

高耐力鏡ボルトの支保効果に関する解析的検討

高橋佳孝¹・木梨秀雄²

¹正会員 株式会社大林組生産技術本部トンネル技術部（〒108-8502 東京都港区港南2-15-2）
E-mail: takahashi.yoshitaka.ro@obayashi.co.jp

²正会員 株式会社大林組生産技術本部トンネル技術部（〒108-8502 東京都港区港南2-15-2）
E-mail: kinashi.hideo@obayashi.co.jp

切羽が不安定な際に用いられる長尺鏡ボルトの補強材には、軽量かつ掘削時に切断が容易なGFRP（Glass Fiber Reinforced Plastic）管や撤去後に細片化しない鋼管が主として用いられる。鏡ボルトに求められる主要な性能としては、引張り耐力と定着耐力が挙げられる。鏡ボルトの引張り耐力は一般的に継手部の耐力とされるが、素材部に比べて低いことが課題となっている。また、補強材が鋼管の場合、表面が平滑なため定着耐力が低いことも課題として挙げられる。

以上の課題を背景に、過年度、高耐力鋼管鏡ボルト（以下、本工法）を開発した。本報告では、新たに開発した高耐力鋼管鏡ボルトの各種地山条件下での補強効果について数値解析検討を行った。以下に、得られた知見について報告する。

Key Words : long face bolting, reinforcement effects, 3D numerical analysis

1. はじめに

未固結の土砂地山や大土かぶりの押出し性地山でトンネルを施工する際には、鏡面の押出しや切羽崩落など切羽の不安定化が問題となる。このようなケースでは長尺鏡ボルトが適用されており、心材には主にφ76～81mm・L=12m程度のGFRP管や鋼管が用いられている。既往の鏡ボルトの材料特性を表-1に示す。引張り耐力に着目すると、素材部に比べて継手部耐力が弱点となることがわかる。また、鋼管の定着耐力は、表面が平滑なものではGFRP管に比べて劣るという特徴がある。

膨張性泥岩におけるGFRP管長尺鏡ボルト（巻付け成形品）の施工実績では、掘削に伴って200mmを超える鏡の押出しにより、継手部耐力の300kNを超える軸力がGFRP管に発生し、継手部が破断した¹⁾。

2. 高耐力鋼管鏡ボルトの概要

従来工法の課題を背景に開発した本工法は、鋼管（STK400、φ76mm、t=5.2mm）を用いた長尺鏡ボルトの新しい技術である。継手部（ネジ式）には本管よりも厚肉かつ高強度の素材を使用している。また、掘削時に重機で容易に切断、撤去できるよう、トンネル1掘進長に合わせて切断した鋼管を、溶接加工により接続している。さらに、鋼管表面に4本/mの突起を設けている（図-1）。従来工法との材料特性比較を図-2に示す。本工法は従来工法に比べて、引張り耐力で1.3倍、定着耐力で2倍向上している²⁾。

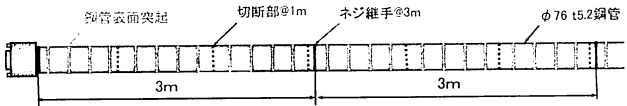


図-1 新しい長尺鏡ボルト工法の概観

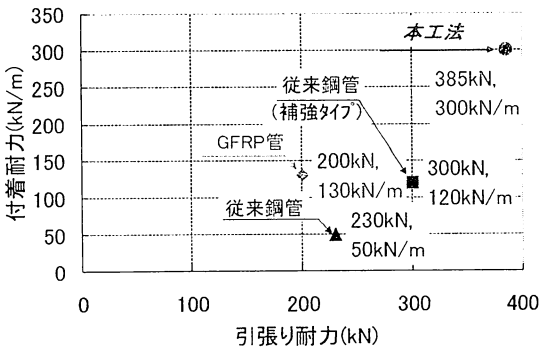


図-2 長尺鏡ボルト工法の材料特性比較

材質	表-1 既往の鏡ボルトの材料特性の比較		
	GFRP管	鋼管	
	引抜き成形品	STK400 (スリット付)	STK400 (スリット・窪み付)
継手部	本体にネジ加工	本体にネジ加工	接続部を補強
外径	φ76mm	φ76.3mm	φ76.3mm
管厚	t=8mm	t=5.2mm	t=4.2mm
引張り耐力 (素材部)	800kN	465kN	381kN
引張り耐力 (継手部)	200kN	230kN	300kN (継手部拡張)
定着耐力※	130kN/m (表面溝加工)	50kN/m	120kN/m

