

複合型 高耐力・高靱性長尺鏡ボルト工法の開発

磐田 吾郎¹, 木梨 秀雄², 伊藤 哲³, 畑 浩二⁴

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: iwata.goro@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

³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: ito.s@obayashi.co.jp

⁴正会員 株式会社大林組 技術研究所 (〒204-8558 東京都清瀬市下清戸4-640)
E-mail: hata.koji.ro@obayashi.co.jp

切羽を安定させるために用いられる長尺鏡ボルトには、12mのGFRP管や鋼管が通常使用される。従来の鏡ボルトは引張耐力が最大300kN程度、地山との付着耐力が最大150kN/m程度である。GFRP管は継手部の引張耐力、鋼管は付着耐力が低いことが短所となり、押出しの大きい地山では、破断や引抜けが発生している。これらを解決するため、引張耐力400kN程度、付着耐力300kN/m程度の鋼管鏡ボルトが開発された。実施工現場をモデル化して解析を行った結果では、400kN以上の引張力が作用することが想定されるため、さらなる引張耐力の向上が課題である。そこで、鋼管内にGFRPフラットバーを挿入して補強する工法を検討した。その材料特性確認試験を実施した結果、本補強工法の有効性が確認できた。

Key Words : face bolt, tensile strength, bond strength, squeezing ground

1. はじめに

膨張性地山や大土被りの押出し性地山のトンネル掘削では、切羽の安定性を確保するために、鏡ボルトの設置が必要となる。十分な定着を得るため、長さ3mの管材をつないで、12m程度の長尺鏡ボルトを施工する。

従来の鏡ボルトには、GFRP管と鋼管が使用されている。鏡ボルトは掘削する断面内に設置され、撤去性能も求められるため、重機で破砕できるGFRPを用いるもしくは、重機で切断できるように鋼管にはスリットが設置される。ところが、GFRP管は継手の引張耐力、鋼管は地山との付着耐力やスリット部の引張耐力が弱く、押出しの大きい地山では破断や引抜けが発生して、十分な押出し抑制効果を得られていなかった。

そこで、高橋ら¹⁾は引張耐力(継手部)400kN程度、付着耐力300kN/m程度の新型鋼管鏡ボルトを開発した。条件の悪い地山では700kN程度の引張力が作用することが解析で予測されたため、このボルトの更なる強度増進が必要と考え、補強方法の開発を行った。

本報告では、従来の鏡ボルトと新型ボルトの概要、鏡ボルトの必要性能を解析で検討した結果を述べた上で、具体的な補強方法と、補強後の鏡ボルトの引張強度試験結果について報告する。

2. 従来の鏡ボルトの概要²⁾

既往の長尺鏡ボルトの材料特性を表-1に示す。GFRP管では素材部の引張耐力は800kNと高いものの、ネジ部が弱点となり、結果的にボルトとしての引張耐力は最大300kNとなっている。また、鋼管では引張耐力は素材部、ネジ部ともに最大300kNあるものの、付着耐力は表面に窪みを付けた場合でも、120kN/m程度と低い値になっている。

表-1 既往の鏡ボルトの材料特性の比較

材質		GFRP管		鋼管	
		引抜き 成形品	巻付け 成形品	STK400 (スリット付)	STK400 (スリット・窪み付)
外径		φ76mm	φ81mm	φ76.3mm	φ76.3mm
引 張 り 耐 力	素材部	800kN	580kN	235kN~ (スリット含む)	300kN (スリット含む)
	ネジ部	200kN	300kN (継手部鋼製)	230~300kN	300kN (継手部直径)
付着耐力		150kN/m	131kN/m	50kN/m~	120kN/m

3. 新型鏡ボルトの概要¹⁾

超膨張性泥岩での施工となった北陸新幹線飯山トンネルでは、軸力計測時に鏡面の押出しにより鏡ボルトに過大な軸力が作用し、継手部の破断が発生した³⁾。そのため、高橋ら¹⁾は、高引張耐力かつ高付着耐力を有する新型鋼管鏡ボルトを開発した。ここでは、その概要を述べる。

