

大規模地下空洞におけるケーブルボルトの支保効果に関する解析的検討

木 梨 秀 雄 天 野 悟 土 原 久 哉
(本社 土木技術本部 (本社 土木技術本部
技術第2部) 技術第2部)
田 中 達 也 吉 岡 尚 也 藤 原 紀 夫
(本社 土木技術本部
技術第2部)

Numerical Experiments on Support Effect of Cable Bolts in Large-scale Underground Openings

Hideo Kinashi Satoru Amano Hisaya Tsuchihara
Tatsuya Tanaka Hisaya Yoshioka Toshio Fujiwara

Abstract

This paper describes a study on the application of cable bolts as rock reinforcement in large-scale underground openings to restrain displacement and deterioration of discontinuities. Cable bolts are fully bonded nonpretensioned rock reinforcement, which are expected to reduce the installation cost and the construction period in comparison with ordinary rock anchors. Numerical experiments have been carried out to evaluate their effectiveness in stabilizing large-scale underground openings. The Distinct Element Method was used to compare the support effects of cable bolts and rock anchors. Results have clarified the different support mechanisms of the two methods, but indicate that the support effects are nearly equivalent.

概 要

地下発電所などの大規模地下空洞では、安定性を確保するための主要な岩盤補強工として、従来からプレストレスを導入するPSアンカーがよく用いられている。これに対し、ケーブルボルトは全面接着式の岩盤補強工であり、プレストレスを必要としないためPSアンカーに比べコストの削減や工期の短縮が見込まれる。本研究では、地下発電所程度の大規模地下空洞を対象とし、ケーブルボルトおよびPSアンカーの支保効果を個別要素法を用いて解析的に検討した。その結果、ケーブルボルトおよびPSアンカーの作用機構の違いが明らかになるとともに、両者による岩盤の変位抑制効果や局所安全率の分布に有意な差のないことがわかった。

1. はじめに

地下発電所、石油備蓄タンクなどのエネルギー関連施設をはじめとして、岩盤内地下空洞は近年大規模化・大深度化し、それらの用途は多様化する傾向にある。これらの地下空洞においては、施工時の周辺岩盤の安定性や経済性の確保が今後の重要課題となっている。また、将来建設が予定されている地下原子力発電所や高レベル放射性廃棄物処分場のような重要構造物においては、これまで以上に様々な観点から空洞や周辺岩盤の安定性に対する検討が必要になるものと考えられる。

空洞の安定性に影響を及ぼす要因として、岩盤内の不連続面の存在が挙げられる。最近の地下発電所における

計測結果から、節理などの不連続面が周辺岩盤の力学的挙動に影響を及ぼすことが指摘されている¹⁾。また、従来から鉄道や道路トンネルで利用されている切羽観察や工学的岩盤分類においては、不連続面の方向・頻度・状態などの情報が重要な指標となっている。これらのようなことから、不連続面の力学特性の評価や幾何学的な分布特性のモデル化、および不連続面を考慮した解析などは岩盤工学の分野における中心的な課題のひとつとなっている。

当社では、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・試験を実施している²⁾。これまでに、不連続面に着目した原位置調査結果とそのデータ解析³⁾、不連続面の力学特性や分布特

性を考慮した坑道の掘削解析^{4),5)}についてすでに報告した。このうち、坑道の掘削解析では、岩盤全体を不連続面で分割されるブロックの集合体としてモデル化し、不連続体解析手法のひとつである個別要素法 (DEM; Distinct Element Method) を適用した。その結果、原位置で計測した不連続面の変位や内空変位をおおよそ再現できることがわかった。これらの神岡岩盤試験場における成果を利用し、本研究では、地下発電所程度の大規模地下空洞を対象とした掘削解析を実施し、空洞の安定性について検討した。その際、地下発電所等の支保部材である岩盤補強工の効果に着目した。従来地下発電所等では、主要な岩盤補強工として PS アンカーがよく用いられている。PS アンカーは、プレストレスを利用する先端定着方式の岩盤補強工である。一方、著者らは岩盤補強工の施工上の省力化による工期短縮とコスト削減を目的として、全面接着式のケーブルボルトの適用性を検討している^{6)~8)}。以下に、不連続性岩盤におけるケーブルボルトと PS アンカーの支保効果を個別要素法により解析し、比較検討した結果について述べる。

