

(4) 不連続面分布の確率論的モデル化と地下空洞の安定解析

Stochastic Modelling of Rock Joint System and Numerical Experiments on Stability of Underground Openings

木梨秀雄^{*}・天野 悟^{**}・田中達也^{**}

Hideo KINASHI, Satoru AMANO, Tatsuya TANAKA

In this study, stochastic modelling of rock joint system has been constructed and numerical experiments have been carried out to evaluate the stability of large scale underground openings. The model of rock joint system has been constructed stochastically based on observed fracture characteristics.

Distinct Element Method has been used to compare the support effect between cablebolts and rock anchors in terms of the presence of pretension. Results of analysis have been also evaluated for different cases of stochastic joint patterns.

1. はじめに

地下発電所などの大規模地下空洞は、不連続面の卓越した岩盤内に構築される場合があり、掘削時の空洞の安定性や周辺岩盤の力学的挙動に不連続面の分布や力学特性が及ぼす影響は大きいものと考えられる。これまでに、不連続面の分布特性および力学特性に関する研究が行われており、これらの成果を利用したクラックテンソルなどによる等価連続体解析や個別要素法（以下ではDEM）などによる不連続体解析の適用が試みられている。

著者らは、平成3年度より神岡鉱山内に地下実験場を開設し、不連続性岩盤における各種の調査・試験を実施してきた。これまでに、不連続面の分布に着目した原位置調査結果とそのモデル化¹⁾、不連続面の力学特性²⁾、原位置における不連続面の変位計測³⁾、およびDEMの適用による新規坑道掘削時の挙動予測解析⁴⁾についてそれぞれ報告した。このうち、坑道掘削時のDEM解析では原位置で計測した内空変位や不連続面の変位をおおよそ再現できることがわかった^{4),5)}。

本報では、不連続面分布の確率論的なモデル化手法、およびこのモデルを用いた大規模地下空洞の安定解析について述べる。まず、神岡地下実験場における不連続面の調査結果を利用して、3次元空間内の不連続面分布を確率論的にモデル化した。つぎに、2次元断面内における岩盤ブロックの分割モデルを作成し、DEMを適用することにより大規模地下空洞掘削のケーススタディーを行った。その際、地下発電所などで用いられている先端定着方式の岩盤PSアンカーと全面接着方式のケーブルボルトに着目し、両者の支保効果を比較した。また、不連続面の分布を複数ケースモデル化し、解析結果のばらつきについても検討した。

* 正会員 (株)大林組 技術研究所

** 正会員 (株)大林組 土木技術本部

2. 不連続面分布の調査とモデル化

2.1 原位置における不連続面の調査

不連続面の分布を考慮して地下空洞掘削時の岩盤の力学的挙動を解析するためには、原位置において不連続面の幾何学的な特性を調査する必要がある。ここでは、実例として神岡地下実験場における不連続面の調査結果を利用する。まず、原位置において不連続面の調査方法の一つであるスキャンライン調査を実施した。すなわち、坑道の側壁にスキャンラインを設定し、これと交差する個々の不連続面の位置、走向・傾斜、トレース長、開口幅などを調査した。スキャンラインの総延長は127mであり、不連続面の総数は492本であった。ここでは、既存の検討結果^{4),5)}から、岩盤の挙動に影響すると考えられる開口幅が2mm以上の不連続面を対象とする。

2.2 不連続面分布のモデル化

スキャンライン調査の結果からフラクチャーネットワークモデルの手法により、3次元空間内の不連続面の分布を確率論的にモデル化した⁶⁾。ここでは、モデル化の対象領域を一辺が100mの立方体とした。不連続面を表す円盤の中心位置は、モデル化の対象となる領域内においてランダムに分布するものと仮定した。個々の不連続面の方向は、開口幅が2mm以上の不連続面を対象として卓越方位解析を行い、卓越方位群ごとにFisher分布を用いた場合の卓越方位、およびその分散であるFisher係数Kを用いて確率論的に与えた。また、不連続面の大きさについては、円盤で表現した不連続面の直径を対数正規分布と仮定することにより決定した。ここでは、不連続面の大きさが、円盤の直径が開口幅に比例するものと仮定している⁶⁾。

以上の方法で作成した不連続面の3次元分布モデルより、2次元断面における不連続面のトレース分布が得られた。このトレース分布を考慮して大規模地下空洞掘削時の岩盤挙動を解析するため、DEMを適用する。DEMでは、対象とする岩盤を不連続面で分割されるブロックの集合体として取り扱う。そこで、不連続面のトレースに若干の処理を施して⁶⁾、DEMの解析モデルを作成した（図-1参照）。

