

ケーブルボルトによる地下空洞岩盤の先行補強

に関する現場実験について

FIELD EXPERIMENTS OF FULLY GROUTED CABLEBOLTING FOR PRE-REINFORCEMENT OF ROCK MASS IN AN UNDERGROUND POWERHOUSE

清水 則一*・○柏柳 正之**・鳥羽瀬 孝臣***・伊藤 文雄****

Norikazu Shimizu, Masayuki Kashiwayanagi, Takaomi Tobase and Fumio Ito

Cablebolts are used in underground mines in Australia, South Africa, Canada and other oversea countries to provide a safe working environment and to increase rockmass stability. Those have the potential to reinforce rockmass and to make it strengthen in construction of underground powerhouses. This report describes field experiments for investigating the validity of cablebolting to pre-reinforcement of rockmass.

Key Words: cablebolts, pre-reinforcement, field experiments, underground powerhouse

1. はじめに

地下発電所や石油等地下備蓄施設等では、地下岩盤内に大断面の空洞が建設され、その空洞掘削時の岩盤の安定性は、NATM の概念に基づくロックボルト及び吹き付けコンクリートを用いた支保工や PS アンカーを用いた補強工によって確保されている。しかし、岩盤不良部などで空洞掘削後に発生する岩盤の変状に対して、事後に施工される支保工や補強工の負担が極めて大きくなるという問題があった。

事前に岩盤不良部の存在が予想される場合などにおいて、空洞掘削前に何らかの岩盤補強が施されるなら、空洞掘削を安全に行え、そして経済的な支保工によって岩盤を安定化させることが可能となるであろう。この岩盤を事前補強する手法として、ケーブルボルトに着目した。ケーブルボルトは、PC 鋼より線を束ねたストランドであり、比較的容易に曲げることができるなどフレキシブル性、ハンドリング性に優れ、小断面の坑道から任意長のボルト打設が可能である。地下空洞周辺に予め設けられる調査坑や作業坑を利用して、その小断面の坑道から、掘削前の空洞側へ任意長のケーブルボルトを打設して空洞周辺の岩盤を事前に補強しようとするアイデアである。このようにして事前に補強された岩盤内で空洞掘削した場合に、岩盤亀裂面で生じる開口やせん断変位に対して、ケーブルボルト軸力(緊張力)として抵抗することを期待するものである。

このような先行補強工法としてのケーブルボルト工法は、海外の地下鉱山で日常的に用いられているものの¹⁾、²⁾、地下発電所空洞のような建設工事では用いられた例はあまりなく、少なくともわが国で本格的に用いられた例はない。本稿では、ケーブルボルトによる事前補強の効果の実証とそのメカニズムの解明を目的として行った現場実証実験について、実験計画を中心に報告する。

* 正会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科

** 正会員 電源開発株式会社 建設部 エンジニアリング室 水力グループ

*** 正会員 電源開発株式会社 奥只見・大鳥増設建設所

**** 正会員 大成建設(株) 土木本部土木技術部

2. 現場実験の目的

本実験では、大断面地下空洞におけるケーブルボルトの事前補強効果を定量的に明らかにするため、次の 3 点について検討することとした。さらに、ケーブル挙動を詳細に把握するため、軸力測定について複数の方法による計測を行い、それぞれの特徴を把握するものとした。

- ①ケーブルボルトの先行補強効果の評価
- ②ケーブルボルトの種類の違いによる先行補強効果の差異
- ③ケーブルボルト軸力計測方法の検討

3. 実験計画

(1) 現場および地下空洞の概要

実験は、新鮮・堅硬な斑レイ岩 (CH～B 級) が分布する地下空洞掘削現場において行った。事前の調査では、数 10cm 程度の規模の小さい断層が数条確認され、また一般的な割れ目は断層付近でやや多い (間隔 5～20cm 程度) が、他の広い領域では割れ目の間隔は 20cm～1m 程度であり頻度は小さい。

空洞は土被り約 110m の位置に掘削され、高さは最大断面で約 41m、幅は約 19m である。空洞の天端から約 20m 下方、壁面から約 10m の位置に小規模なトンネルが事前に掘削されている (図 - 1 参照)。このトンネルを利用してケーブルボルトを本体空洞掘削前に施工するものとした。

