

不連続性岩盤におけるケーブルボルトの作用効果に関する解析的検討

Numerical Experiments on Support Effect of Cable Bolts in Fractured Rock Mass

天野 悟*・木梨秀雄**・田中達也*

Satoru AMANO, Hideo KINASHI, Tatsuya TANAKA

Cable bolts have been used in overseas mines for the past 25 years making effective use of the flexibility. The purpose of this report is to numerically examine the support effect of cable bolts installed in fractured rock mass. The numerical experiments were carried out so as to compare the support effect between cable bolts and rock anchors in terms of the presence of pretension. This report will especially describe how to construct the fracture network model based on the observed fracture characteristics and evaluate the bond characteristics of cable bolts from *in situ* pull-out tests.

Keywords : cable bolts, rock anchor, fractured rock mass, large-scale underground opening,
fracture network model

1. はじめに

ケーブルボルトは、その撓み性を利用して狭い坑内からでも長尺のものが打設できる特色があり、海外では約25年前より鉱山で使用されており、最近では大規模地下空洞での適用事例も報告されている。一方、地下発電所を始めとする大規模地下空洞では、岩盤P Sアンカーと呼ばれる支保が用いられることがある。これは、穿孔後にP C鋼線を挿入し、先端を定着材で固定して緊張力をかけ岩盤を締め付けるものであり、ケーブルボルトとの大きな違いはこの緊張力の有無にあるといえることができる。

本報告では、不連続性岩盤における岩盤P Sアンカーとケーブルボルトの支保効果を緊張力の有無という観点から比較し、不連続性岩盤におけるケーブルボルトの作用効果を解析的に検討することを目的としている。特に、原位置での調査結果を反映した不連続性岩盤のモデル化手法および原位置ケーブルボルト引抜き試験結果を利用した付着特性の評価手法について報告する。

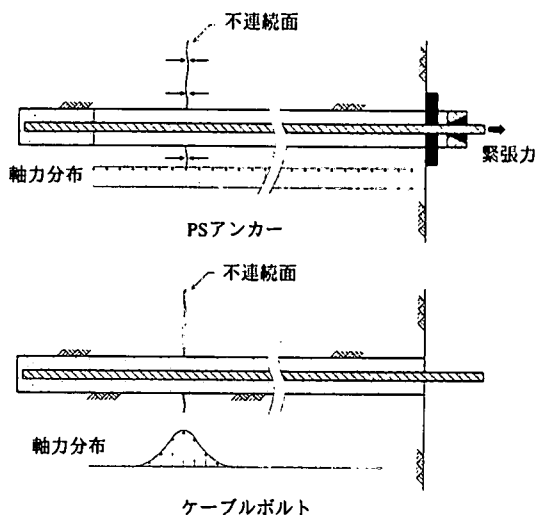
2. ケーブルボルトと岩盤P Sアンカーの作用機構

不連続性岩盤におけるケーブルボルトと岩盤P Sアンカーの作用機構の違いについては、概略次のように

* 正会員 (株)大林組 土木技術本部技術第二部

** 正会員 (株)大林組 技術研究所土木第四研究室

説明することができる¹⁾。図-1に示すように、岩盤P Sアンカーの場合は、緊張力を与えることによって掘削壁面と定着部の間に存在する不連続面に岩盤P Sアンカー打設方向の力を作用させるとともに、この不連続面のせん断剛性を増加させることによって不連続面での変位を抑制しようとする。一方、ケーブルボルトの場合は、不連続面で変位が生じるまでは効果を発揮しないが、変位が生じると同時に不連続面近傍でケーブルボルトに大きな軸力が発生し、この軸力によって不連続面での変位を抑制するものである。このような作用機構の違いによって、不連続性岩盤内に構築される地下空洞の安定性に対してどのような支保効果の差が生じるかを以下に解析的に検討した。



3. 不連続性岩盤のモデル化

3.1 フラクチャーネットワークモデルの作成方法

不連続性岩盤における岩盤P Sアンカーとケーブルボルトの支保効果を検討するために2次元個別要素解析コードUDEEC²⁾を使用した。個別要素解析では、対象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ため、原位置で得られる不連続面の特性調査結果から、解析領域内の不連続面分布を再現する必要がある。そこで、不連続面の幾何学的調査結果（半トレース長、開口幅、方向、密度）から、3次元領域の分布を確率的に再現し、その領域を任意の断面で切断した場合の不連続面のトレースを基礎として2次元解析モデルを作成することとした。