2. ケーブルボルトと PS アンカーの作用機構

PS アンカーとケーブルボルトは、用いるケーブル材料と定着材は基本的に同じである。両者の違いは、プレストレスの有無と定着方式にある。

不連続性岩盤におけるケーブルボルトと PS アンカーの作用機構の概念を示したものが図-1 である。図-1 (a) に示したように、ケーブルボルトの場合は、補強箇所を穿孔後に定着材となるグラウトと PC 鋼線を挿入する。そして、空洞掘削後に不連続面や岩盤が変形すると同時に軸力を生じて支保効果を発揮する。不連続面は岩石に比べると強度が小さく、応力変化に伴う変位が大きいため、不連続面とケーブルボルトが交差する箇所の軸力が特に大きくなるものと考えられる。

一方、図-1 (b) のように、PS アンカーの場合は補強箇所を穿孔後に PC 鋼線を挿入し、先端を定着材により固定してプレストレスを与える。このプレストレスによって、空洞壁面と先端の定着部との間に存在する不連続面や岩盤に軸方向の拘束圧を加え、不連続面の変位が抑制されるものと考えられる。

3. 解析方法

3.1 個別要素解析について

解析において不連続面の特性を考慮するため、2次元個別要素解析コード UDEC を用いた。UDEC は、岩盤全体を不連続面で分割されるブロックの集合体とし、空洞掘削時の不連続面の力学的挙動を考慮するものである。また、UDEC はケーブルボルトに発生するせん断応力が定着材を介した岩盤とケーブル材料間の相対変位に比例して発生するものとして解析できる機能を有しており、ケーブルボルトや PS アンカーを現実に近い形で考慮できる。UDEC は、時間差分近似によって逐次解析するた

め、岩盤とケーブル材料間の相対変位からケーブルの軸力を求め、その支保効果を解析上再現することができる。従来適用している有限要素法においては、このように岩盤とケーブル材料の間の相対変位を考慮して、不連続性岩盤の支保効果を解析することは困難である。

3.2 解析モデルの作成

UDEC を用いて解析する場合、不連続面の配置をモデル化する必要がある。不連続面の幾何学的な特性のうち空洞の力学的な挙動に影響する要因としては、密度、方向、および大きさが挙げられる。不連続面は岩盤に比べ強度が小さく変形しやすいため、その密度および方向は岩盤全体の剛性や異方性を支配するものと考えられる。また、不連続面の大きさ (2 次元的には長さ) により、ブロックの寸法が規定される。ここでは、以下のような手順により不連続面の分布をモデル化した。

① 不連続面の中心を解析領域内に一定間隔で格子状に設定する。ここでは、比較的大規模な不連続面を想定し、その平均間隔を 10 m とした。

② 不連続面の方向は確率論的に設定した。まず、不連続面の調査結果から走向・傾斜を把握し、解析断面における不連続面の傾斜角の確率密度分布を求めた。つぎに、乱数を用い個々の不連続面の傾斜角を設定した。ここでは、神岡鉱山における不連続面の傾斜角の確率密度分布を用いた⁴⁾。