(2) ケーブルボルトの設計

ケーブルボルトの打設に当たっては、(a)ケーブルストランドの種類と 1 孔あたりの本数、(b)長さおよび打設間隔、(c)グラウトの種類と水セメント比を決める必要があった。

(a)ケーブルボルトの種類など

ケーブルストランド 2 本一組のダブルストランドとする。これは、海外の鉱山における一般的な施工例に倣った。ストランドとしては、標準的な 7 本より線 (15.2mm 径) のブレーストランドおよび高付着強度を期待したバルブストランドを用いる (図 - 2 参照)。また、各々のストランドの付着強度が確保できるように、2 本のストランドの間にスペーサーを取り付けた (写真 - 1 参照)。なお、ボアホール径は 65mm である。

(b) ケーブルボルトの長さおよび打設間隔

ケーブル長さや打設間隔を決めるには、岩盤分類などを用いる経験的方法と力学解析による解析的手法とがある³⁾。長さについては、ケーブルトンネルから空洞本体壁面へ向けて施工するため、その条件から 9 - 10m と決まる (図 - 1 参照)。

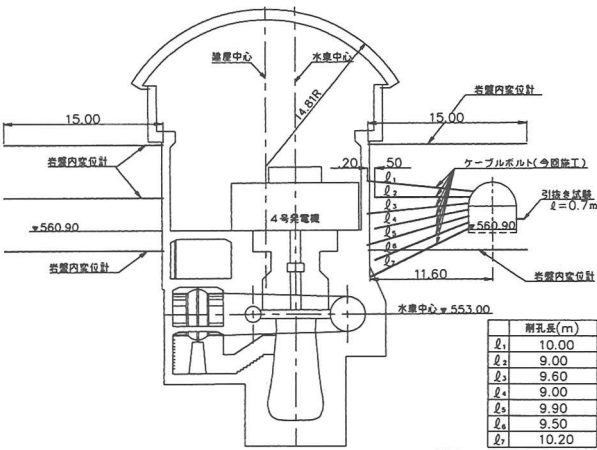


図 - 1 地下空洞横断面およびケーブルボルト打設位置

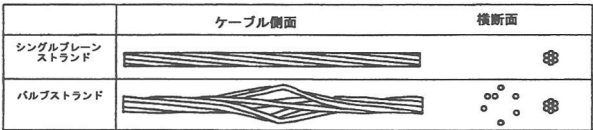


図 - 2 ブレーストランドとバルブストランド

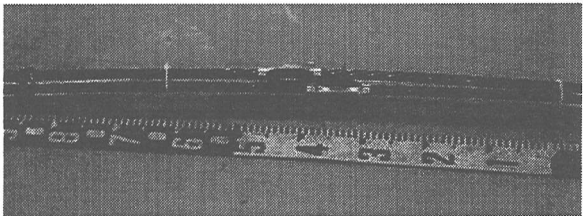


写真-1 スペーサーを取り付けたダブルストランド

打設間隔については、岩盤分類に基づく経験的設計手法³⁾を用い決める。ここでは、QシステムとRMRシステムを用いた。表-1 および図-3に、一例としてQシステムを用いて検討した結果を示す。現場の岩盤のデータを用いた結果は、QシステムではQ=12.5（良好）と評価され、図からケーブルボルトの打設間隔は、吹付コンクリートがある場合は2.5m ピッチ、吹付ない場合は1.0～1.5m ピッチが推奨されている。なお、RMRシステムでも同様の結果を得た。本地下空洞掘削時には吹付コンクリートを用いることと、また、空洞掘削後には打設するロックボルトのピッチが1.5mであることを考慮して、ケーブルボルトも空洞壁面で1.5m ピッチとなるように施工することとした。図-4に空洞壁面から見たケーブルボルトの配置を、図-1には横断面におけるケーブルボルトの打設方向を示す。

