

長尺鏡ボルトの作用の計測と解析による評価

Evaluation on the long length face bolting by measurement and analysis

西村好恵¹・森本真吾²・岡部正²・中川浩二³

Yoshie Nishimura, Shingo Morimoto, Tadashi Okabe, Koji Nakagawa

¹正会員 工修 株式会社東亜測器 技術部 (〒220-0051 神奈川県横浜市中央1丁目28-8)

E-mail:nishimura@touasokki.co.jp

²正会員 工修 株式会社ケー・エフ・シー トンネル技術室 (〒105-0014 東京都港区芝2丁目5-10)

³フェロー会員 工博 山口大学 社会建設工学科 教授 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2丁目16-1)

Long length face bolting is a "It improves stability by the reinforcement of ahead of tunnel face." method of construction. Recently, a measuring case including ahead of tunnel face begins to be done caused by the increase in the adoption actual results in the country, too.

It aims at what is examined about the action of long length face bolting in ahead of tunnel face, the mechanism of the effect by the one for this report with paying attention about the measuring data of long length face boltin by the GFRP pipe and adopting an analytic technique.

Key Words : long length face bolting, measurement, 3D-analysis,

1. はじめに

近年、山岳トンネルは厳しい条件下でのトンネル掘削が多くなり、地表面沈下等の要因であるトンネル掘削時の先行ゆるみの抑制を目的とした様々な補助工法が開発され採用されている。海外における補助工法のひとつとして切羽前方に15m程度のグラスファイバー製のフェイスボルトおよびグラウチングを施して切羽前方地山を強化する工法(ADECO-RS工法)がある。切羽の自立性が難しい地山では「加背を分割して安定性を向上」させる従来の工法と「アンブレラ工法によって地山の応力解放の抑制を図り、切羽安定性を向上させる」方法と ADECO-RS 工法のような「切羽前方地山の積極的改良により安定を図る」方法があるとされている。¹⁾

長尺鏡ボルト工は「切羽前方地山の補強により安定性を向上させる」工法であるが、近年、国内での採用実績の増加に伴い、切羽前方地山を含めた計測事例もされはじめてきている。

本報分では、GFRP 管による長尺鏡ボルト工の計測データについて着目し、解析手法を取り入れながら切羽前方地山における長尺鏡ボルト工の挙動、効果のメカニズムについて検討することを目的としている。尚、使用した解析ソフトはFLAC3Dである。

2. 長尺鏡ボルト工の計測システム

長尺ボルト工は、数値解析で得られるような補強ボルトの挙動、切羽前方および切羽の変位を実測値として実際に得ることができれば、定量的にその効果を評価できると考えられる。本節では、長尺鏡ボルト工、切羽前方地山の計測装置の概要について示す。

(1) 長尺鏡ボルト工軸力測定

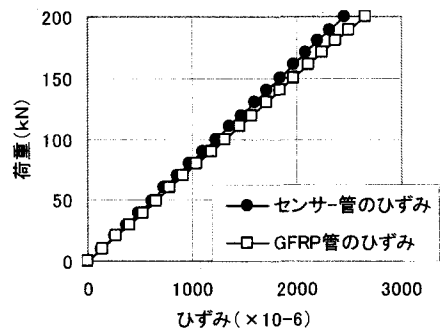


図-1 引張試験結果
(GFRP 管と計測用センサー管比較)



図-2 測定器概要図

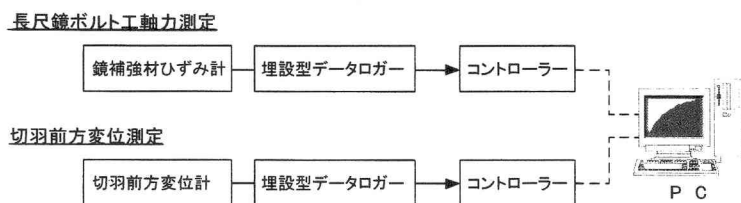


図-3 計測システム図

長尺鏡ボルト工の GFRP 管は、切羽前方地山に打設し、注入材によって地山と一体化される。そのため、GFRP 管に直接ひずみゲージを貼付することは困難であることから、ひずみゲージを貼付したセンサー管を GFRP 管内に挿入し、注入材で一体化することにより間接的にひずみを測定する。図-1 に引張試験による GFRP 管とセンサー管のひずみの比較を示す。図より、センサー管へ伝達されるひずみは、GFRP 管の発生ひずみに比べ小さいものの、GFRP 管のひずみ同様直線性をもつ。したがって、両者の発生ひずみの相関関係を得ることにより、間接的な測定は十分適用可能であると判断した。