③ 不連続面の大きさとして平均トレース長を与える。ここでは、空洞の掘削幅程度の平均トレース長を想定し、20 m とした⁴⁾。

④ 最後に不連続面の端点や交点の処理を行うことにより岩盤をブロック化し、解析モデルを完成した。

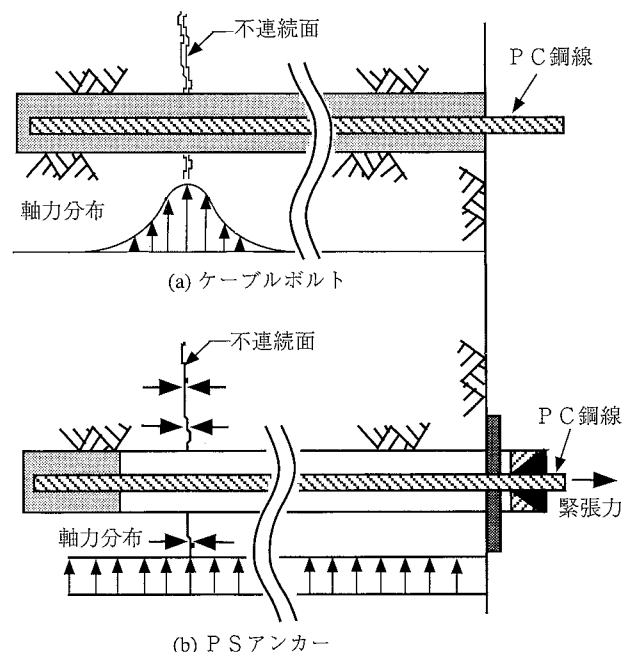


図-1 岩盤補強工の作用機構の概念

以上の手順により作成した解析モデルを図-2に示す。解析領域は、水平方向に160m、鉛直方向に180mとした。ブロック内部は三角形有限差分要素に分割し、岩盤を弾性体として取り扱えるようにした。

3.3 岩盤補強工のモデル化

第2章で述べたように、ケーブルボルトとPSアンカーの違いはプレストレスの有無と定着方式にある。UDECにおいて図-1のような作用機構を再現するためのモデル化を図-3に示す。まず、PSアンカーの場合両端点に節点を設け、その間にばねを定義する。このばねには、所定の剛性や引張強度を設定する。また、各節点にはグラウトの剛性と定着強度を考慮するため、岩盤要素との間にばねおよびスライダを設定する。プレストレスは、両端点間のばねに与える。一方、ケーブルボルトの場合は全面接着方式であるので、図-3に示すように複数の節点を設ける。予備的な検討結果に基づいて節点数を2点/mとした。

3.4 解析ケースおよび解析ステップ

今回の解析では、ケーブルボルトおよびPSアンカーを用いる場合に加え、比較のため両者を用いない場合の解析も実施した。これら3ケースにおいては、いずれも吹付けコンクリートを考慮し、補助的なロックボルトや側壁の2次覆工は考慮しなかった。

解析ステップは、地下発電所空洞の一般的な掘削工程をもとに設定した。まず、初期地圧の負荷を行い、次いでアーチ部・ベンチ部を順次掘削する。これらの掘削ステップでは、アーチコンクリートの要素や吹付けコンクリートに相当するビーム要素、ケーブルボルトもしくはPSアンカーに相当するケーブル要素の付加を順次行った。掘削ステップは、合計8つである。

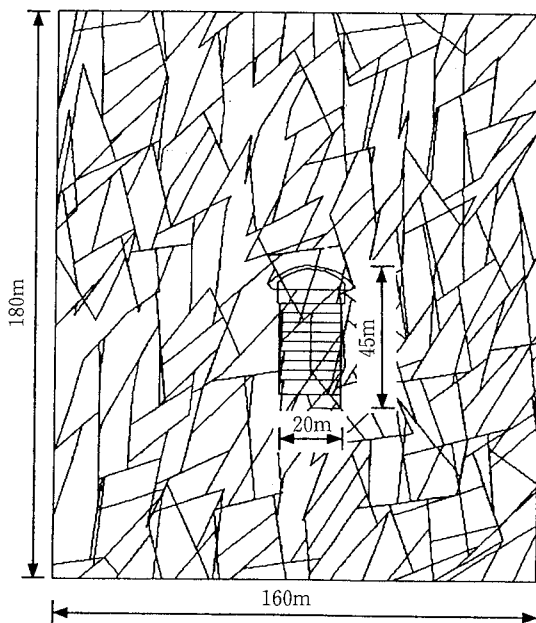


図-2 解析モデル

4. 入力値の設定

解析において、個々のブロックは弾性体としており、神岡岩盤試験場における孔内載荷試験および室内試験の結果から、岩盤の弾性係数、ポアソン比および密度を設定した。また、同じく室内試験の結果を利用して、局所安全率を求めるための岩盤の粘着力、内部摩擦角を設定した。岩盤に関する解析の入力値を表-1にまとめる。

不連続面の力学特性については、通常室内における不連続面のせん断試験などから求める。ここでは、神岡岩盤試験場から採取した不連続面の試験結果から平均的な入力値を設定した。不連続面に関する入力値を表-2にまとめる。