※定着耐力は、定着材（プレミックスモルタル）材齢24hrでの値

3. 解析条件

(1) 解析モデル

地山条件の違いや長尺鏡ボルトの材料特性の違い，有無による補強効果の影響を検証するため，図-3，4に示すモデルで三次元有限差分解析プログラムFLAC3Dによる三次元弾塑性解析を実施した．

トンネル支保は鋼製支保工をビーム要素，吹付コンクリートをシェル要素としている．また，鏡ボルトは，付着特性を考慮できるケーブル要素としている（図-5）．

地山条件は切羽不安定化の恐れがある「低土被りDⅡ級地山」，「土被り55m・DⅡ級地山」の2ケースとした．鏡ボルトは，材質，引張り耐力および定着耐力の異なる「GFRP」，「平滑鋼管（本工法の突起が無いパターン）」，「本工法」の3ケースに加えて「鏡ボルト無し」のケースで比較検討を行った（表-2）．

なお，結果を明瞭にするためトンネルは直径10mの単

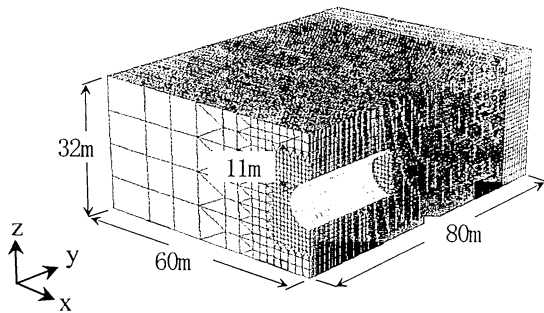


図-3 低土被り DⅡ級地山モデル

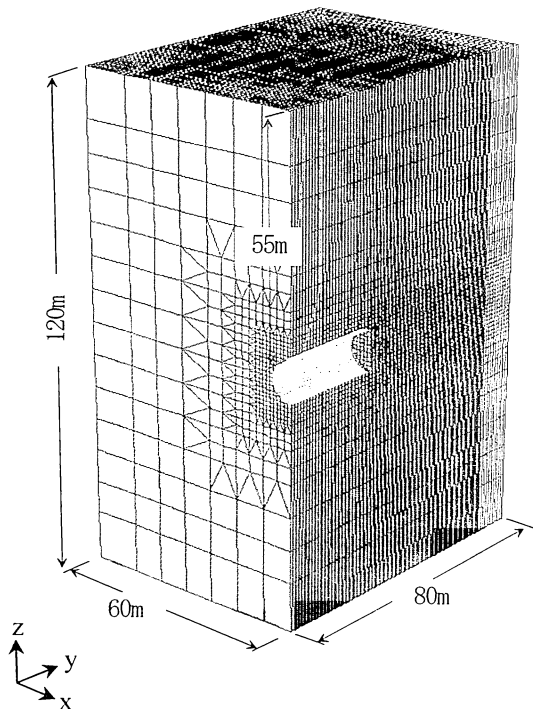


図-4 土被り 55m・DⅡ級地山モデル

芯円とし，鏡ボルトを全面に2mピッチ（ラップ部1mピッチ）打設としている（図-6）．

(2) 入力物性値

解析に用いた入力物性値を表-3，4に示す．地山およびトンネル支保はDⅡ級相当を想定し，管およびネジ継ぎ手部の引張り耐力と，引き抜き試験結果に基づいた付着耐力を考慮した³⁾．軸力が増大し引張り耐力を超えた場合は，その箇所の要素を削除して残る管が分断するよう模擬した．また，地山と管の付着は，せん断ばねKsと付着耐力Sbondにより弾・完全塑性型で模擬した．