新型ボルトの概要を図-1に示す。素管部は、既往の鋼管と同様にSTK400を使用しているが、ネジ部は強度を増加するために、SM490を使用している。また、トンネル掘進ごとに鋼管を重機で切断できるように、1mピッチで溶接継手を設置している。この溶接継手は、せん断方向に衝撃荷重を与えることで容易に破断できる。さらに、鋼管表面には突起が設定されている。これにより、付着耐力を向上させている。

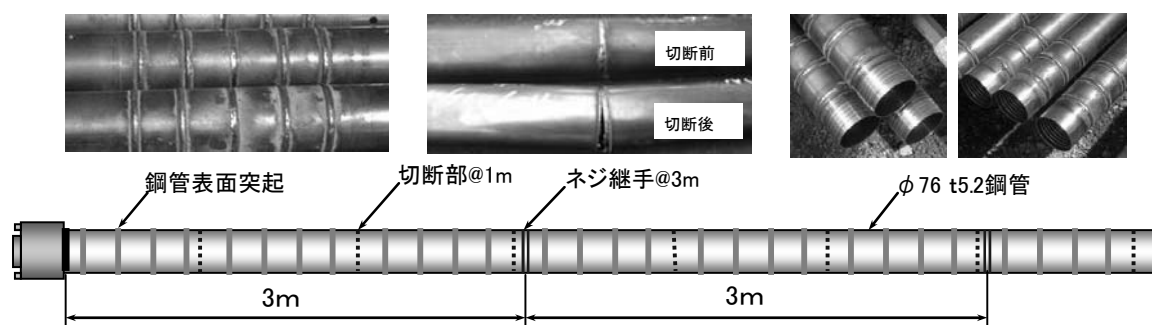


図-1 高引張耐力、高付着耐力鏡ボルトの概要

ネジ継手部			溶接継手部		
供試体No.	試験結果 (kN)	従来工法 (kN)	供試体No.	試験結果 (kN)	素材部* (kN)
1	391	200~300	1	421	460
2	387		2	416	
3	381		3	433	
			4	436	

*STK400, φ76mm, t=5.2mm



図-2 引張強度試験結果（ネジ部、溶接継手部）

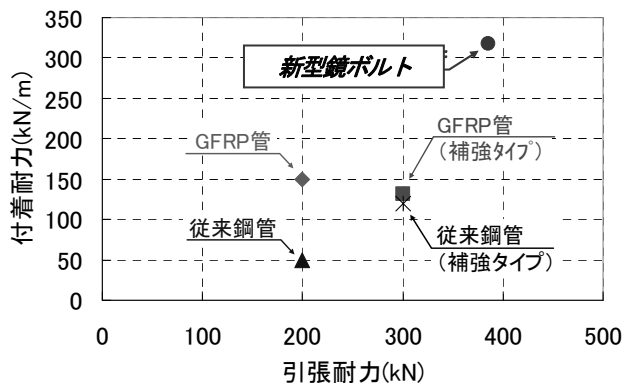


図-4 鏡ボルトの材料特性比較

新型ボルトの引張強度試験結果を図-2に示す。新型ボルトは、ネジ継手だけでなく、溶接継手も有するため、ネジ継手部と溶接継手部について、引張耐力を確認している。最弱部となるネジ継手部においても385kN程度となり、従来の鋼管およびGFRP管を超える耐力を有する。

新型ボルトの付着耐力は図-3の通りである。鋼管表面突起を4本/m@25cmで設置することにより、300kN/m以上の付着耐力が得られている。また、注入する定着材（セメントモルタル）の強度を上げることで600kN/m程度まで付着耐力を向上出来ることを確認している。

以上を踏まえて、新型鏡ボルトと従来の鏡ボルトを比較すると図-4に示す通りである。引張耐力、付着耐力共に、向上していることが分かる。

供試体 No.	突起		定着材強度 (N/mm ²)			定着長 (cm)		最大荷重 (kN)	S_{bond} (kN/m)	凡例
	有	無	小	中	大	25	50			
1	4本/m				31.8			147.6	590.3	◆
2	4本/m			18.0				123.8	495.2	■
3	4本/m		10.4					79.3	317.2	▲
4	4本/m		9.6					129.2	258.4	●
5	2本/m		9.7					89.4	178.8	×
6					36.7			66.3	132.5	◇
7			20.1					38.5	77.0	□
8			8.5					59.3	118.6	△