図-2 にその測定方法を採用した鏡ボルト材ひずみ計を示す。センサー管の素材には PET を使用し、掘削時に支障なく切断ができ、データは先端部の埋設型データロガーに自動収録され、切羽が収録部に達した時点で回収する方式としている。また、モニター用ケーブルを孔口まで布設することにより、掘削途中のデータ確認も可能である。

(2) 切羽前方押し方向変位測定

一般に、三次元測定機やレーザー等を用い、切羽面の変位量の測定がされている。しかし、切羽前方の変位は地中内の変位であり測定が困難であることから、トンネル周辺地山変位を測定する地中変位測定の手法を、切羽前方へ適用して測定する。

図-2 に切羽前方変位計を示す。切羽から削孔し、

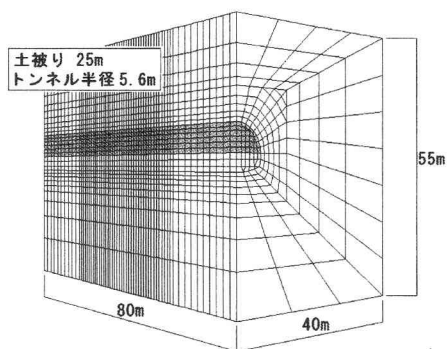


図-4 解析メッシュ図

最深部に長尺鏡ボルト工測定と同様のデータを自動収録できる埋設型データロガーおよび固定用アンカーをセットし、変位ロッドで連結された各測定点に固定したアンカーの移動量を測定する。変位ロッドの素材は FRP を使用し、掘削時に支障なく容易に切断することができる。

(1),(2)による計測システムのシステム例を図-3 に示す。

3. 長尺鏡ボルト工の予測解析

長尺鏡ボルト工の計測にあたり、その目的と計測データの有効利用を目的とし、長尺鏡ボルト工の前方地山内での挙動特性について予測解析を行う。

長尺鏡ボルト工については、これまで計測事例による効果に関する報告も少ないため、数値解析手法を用いてその効果についての予測解析を行った。

解析モデル図を図-4に示す。土被りは25mとしトンネル径は5.6mとした。入力物性値を表-1に示す。地山については日本道路公団のDIII地山の物性値を参照し、洪積世成田層群にみられるようなφ系地山を想定して決定した¹⁾。長尺鏡ボルト工(GFRP管、φ76)については大塚らの²⁾研究によるグラウト特性を考慮した入力値を使用した。解析における長尺鏡ボルト工は13mとし解析における配置図を図-5に示す。

図-6、7は長尺鏡ボルト工のトンネル掘進毎の軸力分布図、長尺鏡ボルト工部材位置地山の押出し方向変位分布図である。長尺鏡ボルト工軸力については掘削に伴い5m程度までは増加傾向にみられるが、残長が短くなるに従い軸力は減少する傾向がみられる。また、長尺鏡ボルト工周辺地山の押出し方向の変位量については長尺鏡ボルト工の残長が短くなるとゆるみ領域内にはいつてしまい、長尺鏡ボルト工が定着長を失うことがひとつ考えられる。図-8は長尺鏡ボルト工打設後1m、5m、9m掘進時のグラウトの付着切れ発生状況を示したものである。図中の○印は付着切れ箇所を示す。

9m掘進し、残長が3m程度になるとボルト全体が付着力を得られていない。

図-9より、長尺鏡ボルト工はグラウトの付着力

表-1 入力物性値

	単位体積重量 (γ) kN/m ³	弾性係数 (E) MPa	ポアソン比 (ν)	粘着力 (c) MPa	内部摩擦角 (ϕ) °
地山	19	50	0.42	0.01	30

	単位体積重量 kN/m ³	弾性係数 MPa	断面積 m ²	グラウトせん断剛性(kbond) MN/m ²	グラウト付着強度 (sbond) MN/m
長尺鏡ボルト (GFRP)	17.5	20,000	1.71E-03	8.19E+02	7.60E-02

