

ケーブルボルトの作用機構と支保効果に関する考察

A STUDY ON MECHANISM AND SUPPORT EFFECT OF CABLE BOLT

木梨秀雄¹⁾・天野 悟²⁾

Hideo KINASHI, Satoru AMANO

The purpose of this paper is to examine the support effect of the cable bolt based on the mechanism that the axial force of the cable bolt is induced according to the relative displacement between the cable bolt and the rock mass. First, a estimation method of the bonding characteristics is proposed, which utilizes the result of *in situ* pull-out test. Then, the numerical experiments are carried out to understand the support effect of the cable bolt in terms of the frequency of discontinuities. The result of the numerical experiments indicate that the support effect of the cable bolt is more efficiently exhibited in discontinuous rock mass than in continuous rock mass.

Key Words : cable bolt, pull-out test, continuous rock mass, discontinuous rock mass, bonding characteristics

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、大規模地下空洞やトンネルでの適用事例も報告されている^{1), 2)}。我が国においても、トンネルの大断面化に伴い、掘削時の切羽や周辺地山の安定性を確保するための先行支保部材として、長尺のケーブルボルトが注目され、その適用性が検討されている³⁾。

筆者らは、ケーブルボルトの定着性を確認するための原位置引抜き試験⁴⁾、長尺切羽ボルトとしての原位置挙動計測とシミュレーション解析⁵⁾、不連続性岩盤での支保効果の解析的検討⁶⁾を通して、ケーブルボルトの作用機構とその支保効果を、原位置計測および数値解析によって検討してきた。本論文では、これらの研究成果を踏まえて、ケーブルボルトの作用機構を連続性岩盤と不連続性岩盤での挙動に分けて考察する。また、ケーブルボルトの定着特性については、原位置での引抜き試験による評価方法とそのパラメーターの設定方法について提案し、さらに、ケーブルボルトの支保効果については、不連続面の頻度に着目してその支保効果の比較検討を行う。

2. ケーブルボルトの作用機構

ケーブルボルトの作用機構は、ケーブルボルト自体にはせん断剛性がないことを除けば、基本的には全面接着型のロックボルトと同様と考えることができる。ここでは、岩盤とロックボルトの相対変位に対応してロックボルトに沿うせん断応力が発生し、その結果ロックボルトに軸力が生じるという考え方⁷⁾をそのままケーブルボルトにも適用している。すなわち、ケーブルボルトに沿うせん断応力 τ_x は岩盤の変位 γ_x とケーブルボルトの変位 ξ_x の相対変位に比例して生じると仮定しており、次式で表わすことができる。

$$\tau_x = C(\xi_x - \gamma_x) \quad (1)$$

(1)式における係数Cは、岩盤と定着材、定着材とケーブルボルト間の両方の定着特性を表現するものであり、岩盤、定着材およびケーブルボルトの材料特性と定着材の充填の程度に左右される。(1)式を仮定することによって、岩盤の変位分布 γ_x がわかれば、ケーブルボルトの変位 ξ_x 、さらに、ケーブルボルト軸力を理論的に求めることができる⁷⁾。

この考え方は、個別要素解析コード⁸⁾および有限差分解析コード⁹⁾の中でケーブル要素として組み込まれており¹⁰⁾、岩盤安定解析の中でその支保効果を考慮できるようになっている。このケーブル要素では、図-1に

1)正会員 工修 (株)大林組 技術研究所 土木第四研究室

2)正会員 Ph.D. (株)大林組 土木技術本部 技術第二部

示すように、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(K_{bond})を表現するバネと付着強度(S_{bond})を表すスライダーを介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よってケーブル材にせん断応力が生じ、このせん断応力とケーブル材の軸剛性に応じて軸力が発生するモデルになっている。すなわち、 K_{bond} はケーブルボルトと岩盤間の単位の相対変位に対してケーブルボルトの長さ方向に沿って生じる単位長さ当たりのせん断力を表し、 S_{bond} はケーブルボルトの長さ方向に沿う単位長さ当たりのせん断強度と定義することができる。 K_{bond} および S_{bond} と相対変位の関係を示したものが図-2である。