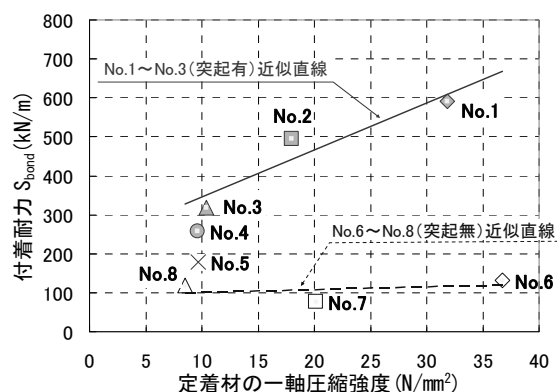


図-3 付着耐力 S_{bond} 試験結果

4. 鏡ボルトの必要耐力に関する解析検討

(1) 飯山トンネル計測結果^③

前述した飯山トンネルの施工では、GFRP管鏡ボルトを設置して、切羽の押出しを抑制した。その際、切羽前方の地山の変位および、鏡ボルトに作用する軸力の計測を行った。計測結果を図-5, 6に示す。

地山の変位は、4m掘削した時点で計測器の限界を超える200mm以上の押出しを観測した。また、鏡ボルトの軸力は、1m掘削した時点で継手の引張耐力(300kN)を超える約400kNの軸力が作用していることを確認した。掘削後に、鏡ボルトを確認したところ、実際にネジ部で破断が発生していた。

(2) FDM解析による鏡ボルトの必要耐力の検討^④

上記の現場実測結果を踏まえ、破断せずに切羽の押出しを抑制できる鏡ボルトに求められる必要耐力を有限差分法(FDM)解析により検討した。解析はプログラムソフトFLAC-3Dを用いて行った。

