

ケーブルボルトの原位置への適用試験

APPLICATION TEST OF CABLE BOLTS TO IN-SITU ROCK MASS

土原 久哉*・二宮 正*・井上 良*・永久 和正**

Hisaya TSUCHIHARA, Tadashi NINOMIYA, Makoto INOUE, Kazumasa NAGAHISA

Unlike traditional bolts, cable bolt's length is not limited by the dimensions of the tunnel. Therefore cable bolting has been applied widely in mining works. In order to use it for construction works, we carried out pull out tests to verify its reliability at OBAYASHI Kamioka Underground Research Laboratory. On the tests we changed the following parameters. (1) material of the bolts, (2) length of the bolt, (3) bond material.

As results, almost all cable bolts had good bond properties.

Keywords : tunnel, cable bolt, pull out test, bond material, FRP

1. はじめに

ケーブルボルトは約25年前にオーストラリアの鉱山で初めて採用された。その後、諸外国で鉱山を中心に適用され、最近ではトンネルや大規模地下空洞の支保として用いられている実績がある。我国でも大断面トンネル等の施工需要から注目されてきており、その有効性は「Flexibility & Free length」による狭い空間内での長尺ボルトの打設が可能になることである。しかし、設計・解析に取り込む場合、その支保効果には不明な点が多い。そこで、全面接着型ケーブルボルトの原位置における定着性の検証を不連続性地山を対象に行った。試験サイトは岐阜県神岡鉱山内に開設した大林組神岡岩盤試験場である。ケーブル材は4m～10m長のPC鋼より線、繊維系材料の総計28本である。また、定着材はセメントミルクを中心とした4種類の材料を使用し、先注入方式によって打設した。試験方法はISRMのロックボルトの引抜き試験法に準じた。その結果、良好な定着結果と定着性についての若干の考察が得られたので以下に報告する。

2. 大林組神岡岩盤試験場概要¹⁾

当試験場の地質は飛騨変成岩で土被り約17.5mに位置し、花崗岩質岩あるいは片麻岩を中心とした空地・アプライト・石灰岩が部分的に存在した硬岩地山である。代表的な岩石の物理・力学特性は単位体積重量は2.89g/cm³、弾性波速度V_sは4.5km/sec、一軸圧縮強度は1,020kgf/cm²、弾性係数は6.1×10⁵kgf/cm²であ

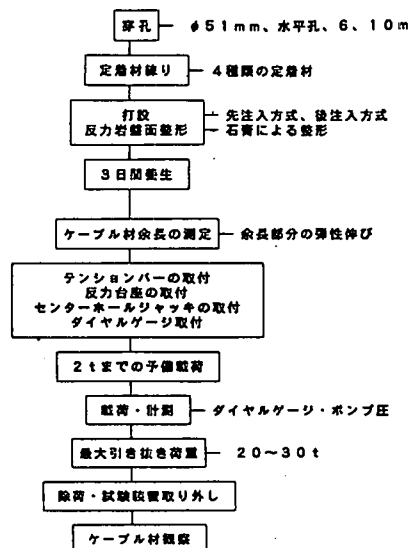
* 正会員 (株)大林組土木技術本部技術第2部

** 正会員 第2東海自動車道清水第3トンネルJV工事々務所

ケーブル材	L(m)	定着材	本数
PC鋼線7本より	6.10	セメントミルク 他3種類	8
PC鋼線19本より	6.10	セメントミルク 他3種類	8
エポキシコーティングPC鋼線	6	セメントミルク	2
帯状炭素繊維	6.10	セメントミルク	4
組み紐状炭素繊維	6	セメントミルク	2
アラミド繊維	4	セメントミルク	2

図2.1 試験坑道とケーブル材打設位置

引抜き試験は I S R M のロックボルト引抜き試験法に準拠して行った²⁾。試験方法のフローチャートを図 3.1 に示す。また、図 3.2 に P C 鋼より線、繊維系ケーブルの試験装置システムの概略図を示す。P C 鋼より線は基本的に P C 緊張に用いる載荷装置で引抜きを行い、繊維系ケーブルはテンションバーを介して載荷するためには繊維系ケーブル先端にテンションバー取り付け用のカップリングを取り付けて引抜きを行っている。また、表 3.1 に本試験に共したケーブル材の諸特性の一覧表を示す。



