

# き裂性岩盤における大規模地下空洞の安定性

- ケーブルボルトの補強効果について -

丹生屋 純 夫 畑 浩 二  
鳥井原 誠

## Stability of Large Scale of Cavern in Un-continuos Rock Mass

- Effect of Reinforcement by Cablebolting -

Sumio Niunoya Koji Hata  
Makoto Toriihara

### Abstract

This report describes the results of laboratory model test to determine the applicability of cablebolting. It is important to understand how to strengthen against shearing of keyblocks toward the inside of a cavern. In addition, we tried to inspect the results of test by un-continuous analysis method.

We obtained some data on the shearing behavior after yeild, deformation of cavern shape and effect of slipping of cablebolt fixings.

### 概 要

本報告は、ケーブルボルト工法の適用性把握と数値解析による効果の検証を目的に、岩盤ブロックが空洞内に滑り破壊する現象をいかに補強するかに着目し、き裂分布を考慮しかつ、ケーブルボルトの長さをパラメータとした模型試験を実施したものである。検証解析では、き裂の力学的挙動が考慮できる2次元個別要素法を用いて、ケーブルボルト打設効果の確認を行った。

模型試験と数値解析を実施した結果、き裂降伏後の挙動、空洞内空変位への影響、ケーブルボルトの定着切れによる影響などについて、以下の知見を得ることができた。(1)降伏せん断応力度において、ケーブルボルト補強なしの場合に比べてケーブルボルト補強あり(短尺)の場合で4倍、ケーブルボルト補強あり(長尺)の場合で6倍の補強効果を発揮した。(2)検証解析では、ピーク強度など変形挙動全体に模型試験結果を再現できた。

### 1. はじめに

ケーブルボルト工法は全面接着式の岩盤補強法であり、フレキシブルなストランドを使用するので、狭い坑内からの長尺施工に有効である。従来、大規模地下空洞の主要な支保に利用されてきたP Sアンカーは、プレストレスが必要不可欠であったが、ケーブルボルトはプレストレスを必要としないために、P Sアンカーに比べて工期短縮及びコストダウンの効果が期待できる。しかし、ケーブルボルトの補強効果は未解明であり、実施工への適用はなされていないのが現状である。そこで、筆者らはケーブルボルトによる補強効果の発現メカニズムを解明するとともに、ケーブルボルトの定着特性及びき裂せん断特性モデルの提案を目的とした室内試験と検証解析を実施し、以下の事項を解明した<sup>1),2)</sup>。

- (1)室内及び原位置での引抜き試験による定着特性
- (2)単一不連続面のせん断試験による補強効果

次いで、ケーブルボルトの設計を目指すためには、不連続性岩盤のモデル化、及び数値解析による評価が必要となる。不連続性岩盤のモデル化は、具体的には原位置に多数存在する不連続面の分布を把握することであり、たとえば2次元個別要素法による解析用のブロックモデルを作成することである。しかし、実際には原位置の不連続面分布が複雑で、調査領域が限られており、不連続面のモデル化は確率論的手法に依存している。このため、モデル化の妥当性検証が困難になっている。また、数値解析で入力する岩石や不連続面の力学特性、初期応力などは必ずしも容易に評価できないこと、及び実際の岩盤挙動計測結果が複雑なため、解析結果の妥当性評価も容易ではない。

そこで、上記の入力値や境界条件が明瞭でかつ、比較的規模の大きな模型試験を実施し、この結果を踏まえてケーブルボルトの作用機構や空洞周辺岩盤に及ぼす影響を把握し、あわせて解析技術の検証を行った。

## 2. 試験体及び試験方法

### 2.1 模型試験体

2.1.1 寸法 模型試験体の外形及び寸法をFig.1に示す。空洞は模型中央に配置することとし、形状は地下発電所空洞を模擬した弾頭型で幅35cmとした。これは実際の一般的な空洞幅である25mの約1/75に当たる。また、空洞高さは幅の約2倍で65cmとした。模型外形寸法は載荷時の空洞周辺の応力分布が安定するまでを考慮して、横200cm、縦105cmとした。

