

地下空洞におけるケーブルボルトの最適配置の検討 - 付着強度に着目して -

Optimization of Cablebolt Installation for Construction of Underground Openings by means of the Bond Strength Model

清水則一*・小島 穰**

Norikazu SHIMIZU and Yutaka KOJIMA

The grouted un-tensioned cablebolting has had great success in pre-reinforcing rock mass mainly in Canadian and Australian underground mine. The applicability of the cablebolting is recently investigated for construction of underground powerhouses and tunnels in Japan. This paper discusses the optimization of cablebolt installation by numerical simulations based on the Bond Strength Model, which can be evaluated the bond strength at the cable/grout interface.

1. はじめに

より経済的な地下空洞の建設に向けて、掘削前に岩盤を事前補強するケーブルボルト工法が注目されている。本研究では、ケーブルボルトを本体掘削に先立ち、アーチ上部あるいは側壁外側の作業坑や導坑から緊張力を与えない全面定着方式で施工することを想定して、その効果が適切に発揮されるような配置を検討する。ここでは、特にケーブルボルトとグラウトの付着強度の限界に着目して、数値シミュレーションを用いて考察する。

2. ケーブルボルトの事前補強効果

これまで筆者らは、ケーブルボルトの作用効果のメカニズムを検討するため、一連の数値シミュレーションを行ってきた^{1)~4)}。その結果、不連続性硬岩では不連続面のせん断あるいは開口によりケーブルボルトに軸力が生じ、その反力として不連続面の垂直方向の応力が増加することによって不連続面の摩擦抵抗が増し、岩盤全体のみかけの強度が増加することがわかった。一方、連続体的に挙動する岩盤に対しては、ケーブルボルト軸力発生に伴う最小主応力の増加によって、初期強度・残留強度の増加および降伏後の延性特性の改善が説明される。

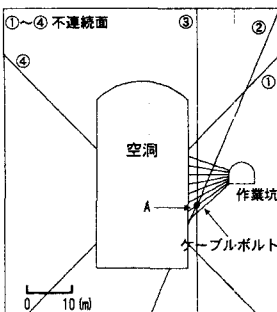


図1 空洞掘削シミュレーション

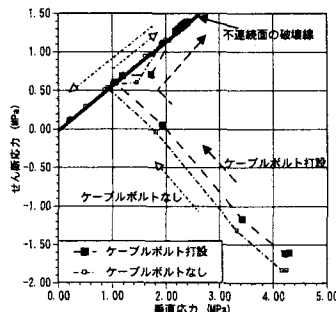


図2 不連続面上の応力経路

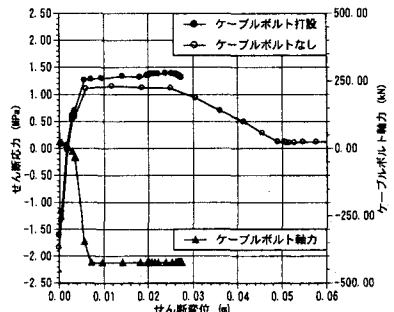


図3 不連続面上のせん断応力・せん断変位関係

* 正会員 博(工) 山口大学助教授 工学部社会建設工学科

** 学生会員 山口大学大学院理工学研究科 社会建設工学専攻

図1～図3は不連続性岩盤における地下空洞掘削の数値シミュレーションの結果³⁾で、事前にケーブルボルトを施工することで側壁岩盤ブロックが安定した例である。図1に示される不連続面上の点Aにおける応力経路と、不連続面のせん断応力・せん断変位関係を調べ、ケーブルボルトを打設した場合と打設していない場合とで比較したのが図2および図3である。図2の応力経路において、ケーブルボルトを打設しない場合、不連続面上の垂直応力は一度増加するものの、せん断すべりの進行とともにやがて減少するため、降伏面に沿ってせん断応力が低下し岩盤ブロックは不安定となる（せん断変位が収束しない。図3中○参照）。一方、ケーブルボルトを打設した場合、軸力発生によって不連続面上の垂直応力がある値に収束し（図2中■参照）、岩盤ブロックが安定していることがわかる（図3中●および▲参照）。

上に述べたケーブルボルトの効果は、軸力が有効に発生することが前提であり（図3）、もし、ケーブルボルトとグラウトの付着が切れたり、ケーブルが破断すると、ケーブルボルトによる岩盤の補強効果は損なわれることになる。一般に、ケーブルボルトにはplain strandが用いられ、その損傷形態はケーブルの降伏や破断よりむしろグラウトとの付着が切れが多いことが観察されている。一方、ケーブルボルト／グラウト間の付着強度は、ケーブルボルトやグラウトの力学的性質以外に、岩盤の剛性および掘削による岩盤応力の変化に依存することが知られている。そこで、本研究では付着強度が有効に発揮されるようにケーブルを打設するために、その位置と方向について検討する。

