数値解析により評

* 正会員 工修 CRC総合研究所 西日本事業部 科学システム第1部

** 正会員 工博 九州大学工学部助教授 環境システム工学研究センター

***正会員 工博 九州大学工学部教授 環境システム工学研究センター

価することが数多く試みられてきた。しかしながら、解析モデルの構築に現場から得られた情報が適切に反映されるようなプロセスが明らかにされているとはいえない。また不連続面の挙動メカニズムの解明においても十分とは言えず、これに対しては基礎的な実験に基づくメカニズム解明とその解明に基づく挙動モデル化が課題となると考えられる。因って著者らは岩盤空洞の安定解析において、次の項目を課題として考える。

- a) 現場調査に基づく不連続性岩盤モデルの構築
- b) 適切な不連続面の挙動モデルの設計

3. Qシステムによる岩盤評価

1970年代からいくつかの岩盤分類システムが発達してきた。この中で、岩盤の不連続性に着目し、数多くの事例の考察に基づいたQシステム²⁾がある。不連続性岩盤の原位置調査におけるQシステムでは、1)岩盤評価のためのQ値、2)不連続面の幾何学的分布特性(密度)、3)単一不連続面の特性(トレース長さ、開口幅、方向)が予測されるであろう。また自然不連続面の室内試験より導かれる力学的特性を加えると、これらに基づいた信頼性のある全体解析モデルの構築が期待される。

Qシステムの利用として、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実例が報告されている³⁾。さらに解析の連続体・不連続体アプローチとQ値の関係についてBarton⁴⁾は、図-1に示すように、Q値が0.1以下の亀裂が非常に多い場合、またQ値が100以上の土被りが非常に厚い岩盤挙動の予測には、等価な連続体モデルによるアプローチが適し、0.1から100の間では、不連続体モデルの方が亀裂をうまく考慮することができ、個別要素法によるモデル化は有効なものであると指摘している。

4. 不連続面の挙動の影響要因とモデル化

不連続性岩盤の挙動を解明する際、適切な単一不連続面の挙動モデルの構築が最も重要な課題となる。こ

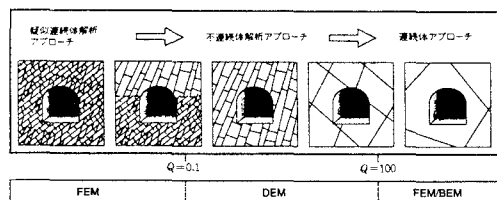


図-1 解析手法のQ値に基づくアプローチの区分

の不連続面の力学特性は、現場によって様々であり、複雑である。そこで、それらを実際に評価するには、実験的に検討する方が有効であると考えられる。特に自然の不連続面の室内試験より得られた挙動を個別要素法解析に組み込むことができれば、かなりの信頼性や妥当性を有する評価が可能になると思われる。

(1) 不連続面の挙動の影響要因

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が、代表的な影響要因を実験的にも既に認識されている範囲で挙げると以下の項目が考えられる。

a) せん断剛性

せん断剛性は、せん断方向の変位増分に対するせん断応力の増分の比で定義され、不連続面がせん断方向に変形を起しやすいか否かを評価する一つの指標として重要な意味をもつ。せん断性に影響を与える代表的なパラメータとして、垂直応力、粗さ、壁面の強度が挙げられるが、これに関して著者の江崎は室内せん断試験による結果及び考察を報告している⁵⁾。

b) 寸法効果

不連続面の寸法の増加に伴ってピークせん断強度及びせん断剛性は、低下することが知られている。このような寸法効果は試験結果を現場の問題に適用する際に考慮する必要がある。

c) 強度特性

不連続面の強度特性は、表面の粗さに影響され、粗い不連続面はピークせん断強度が発生する傾向を示し、さらにせん断が進むと残留強度に収れんする。表面形状が粗いほどピークせん断強度は増加するが、粗さをもたない面はピークを示さずせん断強度と残留強度が等しくなる。

d) 先行履歴

現場における岩盤不連続面は初期応力状態の下で既にせん断履歴を受けているものがある。実験によると履歴を与えた不連続面では凹凸の表面が滑らかになっているため、ピーク強度が現れず残留強度に達し、また、履歴を与えた不連続面と履歴のない不連続面の残留強度が一致したことも報告されている⁵⁾。

e) ダイレイション

ダイレイションは不連続面に垂直方向の変形を意味するが、せん断に起因する不連続面に垂直な方向の拡大であり、岩盤構造物の変形挙動を大きく支配する。従ってモデル化の際はこれに十分な考慮を要する。