(c)グラウト

グラウトに関しては、グラウト材と水セメント比（W/C）を決める必要がある。海外におけるケーブルボルト施工のグラウトは一般にポルトランドセメントを用い、水セメント比として W/C=35～40%（施工方法および打設方向によって若干異なる）³⁾ が推奨されている。本実験では、国内のロックボルト施工に用いるプレミックスモルタルを使用する。プレミックスモルタルの推奨水セメント比は与えられていないので、独自に室内実験を行った。その結果、強度、弾性係数および圧送時の流動性を考慮して、W/C=40 - 45%が適切であることが分かった⁴⁾。写真-2には、透明パイプを模擬ボアホールとして実施したケーブルボルト挿入実験の結果（切断横断面）を示す。プレーンストランド、バルブストランドとも

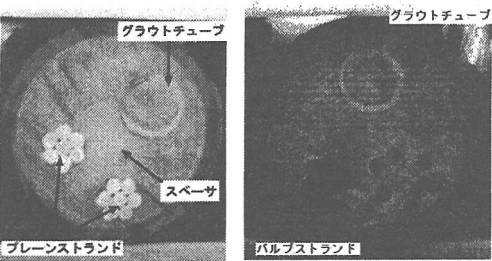


写真-2 グラウトの充填状況（左：プレーンストランド、右：バルブストランド）

表-1 Qシステムによる設計結果

算定方法	Q値とトンネルズパンから支保を算定する
Q値算定式	$Q=(RQD/J_n)(J_r/J_a)(J_w/SRF)$
RQD	割れ目間隔0.2～1m → RQD=75
J _n	3方向の節理 → J _n =9
J _r	節理面は粗い → J _r =1.5
J _a	節理面は変質していない → J _a =1.0
J _w	節理面は少量の湧水あり → J _w =1.0
SRF	中程度の応力状態 → SRF=1.0
Q値	上記算定式よりQ=12.5、下図より岩盤分類は良好
検討結果	吹付有：吹付厚40～50mmで、RB2.5m以上のピッチ 吹付無：RB1.0～1.5mピッチ