ケーブルボルトおよびPSアンカーにおける定着材の付着特性は、岩盤と定着材、および定着材とケーブル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い。また、現場での定着材の充填状況や岩盤の特性にも左右されるものと考えられる。そこで、神岡岩盤試験場においてケーブルボルトの引抜き試験を実施した⁸⁾。引抜き試験の結果から、斉藤・天野⁹⁾が提案した相互作用係数Cを求め、定着材の付着強度やせん断剛性を設定した。ケーブル(鋼線)の強度等については、JIS規格(JIS G 3536)を参考に設定した。また、PSアンカー(4T-φ17.8mm)のプレストレスは、地下発電所で用いられる値を参考に90tf/本とした。ケーブルボルト

表-1 岩盤に関する入力値

密度	2,600 kg/m ³
弾性係数 E	10,000 MPa
ポアソン比	0.25
粘着力 c	3 MPa
内部摩擦角 φ	46°

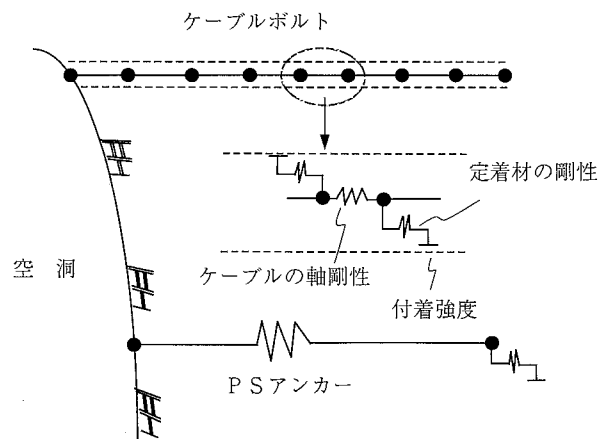


図-3 岩盤補強工のモデル化

トおよびPSアンカーに関する入力値を表-3にまとめる。解析では奥行き方向の厚さが1mの2次元平面ひずみ条件のため、PSアンカーやケーブルボルトの奥行き方向のピッチに応じて、断面積やプレストレスを割り引いた。奥行き方向のピッチは、上部4段において1.5m、そのほかでは3mである。

アーチコンクリートについては、岩盤と同じブロック要素を用いた。また、掘削面に行う吹付けコンクリートは、ビーム要素を用いた。アーチコンクリートおよび吹付けコンクリートに関する入力値を表-4にまとめる。

初期地圧については、神岡岩盤試験場(土被り175m)において実施した円錐孔底ひずみ法による測定結果¹⁰⁾を利用した。解析で用いた2次元初期地圧成分を表-5に示す。

5. 解析結果と考察

5.1 岩盤および不連続面の変位

ケーブルボルトやPSアンカーによる支保効果としては、空洞壁面の変位の抑制や周辺岩盤の安定性(安全率)の向上が期待される。ここでは、3ケースの解析結果のうち、空洞掘削終了時の状態について以下に述べる。

まず、側壁面や周辺岩盤の変位状態を水平方向変位のコンターにより検討する。3つの解析ケースそれぞれの水平方向変位コンターを図-4(a)~(c)に示す。これらの3ケースを比較すると、ケーブルボルトやPSアンカーを用いていない(c)に対し、(a)および(b)では、特に右側壁部の変位が抑制されていることがわかる。一方、左側壁部における岩盤の変位はいずれのケースもほぼ等しい。これは、右側壁部には流れ目の不連続面が卓越しているのに対し、左側壁部には差し目の不連続面が存在するためと考えられる。(a)~(c)における最大変位は、それぞれ37mm、35mm、および50mmであり、ケーブルボルトを用いた場合に比べわずかにPSアンカーの場合の方が変位が小さい。しかしながら、全体的には両者の変位抑制効果はほぼ同等と評価できる。

次に、掘削に伴う各ケースにおける不連続面のせん断変位を比較したものが図-5(a)~(c)である。図-5ではせん断変位の大きさを不連続面に沿ったラインの厚さで表している。各ケースにおけるせん断変位の最大値は、それぞれ17mm、15mm、および28mmであった。

また、開口変位の最大値はそれぞれ5.3mm、4.5mm、および15mmであった。したがって、ケーブルボルトとPSアンカーが不連続面の変位を抑制していることがわかる。

