

不良地山における長尺鏡ボルト工法の開発

APPLICATION OF TUNNEL FACE BOLTING ON UNSTABLE GROUND

木梨秀雄¹⁾・白旗秀紀¹⁾・加藤健治¹⁾・松田安則²⁾・羽馬 徹³⁾

Hideo KINASHI, Hideki SHIRAHATA, Kenji KATO, Yasunori MATSUDA, Toru HABA

Face bolting is one of the effective methods to stabilize tunnel face. This paper will describe that development of new type of face bolting using Glass Fiber Reinforced Plastic tube. Some drilling tests have been performed in various geological conditions, and have been evaluated drilling applicability.

Pull out tests have been also carried out to evaluate the bonding properties of GFRP face bolts.

Key words: face bolt, GFRP pipe, pull out test, bonding strength

1. はじめに

地山強度比の小さい押し出し性の地山や都市部の未固結土砂地山などにおいて、内空変位や沈下が大きく、収束しにくいような状況においては、早期に断面全周を閉合することで地山の安定を確保できる場合が多い。このようなケースでは、鏡面の安定を確保することが前提となる。また、鏡面前方の地山を補強し、先行変位を抑制することで、内空変位や支保の負担を軽減させ、掘削過程全体としての安定性を高める効果が考えられる。この考え方はイタリアの新しい山岳トンネル工法 ADECO-RS¹⁾でも説明がなされている。特に都市部の土砂地山や膨張性地山においては、先行変位が変位全体の 40～50% 前後とされ、鏡面前方地山の補強は有効と考えられる。また、鏡面から 2D 程度の区間を長尺鏡ボルトで補強することは、切羽での作業回数の低減をも可能とするが、そのためには鏡ボルト打設の施工性向上が必要となってくる。

鏡面が自立しないような地山においては、掘削時の支障が小さい GFRP (ガラス繊維) 製のものがよく用いられている²⁾。孔壁が自立する場合には、φ20～30mm 程度の GFRP ボルトが用いられているが、削孔時に孔荒れや孔壁が自立しない不良地山においては、二重管削孔方式の鏡ボルトが適用されている。用いられる材料は GFRP 管であり、管自体が孔壁の自立を確保するとともに、打設後は引張抵抗部材となり、標準的な打設長は 12m 程度としている。しかしながら、地山の先行変位の抑制や、作業回数の低減を考慮すると更なる長尺鏡ボルトの打設が必要と考える。そこで、長尺削孔に対応した GFRP 材料とビットシステムにより、確実な施工と 20～30m の打設が可能な長尺鏡ボルトシステムを開発した。以下では、まず、各種地山における長尺の削孔実験の結果について述べる。つぎに、打設後定着した鏡ボルトの付着特性について述べる。

2. GFRP 材料の選定

GFRP 管には、ガラス繊維が長軸方向に配列する引抜き成形タイプと、ガラス繊維シートを巻付け成形するタイプがある。表-1 は試作した 2 種類の GFRP 管の材料特性を比較したものである。引抜き成形タイプは引張り強度と軸方向剛性に有利な成形タイプであり、巻付け成形タイプは曲げやせん断に有利なタイプである。長尺削孔時に

1) 正会員 (株) 大林組 土木技術本部

2) (株) 亀山 開発営業事業部

3) 正会員 (株) ケー・エフ・シー 技術部

は、GFRP 管に曲げやねじれが負荷となる。また、材料強度は継ぎ手強度で代表されるので、材料特性のバランスを考えると、素材部が強いことよりも巻き付け成形タイプのほうが有利と考えられる。

以上のことから本工法では、20m 以上の長尺削孔に対応すべく、せん断強度のより大きな巻付け成形タイプを採用している（写真-1）。巻付け成形タイプのせん断強度は引抜き成形タイプの約 2.5 倍である。採用した GFRP 管の材料特性を表-1 にまとめる。材料強度は継手部耐力に代表されるが、今回選定した材料と製作方法により 300kN 以上の継手部耐力を実現した。

表-1 GFRP 管の材料特性

成形タイプ	引抜き成形	巻付け成形
外径 (mm)	80	81
内径 (mm)	70	65
軸方向引張強度 (N/mm ²)	500	220
軸方向ヤング率 (N/mm ²)	20,000	18,000
せん断強度 (N/mm ²)	100	255