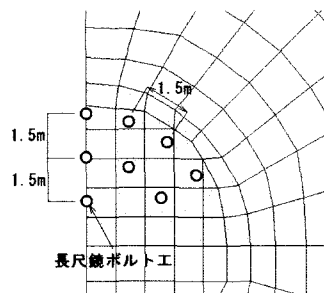


図-5 長尺鏡ボルト工配置図

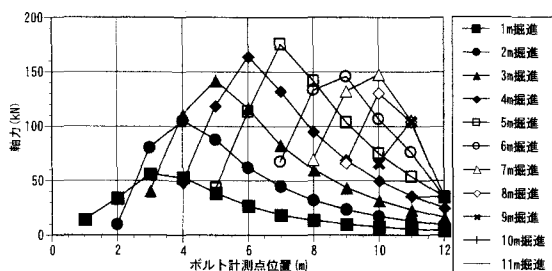


図-6 長尺鏡ボルト軸力分布図

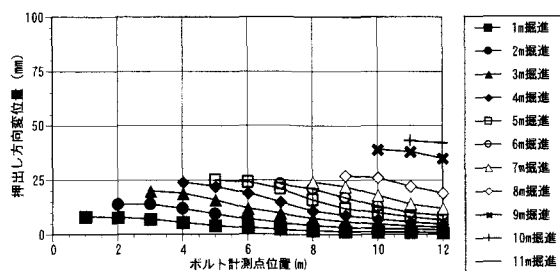


図-7 長尺鏡ボルト位置地山押し出し方向変位分布

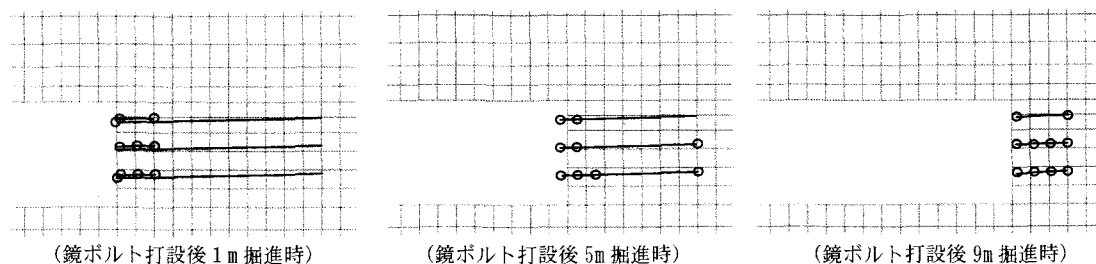


図-8 長尺鏡ボルト-地山間付着状況図
(○は付着切れ箇所を示す。)

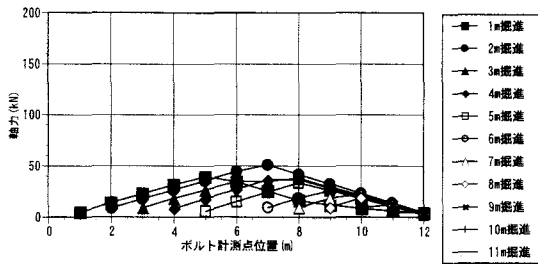


図-9 長尺鏡ボルト軸力分布図
(付着強度低下)

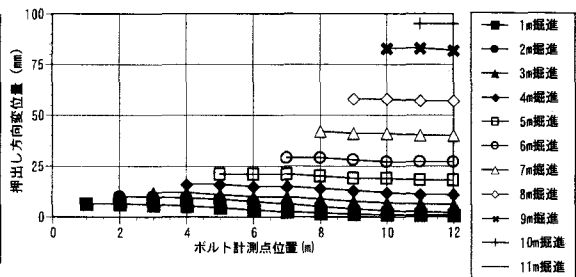


図-10 長尺鏡ボルト位置地山押し出し方向
変位分布図 (付着強度低下)