(2) 不連続面挙動のモデル化への反映

以上列举した影響要因をモデル化の際に反映するに

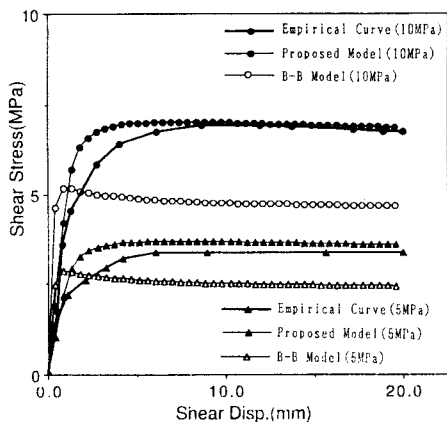


図-2 セン断応力-せん断変位挙動

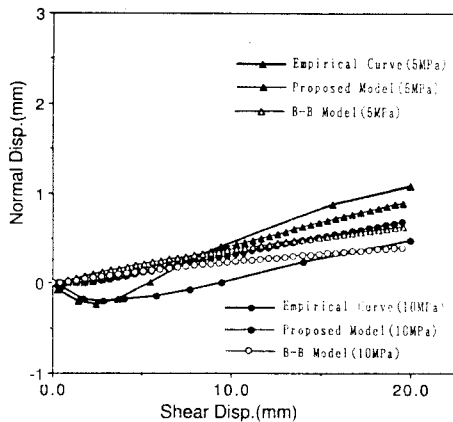


図-3 垂直変位-せん断変位挙動

は、粗さなどの数個の特定パラメータのみから不連続面の挙動を関数的に規定することは困難であると考えられる。より実際の現象に近い不連続面の挙動モデルを設計するには、自然の不連続面より得られた室内試験の結果を数値解析的に忠実に再現することが最も大切であり、この方法により、せん断剛性、先行履歴、ダイレーションはモデル化への反映が比較的可能であると考えられる。ただし、寸法効果やその他の影響要因は今後の検討課題とする。

5. 不連続面の挙動モデルと適用

最初に少し触れたが、既にBarton-Bandisモデル(B-Bモデル)を組み込んだUDE C-BBが公開されている。しかしながら、B-Bモデルが多くの経験則や実験式に基づいた仮想的な挙動モデルであることは否めず、その妥当性は今だ明らかにされていない。さて、ここでは、検討段階である著者らの定式化に関する提案の概要を述べる。また、モデル解析により不連続面の適切な挙動モデルを示す。

(1) 定式化の概要

まず自然の不連続面を対象とした室内せん断試験を数種類の垂直応力下において実施し、せん断応力-せん断変位曲線及び垂直変位-せん断変位曲線を求め、しかもそれらがある程度の間隔をもつ有限個の数値データに変換する。試験を実施していない垂直応力下での挙動特性に関しては、試験結果より得られた挙動特性に基づいた線形補間が可能であると思われる。これらを不連続面挙動モデルとして個別要素法コードUDE Cに組み込む。因ってここで提案した不連続面挙動モデル(以下、提案モデルと呼ぶ)は、せん断特性、

ダイレーション共にほぼ実際の不連続面挙動を再現することになる。

(2) 解析モデルへの適用

提案モデルとB-Bモデルを用いる場合、不連続性岩盤の挙動の解析結果にどのような相違が発生するかを考察するために、圧縮試験シミュレーションと岩盤空洞の安定解析を実施した。

ここで用いた岩石及び不連続面の物性値は、ある現場の地下深部から採取された花崗閃緑岩の供試体試料に基づくものであり、これを表-1に示す。この自然不連続面の室内せん断試験より得られたせん断応力-せん断変位挙動を図-2に示す。不連続面が既にせん断履歴を受けており、せん断応力はピークを示さず、残留応力に達していることがわかる。また垂直変位-せん断変位挙動を図-3に示す。ダイレーションがせん断初期に少し減少した後に増加する傾向を示している。これらの図には、同一供試体から得られたB-Bモデルに要求される物性値(表-2)に基づく挙動特性を合せて示す。B-Bモデルと自然の不連続面との相違に着目すると、せん断応力-せん断変位挙動に関してはB-Bモデルにピーク強度が見られ、しかも残