2. 1 連続性岩盤での挙動

切羽に打設した長尺ケーブルボルトの挙動を三次元有限差分解コード⁹⁾により解析的に求めた⁵⁾。現場は2車線道路トンネルの土被りが約100mの地点であり、地山は一軸圧縮強度が約60MPa程度の閃緑岩と花崗岩が分布し節理が発達していた。解析モデルを図-3に示す。図-3のように、すでに掘削が完了した本坑と換気坑の間に、ポンプ室が掘削される以前に、あらかじめ換気坑から本坑に向かって、軸力計を設置した長さ13mのケーブルボルト($\phi 17.8\text{mm}$)と地中変位計を水平に打設した。そして、ポンプ室切羽の進行に伴うケーブルボルトの軸力と地中変位を計測した。解析に用いた入力値を表-1に示す。地山を連続性岩盤として解析し、最終切羽掘削時のケーブルボルトの軸力分布、せん断応力分布と岩盤およびケーブルボルトの変位分布を併せて示したものが図-4である。なお、本論文で示す軸力はすべて引張りを正としている。図-4からわかるように、ケーブルボルトの軸力ピーク点、岩盤とケーブルボルトの相対変位がない中立点、およびせん断応力の方向が反転する点の位置は一致している。

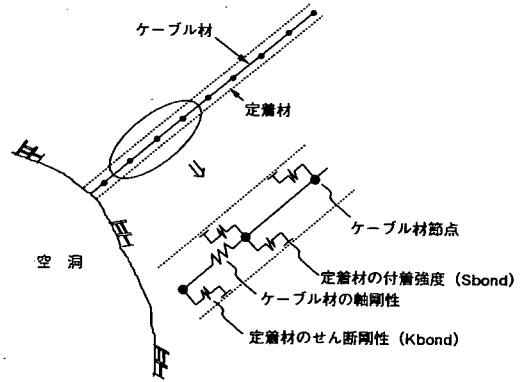


図-1 ケーブル要素のモデル化の概念

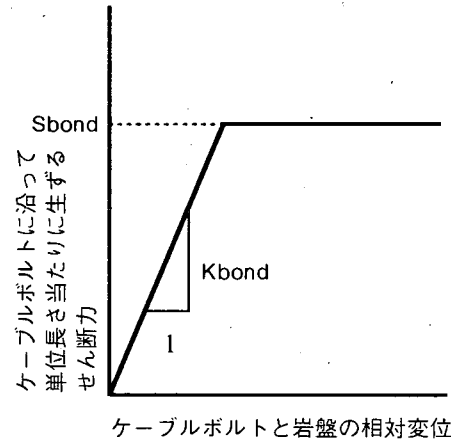


図-2 K_{bond} および S_{bond} と相対変位の関係

表-1 解析に用いた入力値

岩盤	弾性係数	1.23 GPa
	ポアソン比	0.20
ケーブル	密度	2,700 kg/m ³
	断面積	208.4 mm ²
定着材	引張強度	388 kN
	弾性係数	190 GPa
不連続面	せん断剛性	180 MN/m/m
	付着強度	600 kN/m
	垂直剛性	50 MPa/mm
	せん断剛性	10 MPa/mm
初期地圧	粘着力	0.1 MPa
	摩擦角	50°
初期地圧	σ_x	2.7MPa
	σ_y	2.7MPa
	σ_z	2.7MPa