(3) 解析手順

解析ステップは，鏡ボルト（L=18m）打設後1mの逐次掘削，掘削直後に吹付けコンクリートおよび鋼製支保工設置，9m掘進後鏡ボルト（L=18m）を再打設するステップとしている（図-7）．

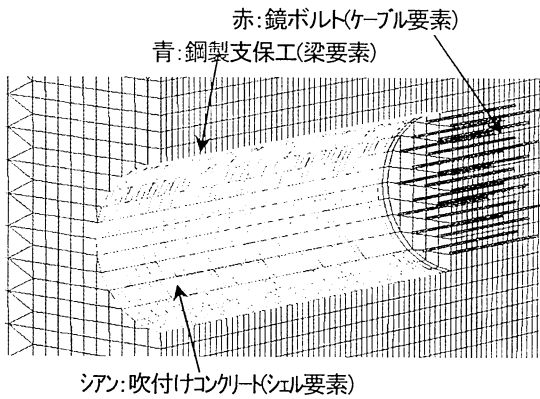


図-5 トンネル・鏡ボルトのモデル

表-2 解析ケース

	土被り	地山等級	鏡補強
1	11m	DⅡ	鏡ボルト無し
2			GFRP
3			平滑鋼管
4			本工法
5	55m	DⅡ	鏡ボルト無し
6			GFRP
7			平滑鋼管
8			本工法

鏡ボルト(図は、ラップ部で1m間隔)

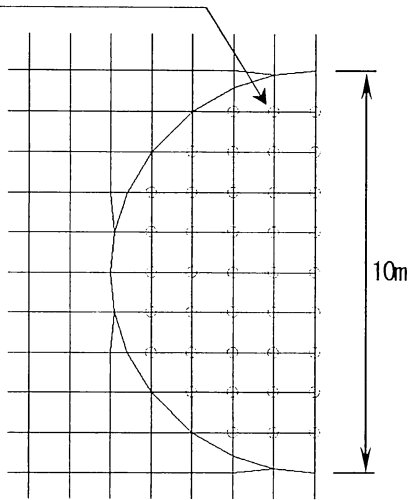


図-6 鏡ボルトの配置

表-3 地山入力物性値

	低土被り	D II 地山	膨張性地山
弾性係数(MPa)	150	150	500
ポアソン比	0.35	0.35	0.35
単位重量(MN/mm ²)	0.021	0.021	0.022
粘着力(MN/mm ²)	0.02	0.04	0.04
内部摩擦角(°)	30	30	35

表-4 鏡ボルト入力物性値

	GFRP	平滑鋼管	本工法
外径(mm)	76	76.3	76.3
厚さ(mm)	8	5.2	5.2
弾性係数(MPa)	2.50E+04	2.10E+05	2.10E+05
断面積(m ²)	1.71E-03	1.16E-03	1.16E-03
素管部引張り耐力(MN)	0.8	0.47	0.47
継手部引張り耐力(MN)	0.2	0.385	0.385
付着耐力(MN/m)	0.13	0.05	0.3
付着剛性(MN/m/m)	5.77E+04	5.77E+04	5.77E+04

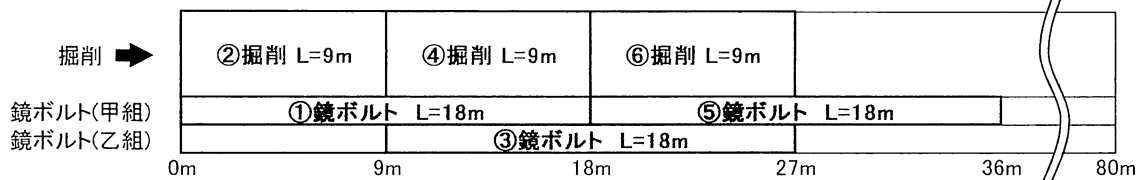


図-7 解析ステップ

4. 解析結果と考察

(1) 低土被り・D II 級地山

a) 変位分布

図-8~11に鏡補強ケースごとのトンネル周辺地山変位分布を示す。鏡ボルト無しの場合、地表面にまでおよぶ大きな変位が発生しているが、鏡補強を行うことによって、その大きな変位は抑制される結果となっている。