2.1.2 き裂面 この空洞の右側壁にすべり破壊が生じるよう、Fig.1に示すき裂を配置した。自然き裂面の起伏形状を明確な条件の下で評価するために、Bartonら<sup>3)</sup>が提案したき裂の凹凸形状に関するパラメータJRCを算出して代表形状化した。某地下発電所建設予定地点におけるき裂状況は、Fig.2に示す分類表内のType3に当てはまる。この形状をFig.2中のアルミ板にトレースし、試験体作製時に利用した。

2.1.3 試験体材料 地下発電所のような大規模地下空洞は、通常C<sub>H</sub>～B級の極めて良好な岩盤に建設されている。そこで、今回の試験体に用いる材料を高強度コンクリートとした。強度は、某地下発電所建設予定地点の岩石強度を勘案して、約70MPaとした。

2.1.4 ケーブルボルト ケーブルボルト材料は、2.9mmの2本撚りのPC鋼線を用いるものとした。配置間隔は、既往の地下発電所空洞におけるPSアンカーの打設状況を参考にした。主な大規模地下空洞の岩石強度、ケーブルボルト仕様及び打設間隔などの情報を整理し、岩石強度に対する一孔当たりのケーブルボルト面積と一孔が受け持つ壁面面積の比率(鋼材断面積比と呼ぶこととする)との関係をFig.3に示す。この関係から、多少のばらつきはあるものの、近似直線の関係を得た。

したがって、今回の試験体に用いるコンクリート強度を約70MPaとしたことから、Fig.3の関係を適用すると0.015%の鋼材断面積比を得た。試験に使用するケー

ブルボルト材料の断面積は13.21mm<sup>2</sup>(2.9mmの2本撚り鋼線)であり、鋼材断面積比を勘案すると、ボルト一孔当たりの壁面面積は約20cm四方となった。したがって、模型試験体内におけるケーブルボルトの配置を、Fig.4のように両側壁に各3段設定した。

### 2.2 試験ケース

- 今回の模型試験では、着眼点を以下の2点に置いた。
- (1)不連続性岩盤ブロックの滑落をケーブルボルトがどれほど拘束できるか。
  - (2)ケーブル長が異なると、拘束効果にどれほどの相違が生じるか。

したがって、試験ケースは以下の3ケースとした。

- ケース1：ケーブルボルト補強なし
- ケース2：ケーブルボルト補強あり(短尺)
- ケース3：ケーブルボルト補強あり(長尺)

短尺と長尺の違いをFig.5に示す。き裂によって空洞側壁に構成されたキープロックの壁面からの水平方向最深部をDとした場合、その1.5倍の長さを短尺(ケース2)とし、3倍の長さを長尺(ケース3)とした。

### 2.3 載荷方法

最大荷重がかかるケースは長尺のケーブルボルトによって補強を行った場合である。事前解析から、模型試

Type	Shape	JRC range
1		0-2
2		2-4
3		4-6
4		6-8
5		8-10
6		10-12
7		12-14
8		14-16
9		16-18
10		18-20