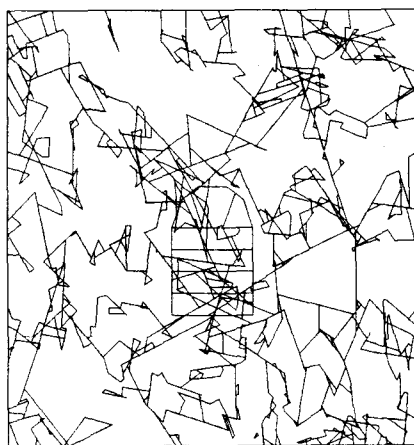


図-1 DEMの解析モデル

3. DEMによる大規模地下空洞の掘削解析

3.1 解析方法

ここでは、作成した不連続面の分布モデルにDEMを適用することにより、不連続性岩盤内に大規模地下空洞が掘削される際の挙動を解析した。解析には、2次元個別要素解析コードUDECを用いた。

想定した空洞は、幅20m・高さ30mの弾頭型断面を呈する。いずれの場合も掘削面の吹付けコンクリートを考慮した。解析における空洞の掘削は、アーチ部を2ステップ、ベンチ部分を5mづつ4段掘削し、合計6ステップとした。

3.2 入力値の設定

不連続面の力学特性は、神岡地下実験場で採取した試料を用いた簡易せん断試験やシュミットハンマー打撃測定の結果に基づき、Barton-Bandisのジョイントモデルにより評価した。DEM解析において、不連続面に囲まれた岩盤ブロックについては、内部を差分要素に分割し弾性体とした。ここでは、神岡地下実験場にお

ける孔内載荷試験および一軸圧縮試験の結果から、弾性係数とポアソン比を設定した。空洞の掘削面に行う吹付けコンクリートに関しては、ビーム要素を用いた。解析に用いる初期地圧は、神岡地下実験場における円錐孔底ひずみ法による測定結果を利用した。以上のように設定した岩盤、不連続面、吹付けコンクリートおよび初期地圧に関する入力値を表-1にまとめて示す。

ケーブルボルトおよび岩盤P Sアンカーにおける、定着材を介したケーブル材と岩盤間の相互作用は、ケーブル要素を用いて考慮した⁶⁾。定着材の付着特性に関しては、神岡地下実験場におけるケーブルボルトの引き抜き試験の結果を利用した。解析に用いたケーブル材および定着材の付着特性を表-2にまとめる⁷⁾。なお、ケーブルボルトおよびP Sアンカーは、長さ15mのものを掘削面に沿って3×3mピッチで打設するものとした。ただし、2次元解析のため奥行き方向の厚さは1mである。したがって、解析において両者の断面積($8.34 \times 10^{-4} \text{m}^2$)および岩盤P Sアンカーの初期緊張力($8.82 \times 10^2 \text{kN}$)は、所定の1/3に設定した。

表-1 岩盤、不連続面、吹付けコンクリート
および初期地圧に関する入力値

岩 盤	密度	2,890 kg/m ³
	弾性係数	13,040 MPa
	ポアソン比	0.19
不 連 続 面	垂直剛性	10 MPa/mm
	せん断剛性	2.16 MPa/mm
	粗さ係数JRC ₀	9.4
	圧縮強度JCS ₀	51.0 MPa
	残留摩擦角φ _r	27°
吹 付 け	密度	2,200 kg/m ³
	弾性係数	17,000 MPa
	ポアソン比	0.20
初 期 地 圧	σ _{xx}	2.14
	σ _{zz}	4.13
	τ _{zx}	0.77

表-2 ケーブル要素に関する入力物性値⁷⁾

ケ ー ブ ル 材 料	密度	6,083 kg/cm ³
	弾性係数	190,000 MPa
	引張強度	1,550 kN
	破壊ひずみ	0.035
	圧縮強度	1,550 kN
定 着 材	せん断剛性	$1.8 \times 10^5 \text{ kN/m/m}$
	付着強度	600 kN/m

3.3 解析結果と考察

まず、地下発電所等の掘削時に用いられている岩盤P Sアンカーとケーブルボルトの支保効果を検討した。比較のため、ケーブル材による補強をしない場合も解析した。

ケーブルボルト、岩盤P Sアンカー、およびケーブル材を用いない場合の岩盤の水平変位コンターを比較したものが図-2である。ケーブルボルトおよび岩盤P Sアンカーを用いた場合、両者の最大変位はいずれも20mm程度ではほぼ同等である。一方、ケーブル材を用いない場合の最大変位は30mm程度となり、かつ各変位コンターの領域が拡大している。これら3ケースの変位の差は、左側壁部で大きくなっている。これは、左側壁部の不連続面が空洞に対して流れ目であり、かつその傾斜方向が初期地圧の最大主応力方向とほぼ一致することに起因している。右側壁部に関しては3ケースの差は小さい。この結果、ケーブルボルトや岩盤P Sアンカーが、空洞近傍の不連続面の挙動を抑制していることがわかる。