鏡補強を行った3ケースを比較すると、6~10mmの変位が発生している領域がGFRPで切羽前方6m程度まで達しているのに対し、平滑鋼管で3m程度、本工法の場合には、さらにその領域は小さくなっている。また、本工法の切羽前方地山の変位は、付着特性のみが低い平滑鋼管に比べて天端部も含めて小さくなっていることから、付着耐力を向上させた本工法は、トンネル周辺地山の安定性が他の工法に比べてさらに向上すると考えられる。

b) 鏡面押し出し変位

図-12に鏡補強ケースごとの鏡面押し出し変位量を示す。鏡ボルト無しのケースは、鏡面の崩壊が発生している。鏡補強を実施したケースの最大変位量はGFRPで約10mm、平滑鋼管で約8mm、本工法で7mmとなっており、差は小さいが、本工法による鏡補強が最も優位な結果となっている。

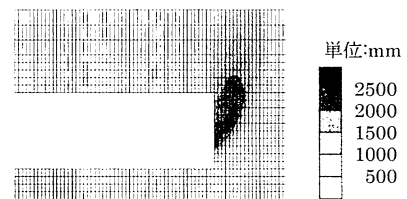


図-8 変位分布 (鏡ボルト無し)

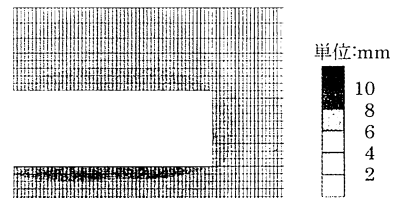


図-9 変位分布 (GFRP)

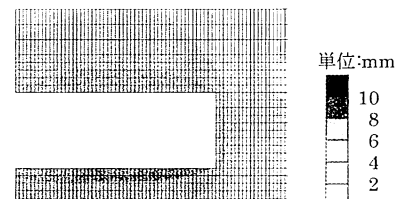


図-10 変位分布 (平滑鋼管)

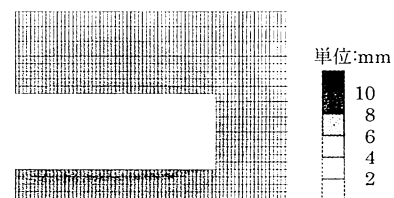


図-11 変位分布 (本工法)

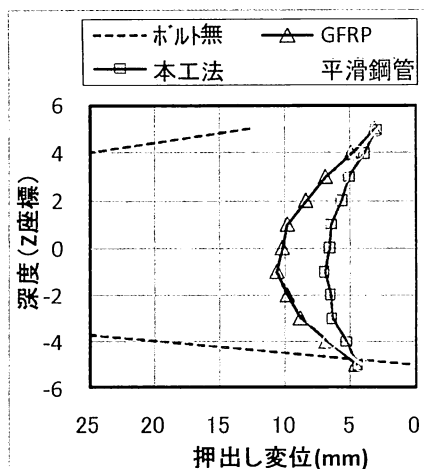


図-12 鏡面押し出し変位量

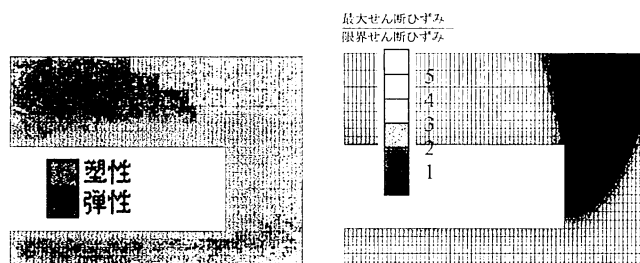


図-13 塑性域分布
(鏡ボルト無し)

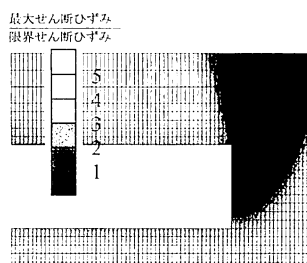


図-17 ひずみ分布
(鏡ボルト無し)