0 5 10cm Scale



Fig.2 き裂分類とトレース版

Classification of crack and mold of crack trace

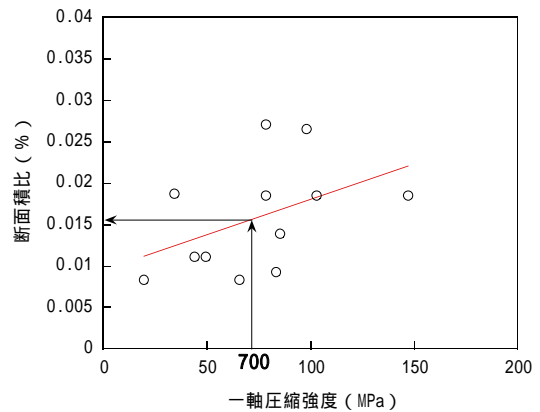


Fig.3 鋼材断面積比

Ratio of area of bolt

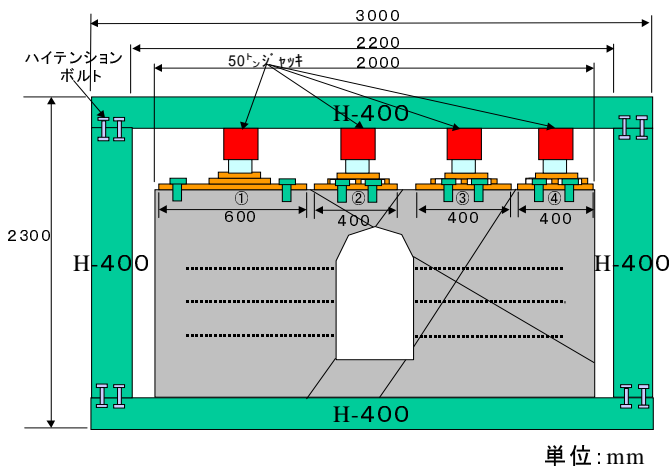


Fig.1 試験体の外形及び寸法

Shape and scale of model

験体上辺に約1000kN、60°傾斜のき裂面が滑るブロック部分(幅45cm)には約200kNがかかることが予想された。したがって、容量500kNの油圧ジャッキを4台用意し、各ブロックの上面に配置することにした。試験体への載荷方法及び状況をFig.1に示す。

#### 2.4 計測項目

計測項目は、ケーブルボルトひずみ、き裂せん断変位、き裂開口変位、載荷方向相対変位、載荷直交方向相対変位及び載荷荷重である。

ケーブルボルトに生じるひずみの測定ポイントは、Fig.6に示すようにき裂直上点及び岩質内部点に定めた。また、き裂のせん断挙動に関するせん断方向変位及び開口方向変位については、高精度変位計を用いて計測を行うものとした。設置した箇所はFig.6に示すき裂位置に固定ボルトを埋込み、変位計及びターゲットを組み上げるものとした。

載荷荷重は、Fig.1中に示した4台のジャッキのうち2台にロードセルを組込み測定した。1台は傾斜60°のき裂に挟まれたブロックの上辺No. に設置し、残りの1台は左端ブロックの上辺No. に設置した。

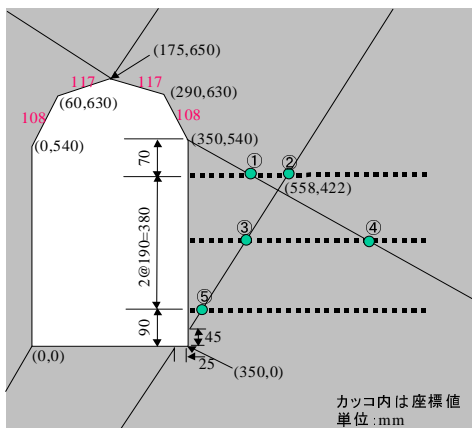


Fig.4 ケーブルボルト配置  
Location of setting cablebolts

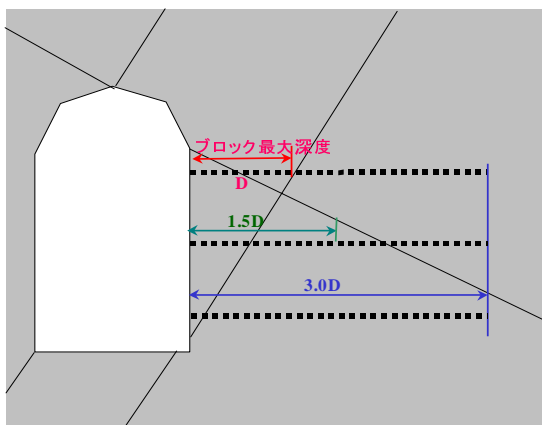


Fig.5 ケーブルボルトの長さ  
Length of cablebolt in each case

### 3. 試験結果

#### 3.1 ケース1(ケーブルボルト補強なし)

ケーブルボルトなしの無補強ケースについて、試験終了時点のせん断挙動状況をPhoto 1に示す。空洞側壁部のキーブロック(60°勾配と30°勾配で設置したき裂面で囲まれたブロック)は、60°勾配き裂に沿って連続的にすべり、最終的には空洞内に向かって崩落した。