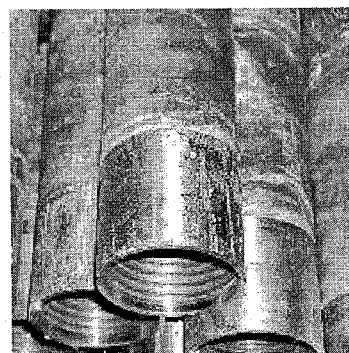


写真-1 GFRP 管ボルト
(巻付け成形タイプ)

3. GFRP 管鏡ボルトの二重管長尺削孔実験

(1) 削孔方法と削孔ツールズ

写真-2 は、GFRP 管鏡ボルトの削孔状況を示したものである。削孔は GFRP 管とインナーロッドの二重管構造で行われる。これを二重管削孔と呼んでいる。インナーロッドの先端には削孔水と圧力が供給され、切削された土砂は泥水となり GFRP 管の内側を通して排出される。近年、適用実績が豊富な長尺鋼管先受け工も同様に二重管削孔方式であり、その施工性は削孔時の排泥効率の影響を大きく受ける。長尺鋼管先受け工の経験から判断して、GFRP 管は鋼管のφ114.3mm よりも削孔径が小さく、さらに施工性が地質に依存することが予想された。そこで、できるだけ多くの地質に対する GFRP 管鏡ボルトの削孔性能を定量的に把握することを試みた。

GFRP 管鏡ボルトの施工は、山岳トンネルの施工サイクルに取り込むよう、専用機を用いずに山岳トンネルの標準削孔機であるドリルジャンボで行う。先端のビットは 2 タイプあり、ここではⅠ型とⅡ型と呼ぶことにする。Ⅰ型は、アウターが捨てビットになっており、インナーがドリルジャンボのロッドの先端に接続され、鏡ボルト先端部においてアウタービットと噛み合う。Ⅱ型は、アウタービットのクリアランスを拡大して、土砂の取り込み効率が良くなるように改良したものである。

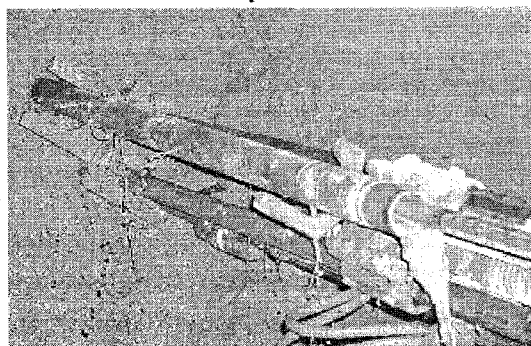


写真-2 GFRP 管ボルト (巻付け成形タイプ)

いずれも、鏡ボルト先端部において、ドリルジャンボの動力である、打撃・回転・フィードを伝達する前引き方式である。

(2) 長尺削孔実験結果

実際に鏡面ボルトが適用されている山岳トンネルの切羽において、削孔実験を実施した。これまでに、表-2 に示すような 6 つの地質に対する削孔性能を試した。なお、地質分類は粒度分布データに基づいて、地盤工学会の土の分類「中分類」によっている。表-2 より、玉石混じりの礫を除くと 3m あたりの削孔は 2~7 分程度であることがわかる。なお、礫層でも玉石が無い条件では、砂地山と同等の削孔速度が得られている。削孔時間を左右する主な地質的な要因は、シルトや粘土などの細粒分の含有量である。細粒分は粘性があり、排泥時に管内に滞

表-2 GFRP 管鏡ボルトの長尺削孔実験結果

地質	削孔長	ビットシステム	平均削孔時間	削孔結果
	m		分：秒／3m	
礫 (玉石混じり)	21	I 型	12:48	削孔長時間要したが可能。
シルト	12	I 型	5:49	排泥難あり、削孔完了。
	12	II 型	3:05	削孔良好。管内に粘性分残留により、ロッド回収難渋。
砂	12	I 型	2:20	良好。
強風化泥岩	21	II 型	2:02	良好。ロッドの回収やや難渋
	30	II 型	2:17	良好。
	42	II 型	2:40	削孔は良好だが、ロッドの回収に難渋した。
泥岩	30	II 型	6:43	良好。削孔スピードを抑えることで、排泥良好、ロッドの回収が容易。
礫 (玉石混じり)	12～30	II 型	13:10	継手破断あり。玉石ではノミ下がり極端に悪い。