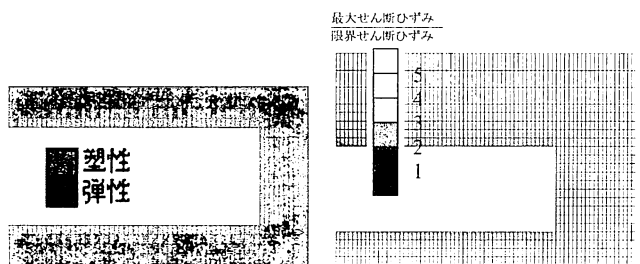


図-14 塑性域分布
(GFRP)

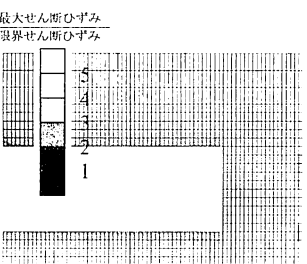


図-18 ひずみ分布
(GFRP)

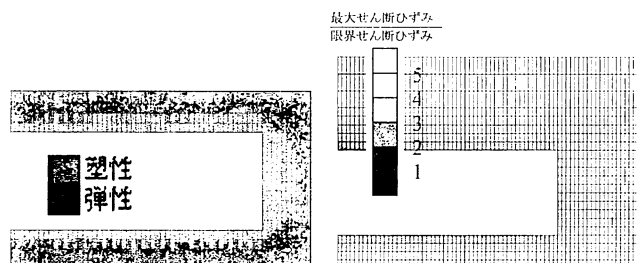


図-15 塑性域分布
(平滑鋼管)

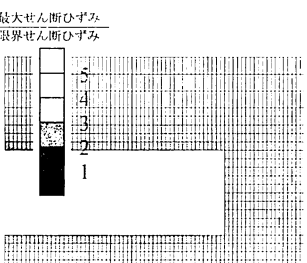


図-19 ひずみ分布
(平滑鋼管)

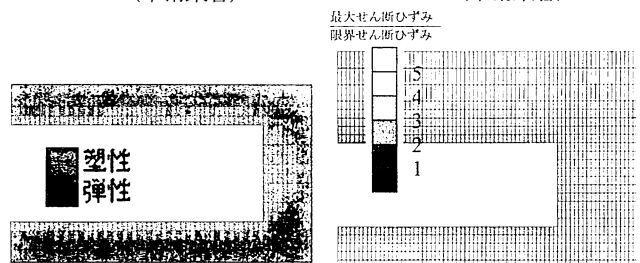


図-16 塑性域分布
(本工法)

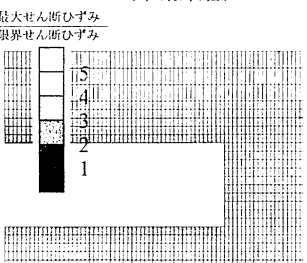


図-20 ひずみ分布
(本工法)

c) 塑性域・ひずみ分布

図-13～16に鏡ボルトごとの塑性域分布を、図-17～20に鏡ボルトごとの地山せん断ひずみ分布を示す。変位分布同様、鏡ボルト無しの場合、塑性域や不安定領域が地表面にまで及んでいるが、鏡補強を行うことによって安定する結果となっている。

鏡補強の3ケースを比較すると、GFRPの場合、塑性域が切羽前方5m以上にまで達しているのに対し、平滑鋼管および本工法では切羽前方3～4m程度と減少する結果となった。また、平滑鋼管と本工法を比較すると、わずかなではあるが、切羽周辺の塑性域は減少する。