5.2 軸力の分布

ケーブルボルトおよびPSアンカーの軸力分布を図-6(a)、(b)に示す。図-6(a)のようにケーブルボルトの場合は全面接着方式のため、その延長上の軸力は不連続面と交差する部分で大きい。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、岩盤とケーブルボルトの相対変位に比例して、定着材を介して

表-2 不連続面に関する入力値

垂直剛性 K_n	2.04 MPa/mm
せん断剛性 K_s	1.02 MPa/mm
粘着力 c_j	0.1 MPa
摩擦角 ϕ_j	40°

表-3 ケーブル要素に関する入力値

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	1.8×10^6 kN/m/m
	せん断強度	600 kN/m

表-4 アーチコンクリートおよび吹付けコンクリートに関する入力値

アーチ	密度	2,200 kg/m ³
	弾性係数	19,600 MPa
	ポアソン比	0.2
吹付け	密度	2,200 kg/m ³
	弾性係数	17,000 MPa
	ポアソン比	0.2

表-5 入力した初期地圧成分

σ_{xx}	σ_{zz}	τ_{zx}
2.14 MPa	4.13 MPa	0.77 MPa

ケーブルボルトに軸力が生じている。このような軸力分布は、全面接着方式のケーブルボルトの特長といえる。

一方、図-6(b)のようにPSアンカーの軸力は、その延長上では一定であり、プレストレスに掘削時に作用する荷重が加算された値となっている。PSアンカーのプレストレスは空洞の上部4段で60tf、その他で30tfである。

5.3 局所安全率の分布

空洞周辺の局所安全率(L.S.F)を比較したものが図-7(a)~(c)である。局所安全率は、モール・クーロンの破壊基準を用いて求めた。この結果、(c)に比べ、(a)および(b)では局所安全率が1以下の領域が小さいことがわかる。一方、(a)および(b)における局所安全率の分布は、ほぼ同等である。

5.4 考察

解析結果から、今回の検討に用いたような不連続性岩盤においては、PS アンカーおよびケーブルボルトによる支保効果がほぼ同等であることが示された。両者の支保形式にはやや違った点がある。PS アンカーは、プレストレスにより不連続面に積極的に拘束圧を与えることで、岩盤の強度低下や変形を抑制するものである。一方、ケーブルボルトは掘削時に岩盤の変位が生じると初めて軸

力が発生する。そして、この軸力によって不連続面の変位を抑制し、結果的に空洞周辺の岩盤の強度低下や変位の増大を抑制する。局所的には、PS アンカーのプレストレスが有効な場合も考えられるが、今回の解析結果から判断すると、掘削時に岩盤から空洞に作用する外力（除荷荷重）に比べプレストレスは小さく、総合的にはケーブルボルトの支保効果と大差がなかったものと考えられる。したがって、ほぼ同等の支保効果が得られるような