表-1 供試体試料の基本物性値

弾性係数 (MPa)	ポアソン比	密度 (kg/m ³)	一軸圧縮強度 (MPa)
7.0×10^6	0.25	2500.0	150.0

表-2 B-Bモデルの物性値

JRC ₀	JCS ₀ (MPa)	L ₀ (m)	L _n (m)	ϕ_r (deg)
8	35.0	0.12	0.12	23.0

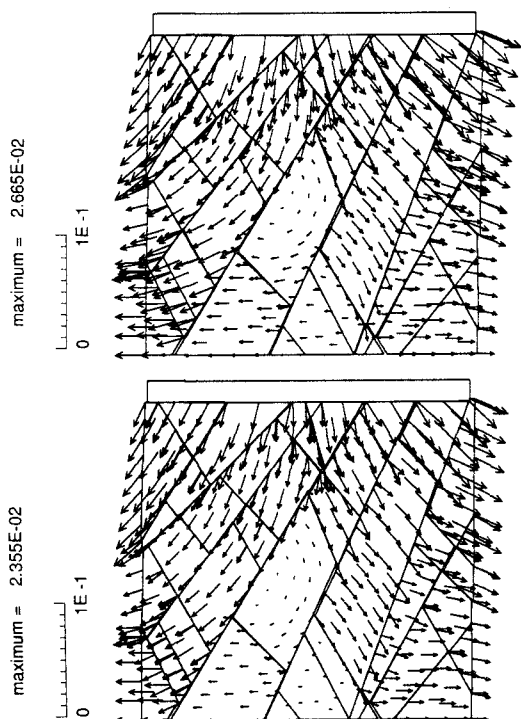


図-4 系の全体的な変形 (上図: 提案モデル
下図: B-Bモデル)

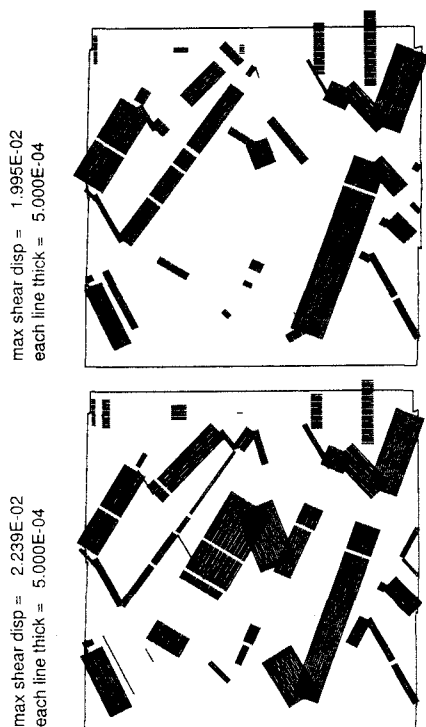


図-5 不連続面のせん断変位 (上図: 提案モデル
下図: B-Bモデル)

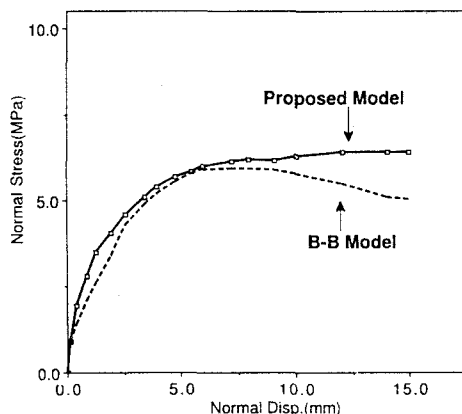


図-6 岩盤供試体の垂直応力-垂直変位の関係

留強度は実際より低くなっていることがわかる。また、ダイレーション挙動に関しては、ここに提案する挙動モデルではB-Bモデルよりも実際の挙動に近い傾向を示すと考えられる。

a) 圧縮試験シミュレーション

寸法 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ の不連続性岩盤供試体に対して側圧 1 MPa を載荷した状態で上面載荷板を変位制御により下方へ最大 15 mm まで載荷した。図-4より、系の全体的な変形はB-Bモデルに基づく場合よりもここで提案したモデルの方が若干大きいようである。これはダイレーションの効果に対する室内試験結果が反映され、せん断変位よりもむしろ剝離の発生が卓越した結果によると思われる。また図-5より、不連続面ごとに若干異なった変位が得られており、全体としてはB-Bモデルに基づく場合の方が大きな変位が生じている。さらに図-6より、垂直応力と水平変位の関係では、ピークを示すB-Bモデルによる結果に比べて提案モデルの方がピークを示さない結果が得られており、自然不連続面のせん断強度の室内試験結果との相関性が伺える。

b) 空洞掘削シミュレーション

不連続性岩盤内において深さ 120 m の位置に高さ 22 m 、幅 18 m の空洞を開削する問題を考える⁶⁾。ここでは初期応力状態を再現した後に空洞断面を除去した。2つの不連続面挙動モデルによって解析結果には大きな差異が見られた。図-7より、内空壁面の変位に着目すると、破壊しているくさび型ブロックを除き、壁面全体としてはB-Bモデルに基づく場合の方が大きな結果が得られており、提案モデルの方がより実際の現象に近い結果が得られるであろうと考えられ