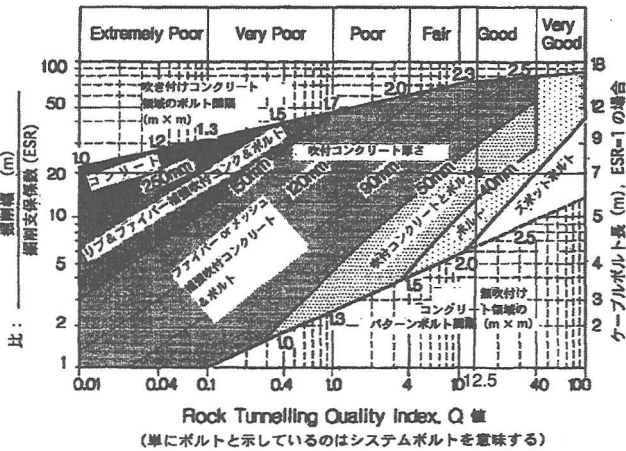


図-3 ケーブルボルトの打設間隔（Qシステムによる）

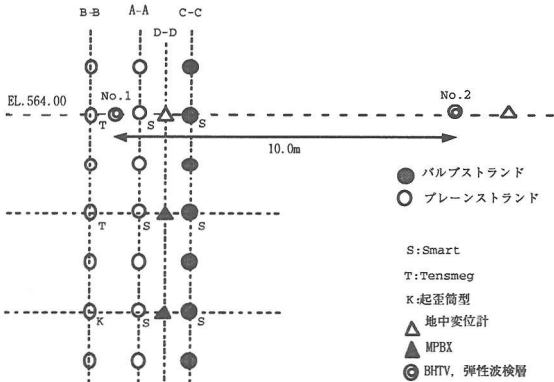


図-4 ケーブルボルト施工位置および計測機器の配置（空洞壁面からケーブルトンネルを見る方向）

十分にグラウトが充填していることが分かる。特に、バルブストランドではバルブ部分の中にも間隙なく充填されている⁴⁾。

(3) 計測方法

計測は、検討の内容毎に次のように計画した。

①ケーブルボルトの有無による先行補強効果の評価

ケーブルボルトによって先行補強をする断面と補強しない断面において、岩盤挙動を計測してその差異を調べるため、本体空洞掘削前に、ケーブルボルト施工と同時に地中変位計を設置する。図 - 4 において、ケーブル打設領域、および、ケーブルを打設しない領域の△の位置に、それぞれ、ボアホール型エクステンソメータを水平にケーブルボルトトンネル側から設置する。さらに、それぞれの領域の No.1 および No.2 の位置にボアホールを開け、ボアホールテレビ (BHTV) による亀裂観察、および、弾性波速度検層を本体空洞掘削前後に実施し、亀裂の開口、ゆるみなどを観察する。

②ケーブルボルトの種類の違いによる先行補強効果の差異

付着特性の異なる 2 種類のケーブルボルト、すなわち、ブレインストランド (図 - 4 において○印の位置) とバルブストランド (図 - 4 において●印の位置) を用いて、ケーブルボルトの軸力や周辺岩盤の変位挙動について、比較し効果の差異を調査する。なお、図 - 4 において▲印の位置に、ケーブルボルト近傍の岩盤変位を計測する目的で、小型の地中変位計 (MPBX, MDT 製, Canada) を、ケーブルボルトと平行に設置する。軸力計測については次に述べる。

③ケーブルボルト軸力計測方法の検討

ケーブルボルトの軸力測定は国内ではケーブルを覆う筒にひずみゲージを貼り付けた“ひずみゲージ型”がよく用いられ、海外の鉱山ではケーブルの外周にらせん状にニッケルクロニウム抵抗線を取り付けた“TENSMEG” (ROCKTEST 社製, Canada) が用いられる。今回の計測には両者とともに、新しいケーブルボルト軸力計測器“SMART”⁵⁾ (MDT 社製, Canada) を導入し、この 3 タイプの長短所を調査する。SMART はケーブルボルトの中央の PC 鋼線 (king wire 呼ばれる) の代わりに超小型のエクステンソメータを仕組んだもので、センサーや計測用ケーブルなどがケーブル内部に設置されるため、外部は普通のケーブルボルトと変わりなく、付着強度を低下させないという特徴がある。

図 - 4 において S, T, K が付されている位置のケーブルボルトが、SMART, TENSMEG, および、ひずみゲージタイプの軸力計の設置位置である。まとめると、ケーブルボルトは 3 列 7 段で計 21 組 (1 組あたり 2 本のストランドを使う)、そのうち、ブレインストランドが 14 組、バルブストランドが 7 組であり、軸力計測機器は SMART を 6 本、TENSMEG を 2 本、ひずみゲージ型を 1 本用いた。

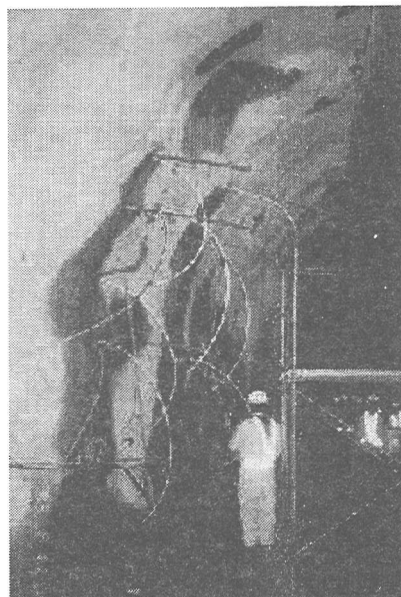


写真 - 3 ケーブルボルトの打設状況

4. ケーブルボルト施工

ケーブルボルトの施工法には、グラウトチューブ法、グラウトチューブ引き抜き法等の 4 種類が多く適用されている。本実験では、あらかじめ、グラウトチューブをケーブルボルトに取り付け、それらをボアホールに挿入し、グラウトを孔奥から充填し、口元までリターンさせるグラウトチューブ法³⁾を採用した。また、先述のように、ダブルストランド間にグラウトが確実に充填するようにストランド間にはスペーサーを、また、孔内をスムーズに挿