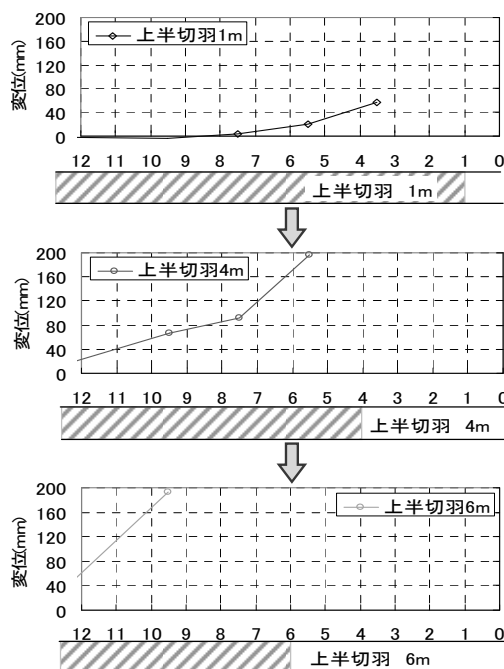


図-5 切羽進行に伴う押出し量の変化

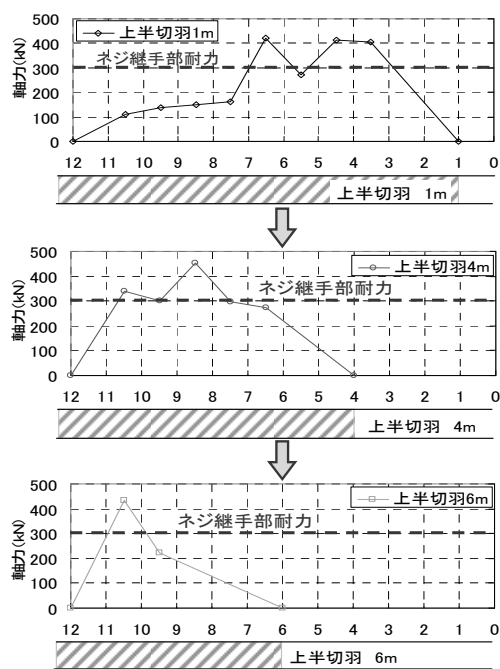


図-6 切羽進行に伴う GFRP 管軸力の変化

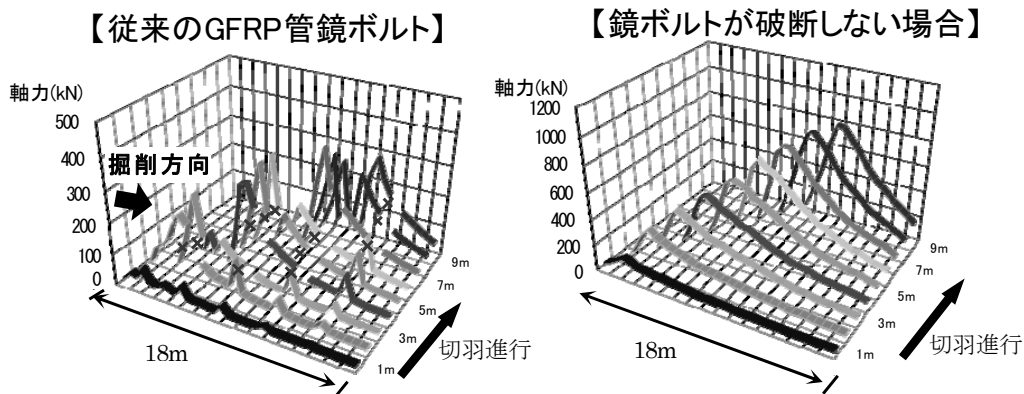


図-7 FDM 解析検討結果

解析条件としては、飯山トンネルでの地山条件を想定した。土被りは200mとした。トンネル形状については、形状による影響を排除するために、直径10mの円形トンネルを仮定した。鏡ボルトは現実的に設置できる最大本数を考慮して、1m間隔で設置することとした。ケースとしては、通常のGFRP管鏡ボルトのケースの他に、鏡ボルトが破断しないと仮定したケースについても解析を行った。

解析結果を図-7に示す。通常のGFRP管鏡ボルトでは、現場での実測結果と同様に、付着切れや破断が発生する結果となった。破断が発生しない場合においては、最大700kN程度(9m掘進後)の軸力が発生した。

以上を踏まえると、押出し性地山においては、700kN程度の引張耐力を持った鏡ボルトが求められるため、新型ボルトの耐力をさらに向上することが必要と考えた。付着耐力については、定着材強度で増強できるため、本開発では、引張耐力の向上を目的とした。

5. 新型鏡ボルトの補強工法の開発

(1) 補強工法の概要

新型ボルトの補強工法として、GFRPフラットバーを挿入することを選定した。設置方法は、鋼管鏡ボルトを打設後に、GFRPフラットバーを挿入する。鋼管の材料強度や断面積を増加させても耐力を向上できるが、コスト増や施工機械の変更が必要となり、汎用性が損なわれるため、当方法を選定した。GFRPフラットバーはローリング状に巻きつけて運搬でき、継手を必要としないため、GFRP素材部のもつ高い引張耐力を発揮できると考えた。

挿入するGFRPフラットバーは写真-1に示すように、3枚のフラットバー（40mm×7mm）を三角形に結束した状態で鏡ボルト内に挿入する。フラットバー3枚の中心のパイプは定着材注入用のパイプである。

(2) 引張強度試験概要

補強効果を確認するために、補強した新型鏡ボルトの引張強度試験を実施した。以下に詳細を述べる。

a) 供試体

長さ1mの新型鏡ボルト2本を溶接、ネジ継手で繋ぎ、その中に上記のGFRPフラットバー（L=2.0m）を挿入した。挿入後、注入管から早強セメントモルタル（W/C=61.1%）を鏡ボルト内に充填した（写真-2）。使用材料の諸元を表-2に示す。なお、定着材を介して、GFRPへ引張応力を効率的に伝達するため、鋼管内部には突起等の凹凸を付けた。形状については、溶接突起全周1列、溶接突起半周（3分割）×1列、2列、鋼管削り加工の4種類を検討した（写真-3）。