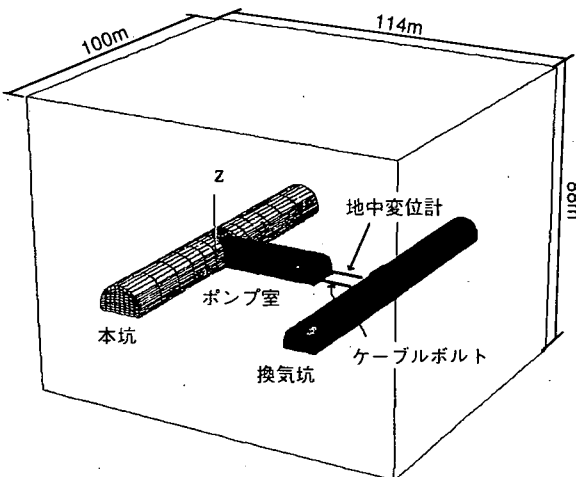


図-3 解析モデルの概要

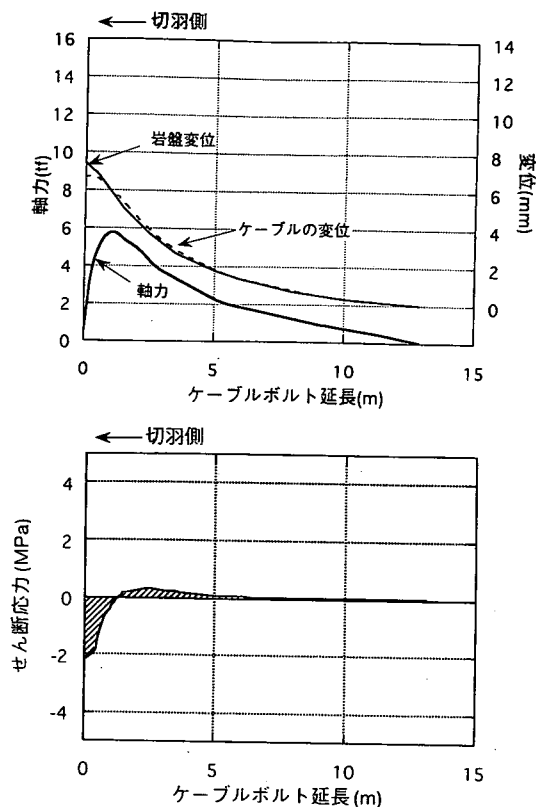


図-4 連続性岩盤でのケーブルボルトの挙動

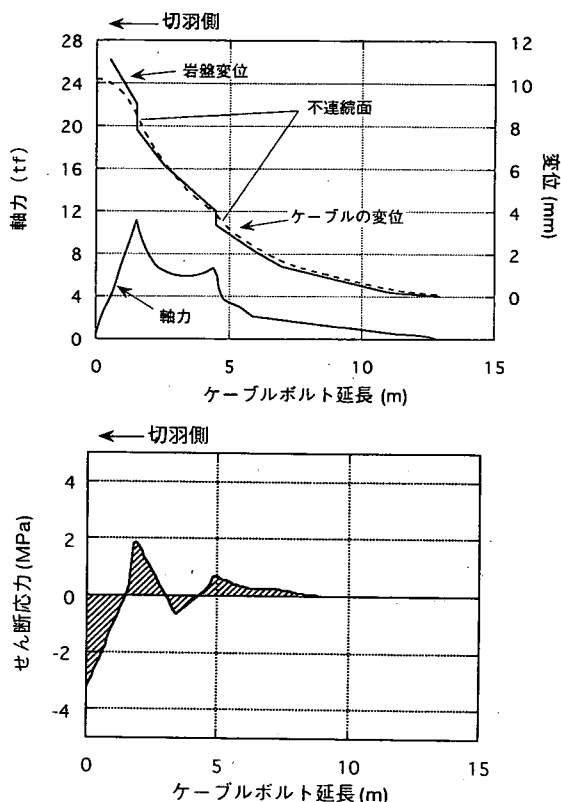


図-5 不連続性岩盤でのケーブルボルトの挙動

すなわち、この場合、中立点より切羽側のせん断応力はケーブルボルトを引き抜くように、奥側のせん断応力は岩盤に固定するように働き、この結果、ケーブルボルトには図-4に示すような軸力が生じることがわかる。

2. 2 不連続性岩盤での挙動

図-5は、地中変位の計測結果から不連続面の存在が推測された2カ所に不連続面を設定して解析を行った結果を同様に示したものである。図-5から、2カ所の不連続面の位置において、ケーブルボルトには尖った形状のピークを呈する大きな軸力が発生していることがわかる。この軸力は、おもに不連続面での局所的な開口変位に対応して生じているものであり、不連続面での開口変位を抑制する効果が期待される。