フラクチャーネットワークモデルでは、3次元空間において不連続面の中心位置が均質にランダムに分布すると仮定している。領域内に発生させる各不連続面の方向は、卓越方位解析によりもとめられた不連続面のセット（卓越方位群）ごとに、Fisher分布³⁾を用いた場合の卓越方位とその卓越方位からの分散（Fisher定数K）を用いて確率的に発生させている⁴⁾。また、各不連続面の大きさについては、坑道壁面でのスキャンライン調査により得られた半トレース長の分布から、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ている⁴⁾。不連続面の3次元的な密度は、坑道壁面における2次元的な調査結果から推定することが困難なため、モデル作成領域の任意の位置にスキャンラインを模擬した直線を設定し、その直線と不連続面が交差する密度がスキャンライン調査により得られた密度と一致するまで不連続面を発生させている。

このフラクチャーネットワークモデルの作成は、一連のプログラムコードによってシステム化されており、PC（パーソナルコンピュータ）を用いて解析を行うことが可能となっている。また、領域内のある位置に限定された破碎帯や大規模な不連続面を決定論的に扱うなど、モデルの発展も容易である。

3.2 個別要素解析への適用と入力値の設定

本個別要素解析で用いるモデルは、現実的な不連続面の特性を再現することを目的とし、大林組神岡岩盤試験場で実施した不連続面のスキャンライン調査結果を用いて作成した⁵⁾。スキャンラインの総延長は127 mであり、スキャンライン調査により得られた不連続面の総数は492本となる。ここでは、岩盤の挙動に影響を及ぼすと考えられる不連続面として開口幅2 mm以上のものを取り扱い、卓越方位解析ならびにフラクチャーネットワークモデルの作成を実施した。開口幅2 mm以上の不連続面は33本となる。図-2に卓越方位解析結果、表-1に各不連続面セットの統計量を示す。また、開口幅2 mm以上の不連続面の直径の分布は、開口幅と不連続面の大きさは単純な比例の関係にあると仮定して、対数正規分布において開口幅2 mm

以上の範囲に該当するもののみ発生させることにした。フラクチャーネットワークモデルによるモデル化結果の1例を図-3に示す。モデル化領域は100m×100m×100mの立方体とし、不連続面の発生では境界近傍での密度減少を考慮し、一辺140mの立方体領域を用いている。

表-1 各不連続面セット（卓越方位群）の統計量

	卓越法線方位/傾斜	Fisher定数(K)	サンライズ調査による 不連続面の密度(本/m)
卓越方位群1	186 / 10	6.59	0.270
卓越方位群2	96 / 21	8.36	0.267
ランダム方位	—	—	0.035

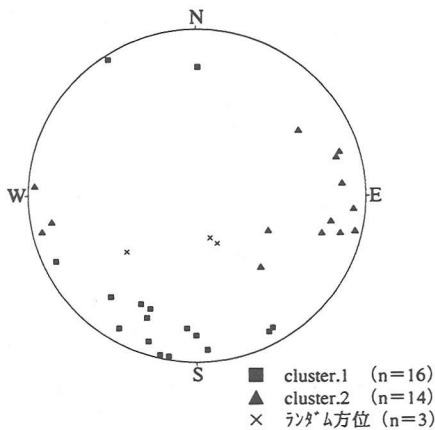


図-2 卓越方位解析結果

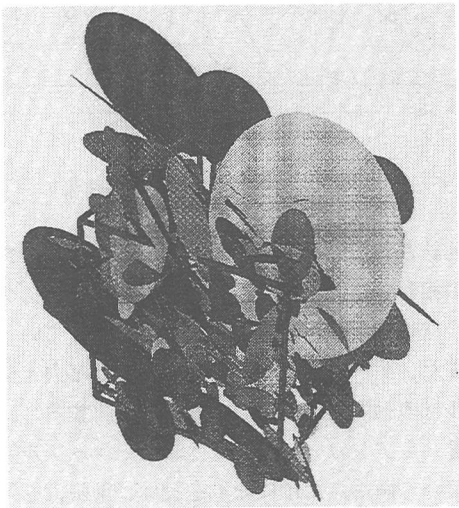


図-3 3次元モデル化結果例

領域内のある切断面における不連続面のトレース図を図-4に示す。個別要素解析では領域内の不連続面の特性を反映した要素分割を行うために、フラクチャーネットワークモデルを用いて作成した不連続面のトレースを以下に示す仮定を用いて処理することにより、解析に用いるモデルを作成した。