3. ケーブルボルト／グラウト間の付着強度モデル^{5), 6)}

ケーブルボルト／グラウト間の付着特性は、ケーブルストランドの表面形状、グラウトの力学的性質（弾性係数、圧縮強度、引張強度など）、ならびに岩盤の弾性係数に依存するだけでなく、ケーブルボルト打設後の周辺岩盤の応力変化にも影響を受ける。これを、力学モデルとして表現した付着強度モデル（BSM; Bond Strength Model）がYaziciおよびKaiserらによって提案されている^{5), 6)}。また、付着強度に関して基本的にはBSMと同じ考え方であるがケーブルボルトの引抜き試験結果を直接反映させたケーブル軸力・変位関係モデルが、HyettおよびBawdenらによって提案されている⁷⁾。本研究では、付着強度に焦点をしばらく検討するので、それに都合の良いBSMを利用する。

BSMの概要は図4のように表される⁵⁾。まず、ケーブルボルトとグラウトの間の強度は摩擦抵抗に基づくものと考え（図4の直線①）。掘削によって岩盤が変位し、グラウトとケーブルの間に相対的な変位が生じる。この相対変位に伴い、ケーブルは表面の凸形状のため、ケーブル／グラウト境界面を外に向かって押し広げる。この現象をダイレイションと呼ぶ（図4の u_1 ）。このとき、ケーブル／グラウト境界面の垂直方向に応力が生じ（図4の p_1 ）、その応力によって摩擦抵抗が生まれる。ダイレイションと境界面応力との関係は図4の実線②で表される。②を表す式は、弾性解およびグラウトに発生する亀裂を考慮した塑性解から求められ、グラウトの弾性係数、ポアソン比、引張強度、岩盤の弾性係数、ならびに、岩盤の応力変化の関数となる。ここで、ダイレイションはケーブルの変位に対していつまでも生じるわけではなく、たとえば、境界面応力が0の場合、ケーブル凸部の山の高さ以上は生じない。このような、ダイレイション限界

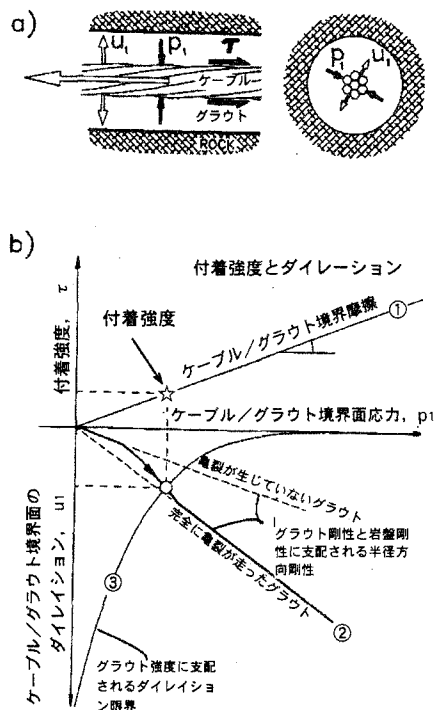


図4 BSMの概要⁵⁾

は、境界面応力とグラウトの圧縮強度、ならびに、ケーブルの形状に関係すると考えられ、実験的に曲線③のように求められる。以上のことから、ケーブルの形状、グラウトと岩盤の力学パラメータを与えれば、図4の○を経て☆に示す付着強度が得られる。

4. 付着強度分布に基づくケーブルボルトの打設位置の検討

ここでは、CHクラス程度の岩盤を想定して、まず、BSMを用いケーブルボルトの引抜き試験の数値シミュレーションを行い付着強度を求める。次に、代表的な形状の地下空洞に対して、掘削時の応力変化によって、引抜き試験で得た付着強度がどのように変化するか、その分布をケーブルボルトの打設方向毎に求める。最後に、付着強度の分布からケーブルボルトの適切な配置について検討する。この考え方は文献^{9),8)}を参考にしている。