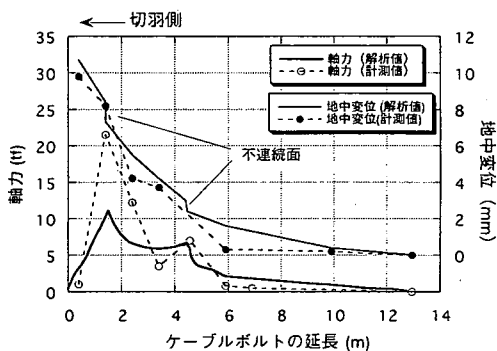


図-6 原位置計測および解析結果の比較

図-6は、図-5に示した解析結果と原位置でのケーブルボルト軸力と切羽前方の地中変位の計測結果を比較して示したものである⁵⁾。連続性岩盤でのケーブルボルトの挙動を示した図-4の結果と比較すれば明らかなように、不連続面の存在が推定された2カ所において解析上不連続面を考慮することによって、原位置での計測結果に近い挙動を解析的に表現することができた。したがって、このケーブルボルトのモデル化によって、ケーブルボルトの原位置での挙動を三次元の数値解析において再現できることがわかる。

ケーブルボルトは、このように不連続面が開口するような挙動を抑制する効果は大きいですが、ケーブルボルト自体にはロックボルトのようなせん断剛性がないため、不連続面でのせん断変位に対する抵抗が期待できないとい

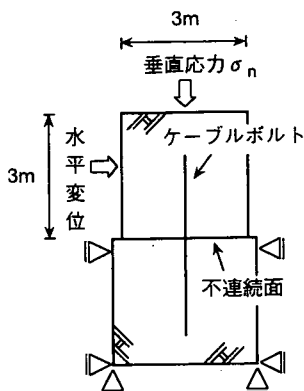


図-7 一面せん断の解析モデル

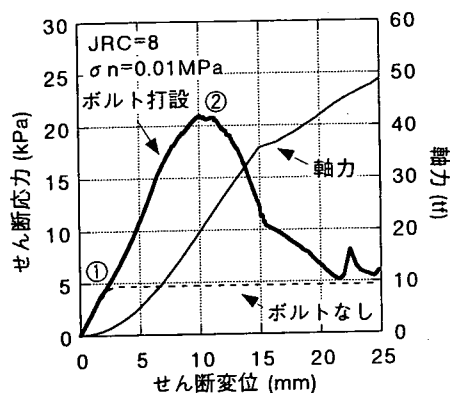


図-8 せん断応力～せん断変位、軸力の関係

う懸念がある。しかしながら、ケーブルボルト自体にはせん断剛性がないものの、定着材の付着によってせん断時に軸力が生じ、不連続面のせん断強度が増加することが期待できる。

そこで、不連続面の一面せん断を解析的に模擬し、ケーブルボルトの打設による不連続面の補強効果について解析的に検討した¹¹⁾。解析では、図-7に示すように、3m×3m（奥行き1m）の岩盤ブロックが不連続面を境にせん断される場合を想定し、ケーブルボルトは不連続面と直交する方向に打設した。上側のブロックに水平変位を与えることによって一面せん断を模擬し、この時の不連続面上のせん断応力の平均値とせん断変位を求めた。

図-8は、この時のせん断変位、せん断応力およびケーブルボルトの最大軸力の関係を、ケーブルボルトが無い場合と比較して示したものである。なお、この場合の垂直応力は0.01MPa、不連続面の粗さ係数はJRC=8である¹¹⁾。図-8において、せん断開始から図中の①までの範囲では、ケーブルボルトの軸力の発生はわずかであり、不連続面本来のせん断抵抗によりせん断応力が増加している。せん断変位が図中の②まで増加する範囲では、ケーブルボルトがない場合には不連続面は降伏するが、ケーブルボルトを打設した場合には、その効果によりせん断応力が大きく増加することがわかる。このように、解析的ではあるが、ケーブルボルトが不連続面と直交して打設されるような場合にも、せん断変位の増大とともに軸力が発生し、不連続面のせん断強度が増大することがわかった。