PC鋼より線
プレート
センターホールジャッキ
ダイアルゲージ
マグネット
スタンド
カップラー
電圧100V
電流10A
電圧計
電流計
電圧100V
電流10A
電圧計
電流計

PC鋼より線引抜き試験装置

図3.2 試験装置システム

ケーブル材	公称径、幅×厚さ	引張強度(N/mm ²)	破断伸び(%)	ヤング率(N/mm ²)
P C 鋼より線 7 本より	1 5 . 2 mm	1 , 7 0 0	3 . 5 <	1 9 2 , 0 0 0
P C 鋼より線 1 9 本より	1 7 . 8 mm	1 , 9 0 0	3 . 5 <	1 9 1 , 0 0 0
带状炭素繊維	3 0 × 3 . 5 mm	2 , 0 0 0	1 . 6 <	1 2 5 , 0 0 0
組み紐状炭素繊維	1 5 . 0 mm	1 , 9 0 0	1 . 2 <	1 5 1 , 0 0 0
アラミド繊維	1 6 . 0 mm	1 , 4 0 0	2 . 1 <	7 0 , 0 0 0

4. 試験結果

4.1 PC鋼より線

PC鋼より線の引抜き試験結果を概説する。なお引抜き変位の測定では自由長、つまり定着されていない部分の長さの弾性変形分を考慮し、差し引いている。以下に個々のケーブル材の引抜き荷重～変位曲線を中心とし、その定着性を示す。

図4.1.1に防食処理としてPC鋼より線にエポキシ樹脂コーティングしてケイ砂を全体に付着させたケーブル材をPC鋼より線7本よりと比較したものを示す。引抜き荷重載荷時の立ち上がりから良好な定着効果を示した。これは、ケイ砂の影響によって定着材との摩擦抵抗が増したものと考えられる³⁾。また、同図中にケーブル材にスペーサを装着し、孔の中心に敷設したものは若干、定着特性が低下している。これは、先注入方式によりケーブル挿入時にスペーサそのものがセメントミルクを押し退け、口元からセメントミルク流出したため、全体的にケーブル材と定着材の付着が不十分になったものと考えられる。今後、後注入方式、スペーサの改良等を行えば、より良い定着効果は得られると考えられる。

図4.1.2はPC鋼より線19本よりにおける定着長の影響を示す。若干ではあるが、1.0mの方が6mより定着効果が表れている。荷重をさらに増加させたときに、明確な定着性の違いが表れると考えられる。さらに同図から、後注入方式1.0mは先注入方式より定着効果は低下している。これは、ケーブル材に沿わしたエア抜きチューブが付着性を低下させ、引抜き抵抗力を弱めたと考えられる。後注入方式は定着材が密に充填され、ケーブル材との付着性を高め、また定着材の落下防止という利点があるが、後注入方式を採用する場合、エア抜きチューブの配置を考慮しなければならない。

図4.1.3はPC鋼より線7本より、19本よりを比較したものである。定着材のかぶりにそれほど違いがないことから定着性に顕著な差はみられなかった。

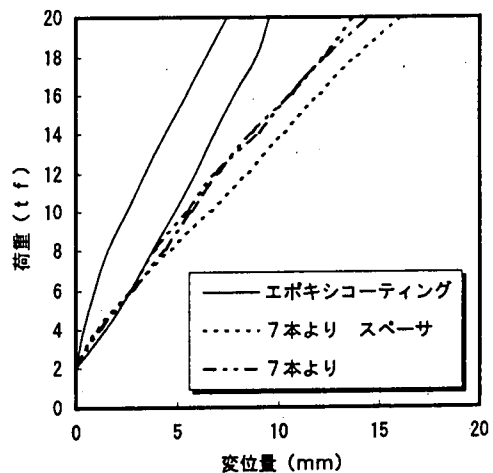


図4.1.1 エポキシ樹脂コーティング
PC鋼より線7本より

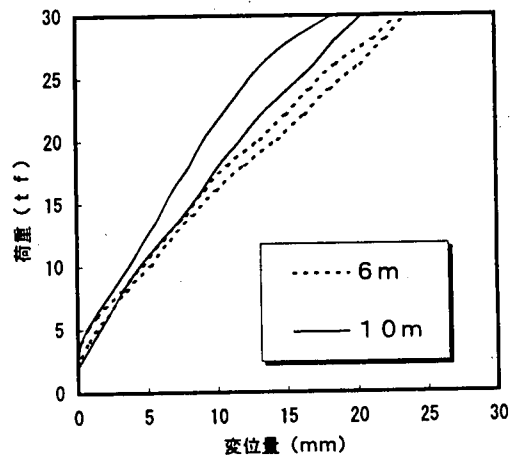


図4.1.2 PC鋼より線19本より
定着長による影響(6m, 1.0m)