以上の結果より、鏡ボルトの補強材に鋼管を使用することおよび付着耐力向上により補強効果が高まるいえる。

d) 鏡ボルトの軸力分布

図-21～23に図-8～20で示した解析ステップ時の鏡ボルトの軸力分布を示す。この図では、線の太くなるほど軸力が大きくなることを表している。

補強材の材質が同じ平滑鋼管と本工法を比較すると、本工法の方がより大きな軸力が作用していることが確認できる。これにより押し出し変位や地山のゆるみが抑制される。また、本解析ケースではすべての鏡ボルトで破断や付着切れは確認されなかった。

e) 本解析条件における考察

以上の結果より、本解析条件の場合、本工法による鏡補強が最も優位である要因として、鏡ボルトの破断や付着切れが発生していないことから、剛性の高い補強材を使用していることが挙げられる。また、付着耐力の向上によって、鏡ボルトに有効に軸力を作用させることができるため、より補強効果が高まると考えられる。

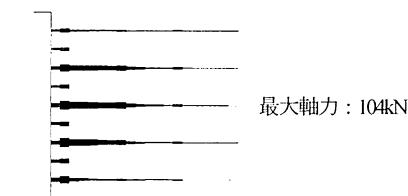


図-21 軸力分布(GFRP)

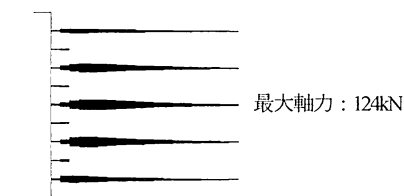


図-22 軸力分布(平滑鋼管)

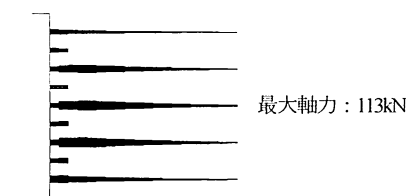


図-23 軸力分布(本工法)

(2) 土被り55m・DⅡ級地山

a) 変位分布

図-24～27に鏡補強ケースごとの地山変位分布を示す。鏡補強無しの場合、切羽前方に150mmを超える大きな変位が発生しているが、鏡補強を行うことによって、その大きな変位は90mm以下に抑制される結果となっている。

鏡補強を行った3ケースで比較すると、30mm以上の変位領域がGFRPで切羽前方8m程度まで達しているのに対し、平滑鋼管で3m程度、本工法で2m程度と抑制されている。また、切羽直近の60～90mmの変位領域もGFRPが最も大きく、平滑鋼管、本工法の順に抑制される結果となった。