3. 定着特性の評価

ケーブルボルトの支保効果を考える場合、その作用機構から、定着材の定着特性を適切に評価することが重要になる。ケーブルボルトの定着特性は、岩盤と定着材の境界面での定着特性および定着材とケーブルボルトの境界面での定着特性、さらには、岩盤および定着材の材料特性に左右され、また、施工時の定着材の充填状況にも大きく影響される。したがって、この定着特性を詳細に評価するには、これらの多くのパラメーターを設定する必要があるが、ケーブルボルトの支保設計に際して、これらの多くの定着特性に関するパラメーターを、個々に設定することは現実的には困難である。しかしながら、先に述べたケーブル要素におけるモデル化では、この定着特性を2つのパラメーター(K_{bond} と S_{bond})によって、これらの多くの要因を包括して表現している。このように、設定すべきパラメーターが少くないということは、モデル化が簡便になるとともに、得られた解析結果の解釈が容易になるという利点がある。さらに、後で述べるように、このパラメーターを引抜き試験結果を利用して設定することにより、原位置で実際に打設されたケーブルボルトの定着特性を評価することができる。

ここでは、引抜き試験結果による定着特性の評価について考察するとともに、引抜き試験結果の数値シミュレーションを利用した定着特性パラメーターの設定方法について述べる。

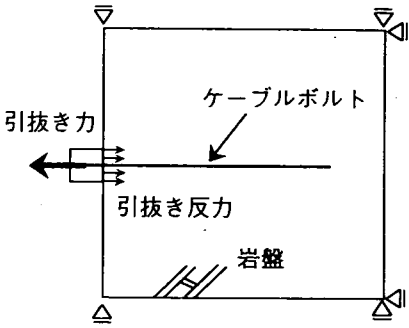
3. 1 引抜き試験による評価

従来、ロックボルトの定着耐力を確認するための試験として、引抜き試験が行われている。通常、この引抜き試験では、引抜き荷重に対してボルト頭部の変位を測定し、その結果としての荷重－変位曲線の線形性から引抜

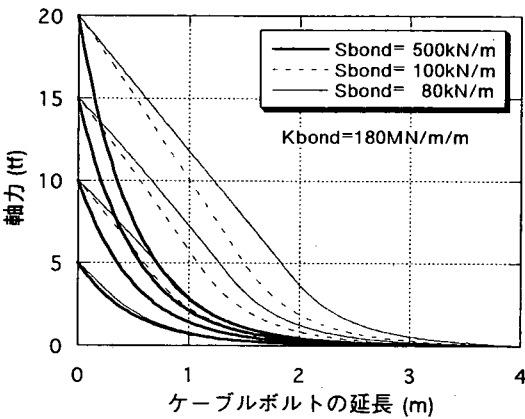
き耐力が評価されている¹²⁾。この引抜き耐力は、ボルトの降伏点耐力と同程度となるように定められ、施工中の引抜き試験では引抜き耐力の80%程度に達すれば合格と見なしてよいともされている¹³⁾。また、この荷重－変位曲線の直線部の勾配から、(1)式における係数Cの値を求める試みもなされている⁷⁾。

(1) 式の考え方によれば、Cの値が大きいくほど、すなわち、荷重－変位曲線の勾配の大きいほど、岩盤の変位に対してより大きな軸力がケーブルボルトに生じるため、小さな変位に対してもその効果を発揮することができる。逆に、この勾配が小さいほど、大きな岩盤の変位に対しても、ケーブルボルトは降伏耐力を越えることなく追従し、その効果を発揮できるともいうことができる。このように、荷重－変位曲線の勾配の大きさがケーブルボルトの効果に与える影響については、ケーブルボルトを打設する岩盤の変形特性によって異なるため、一概にいうことはできない。ただし、引抜き試験の結果において問題となるのは、ケーブルボルトの降伏耐力以下の荷重レベルでこの勾配が極端に低下する場合であり、ケーブルボルトの効果を最大限に期待するためには、定着耐力が不足しているといえることができる。

しかしながら、この引抜き試験では、通常、ボルト頭部の変位測定の精度はあまり高くはない。また、口元の壁面に引抜き荷重の反力がかかるなど、引抜き試験時のケーブルボルトの挙動は実際の挙動とは異なるものと考えられる。したがって、ここでは、引抜き試験結果の数値シミュレーションによって、ケーブルボルトの定着特性パラメーターを設定することを考えた。以下にそのパラメーターの設定方法について述べる。