掘削終了時の岩盤P Sアンカーおよびケーブルボルトの軸力を示したものが図-3である。図-3でケーブルボルトの軸力は延長上の最大値を示し、岩盤P Sアンカーの軸力は掘削に伴う増分値を示している。図-3よりケーブルボルトの場合、その延長上の軸力は不連続面の交差部で大きくなっていることがわかる。また、不連続面との交差部に作用する軸力は、その前後にも分散しており、定着材を介して岩盤とケーブル材の相対変位に対応して発生している。図-3より左側壁部において軸力は最大値510kN (52tf) となっている。このようにケーブルボルトの支保効果は、掘削時の荷重の一部を負担することで不連続面の挙動を抑制し、岩

盤が本来有する支保能力を保持するものと考えられる。一方、岩盤PSアンカーは先端定着方式のため、軸力はその延長線上では一定であり、初期緊張力に掘削時に作用する荷重が加算された値となる。図-3より軸力増分の最大値は左側壁部の49kN（5tf）であり、掘削時に新たに発生する軸力はケーブルボルトに比べ小さい。したがって、岩盤PSアンカーの場合は、初期緊張力により支保効果が発揮されていることがわかる。

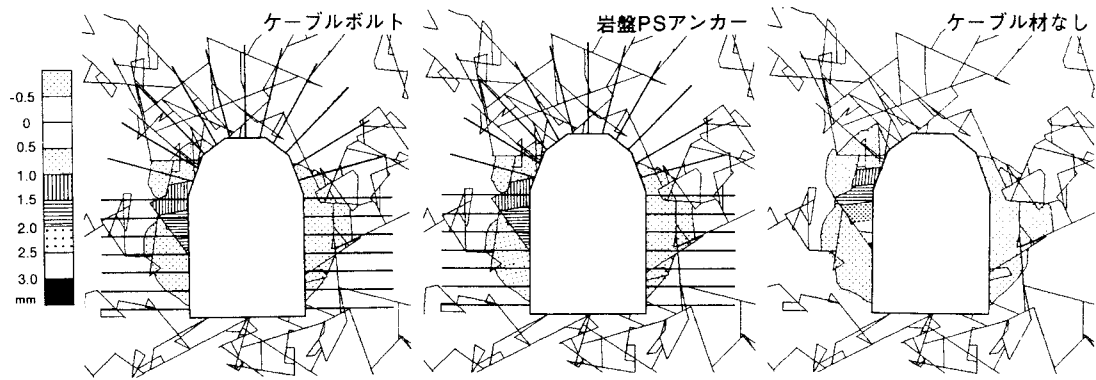


図-2 掘削時の水平変位コンター

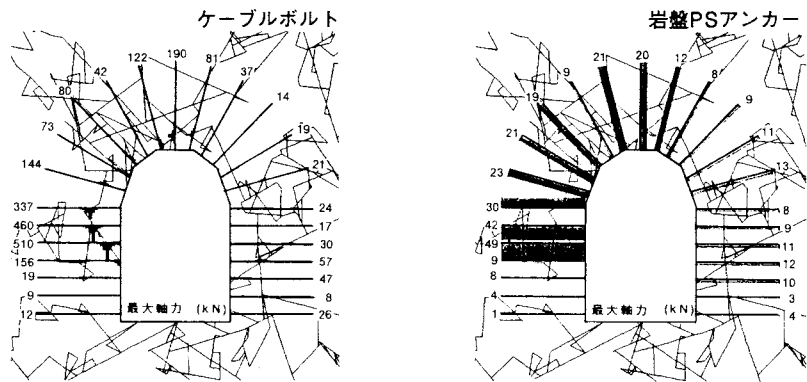


図-3 掘削時に発生した軸力の分布

つぎに、フラクチャーネットワークを作成する際の乱数の系列を変えることにより、不連続面の分布を5 ケースモデル化し、確率論的手法の解析結果のばらつきへの影響について検討した。ここでは、各々のケースに対しケーブルボルトを使用する場合、およびケーブル材を用いない場合の 2 種類の解析を実施した。このうちケース1は、すでに述べた図-1のモデルである。解析結果から、空洞の左右側壁間の変位（水平変位）および天端と底盤間の変位（鉛直変位）について、5 ケースを比較したものが表-3である。表-3で空洞の水平変位を比較してみると、ケース1が他のケースの2倍程度となっている。これは、上述したように空洞の左側壁部に存在する流れ目の不連続面（または岩盤ブロック）の挙動に起因している。ケース2～5における鉛直変位および水平変位のばらつきは1～2 割程度に収まっている。また、ケース2～5でケーブルボルトを用いた場合と用いない場合の変位の差は、ケース1の場合に比べ小さくなっている。