#### 3.2 ケース2(ケーブルボルト補強あり(短尺))

空洞幅の1.5倍の長さを持つケーブルボルトを打設したケースについて、試験終了時点のせん断挙動状況をPhoto 2に示す。キーブロックの崩落状況はケース1と同様であるが、ケーブルボルトの拘束効果の影響で断続的なすべりを伴って崩落した。

#### 3.3 ケース3(ケーブルボルト補強あり(長尺))

空洞幅の3倍の長さを持つケーブルボルトを打設したケースについて、試験終了時点のせん断挙動状況をPhoto 3に示す。キーブロックの断続的な崩落挙動はケース2と同様であったが、せん断降伏応力は約3割増しとなった。

#### 3.4 考察

Fig.7は鉛直荷重と鉛直変位の関係を、3つのケースについてまとめて示したものである。これより、各ケースのせん断降伏応力を読み取ると、無補強ケースが0.25MPa、短尺ケーブルボルトケースが1.07MPa、長尺ケーブルボルトケースが1.38MPaとなった。短尺ケースは無補強に比べて4.1倍のせん断拘束効果があると解釈でき、長尺ケースでは5.3倍の効果があると判断できる。また、ケーブルボルト補強ケースにおいてはせん断降伏後も、鉛直載荷荷重は増加しており、ケーブルボルト材料の引張耐力による拘束効果も発揮されていると考えられる。さらに、その引張による拘束効果については、短尺よりも長尺ケースの方が顕著である。

Fig.8は60°き裂に対する開口変位とせん断変位の関係を示したものである。短尺ケースと長尺ケースにおけ

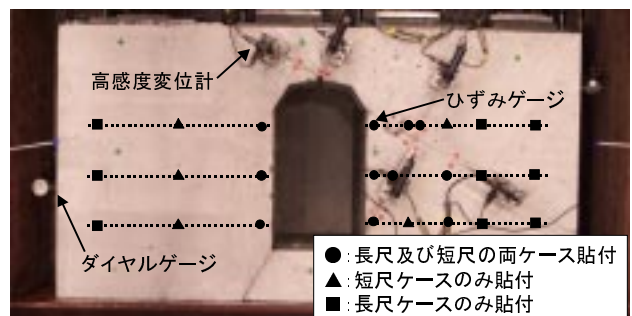


Fig.6 各種計測器配置  
Location of setting the measuring instruments

せん断変位に対する開口変位の関係を比較すると、せん断変位10mm時点の開口変位は短尺ケースで0.8mm、長尺ケースで0.2mmほどであった。これより、ケーブルボルト長が2倍になると、約4倍の開口抑制効果があったと考えられる。

Fig.9はケーブルボルトに発生した軸力の分布を示したものである。横軸にケーブルボルト長、縦軸に軸力を表している。プロットした軸力は、長尺、短尺両ケースの空洞右側壁中段に設置したケーブルボルトにおいて、各荷重段階における軸力を比較したものである。全上載荷重100kNにおいて、長尺ケーブルボルト(印)の全延長上にはまだ軸力は発生していないが、短尺ケーブルボルト(印)の延長上では約0.75kNの軸力が発生した。全上載荷重400kNにおいて、長尺ケーブルボルト(印)では延長130mm地点において1.1kNの軸力が発生していたが、短尺(印)ではその倍ほどの軸力が発生した。また、延長330mm地点において、軸力が約0.5kN発生し、延長460mm地点においては1.2kN発生した。330mm地点は60°勾配で設定したき裂との交差点であり、460mm地点は30°勾配で設定したき裂との交差点になる。長尺ケーブルボルトにおいて、上載荷重が600kNに達すると(印)延長330mm地点では約6.5kNの軸力が発生し、460mm地点では約6.2kN発生した。せん断当初、30°き裂付近に大きな軸力が発生する傾向にあったが、その後荷重が増えるにしたがってキープロックの空洞内部への変位が卓越するようになり、60°き裂交差点でせん断破壊し、最大軸力が発生している。また、同一荷重、同一延長地点における軸力を比較すると、短尺ケーブルボルトでは長尺ケーブルボルトの倍、値にして約1kN大きく発生した。したがって、短尺ケーブルボルトのほうが長尺ケーブルボルトより早くせん断降伏に達するものと考えられる。