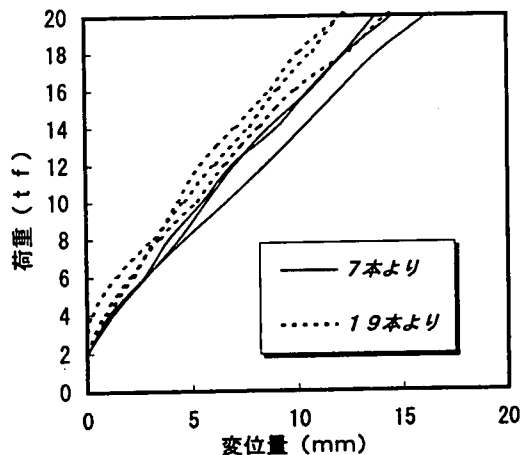


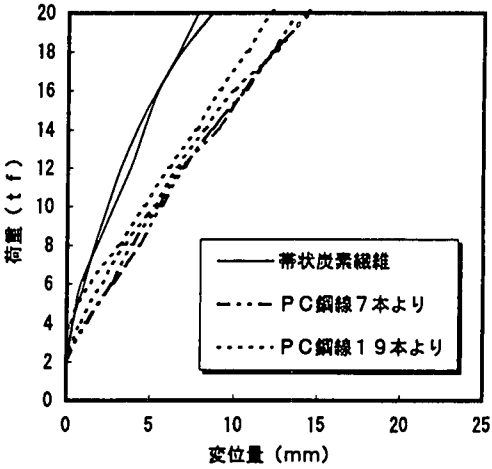
図4.1.3 PC鋼より線7本よりと19本より

以上のように、全体的にPC鋼より線の引抜き試験結果は20～30tの荷重レベルにおいてもケーブル材は引き抜かれることはなく、また明確な降伏は認められない結果となった。

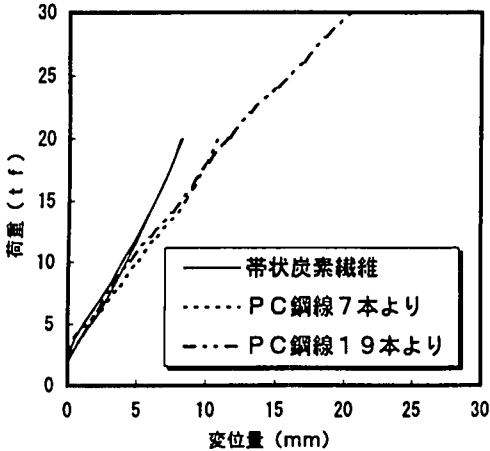
4・2 繊維系ケーブル

繊維系ケーブルの引抜き試験結果を概説する。繊維系ケーブルは余長がないので材料の弾性伸びを特に考慮していないが、テンションバー部分の弾性伸びを考慮し、差し引いている。以下にPC鋼より線との比較を中心に試験結果を示す。

図4.2.1(a)、(b)に帯状炭素繊維6mと10mの引抜き荷重～変位曲線を示す。帯状炭素繊維は断面積の大きさ、表面の粗さ、および材料自身の引張強度が比較的大きいことから良好な定着効果を示した。なお、帯状炭素繊維はストランド系ケーブル材の約単位長さ当たり1.4倍の定着面積を持ち、表面の粗さは凹凸のピッチが小刻みに存在している。また、切断、打設も容易に行うことができる。図4.2.2に示すように組み紐状炭素繊維6mの試験結果も同様にPC鋼より線と比して良好な定着効果を示した。図4.2.3にアラミド繊維の試験結果を示す。PC鋼より線と同等の定着性を示した。繊維系ケーブルも最大荷重レベル20tにおいて、全体的に定着力の低下、材料の降伏は見られず、むしろPC鋼より線よりも良好な定着効果を示す結果となった。