図－9 引抜き試験の解析モデル



図－10 引抜き試験における軸力分布

3. 2 定着特性パラメーターの設定

ケーブルボルトの定着特性パラメーター (K_{bond} と S_{bond}) は、ケーブルボルトの引抜き試験時の軸力測定結果をケーブル要素を用いた数値シミュレーションを行うことによって設定することができる。

図－9 に示すような解析モデルを用いて引抜き試験を再現することにより、引抜き荷重ごとにケーブルボルトに生じる軸力分布を求めることができる。図－10 は、長さ4mのケーブルボルトの引抜き時の軸力分布を、引抜き荷重ごとに示したものである。なお、この時の定着特性パラメーターは、 K_{bond} を一定にして、 S_{bond} を変化させている。実際にこれらの定着特性パラメーターを設定する場合には、引抜き試験時のケーブルボルトの軸力分布測定結果に、シミュレーション結果を試行錯誤的にあわせることによって K_{bond} と S_{bond} を設定することになる。ただし、この作業は、定着材の付着強度以下の引抜き荷重において、まず K_{bond} を設定してから、次に S_{bond} をあわせれば、それほど複雑なものとはならない。

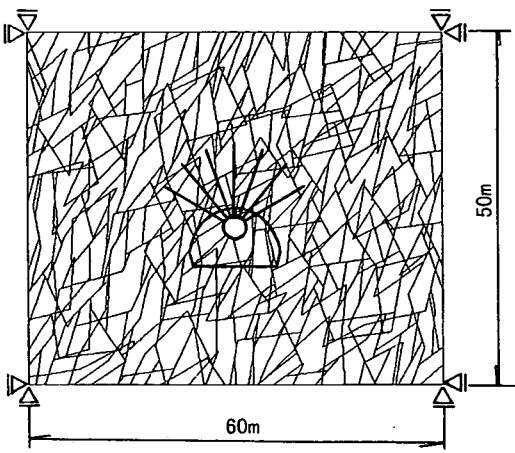
4. ケーブルボルトの支保効果

4. 1 解析方法

ここでは、不連続性岩盤におけるケーブルボルトの支保効果を把握するため、不連続面の頻度に着目し、個別要素解析コード⁸⁾を用いて検討する。2次元平面内における不連続面の配置は、中心位置、トレース長および傾斜角によりモデル化した。不連続面の頻度については、トンネルの掘削幅Dを基準として不連続面の中心位置間隔aをD、D/3、D/5、D/10の4パターンとした。トレース長は、中心位置間隔aの2.5倍程度とし、個々の不連続面の傾斜角については、硬岩地山における実測例⁶⁾を利用して確率論的に設定した。中心位置の間隔aがD/5の場合の解析モデルを図－11に示す。図－11に示すように、長さ10mのケーブルボルト7本を直径3.5m

の先進導坑から打設し、掘削幅Dが13mのトンネルに拡幅することを想定した。ケーブルボルトは、φ17.8mmのPC鋼より線（19本より）としている。解析ケースは、上記の4ケースに不連続面を含まない連続性岩盤のケースを加えた5つのケースで、各ケースについて無支保の場合と比較した。さらに、 $a = D / 10$ のケースとほぼ同等の内空変位が発生するような等価な弾性係数を持つ連続性岩盤（ケース6）についても解析した。なお、ケース6についても個別要素法を用いて解析を実施した。

解析に用いた入力値を表－2に示す。なお、初期地圧は土被り100m程度を想定し、 $\sigma_v = \sigma_H = 2.5\text{MPa}$ の等方応力状態とした。ただし、ケース6では岩盤の弾性係数を1.5GPaとしている。また、解析では重力を考慮している。



図－11 トンネルの解析モデル（ $a = D/15$ ）

表－2 解析に用いた入力値

岩 盤		不連続面	ケーブルボルト	
密 度	2,500 kg/m ³	垂直剛性 2 MPa/mm	密 度	6,083 kg/m ³
弾性係数	18 GPa	せん断剛性 1 MPa/mm	弾性係数	190 GPa
ポアソン比	0.21	粘 着 力 0.1 MPa	引張強度	388 kN
		摩 擦 角 40°	K _{bond}	180 MN/m/m
			S _{bond}	600 kN/m