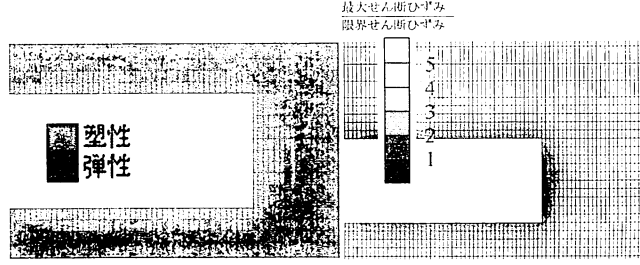
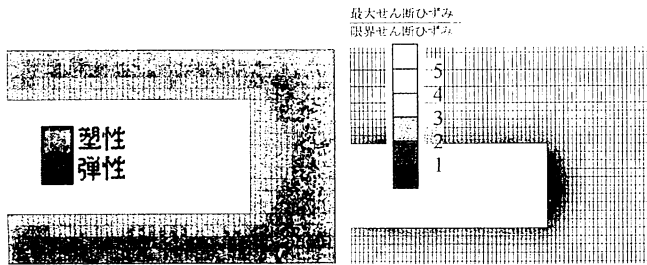
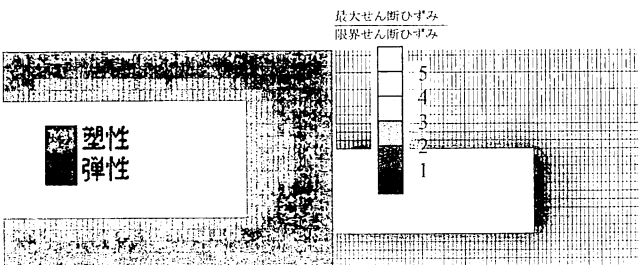
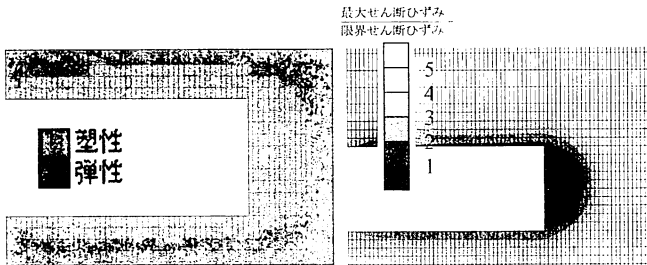
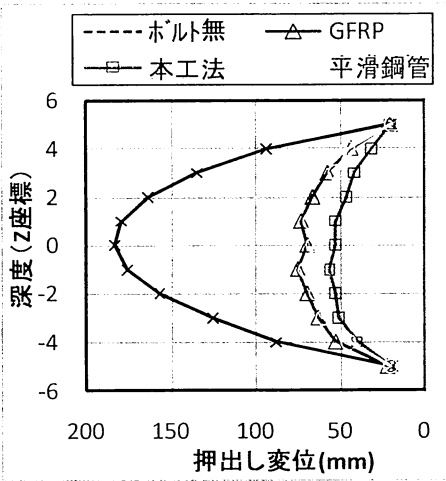
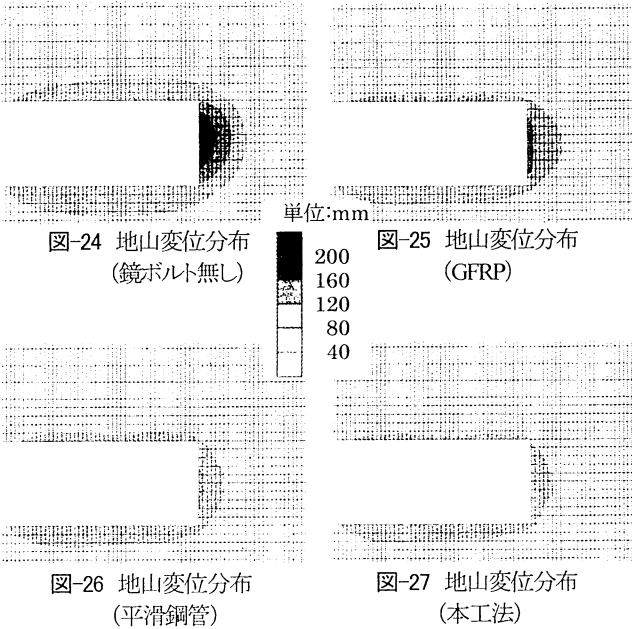
b) 鏡面押し出し変位

図-28に鏡補強ケースごとの鏡面押し出し変位量を示す。鏡ボルト無しの場合、最大180mm程度の押し出し変位が発生する。鏡補強を実施したケースの最大変位量はGFRPで約75mm、平滑鋼管で約70mm、本工法で約55mmとなっており、本工法による鏡補強が最も優位な結果となっている。

c) 塑性域・ひずみ分布

図-29～32に鏡ボルトごとの塑性域分布を、図-33～36に鏡ボルトごとの地山せん断ひずみ分布を示す。鏡ボルト無しの場合、不安定領域が切羽前方6～7m程度まで達するが、鏡補強を行うことによって不安定領域は大きく減少する結果となっている。

鏡補強の3ケースを比較すると、切羽前方の不安定領域がGFRPで3m程度、平滑鋼管で4m程度、本工法で2m程度となっている。不安定領域の大きさは、GFRPと平滑鋼管で同程度、本工法は前者に比べて小さくなっており、本工法の鏡補強が最も優位な結果となっている。



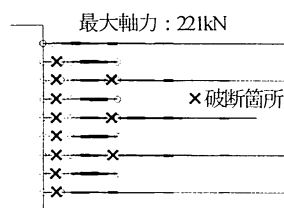


図-37 軸力分布 (GFRP)

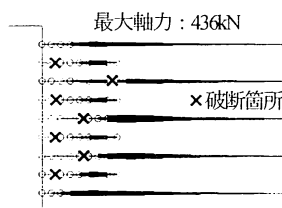


図-38 軸力分布 (平滑鋼管)