作成した供試体のパターンを表-3に示す。モルタル打設後、24時間で引張試験を行った。鋼管自体は継がずに縁切れしたケース（供試体①）についても試験を行った。

b) 載荷方法

引張試験装置を写真-4に示す。供試体にPC鋼棒を連結して、100tセンターホールジャッキで載荷した。

c) 計測項目

計測項目は以下の通りである。

- ・ 載荷引張荷重
- ・ 変位
- ・ 鋼管ひずみ
- ・ GFRPフラットバーひずみ

変位については、ジャッキの伸び量を接触式変位計で計測した。鋼管ひずみ、GFRPフラットバーひずみについては、供試体中間部（継手部）にひずみゲージを設置して計測した。

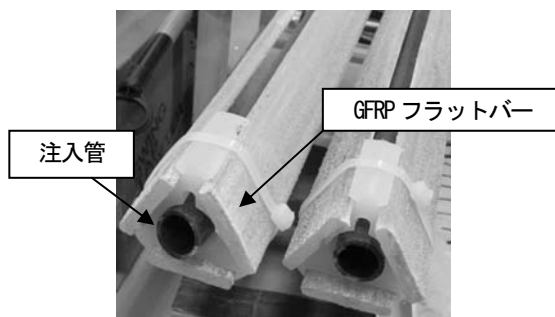


写真-1 GFRP 補強材（FILa System : SICS407）

表-2 使用材料諸元

	サイズ mm	弾性係数 kN/m ²	断面積 mm ²	引張り耐力	
				MPa	kN
鋼管 STK400	φ76.3 t=5.2	210×10 ⁶	1162	-	385 (継手部)
フラットバー GFRP	40×7 3本	40×10 ⁶	840	1000	840
	セメント	W/C (%)	Pポート (秒)	圧縮強度 (MPa)	
				1日	28日
充填材 モルタル	早強 セメント	61.1	14.7	14.4	41.8

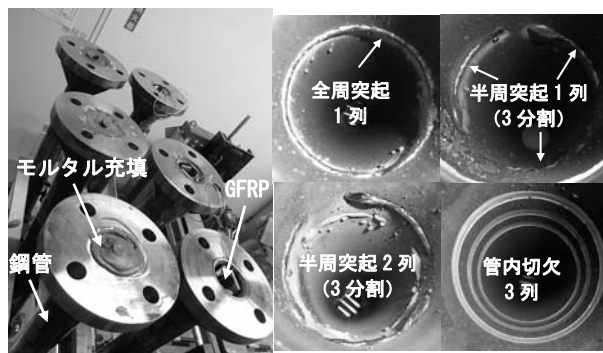


写真-2 供試体作成状況

写真-3 継手部管内加工状況

表-3 供試体種類

	継手	管内凹凸		継手	管内凹凸
①	なし (縁切れ)	なし	⑤		なし
②		なし	⑥		溶接突起全周1列
③	溶接継手	溶接突起半周1列	⑦	ネジ継手	溶接突起半周1列
④		溶接突起半周2列	⑧		溶接突起半周2列
			⑨		削り加工