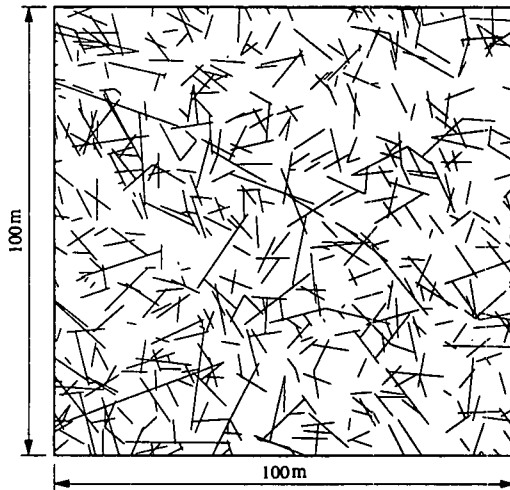
- ① 不連続面のトレース (A) の1端点と近傍のトレース (B) との延長距離がトレース長 (A) の1/3以下なら、トレース (A) を延長し、(B) と接続する。
- ② トレースの1端点と近傍のトレースの1端点との距離がどちらかのトレース長の1/3以下なら、両端点を接続する。
- ③ トレースの1端点と解析領域までの距離がトレース長の1/3以下なら、トレースを延長し、解析領域に接続する。

以上の処理により作成した縦横100m領域の解析モデルを図-5に示す。中央に配置された空洞は、後述する解析に用いる大規模地下空洞を模擬している。

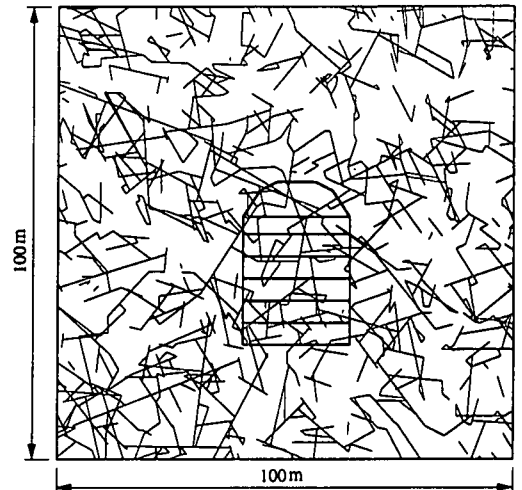
4. ケーブルボルトと岩盤P Sアンカーのモデル化

4・1 ケーブル要素によるモデル化

UDECでは、定着材を介した岩盤とケーブル材料間の相互作用を考慮できるケーブル要素という機能を有しており、全面接着型のケーブルボルトはもちろん、緊張力を考慮した岩盤P Sアンカーも現実に近い形で解析的に表現できるようになっている。図-6に示すように、このケーブル要素では、ケーブル材に設けた節点において、ケーブル材と岩盤は定着材のせん断剛性を表現するバネと付着強度を表すスライダーを介



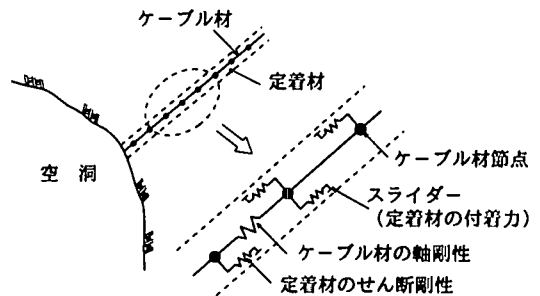
図－４ 不連続面トレース結果



図－５ 個別要素解析モデル

して連結されている。したがって、岩盤とケーブル材の相対変位と定着材のせん断剛性に応じてケーブル材にせん断応力が生じるようになっている。また、ケーブル材には、このせん断応力とケーブル材の軸剛性に対応して軸力が発生する⁶⁾。