(1) ケーブルボルトの引抜き試験シミュレーション

岩盤の弾性係数 $E=10\text{GPa}$ 、ポアソン比 $\nu=0.2$ 、グラウトの水セメント比 $W:C=0.35$ と仮定して、シングル plain strand の引抜き試験の数値シミュレーションを行う。なお、 $W:C=0.35$ はグラウトにボルトランドセメントを用いる場合の最適値であり、計算ではこの値に対応したグラウトの諸数値を用いている（弾性係数 27GPa 、圧縮強度 68MPa 、ポアソン比 0.18 、引張強度 4MPa ）。図5に、引抜き時にケーブルが回転する場合と回転しない場合を考慮した結果を示す。過去の実験結果からケーブル引抜き量が 20mm の時点を目録限界値とすると、上限および下限の付着強度はそれぞれ約 325kN/m および 260kN/m となる。

(2) 地下空洞周辺の付着強度分布

図6に付着強度分布を求める地下空洞の形状を示す。地下発電所空洞の代表的な形状として、弾頭型、きのこ型、たまご型を選んだ。解析の手順は、(1)掘削解析によって岩盤の応力分布を求め、(2)ケーブル打設方向を設定し掘削による岩盤の応力変化からケーブル軸方向に直交する応力変化を計算し、(3)BSMに基づき付着強度を推定する。以下に初期応力を静水圧状態（ 5MPa ）とし、岩盤を弾性体と仮定したケースに対する結果を示す。

図7は、各空洞形状に対してケーブルボルトを (a)水平方向、(b)水平から反時計回りに 45° の方向、(c)鉛直方向、(d)水平から時計回りに 45° の方向、にそれぞれ打設する場合の付着強度分布である。ただし、分布は絶対値ではなく、4(1)で示した引抜き試験による付着強度（応力変化がない場合）との比率によって示している。たとえば、 1.15 は付着強度が岩盤掘削によって 15% 大きくなることを、また、 0.85 は逆に 15% 低下することを示す。

図7から、次のようなことがわかる。(1)空洞天端上部については、ケーブルを鉛直方向に打設する場合、また、右（左）上部から左（右）下斜め方向の打設する場合、はいずれも空洞壁面付近で付着強度が増加する。(2)ケーブルを側方から空洞側壁に向かって打設する場合、水平および斜め上・下いずれの方向であっても、側壁周辺で付着強度が低下する領域が生じる。(3)本例では、たまご型空洞が他の形状に比べて、側壁付近で付着強度の低下領域がいくぶん小さい。

(3) 考察

数値シミュレーションの結果、空洞天端上部では空洞壁面方向にケーブルボルトを打設すれば、壁面付近で引抜き試験で得られる付着強度よりも大きな強度を得ることができ有利と言える。一方、側壁に向かって打設する場合、いずれの方向に打設しても付着強度は低下するため付着強度の高いバルブストランドやバードケー

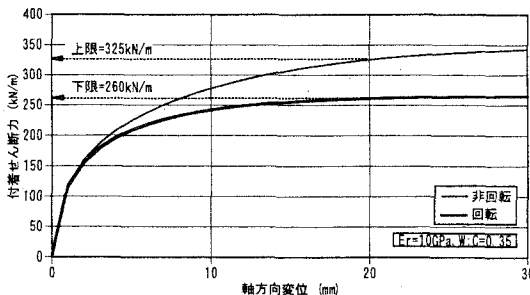


図5 ケーブルボルトの引抜き試験シミュレーション

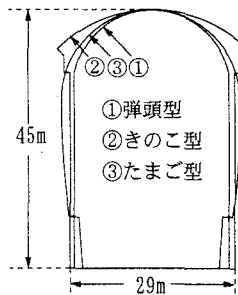
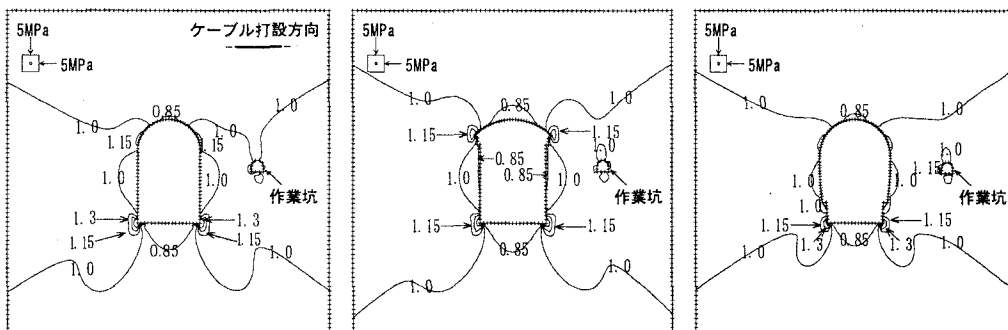
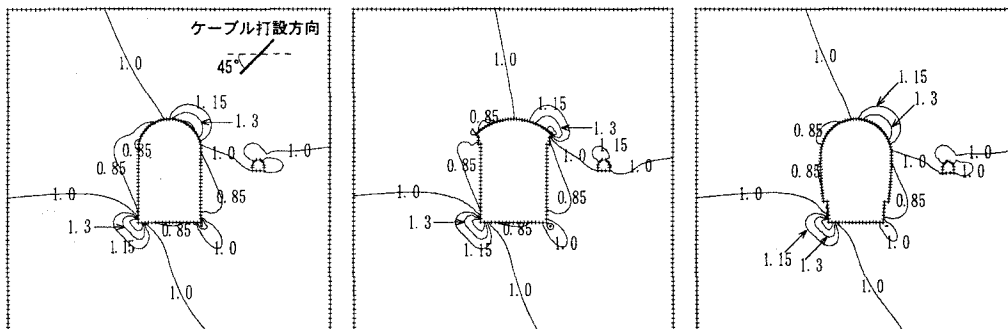