#### 4. 解析結果

上記試験で示した3ケースにおいて、載荷荷重とせん

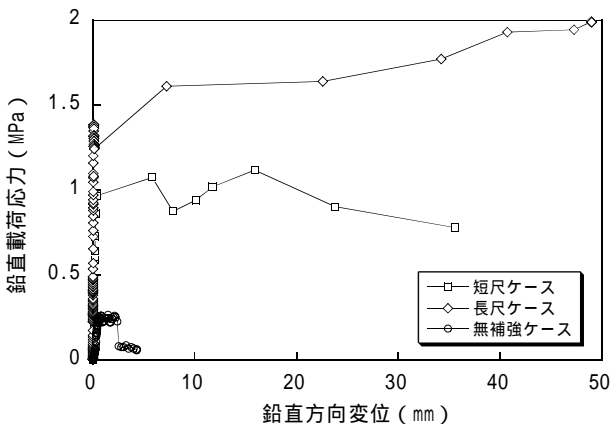


Fig.7 せん断強度とせん断変位の関係

Relationship between shear stress and displacement

断変形関係及び空洞周辺における応力分布状況などの挙動を数値解析によって検証した。

#### 4.1 個別要素法

数値解析には、き裂の特性を考慮できる2次元個別要素解析コードUDECを用いた。本コードは、岩盤全体をき裂面で分割されるブロックの集合体として取扱い、空洞掘削時の不連続面の力学的挙動が解析可能である。また、ケーブルボルトに発生するせん断応力が定着材を介して岩盤とケーブル材料の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、ケーブルボルトを現実に近い形で考慮することができる。