岩盤 P S アンカーの場合には、このケーブル要素を用いて両端点だけに節点を設け、緊張力を両端点間のバネに与える。一方、ケーブルボルトの場合は全面接着方式であるので、節点をできるだけ多く設定し、緊張力は与えない。



図－６ ケーブル要素のモデル化の概念²⁾

4・2 定着材の付着特性の設定

定着材の付着特性は、ケーブルボルトに発生する軸力ひいてはその支保効果に大きく影響するものの、岩盤と定着材との付着特性および定着材とケーブル材の付着特性の両方に関係するため、定着材の特性だけから評価するのは難しく、現場での定着材の充填状況および岩盤の特性に大きく左右される。そこで、大林組神岡岩盤試験場でケーブルボルトの引抜き試験を実施し、この引抜き試験の荷重－変位曲線から得られる付着特性を解析で用いた⁷⁾。ここでは、引抜き試験から、斉藤・天野が提案した相互作用係数⁸⁾をもとめ、この値から解析で用いる定着材の付着特性（せん断剛性と付着強度）を設定した。表－２に解析で用いた定着材の付着特性およびケーブル材の物性値を示す。

表－２ ケーブル要素に関する入力物性値

ケーブル材料	密度	6,083 kg/m 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 x 10 ⁵ kN/m/m
	付着強度	600 kN/m

5. 大規模地下空洞での解析例

5・1 解析方法

ここでは、作成したフラクチャーネットワークモデルに個別要素解析を適用することにより、不連続性岩盤内に大規模空洞が掘削される際のケーブルボルトの作用効果を検討した。

想定した空洞は図－5に示した弾頭型断面を呈し、幅25m・高さ35mである。また、比較のため岩盤P Sアンカーを用いる場合、および両者のいずれも用いない場合を含めて合計3ケースの解析を実施した。いずれのケースにおいても掘削面の吹付けコンクリートを考慮した。

ケーブルボルトおよび岩盤P Sアンカーは掘削面に沿って3×3 m ピッチで打設するものとした。解析は2次元平面ひずみ条件であり、奥行き方向の厚さは1 m 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と設定した。ケーブルボルトおよび岩盤P Sアンカーの長さはいずれも15m としている。全面接着型のケーブルボルトの場合、全長に0.5m 間隔で節点を配置し、先端接着型の岩盤P Sアンカーの場合には、両端の2点に節点を配置している。

解析ステップは初期地圧の負荷と空洞掘削の2ステップに分かれる。空洞掘削のステップは施工順序を想定し、8つのサブステップに分けた。各掘削ステップにおいて、吹付けコンクリートおよびケーブルボルトまたは岩盤P Sアンカーの打設を行った。

5・2 入力値の設定

不連続面で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、大林組神岡岩盤試験場における孔内載荷試験および室内における一軸圧縮試験の結果から、変形係数とポアソン比を設定した。

不連続面の力学特性については、大林組神岡岩盤試験場にて採取した不連続面の試料を用いた室内せん断試験の結果から設定した。ここでは、不連続面の変形および強度をそれぞれバネとスライダー（モール・クーロンの規準）でモデル化した。

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。岩盤、不連続面、吹付けコンクリートに関する入力値を表－3にまとめて示す。

表－3 個別要素解析での入力値

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	10.0 MPa/mm
	せん断剛性	1.0 MPa/mm
	粘 着 力	0.1 MPa
	摩 擦 角	40.0 deg.
吹 付 け	密度	2,200 kg/m ³
	弾性係数	17,000 MPa
	ポアソン比	0.20

5・3 解析結果と考察

まず、掘削終了時のケーブルボルトおよび岩盤P Sアンカーの軸力を示したものが図－7である。ケーブルボルトは全面接着型のため、その延長上の軸力は不連続面との交差部で大きくなっている。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軸力が生じていることがわかる。一方、岩盤P Sアンカーの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っている。このように、支保形態の異なるケーブルボルトと岩盤P Sアンカーにおける軸力分布の違いを解析的に示すことができた。

つぎに、ケーブルボルト、岩盤P Sアンカーおよび両者を用いていないケースの岩盤の水平変位コンターを比較したものが図－8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 程度でほぼ同等である。一方、両者を用いない場合の最大変位は25mm 程度であり、かつ側壁左側部に15mm 以上の変位領域が拡大している。