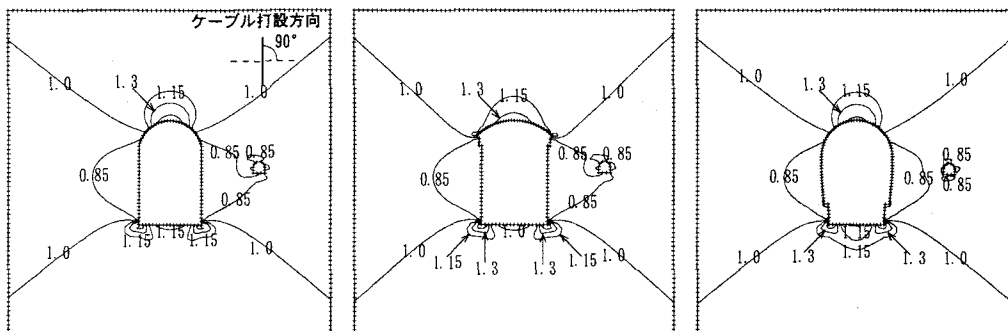
図6 空洞形状



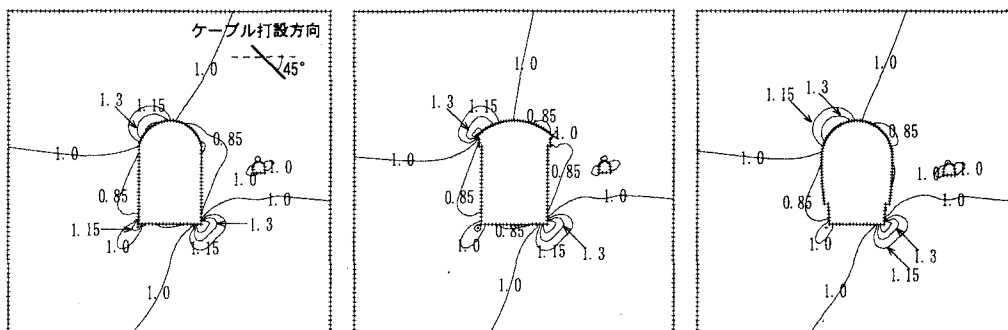
(a) 水平方向に打設した場合



(b) 水平から反時計回りに45°方向に打設した場合



(c) 鉛直方向に打設した場合



(d) 水平から時計回りに45°方向に打設した場合

図7 ケーブルボルトの打設角度と附着強度比分布

ジストランドなどの modified strand を用いるなどの対策が必要である。図8は弾性係数の異なる岩盤について、岩盤内応力変化に対する付着強度の低下率を求めたものである。この図から岩盤の弾性係数が小さいほど応力減少による強度の低下率は大きくなるため、付着強度を確保する対策がより重要であることがわかる。

次に、長さ10mのケーブルボルトを想定して、岩盤の変位が図9(a)に示される①～④の4ケースについて、ケーブル/グラウト間の付着せん断力とケーブル軸力分布を計算した(図9(b)および(c))。変位①は弾性変位で変位勾配も小さいため付着せん断力および軸力とも小さいが、壁面から3mあたりから変位勾配が大きくなると(図9(a)②～④)付着せん断力および軸力とも増加する。変位③に対しては壁面付近で付着せん断力が付着強度(220kN/m=260×0.85)を上まわり、さらに、変位④では壁面から約70cmの間で付着が切れ、軸力の値が降伏値に近づく様子が分かる。このように図7に示した付着強度の分布に加えて、岩盤に生じる変位についても考慮して、効果的なケーブルボルトの配置を検討することが重要である。