4. 2 解析結果と考察

解析結果を表－3にまとめる。表－3に基づいて、各ケースにおける掘削時の岩盤挙動およびケーブルボルトの支保効果を比較してみる。

まず、連続性岩盤と不連続性岩盤における掘削時の挙動の違いを考察してみる。連続性岩盤を対象としたケース1とケース6の天端沈下および内空変位を比較すると、内空変位よりも天端沈下が大きくなっている。この傾向は、初期地圧が等方状態であることとそのトンネル形状から考えれば予想できる挙動であるといえる。一方、ケース2～5の不連続性岩盤では、不連続面の頻度の増加に伴い内空変位に対する天端沈下の比率が小さくなる傾向にある。これは、解析に用いた不連続面の傾斜角が鉛直方向に卓越しており、掘削時の不連続面の開口変位が、内空変位に寄与するためと考えられる。

つぎに、不連続面の頻度の違いによるケーブルボルトの挙動と支保効果についてケース2～5で比較してみる。表－3では、掘削後に7本のケーブルボルトに蓄えられた弾性ひずみエネルギーE_Rを示した。ケーブルボルト一本あたりのE_Rは、次式により求めている⁷⁾。

$$E_R = \frac{\pi r^2}{2E_s} \int_0^L \sigma_x^2 dx$$

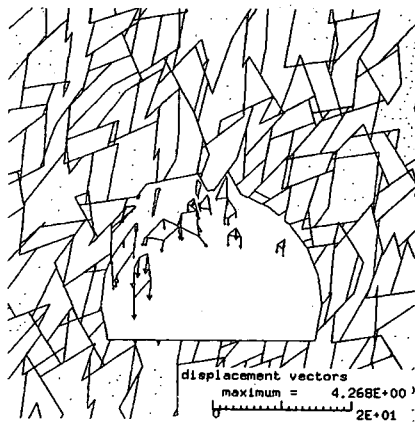
(2)

ここで、 r 、 L 、 E_s 、 σ_x はそれぞれケーブルボルトの半径、長さ、弾性係数および発生した軸応力である。

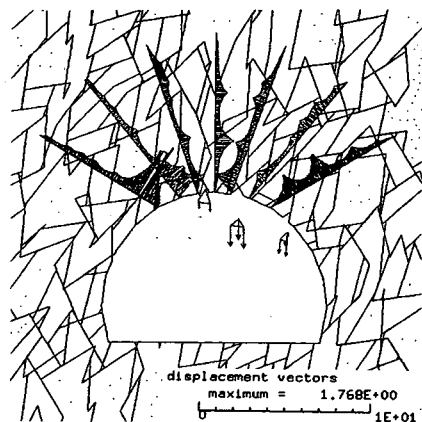
表－3より、不連続面の頻度の増加に伴いE_Rが増大し、天端沈下抑制の効果が高まる傾向にあることがわかる。ケース5における岩塊の挙動と軸力分布を図－12に示す。図－12に示すように、ケース5では無支保の場合には天端部分全体が崩落しているが、ケーブルボルトを打設した場合は、天端からはケーブルボルト打設間の

表-3 解析結果のまとめ

	中心間隔 a		天端沈下 (mm)	内空変位 (mm)	最大軸力 (tf)	弾性ひずみエネルギー (N・m)
ケース 1	0 (連続性岩盤)	支保あり	1.113	0.962	0.5	5.5
		無支保	1.114	0.963	---	---
ケース 2	D	支保あり	1.575	2.048	5.4	27.4
		無支保	1.583	2.079	---	---
ケース 3	D/3	支保あり	2.430	5.305	6.6	69.6
		無支保	3.205	5.392	---	---
ケース 4	D/5	支保あり	4.762	7.170	13.5	350.8
		無支保	5.274	7.190	---	---
ケース 5	D/10	支保あり	6.177	11.890	14.2	317.5
		無支保	崩落	11.467	---	---
ケース 6	0 (連続性岩盤)	支保あり	13.35	11.518	6.2	794.8
		無支保	13.46	11.510	---	---



(無支保)



(ケーブルボルト打設)

図-12 ケース5の解析結果 (a = D/10)