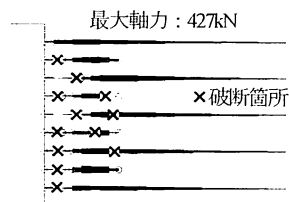


図-39 軸力分布 (本工法)

d) 鏡ボルトの軸力分布

図-37～39に図-24～36で示した解析ステップ時の鏡ボルト軸力分布を示す。図中×印は補強材が破断した箇所、丸印は付着切れが発生している箇所を表している。

鏡補強ケースごとの特徴としては以下の通りである。

- ・解析条件(1)同様、GFRPに比べて高剛性の鋼管タイプの鏡ボルトに大きな軸力が発生している。
- ・GFRPの破断はすべて継手部で発生している。
- ・平滑鋼管は、破断箇所は少ないものの、付着耐力が低い付着切れが他の鏡ボルトに比べて最も多く発生している。
- ・付着耐力を向上した本工法では、平滑鋼管に比べて付着切れを抑制している。

e) 本解析条件における考察

以上の結果より、本解析条件の場合、本工法による鏡補強が最も優位である要因として、継手部に破断が発生しても、突起と鋼管による高い抵抗力が得られること、付着耐力向上により付着切れを抑制し、補強材に有効に軸力を作用させることができることが挙げられる。

5. まとめ

本報告では、継手部耐力と付着耐力を向上させた新しい高耐力鋼管鏡ボルトの補強効果について、各種地山条件下で数値解析を実施し、その優位性や適用性の検証を行った。本報告から得られた知見を以下に示す。

- ・「低土被り・DII級地山」の場合、鏡ボルトの補強材に剛性の高い材料を使用することにより、トンネル周辺地山の安定が向上する。あわせて、付着耐力を向上させた本工法の採用により、鏡ボルトに軸力を有効に作用させることができ、従来工法に比べてさらにその補強効果は向上する。
- ・「土被り55m・DII級地山」の場合、継手部の耐力と付着耐力を向上させた本工法の採用により、継手部が破断しても高い抵抗力が得られるとともに、付着切れを抑制し、従来工法に比べて補強効果はさらに向上する。

以上、「低土被り・DII級地山」および「土被り55m・DII級地山」の地山条件下において、本工法の従来工法に対する補強効果の優位性を確認できた。

今回の数値解析は、補強効果が明確に得られるようなモデルや条件で行っている。今後は、実際の挙動に即した精度の高い予測が行えるよう、検討を進めていく。

参考文献

- 1) 瓜生良知, 免田幸三, 橋爪正博, 木梨秀雄: 超膨張性地山および未固結断層帯における地山挙動の予測と計測評価, トンネル工学報告集, 第19巻, pp.55～61, 2009.
- 2) 高橋佳孝, 木梨秀雄, 西野俊論, 畑浩二, 中岡健一: 高耐力・高定着力の長尺鏡ボルトの開発, トンネル工学報告集, 第20巻, pp.123～128, 2010.
- 3) GFRP 切羽補強研究会: 長尺切羽補強工技術資料, 第一回改訂版, pp.64～67, 2009.

ANALYTIC CONSIDERATION ABOUT REINFORCING EFFECTS OF THE HIGH BEARING CAPACITY FACE BOLTING

Yoshitaka TAKAHASHI and Hideo KINASHI

Long face bolting is one of the effective methods to stabilize tunnel face. Conventional type of long-face bolts are made by GFRP (Glass Fiber Reinforced Plastic) tube and steel pipe, which length are about 12m per 1 shift. However, tensile strength of screw joints of conventional bolts are low. Therefore, we newly developed high-bearing capacity face bolt using steel tube. Considering our previous experience, tensile strength and adhesion resistance of new face bolts were improved. Additionally, it confirm that strength of the screw joint and the bond strength were larger than that of conventional face bolts from the tension test and pull out test.

By this report, the result of numerical analytic consideration about reinforcing effects of the high bearing capacity face bolting developed newly is described.