5. むすび

本報告では、ケーブルボルトの付着強度を評価する Bond Strength Model (BSM) を用いて、空洞掘削時の応力変化を考慮したケーブルボルトの付着強度分布を推定し、ケーブルボルトの配置について検討した。

本研究では付着強度の評価と分布を求めるために計算プログラム“CABLEBND”を用いた。使用の便宜を図って頂いたP.K. Kaiser教授(Geomechanics Research Centre, Laurentian University, Canada)に謝意を表する。

参考文献

- 清水則一、武田智治：軟岩に対するケーブルボルトの適用性について、トンネル工学研究論文・報告集, 7, 111-116, 1997.
- 清水則一、武田智治、小島穰：ケーブルボルトによる岩盤の先行補強について、第10回岩の力学国内シンポジウム, 539-544, 1998.
- 小島穰、成川麻里子、清水則一：ケーブルボルトによる不連続性岩盤の先行補強効果の数値シミュレーション、土木学会第53回年次学術講演会概要集第3部B, 252-253, 1998.
- 武田智治、馬杉篤志、清水則一：ケーブルボルトによる軟岩トンネルの先行補強効果の数値シミュレーション、土木学会第53回年次学術講演会概要集第3部B, 210-211, 1998.
- Yazici, S. and Kaiser, P.K.: Bond strength of grouted cable bolts, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 29(3), 279-292, 1992.
- Kaiser, P.K., Yazici, S. and Nose, J.: Effect of stress change on the bond strength of fully grouted cables, J., Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 29(3), 293-306, 1992.
- Hyett, A. J., Bawden, W. F., Macsporrán, G. R. and Moosavi, M.: A constitutive law for bond failure of fully-grouted cable bolts using a modified Hoek cell, J., Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 32(1), 11-36, 1995.
- Diederichs, M.S., Pieterse, E., Nose, J. and Kaiser, P. K.: A model for evaluating cable bolt strength: An update, Eurock'93, 83-90, 1993.

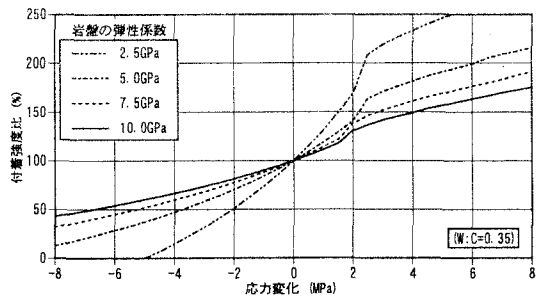
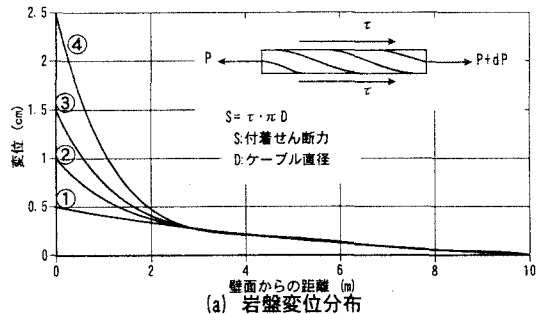
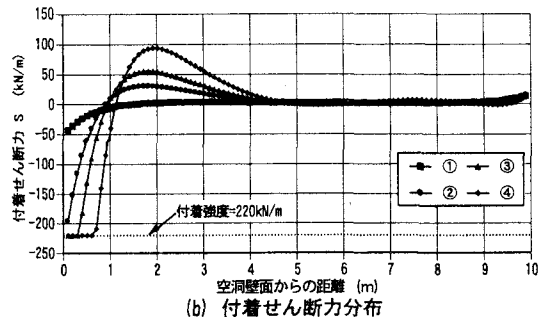


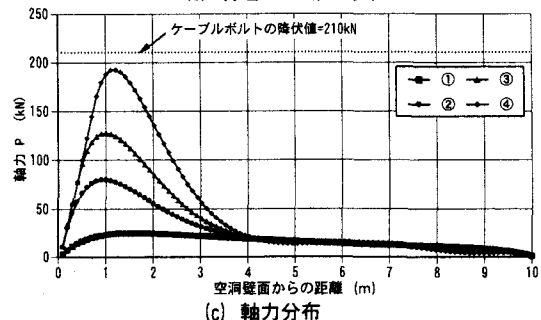
図8 付着強度比と岩盤応力変化の関係



(a) 岩盤変位分布



(b) 付着せん断力分布



(c) 軸力分布

図9 ケーブルボルトの付着せん断力と軸力