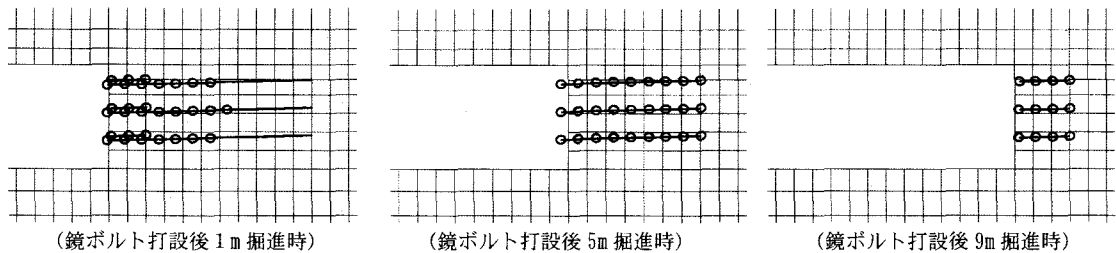


図-11 長尺鏡ボルト-地山間付着状況図 (付着強度低下)
(○は付着切れ箇所を示す。)

がその効果に大きく影響すると考えられることから、付着が不良である場合について数値解析シミュレーションを行った。今回は想定として付着不良についてはグラウトの付着強度を 1/10 としてモデル化した。図-9～11 に長尺鏡ボルト工軸力、地山押し出し量、グラウトの付着切れ状況分布図を示す。長尺鏡ボルト工と地山との付着が不良である場合、長尺鏡ボルト工の軸力は小さくなり、鏡部の押し出し量は大きくなる。また、5m 掘進時にボルト全体の付着力が失われている。

以上解析結果より、長尺鏡ボルト工の効果を発揮させるためには地山・ボルト間十分な定着力が必要であることが示された。このことより、長尺鏡ボルト工は、ボルト軸力、前方地山変位と併用した評価が必要であると考えられる。

4. 長尺鏡ボルト工の計測値と解析値の比較

長尺鏡ボルト工の軸力分布状況について解析値と計測値の比較を行う。尚、解析モデルは 3 章と同様である。但し、計測例では上半、下半離れ 4m 程度のマイクロベンチとし、上半長尺鏡ボルト工の長さは 14m、1 シフト掘削長 7m (ラップ長 7m)、下半長尺鏡ボルト工は長さ 18m となっておりため、数値解析においても条件を合わせている。解析モデルと実施工における諸条件を表-2 に示す。相違点が多

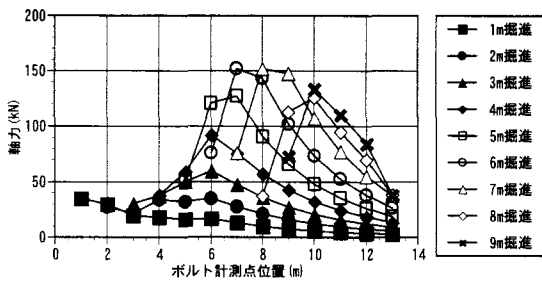
表-2 実現場と解析モデルの比較

	実現場	解析モデル
土被り	35m	25m
トンネル径	6.4m	5.6m
上・下半離れ	4m	5m
上半ボルト本数	23 本	16 本
下半ボルト本数	8 本	6 本

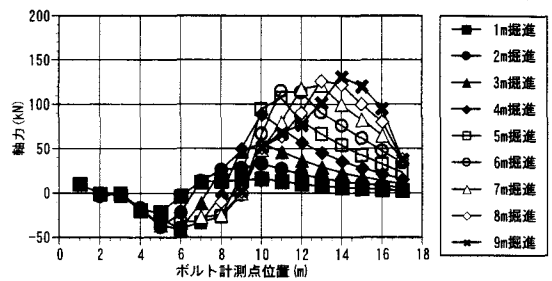
く、特に数値解析は逆解析を行っていないため、傾向について検討するものとする。

図-12 に数値解析、計測における長尺鏡ボルト工の軸力分布図を示す。上半の長尺鏡ボルト工の軸力分布は解析値では軸力ピーク値は各掘削毎において切羽鏡部前方 2～3m に発生している。計測値についてはばらつきはあるものの各掘進毎にピーク値の発生位置は切羽前方位置に移動していることが読み取れる。上半長尺鏡ボルト工の軸力ピーク値は掘進毎の前方ゆるみ域に対応して発生するようである。また、解析値では、鏡ボルト工の残長はある一定よりも短くなると軸力のピーク値は減少する傾向がみられるが、計測値ではみられない。