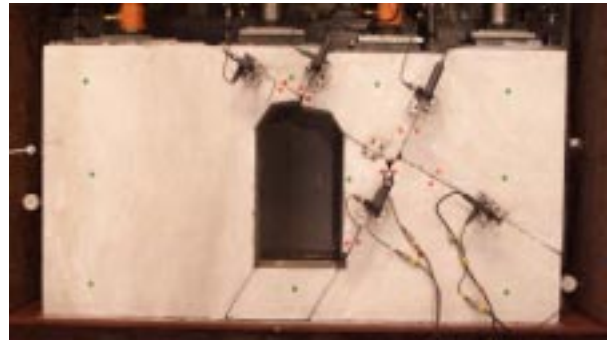


Photo 1 ケース1(ケーブルボルト補強なし)  
Shearing statement of non-cablebolt case



Photo 2 ケース2(ケーブルボルト補強あり(短尺))  
Shearing statement of short-cablebolt case

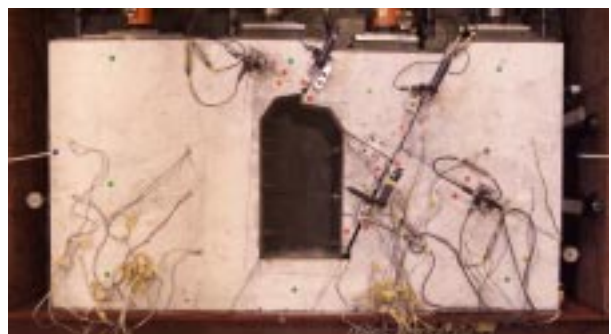


Photo 3 ケース3(ケーブルボルト補強あり(長尺))  
Shearing statement of long-cablebolt case



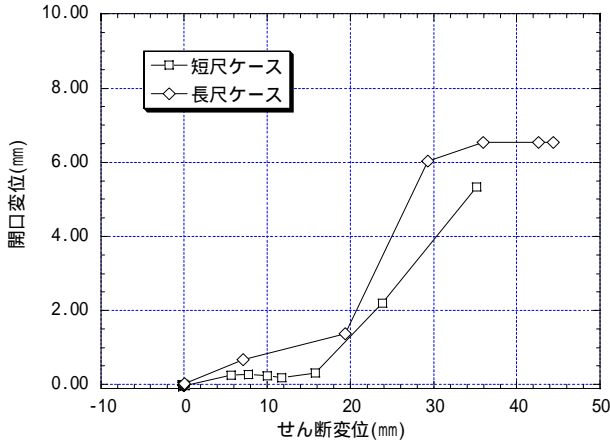


Fig. 8 開口変位とせん断変位の関係

Relationship between opening and displacement

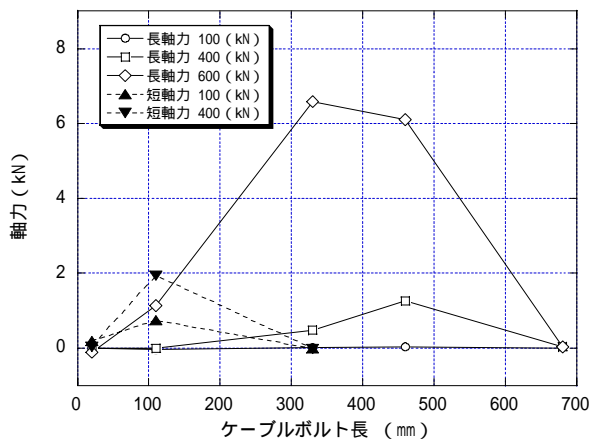


Fig. 9 ケーブルボルト上軸力分布

Distribution of axis road of cablebolt in each vertical road level

#### 4.2 解析モデル

模型試験体を解析モデルとして形成すると Fig. 10 となる。また、メッシュは三角形要素による自動分割を行った結果、Fig. 11 のようになった。

#### 4.3 入力値および解析方法

作成した試験体モデルに各種パラメータを入力する。UDCでは奥行きを単位長さ当たりとなるために、実際の値を単位長さに換算して入力する必要がある。実際の模型試験体の奥行きは24cmであり、解析上実際の載荷荷重、FC鋼材断面積及び付着力などは100cm/24cm=4.2倍した値を入力した。Table 1に入力値一覧を示す。

載荷方法は、モデル上辺に等分布圧で与える。モデル両側端は自由とし、下端は鉛直変位を固定した。鉛直応力を0.1MPaづつ増加させていき、最大変位増分がほとんど認められなくなった時点で解析を終了した。