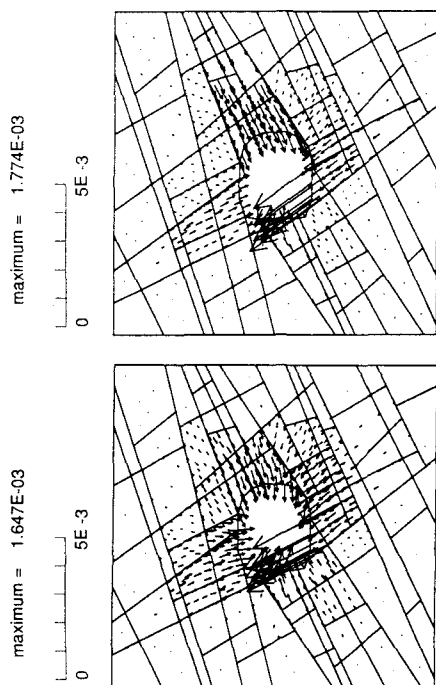


図-7 系の全体的な変形 (上図: 提案モデル
下図: B-Bモデル)

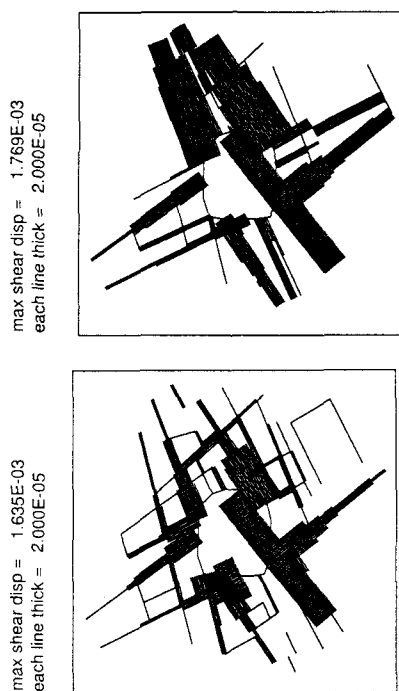


図-8 不連続面のせん断変位 (上図: 提案モデル
下図: B-Bモデル)

る。しかしながら確定した結論は将来的に現場での検証を待たねばならない。図-8より、それぞれの不連続面に着目すると、全体的には提案モデルによる方が大きなせん断変位が得られている。

6. おわりに

不連続性岩盤を対象とした空洞安定解析を考える場合、適切な現場調査及び不連続面の挙動モデルの適切な設計に基づく解析モデルの構築が最も重要な課題である本研究は、Qシステムを含んだ不連続性岩盤の現場調査の検討及び、解析手法として個別要素法(解析コードUDE C)を用いた解析モデルにより不連続面の挙動モデルの適切な設計の検討を行った。その結果、既存のB-Bモデルに比べて自然の不連続面の挙動を取り入れると、系全体の変形挙動にかなりの相違が現れるため、岩盤構造物の安定設計を行うにあたってまず、実際の特性を考慮して不連続面の挙動モデルを設計する必要があることを明らかにした。今後は寸法効果などを考慮した不連続面挙動モデルの定式を具体化して実際問題に適用していく予定である。

参考文献

- 1) Cundall, P.A.: A Generalized Distinct Element Program for Modeling Jointed Rock, European Research Office, U.S. Army, Peter Cundall Associates, 1980.
- 2) I. W. Farmer: 江崎哲郎・松井紀久男(共訳): 岩盤工学の基礎と応用, 鹿島出版会, 1988.
- 3) 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.
- 4) 伊東 淳(訳): ノルウェートンネル工法(NMT)の概要 (1) トンネルと地下, Vol. 26, No. 10, pp. 39-46, 1995.
- 5) 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.
- 6) 小杉昌幸・中川光雄・石原治幸: 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.