(a) 帯状炭素繊維 6m



(b) 帯状炭素繊維 10m

図4.2.1 帯状炭素繊維

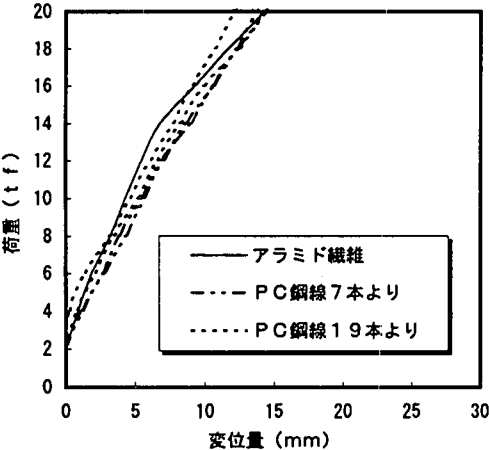


図4.2.3 アラミド繊維 4m

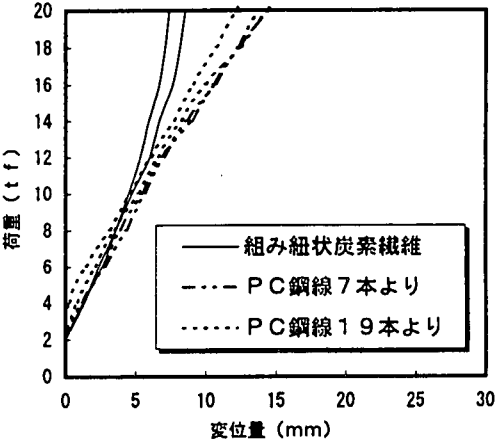


図4.2.2 組み紐状炭素繊維 10m

4・3 定着材

定着材はセメントミルクを中心とし3種類の膨張性定着材を用い、先注入方式により打設した。表4.3.1は各種定着材の室内物理・力学試験と現場練りで得られた諸特性の一覧表である。図4.3.1はP C鋼線7本より6 mの定着材を変えた場合の試験結果を荷重～変位曲線で示したものである。モルタルNo. 2、セメントミルク、モルタルNo. 1、膨張性セメントペーストの順で定着効果が表れている。膨張材はその膨張圧に伴って発生する孔内における内圧が定着材と岩盤、ケーブルボルトを拘束し、定着効果を増加させたと考えられる。しかし、同図からセメントミルクも膨張性定着材に比して良好な定着効果を発揮しており、その有用性には問題ないと考えられる。

表4.3.1 定着材の配合と諸特性一覧表

定着材	セメント ミルク	膨張性 セメントペースト	モルタルNo. 1	モルタルNo. 2
普通セメント(%)	100	0	0	0
特殊セメント(%)	0	33.3	30.0	40.0
膨張材(%)	0	2.0	3.4	5.0
W/C(%)	33.0	24.7	27.3	33.0
フロー値 (mm)	209	199	201	195
3日強度 (kgf/cm ²)	455	297	143 (4日強度)	120 (4日強度)
3日膨張圧 (kgf/cm ²)	0	13	22	24

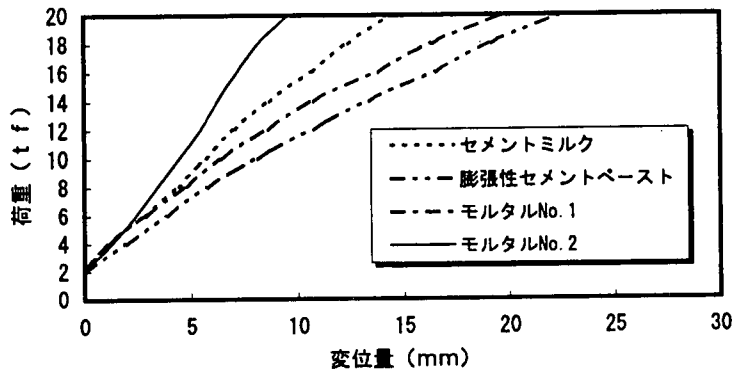


図4.3.1 定着材の比較試験

5. ケーブルボルトの相互作用係数C

全面接着型ケーブルボルトを解析等に反映させるためにはその効果を定量的に評価する必要がある。齊藤・天野⁴⁾は岩盤やロックボルト、及び定着材の材料特性や接着の程度によって決まる固有の相互作用係数Cを提案している。岩盤の変形に応じて軸力がロックボルトに生じていると同時に岩盤もロックボルトから作用を受けている。その釣合状態に対してロックボルト引抜き時の場合の境界条件から釣合方程式を解き、定着性を示す係数Cを次のように示した。