#### 4.4 結果と考察

以下に模型試験3ケースについて解析した結果を示す。解析結果のうち、モデルの変位挙動を Fig. 12 ~

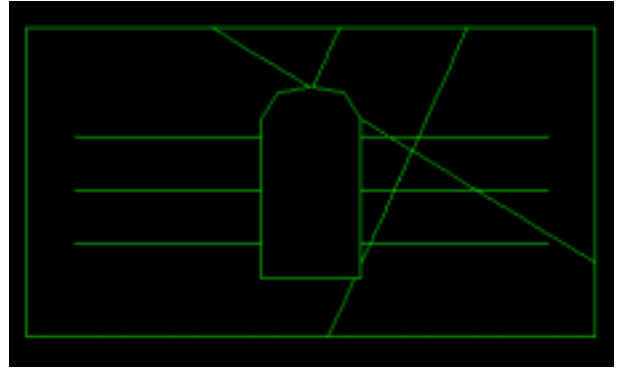


Fig. 10 解析モデル

Statement of analysis model

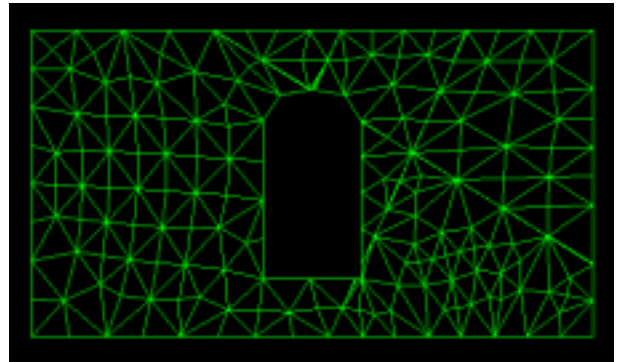


Fig. 11 モデル要素分割

Split of elements of model

Table 1 入力物性値

Input parameters of instrumental character

パラメーター	単位	φ2.9mm2本より		
		実際	解析	
鋼線材料特性	断面積 $A_s$	mm <sup>2</sup>	13.21	55.04
	周長	mm	12.88	26.30
	単位体積重量	kg/m <sup>3</sup>	7873.00	7873.00
	降伏荷重 $P_y$	kN	25.90	107.85
	ヤング率 $E_a$	kN/mm <sup>2</sup>	203.00	203.00
	破断ひずみ $\epsilon_f$		0.04	0.04
付着特性	付着強度 $\tau_y$	N/mm <sup>2</sup>	0.75	3.10
	すべり $S_y$	mm	0.08	0.27
	$S_{bond}$	N/m	9.79E+03	8.10E+03
	$K_{bond}$	N/m/m	1.22E+08	3.00E+08

Fig. 14 に示す。また、Fig. 15 に鉛直応力 - 鉛直変位関係を示す。

Fig. 12 はケース1 (ケーブルボルト補強なし) の場合であり、空洞右上部に位置するキーブロックの崩壊現象が再現されている。Fig. 15 から、このケースでは鉛直応力約0.40MPa (鉛直載荷荷重590kN) を過ぎたところでき裂面はせん断降伏し、鉛直変位が急激に増加することがわかった。その後、変位が増大しても、応力の増加は確認されなかった。

Fig. 13 はケース2 (ケーブルボルト補強あり (短尺)) の場合である。Fig. 12 と同様、空洞右上部に位置するキーブロックの崩壊現象が再現されているとともに、ケーブルボルトに作用する軸力分布の状況が理解できる。Fig. 15 から、ケーブルボルトによる補強を行うこと