ケーブルボルトを用いた場合の岩盤の水平変位コンターを比較したものが図-4である。図-4に示した4 ケースを比較すると、変位コンターの広がりには差異が認められる。これは、4 ケースそれぞれの空洞近傍の不連続面の分布に依存すると考えられる。また、ケース1～5各々においてケーブルボルトに発生した軸力の最大値を示したものが表-4である。このうち、ケース1の軸力は他に比べ大きい。表-3でも考察されたように、ケ

ース1と比較して最大軸力の小さいケース2～5においては、ケーブルボルトを使用した場合と使用しない場合の変位の差は小さい。ケーブルボルトに発生する軸力は、その支保効果を反映しているものと考えられる。

以上から、不連続面の分布を確率論的にモデル化し解析する場合、空洞近傍に存在する不連続面の局所的な影響により岩盤の変位やケーブルボルトの軸力に差異が認められた。したがって、原位置調査により空洞周辺部に実在する不連続面を決定論的にモデルに取り込むことも重要であることが理解できる。

表-3 空洞の内空変位の比較

	ケーブル材なし		ケーブルボルト使用	
	水平変位 (mm)	鉛直変位 (mm)	水平変位 (mm)	鉛直変位 (mm)
ケース1	40.8	25.3	29.1	23.4
ケース2	19.4	20.2	18.1	17.7
ケース3	20.9	16.9	16.3	15.9
ケース4	18.7	21.2	16.9	16.8
ケース5	20.5	21.4	18.8	19.0

表-4 ケーブルボルトの最大軸力の比較

解析ケース	最大軸力 (kN)
ケース1	510
ケース2	324
ケース3	225
ケース4	187
ケース5	127

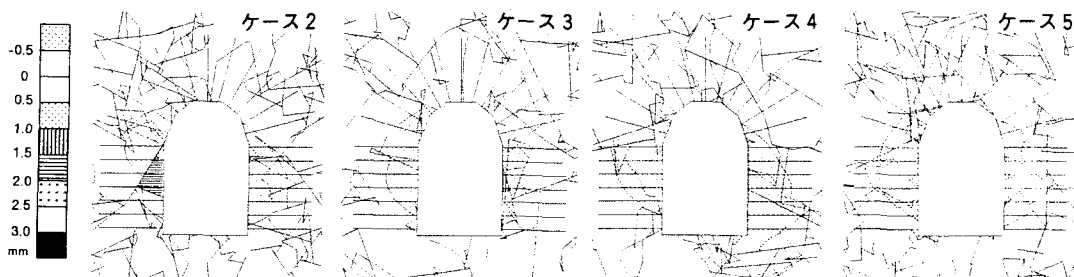


図-4 水平変位コンターの比較

6. まとめ

本研究では岩盤内の不連続面の分布を原位置調査結果に基づいて確率論的にモデル化し、DEMによる大規模地下空洞掘削時の安定解析を実施した。その結果、主要な支保部材であるケーブルボルトと岩盤PSアンカーの作用機構の違いを解析的に示し、両者の変位抑制効果がほぼ同等であることを確認した。また、確率論的にモデル化した、複数ケースの不連続面の分布モデルを用いた解析を行い、解析結果のばらつきを評価するとともに、空洞周辺に存在する不連続面の影響を指摘した。

今後は、原位置計測の結果との比較を行い、不連続性岩盤のモデル化や大規模地下空洞の安定性評価手法の妥当性を検証することが課題となる。

参考文献

- 1) 白旗秀紀、玉井昭雄、金田勉：第9回岩の力学国内シンポジウム、pp.283 - 287, 1994
- 2) 小杉昌幸、永久和正、石原治幸、緒方義弘：第9回岩の力学国内シンポジウム、pp.731 - 736, 1994
- 3) 小杉昌幸、玉井昭雄、石原治幸：土木学会論文集、No.157、pp.181 - 188, 1995
- 4) 木梨秀雄、白旗秀紀、永久和正、玉野達、田中達也：第26回岩盤力学に関するシンポジウム、pp.431 - 435, 1995
- 5) 木梨秀雄、白旗秀紀、永久和正、玉野達、田中達也：土木学会第50回年次講演会、III, pp.684 - 685, 1995
- 6) 天野悟、木梨秀雄、田中達也：第5回トンネル工学研究発表会、pp.155 - 160, 1995
- 7) 土原久哉、二宮正、井上良、永久和正：第5回トンネル工学研究発表会、pp.149 - 154, 1995