$$C = \frac{1}{2 \pi^2 r^3 E_s} \left[\frac{P}{F_0} \right]^2$$

上式から係数Cはボルトの半径 r 、ヤング率 E 、および引き抜き試験結果の引抜き荷重～変位曲線の勾配(P/f_0)から算定できる。この係数の物理的意味は岩盤とケーブル材の相対変位に対応したせん断剛性であり、不連続性岩盤の安定解析におけるケーブル材の定着性に関する入力パラメータとして共することができる⁵⁾。相互作用係数Cを今回のケーブルボルト引き抜き試験結果から求め、その定着効果を評価する。変位～荷重曲線の勾配(P/f_0)は最大引抜き荷重の1/2でのところで求めた。図5.1は引抜き試験結果から上式より算出した相互作用係数Cとケーブル材その物の引張強度の関係を示したものである。繊維系ケーブル材はP C鋼より線より大きい領域にある。また、図5.2は定着材の膨張材添加率と相互作用係数Cとの関係である。添加率の増加に伴って相互作用係数Cが増加していることがわかる。

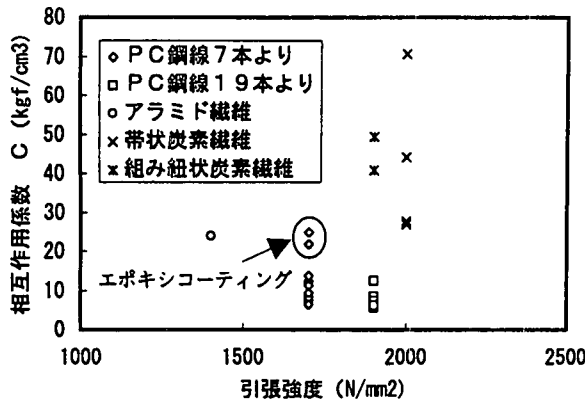


図5.1 ケーブル材の引張強度と相互作用係数C

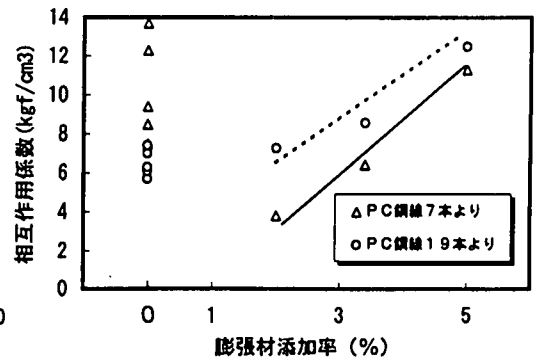


図5.2 膨張材添加率と相互作用係数C

6. まとめ

以上の試験結果から以下のことが把握できた。

- ①全体的にケーブル材の定着性は良好であることがわかった。
- ②特にエポキシコーティングP C鋼より線、帯状炭素繊維は定着性に優れていることから、表面の粗度によってケーブル材と定着材の境界に良好な定着力が得られていると考えられる。
- ③ケーブル材の柔軟さと容易に切断できることから施工性に優れている。
- ④膨張性定着材を添加することにより定着効果が高まった。
- ⑤相互作用係数Cにより定着効果を定量的に求め、数値解析パラメータとして共することができる。

(謝辞) 本試験を行うにあたって住友電気工業(株)、(株)小野田、東レ(株)、デュポン・東レ・ケブラー(株)の皆様方に御協力を頂いた。ここに謝意を表する。

7. 参考文献

- 1) 玉井昭雄、白旗秀紀、永久和正：制御発破の効果と岩盤への影響度に関する調査研究、第2回トンネル工学研究発表会論文・報告集、pp. 209～214、1992.
- 2) 岩の力学連合会：I S R M指針、Vol. 1 (ロックボルト試験法の指針)、1982
- 3) S. YAZICI, P. K. KAISER: Bond Strength of Grouted Cable Bolts. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 29, No. 3.
- 4) 斉藤敏明、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.
- 5) 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投稿予定、1995.