次に下半の長尺鏡ボルト工の軸力については、解析値では下半切羽位置より 5m 程度から軸力が大きくなりピーク値が現れる傾向がみられる。また下半部に配置されている部分には圧縮もみられる。圧縮がみられるのは恐らく解析における底盤膨れによるものと考えられる。計測値においても軸力のピーク

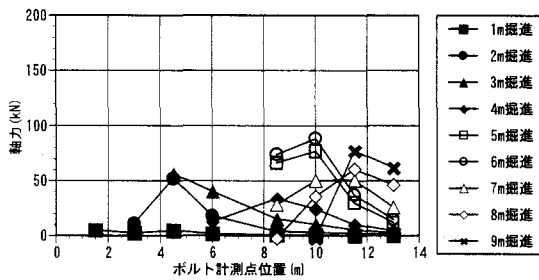


(上半長尺鏡ボルト工軸力分布図)

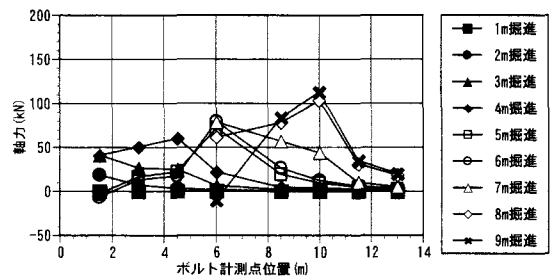


(下半長尺鏡ボルト工軸力分布図)

解析結果



(上半長尺鏡ボルト工軸力分布図)



(下半長尺鏡ボルト工軸力分布図)

計測結果

図-12 長尺鏡ボルト工軸力分布図 (上: 解析結果, 下: 計測結果)

発生位置は上半部とは異なり、下半切羽位置より 4～5m 付近に現れる傾向がみられる。以上、上半部下半部の軸力ピーク値の発生位置より推測される前方ゆるみ範囲を図-13 に示す。上半・下半の掘削がマイクロベンチの場合についてもすべり崩落線が発生することが解析値、計測値より予想される。また、図-14 に計測結果による鏡部押し出し方向の変位量を示す。前章の解析結果より、ボルト残長が短くなると押し出しが大きくなる傾向がみられたが、計測結果においても同様な傾向が伺える。

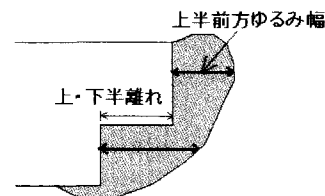


図-13 切羽前方ゆるみ領域想定図

5. おわりに

長尺鏡ボルト工の作用効果について、解析結果と計測結果により以下のような傾向がみられた。

- ・数値解析による予測シミュレーション結果より、ボルト軸力ピーク値の発生位置、残長に伴う軸力と押し出し量の挙動が示された。また、グラウトの付着強度を任意に低下したモデル解析結果より、ボルト-地山間の定着力がボルトの作用効果に大きく影響を及ぼすことが示された。

- ・解析結果と計測結果の比較により、軸力ピーク値発生位置、残長不足による押し出し量の増加についてある程度同様な傾向を示すことが把握された。このことにより計測と解析を併用した長尺鏡ボルト工の効果に関する管理システムの可能性が示された。

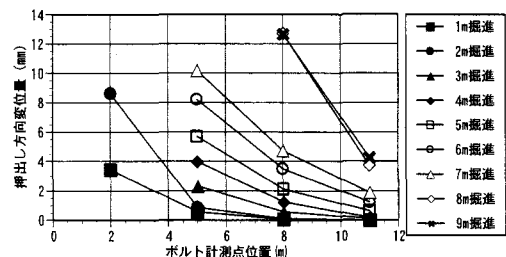


図-14 鏡部押し出し方向変位量 (計測値)

参考文献

- 1) ジェオフロンテ研究会: 切羽前方コアに着目した新しいトンネル工法-ADECO-RS の適用について、2002.11.
- 2) 大塚勇, 青木智幸, 小川哲司, 足達康軌, 田中崇生: 各種ボルト材による鏡ボルトの岩盤補強効果について、第33回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文(社) 土木学会, 2004.1.