留するなどの不都合を起こすため、削孔性能に大きく影響する。強風化泥岩においては順調に 30m の削孔を終えることができた。このケースではウレタン系の注入も完了し、30m クラスの実用化が可能であることが確認された。表-2 でシルトの結果から、ビットシステムの改良により、細粒分が含まれる地質での削孔効率が向上したことも確認した。表-3 には、各種地質ごとに GFRP 管の削孔性をまとめた。これまでのところ適用に難があるのは、玉石混じりのケースと粘土のケースである。

粘土地山は、土被りが浅い場合は鏡面の安定が良いので、本来であれば GFRP 鏡ボルトの適用外であるが、砂礫地山は互層の場合もあり、実際の施工では長尺削孔の区間に粘土と遭遇する場合が少なくない。なお、地山掘削時には、本 GFRP 管の切断は容易である。

表-3 削孔性のまとめ

地質	施工性	削孔状況
礫 (玉石混り)	△	適用可能だが、長時間要する。
礫	◎	良好。
砂	◎	良好。
シルト	○	十分適用可能だが、細粒粘性分が削孔を阻害する場合もある。
粘土	△	粘土混じりでは排泥難あり。
風化軟岩	◎	良好。

4. GFRP 管鏡ボルトの付着特性試験

鏡ボルトの補強効果は、ボルト材料の力学的特性、および定着材を介した地山との付着特性に支配される。しかしながら、施工実績が少ないことや付着試験の方法が確立されていないために、GFRP 管の付着特性は現状では把握されていない。そこで、GFRP 管の付着特性を調べることを目的として、トンネル現場において引抜き試験を実施した。今回は、引抜き試験により得られたデータに基づいて、鏡ボルトの付着特性を把握する。

泥岩地山において定着長 50cm における

引抜き試験を実施した。図-1 のように、荷重はセンターホールジャッキで負荷し、ロードセルで計測した。また、

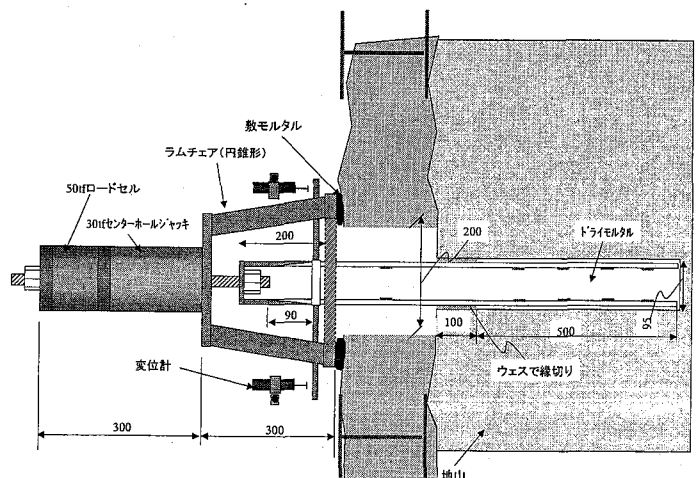


図-1 現場引抜き試験の概要（平面図）

GFRP 管の 4 箇所のみずみゲージにより、定着内部の作用軸力を計測した。みずみと軸力の関係は予め較正している。定着材はドライモルタルで材齢 6 時間（2 セット）と 24 時間のケース（4 セット）を実験した。モルタルの一軸圧縮強度は、試験時に各々 0.5N/mm^2 、および 12.2N/mm^2 であった。

図-2 は、定着材齢 6 および 24 時間それぞれの、引抜き荷重の増加に伴う各深度での付着力 S_{bond} の関係である。 S_{bond} は各区間の軸力差を 1m 当たりで算出したものである。 S_{bond} は、引抜き荷重の増加とともに大きくなっており、GFRP 管周囲の摩擦抵抗が増大していることを示す。材齢 6 時間では、最大引抜き荷重が 10 kN 程度であったが、図-2 でも各深度ともほぼ同じ付着力まで増大後に低下している。この最大付着力が付着耐力 S_{bond} に相当するものと考えられる。材齢 24 時間では、管が完全に引き抜かれる前に継ぎ手金具部が切れた。しかし、図-2 によると口元側の 2 区間については 130kN/m で付着が切れている。全ケースの平均では、付着耐力 S_{bond} が 142kN/m であった。