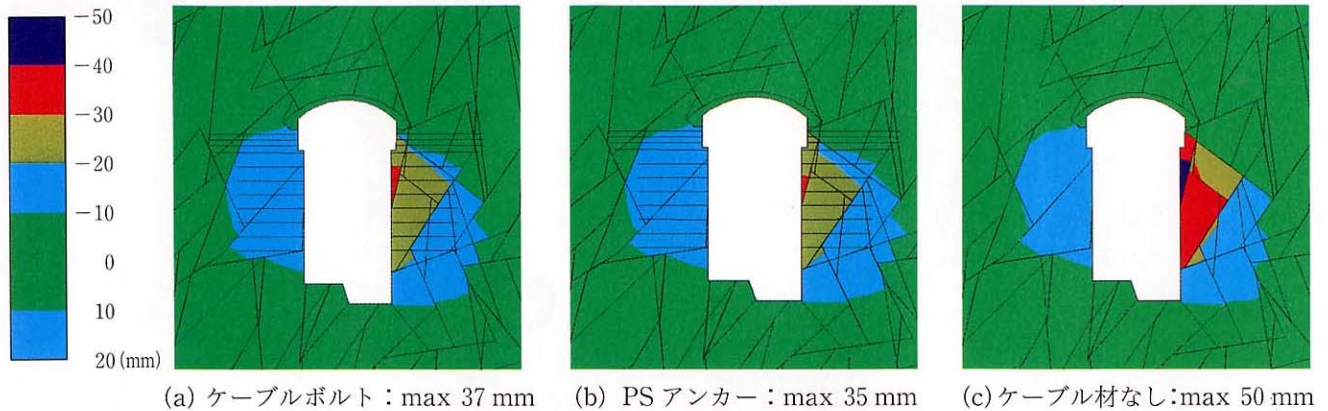


図-4 空洞周辺岩盤の水平変位の比較

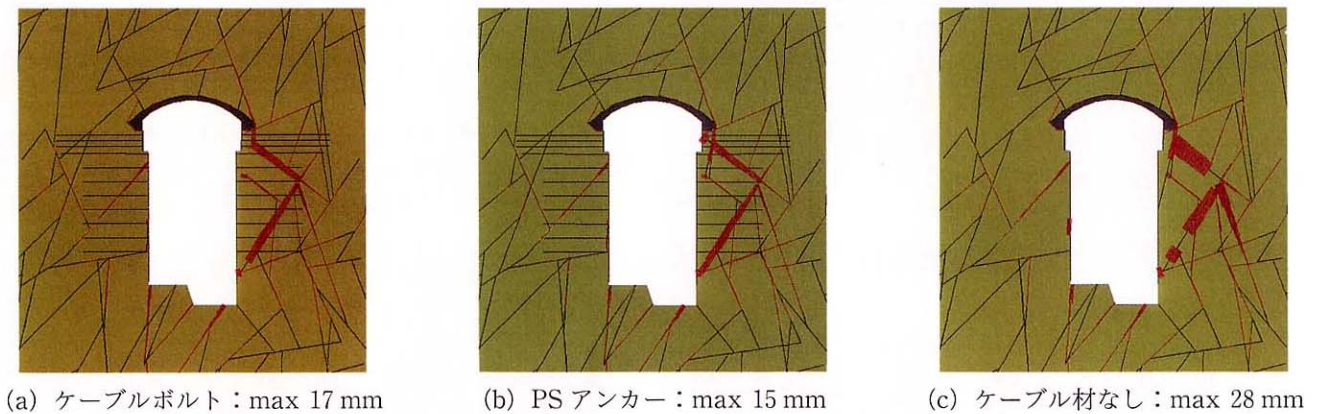


図-5 不連続面のせん断変位の比較

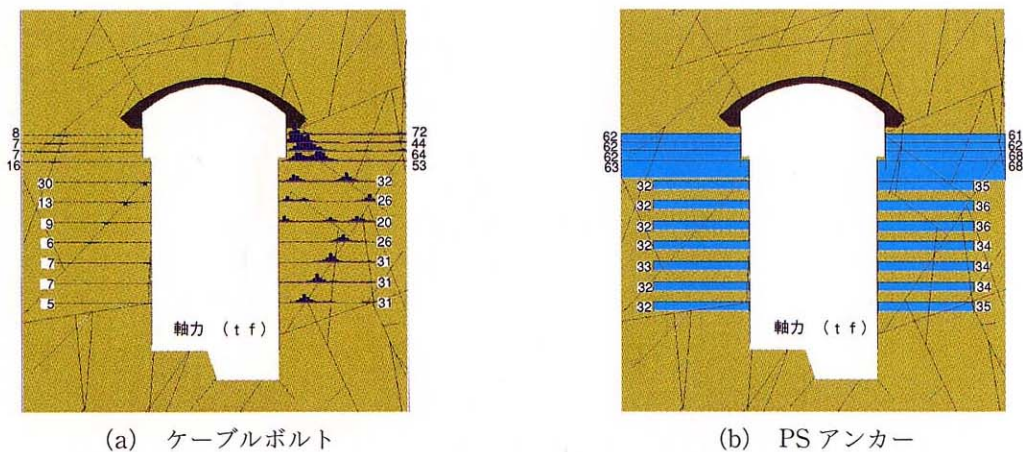


図-6 ケーブルボルトとPSアンカーの軸力分布の比較

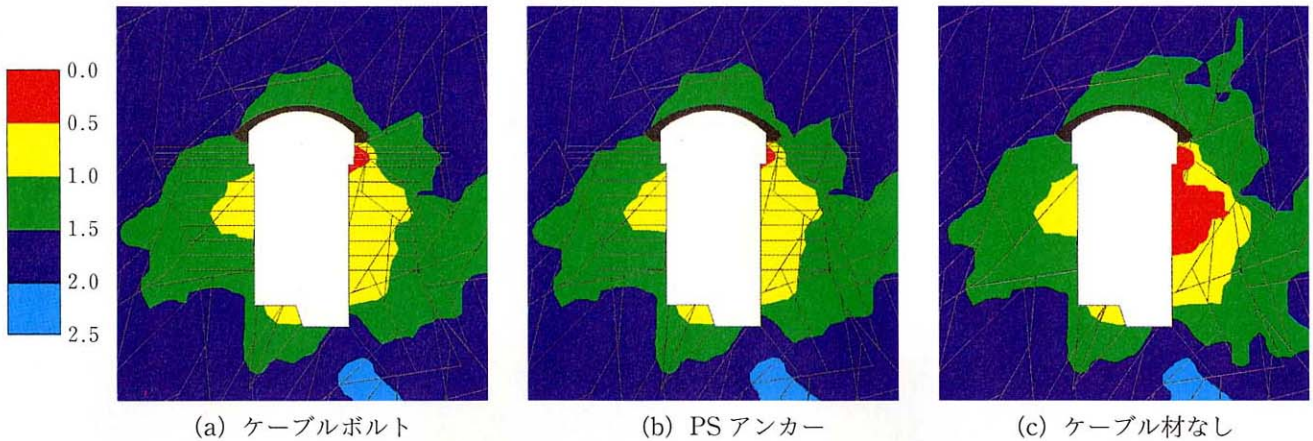


図-7 空洞周辺岩盤の局所安全率の比較

岩盤に対しては、コストや工期の面でケーブルボルトの方が有利になるものと考えられる。

6. 主な成果と今後の課題

本研究では、大規模地下空洞の主要な支保部材となるケーブルボルトおよびPSアンカーの支保効果をDEM解析により検討した。その結果、ケーブルボルトとPSアンカーの作用機構の違いを解析的に再現することができた。また、解析で想定した不連続性岩盤内の大規模地下空洞において、両者の変位抑制効果や局所安全率の分布には大きな違いのないことがわかった。したがって、ケーブルボルトは不連続性岩盤内の大規模地下空洞において、PSアンカーと同等の支保効果を発揮するものと期待される。

ケーブルボルトの実用化に向けては、定着材の付着特性などを今後十分に検討する必要がある。

参考文献

- 1) 赤木, 堀井, 田中, 打田: 不連続性岩盤の調査と試験・計測, 第26回岩盤力学に関するシンポジウム, p.574~583, (1995)
- 2) 玉井, 三上, 秋好: トンネル掘削による不連続性岩盤の3次元力学挙動の研究, 第9回岩の力学国内シンポジウム, p.605~610, (1994)
- 3) 天野, 白旗: 地質調査情報に基づく透水亀裂の判別, 第26回岩盤力学に関するシンポジウム, p.126~130, (1995)
- 4) 木梨, 白旗, 永久, 玉野, 田中: 原位置調査に基づく岩盤内き裂分布の推定とDEM解析への応用, 第26回岩盤力学に関するシンポジウム, p.431~435, (1995)
- 5) 木梨, 白旗, 永久, 玉野, 田中: 原位置調査結果に基づく不連続性岩盤のモデル化について, 第50回土木学会年次講演会講演概要集, p.684~685, (1995)
- 6) 天野, 木梨, 田中: 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, 第5回トンネル工学研究発表会, p.155~160, (1995)
- 7) 木梨, 天野, 田中: 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, 第27回岩盤力学に関するシンポジウム, p.16~20, (1996)
- 8) 土原, 二宮, 井上, 永久: 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, p.149~154, (1995)
- 9) 斉藤, 天野: ロックボルトの支保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, p.76~80, (1982)
- 10) 坂口, 菅原, 永久, 金田: 円錐孔底ひずみ法の不均質岩盤への適用と考察, 第9回岩の力学国内シンポジウム, p.229~234, (1994)