入できるように、ストランド先端部にはプラスチック製のコーンを装着し装備した。

グラウトの水セメント比は先にも述べたように $W/C=40\sim45\%$ (目標 42-43%) となるように、フロー値 180 前後で管理した。グラウトの圧送にはロックボルト施工用の注入ポンプ (MAI ポンプ H400 HP3) を用いた。写真 - 3 および写真 - 4 にケーブルボルトの施工状態を示す。

5. 計測状況

計測結果の一例を図 - 5 に示す。本体空洞は順調に掘削終了し、現在、計測結果に基づき、2. に示した目的事項について考察中である。

6. おわりに

本報告は、ケーブルボルトによる地下空洞岩盤の先行補強の効果を明らかにする目的で実施した現場実証実験について、実験計画を中心に報告した。実験結果については稿をあらためて発表する予定である。

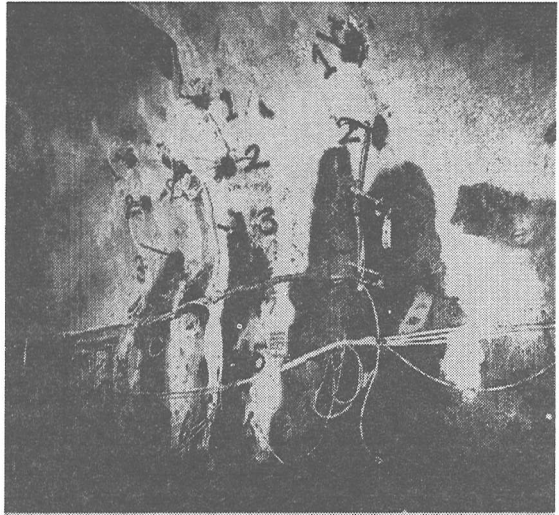


写真 - 4 ケーブルボルト打設終了状況

謝辞： 本実験を遂行するにあたり、現場において数々のご協力をいただいた。ここに関係者各位に謝意を表する。

参考文献

- 1) 清水則一, P.K. Kaiser, M.S. Diedericks and D.J. Hutchinson : 海外におけるケーブルボルトの設計法。トンネルと地下, 28(4), pp.43-52, 1997.
- 2) 清水則一 : ケーブルボルト工法による地下空洞岩盤の先行補強。電力土木, 5月号, No.275, pp.1-7, 1998.
- 3) Hutchinson, D. J. and M. S. Diedericks: Cablebolting in Underground Mines, BiTech publishers, 1996.

4) 伊藤文雄, 羽馬 徹, 清水則一, 成川麻里子 : ケーブルボルト施工のためのグラウト注入実験, 土木学会第 55 回年次学術講演会講演概要集, CR-ROM, III-B081, 2000.

5) Bawden, W.F., Hyett, A.J., Launsch, P., Moosavi, M., Graaf, P. and Ruest, M.: The S.M.A.R.T. Cable bolt, Results from Two Initial Field Trials, The 3rd North American Rock Mechanics Symposium, NARMS'98, pp.245-225, 1998.

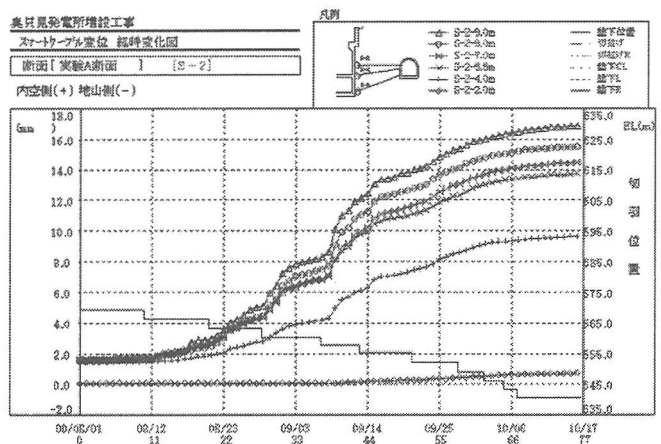


図 - 5 計測結果の一例 (SMART によるケーブルボルト変位の経時的変化)