実験結果より、既存データ^{3),4)}とともに各種条件下での鏡ボルトの付着耐力と、定着材の各材令における一軸圧縮強度を比較すると図-3 のようになる。図-3 から、定着材の強度増加にほぼ比例して付着耐力が増大することがわかる。GFRP 管では周長により付着力を確保でき、かつ表面形状が比較的粗いため、材齢が 4 日でも PC 鋼より線の材齢 28 日の付着耐力並みであることがわかる。山岳トンネルの鏡ボルトでの対象となる、材齢 24 時間での定着長 1m 当たりの付着耐力は、 $S_{\text{bond}}=131\text{kN/m}$ である。現状の継ぎ手の耐力（すなわち材料耐力）は 300kN 程度であり、施工時のラップ長を最小必要定着長と考えれば、ラップを 3~4m とすることは、ほぼ妥当と考えられる。

5. まとめ

GFRP 管を用いた長尺鏡ボルトの削孔実験を種々の地山で行い、施工性を検討した。その結果、地質による削孔性能の違いを把握した。また、原位置での引き抜き試験を行い、付着特性を把握した。これらの成果は数値解析に活用することができる。今後は、数値解析および現場計測により鏡ボルトの支保効果を調べる予定である。

参考文献

- 1) Design & constructing tunnels – ADECORS approach, Tunnels & Tunnelling International special supplement, 2000
- 2) ジェオフロンテ研究会：長尺鏡ボルトの施工実態調査とその分析 その 2—不良地山での長尺ボルト施工技術資料一、2000
- 3) 木梨他：付着応力分布に基づく「ケブ 傭」の引抜き定着特性に関する研究」トシ工学研究論文・報告集、第 9 巻, pp.31~38, 1999
- 4) 石塚他：「ケブ 傭」の付着抵抗性と解析モデルに関する研究, トシ工学研究論文・報告集、第 7 巻, pp.7~14, 1997

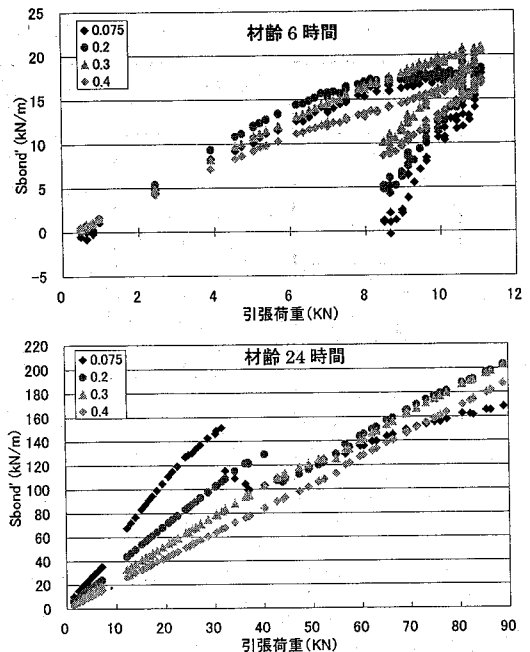


図-2 引抜き荷重と付着力の関係

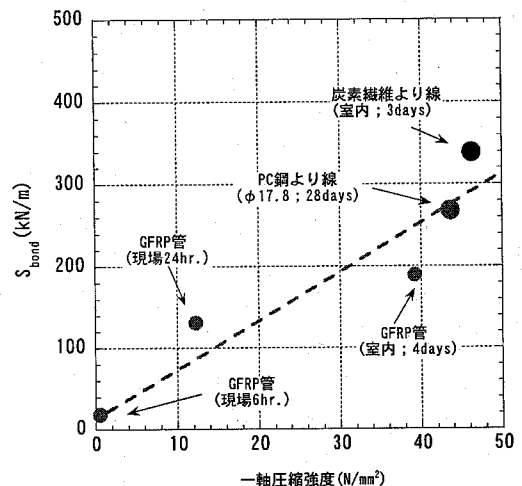


図-3 定着材の強度と付着強度の関係