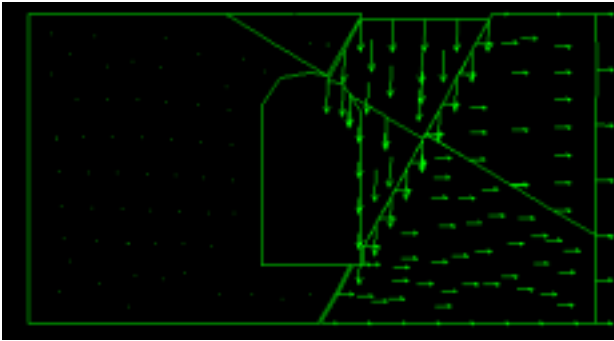


Fig.12 ケース1(ケーブルボルト補強なし)解析結果  
Result of analysis in non-cablebolt case

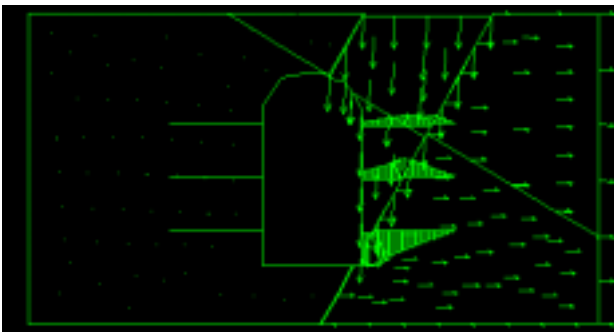


Fig.13 ケース2(ケーブルボルト補強あり(短尺))解析結果  
Result of analysis in short-cablebolt case

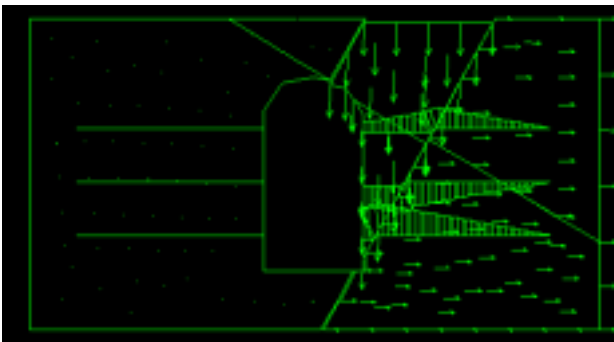


Fig.14 ケース3(ケーブルボルト補強あり(長尺))解析結果  
Result of analysis in long-cablebolt case

により、このケースでは、ケーブルボルト補強なしの場合と同様に約0.40MPaの鉛直応力がかかったところで、き裂のせん断変位が生じ始めたが、その後も応力は増加を続け鉛直応力1.43MPa(鉛直載荷荷重685kN)まで保つことができた。この時点でケーブルボルト補強なしの場合と比較して、鉛直応力に対して3.5倍の補強効果を得ることが出来るとも考えられる。しかし、その後、応力の増加はほとんど見られなかった。

一方、Fig.14はケース3(ケーブルボルト補強あり(長尺))の場合である。Fig.12と同様、空洞右上部に位置するキーブロックの崩壊現象が再現されているとともに、Fig.13と同様にケーブルボルトに作用する軸力分布の状況が理解できる。Fig.15から、このケースでは鉛直変位が生じ始めて以降、鉛直応力1.70MPa(鉛直載荷荷重815kN)まで保つことができた。ケーブルボルト補強

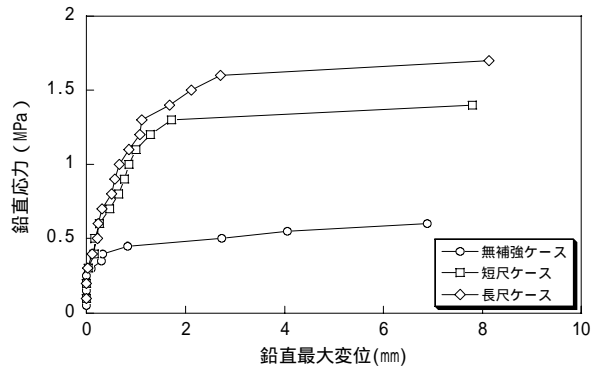


Fig.15 解析による応力 - 変位比較  
Relationship between shear stress and displacement by analysis

なしの場合と比較して、鉛直応力に対して4.25倍の補強効果を得ることができるものと考えられる。さらに、その後変位が増大するとともに、応力の増大もわずかではあるが確認され、依然ケーブルボルトによる拘束効果が発揮されていることが示唆された。

次に、模型実験と数値解析における鉛直応力 - 鉛直変位の関係 (Fig.7とFig.15)を比較してみる。3ケースにおけるき裂せん断降伏応力に着目すると、両者がよく一致している結果になり、解析コードUDECによって模型試験を再現できたものと判断できた。ただし、せん断降伏応力に至るまでのき裂せん断挙動に着目すると、模型実験ではほとんど変位が起きていないのに対して、解析では2mmを越える変位が生じている。この差異は、き裂の入力物性やせん断特性モデルが実験と解析で異なることが要因として考えられる。

## 5. おわりに

模型試験及び数値解析を実施することにより、ケーブルボルトによる岩盤補強効果の解明を試みた。その結果、明らかとなった事項を以下に示す。

- (1)ケーブルボルトを打設することで、無補強時に比べてき裂の降伏せん断応力が4～6倍向上した。
- (2)解析コードUDECでケーブルボルトの支保効果を検証できた。

今後、ケーブルボルトを用いた岩盤補強工法に関する合理的な設計・施工法の確立を行い、実施工へ展開する予定である。

### 参考文献

- 1) 木梨, 大内, 大西; 付着応力分布に基づくケーブルボルトの引抜定着特性に関する研究, トンネル工学研究論文・報告集第9巻, pp.31～38, 1999
- 2) 丹生屋, 木梨, 鈴木; ケーブルボルトによる岩盤き裂面せん断補強効果に関する要素試験, トンネル工学研究論文・報告集第10巻, pp.167～172, 2000
- 3) Barton, N., Choubey, V.; The shear strength of rock joints in theory and practice, Rock Mechanics, Vol.10, pp.1～54, 1977