小岩塊の抜け落ち程度にとどまっており、ケーブルボルトの支保効果を認めることができる。

つぎに、連続性岩盤および不連続性岩盤におけるケーブルボルトの挙動の違いを、ケース5とケース6で比較する。ケース6は、ケース5の場合と同等の内空変位が生ずるような等価な弾性係数を設定し、連続性岩盤に置き換えて解析を実施したものである。ケース6における岩盤変位と軸力分布を図-13に示す。図-13に示すように、連続性岩盤における軸力分布は、図-12に示した不連続性岩盤での軸力分布とは明らかに異なる。また、ケース6では E_R がケース5の2.5倍となっているものの、ケース6でケーブルボルトを打設した場合の天端沈下抑制の効果は、ケース5ほど顕著ではない。したがって、本解析例の場合には、ケーブルボルトの支保効果は、連続性岩盤よりも不連続性岩盤においてより効率的に発揮されるということが出来る。

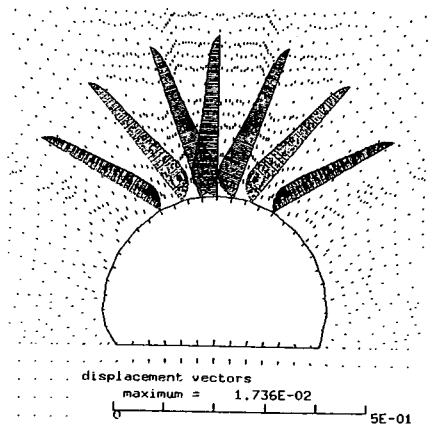


図-13 ケース6の解析結果

5. おわりに

本論文では、岩盤とケーブルボルトの相対変位に対応してケーブルボルトに軸力が生じるという考え方に基づいて、ケーブルボルトの作用機構を連続性岩盤と不連続性岩盤での挙動に分けて説明した。

また、ケーブルボルトの支保効果を考える場合に最も重要となる定着特性の評価については、引抜き試験の数値シミュレーションを利用した評価方法を提案した。

さらに、ケーブルボルトの支保効果を把握するために、不連続面の傾度に着目して解析的検討を行った。この結果、一つの解析例ではあるが、ケーブルボルトの支保効果は、連続性岩盤よりも不連続性岩盤においてより効率的に発揮されることを示すことができた。

6. 参考文献

- 1) Barton, N. et al.: Predicted and Measured Performance of the 62m Span Norwegian Olympic Ice Hockey Cavern at Gjovik. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.31, No.6, pp. 617-641, 1994.
- 2) Smith, M.: Requalification at Serena. *World Tunnelling*, Vol.4, No.3, pp. 153-158, May 1991.
- 3) 高速道路技術センター：第二東名・名神トンネルに関する技術的検討の現況と今後への展望、講演会資料、pp. 58～61、1996.
- 4) 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論文・報告集－第5巻－、pp. 149～154、1995.
- 5) 天野 悟、木梨秀雄、土原久哉、渡辺和憲、二宮康郎：切羽安定のためのケーブルボルトの支保効果について、第6回トンネル工学研究発表会論文・報告集－第6巻－、pp. 151～156、1996.
- 6) 天野 悟、木梨秀雄、田中達也：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論文・報告集－第5巻－、pp. 155～160、1995.
- 7) 斎藤敏明、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.
- 8) Itasca Consulting Group, Inc.: UDEC(Universal Distinct Element Code) Version 3.0 User's Manual, 1996.
- 9) Itasca Consulting Group, Inc.: FLAC3D (Fast Lagrangian Analysis of Continua in Three Dimensions) Version 1.10 User's Manual, 1996.
- 10) Brady, B. and Lorig, L.: Analysis of Rock Reinforcement Using Finite Difference Methods. *Computers and Geotechnics*, pp. 123～149、1988.
- 11) 木梨秀雄、天野 悟、吉岡尚也：不連続面のせん断に伴うケーブルボルトの補強効果に関する解析的検討、第52回土木学会年次学術講演会Ⅲ-B、pp. 130～131、1997.
- 12) 日本道路協会：道路トンネル観察・計測指針、pp.78～79、1993.
- 13) 土木学会：トンネル標準示方書〔山岳工法編〕・同解説、pp.180～183、1996.