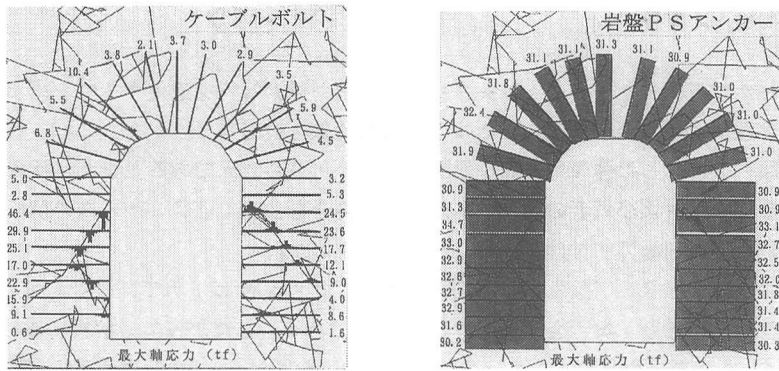


図-7 軸力の分布

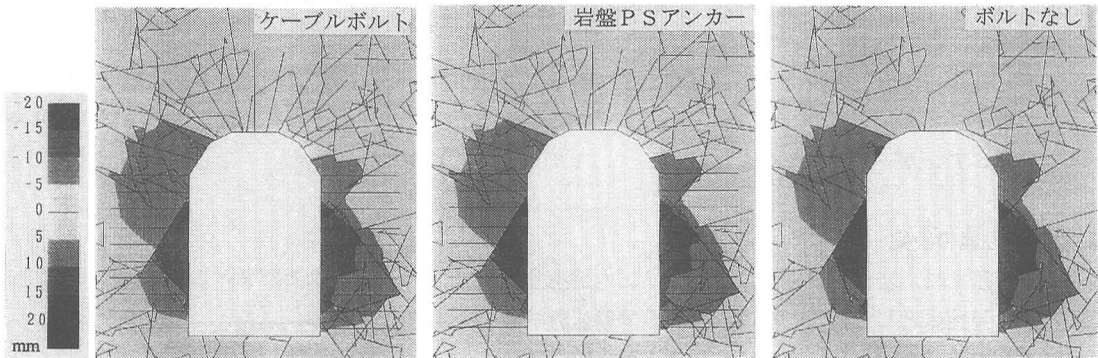


図-8 水平変位コンター

6. おわりに

不連続性岩盤におけるケーブルボルトの作用効果を検討するために、不連続面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、原位置の引抜き試験結果から定着材の付着特性に着目して2次元個別要素解析を実施した。しかしながら、この解析結果は不連続性岩盤のモデル化に関して、確率論的に作成した1つのケースにすぎないため、今後複数ケースの解析を実施し、そのばらつきについて検討する必要がある。さらに、この確率論的に作成した不連続性岩盤のモデルを用いて、原位置計測結果との比較も今後行っていく予定である。

7. 参考文献

- 1) 斉藤敏明：ケーブルボルト支保の理論と実際，ロックボルト支保に関する研究会，日本鉱業会関東支部主催，1982.
- 2) Itasca Consulting Group, Inc. : UDEC(Universal Distinct Element Code) Version 2.0 User's Manual, 1993.
- 3) Fisher, R. : Dispersion on a Sphere, Proceeding of the Royal Society of London, A217, pp.295~305, 1953.
- 4) Priest, S. D. : Discontinuity Analysis for Rock Engineering, Chapman & Hall, 1993.
- 5) 白旗秀紀・玉井昭雄・金田 勉：調査結果に基づく亀裂群の定量化と亀裂分布予測手法，第9回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，pp.283~288, 1994.
- 6) Brady, B. H. G. and Brown, E. T. : Rock Mechanics for Underground Mining, Second Edition, Chapman & Hall, 1993.
- 7) 土原久哉・井上 良・二宮 正・永久和正：ケーブルボルトの原位置への適用試験，第5回トンネル工学研究発表会，1995.
- 8) 斉藤敏明・天野 悟：ロックボルト支保の設計に関する基礎的考察，第14回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.76~80, 1982.