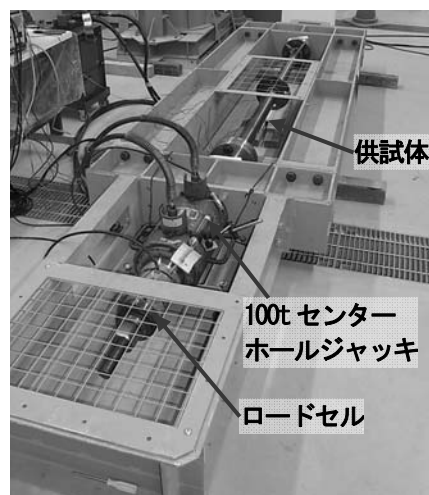


写真-4 引張強度試験状況

(3) 引張強度試験結果

引張強度試験結果を表-4に示す。いずれの供試体も鋼管継手破断後、GFRPの破断もしくはモルタルの引抜けにより破壊に至った。変位は供試体全体の引張変位である。

荷重-変位曲線を図-1に示す。GFRPフラットバーのみの場合に推定される荷重-変位曲線も表記する。

継手破断時の鋼管とGFRPの荷重配分を表-5に示す。測定したGFRPのひずみから負担荷重を逆算し、全体荷重からそれを除して鋼管の負担荷重を算出した。鋼管ひずみは鋼管の降伏や継手部の不連続性により測定値がばらついたため検討には使用していない。GFRPは破断までほぼ弾性挙動を示すことが知られており、GFRPのひずみから分担荷重を算出するのが妥当と考えた。鋼管およびGFRPの荷重-変位曲線の一例を図-9に示す。

表-4 引張試験結果

供試体	継手破断		GFRP破断		モルタル引抜け	
	変位	総荷重	変位	総荷重	変位	総荷重
①	0.0 mm	0 kN	-	-	9.8 mm	144 kN
②	12.9 mm	499 kN	40.0 mm	606 kN	-	-
③	13.9 mm	516 kN	90.2 mm	590 kN	-	-
④	15.1 mm	543 kN	54.4 mm	643 kN	-	-
⑤	15.8 mm	515 kN	-	-	25.1 mm	446 kN
⑥	13.1 mm	502 kN	92.4 mm	574 kN	-	-
⑦	11.4 mm	464 kN	-	-	100.0 mm	506 kN
⑧	13.9 mm	522 kN	41.3 mm	646 kN	-	-
⑨	12.8 mm	488 kN	-	-	31.5 mm	306 kN

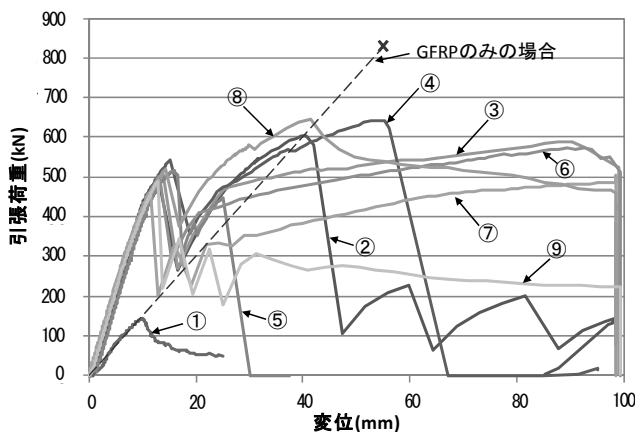


図-8 引張強度試験荷重変位曲線

表-5 継手破断時荷重配分

供試体	継手破断時荷重配分			
	変位	総荷重	鋼管	GFRP
①	0.0 mm	0 kN	0 kN	0 kN
②	12.9 mm	499 kN	395 kN	104 kN
③	13.9 mm	516 kN	366 kN	150 kN
④	15.1 mm	543 kN	365 kN	178 kN
⑤	15.8 mm	515 kN	-	-
⑥	13.1 mm	502 kN	300 kN	202 kN
⑦	11.4 mm	464 kN	270 kN	194 kN
⑧	13.9 mm	522 kN	294 kN	228 kN
⑨	12.8 mm	488 kN	297 kN	191 kN

(4) 考察

- ・ 充填モルタルと鋼管の付着強度は供試体①の結果より、150kN/m程度と考えられる。モルタルと鉄の付着強度の一般的な値から算出しても同等の値であった。
- ・ 継手破断強度は、溶接継手で500kN～540kN程度、ネジ継手で460kN～520kN程度となった。鋼管の負担荷重を見ると、溶接継手単体の破断は365kN～400kN、ネジ継手単体の破断が300kN程度で発生した。鋼管のみで行った引張強度試験結果(図-2)からすると、いずれも小さい値となった。今回は供試体を水平方向に引っ張ったため、断面内での偏荷重が掛かった可能性も考えられる。
- ・ 継手破断時のフラットバーの負担荷重は溶接継手で100～170kN、ネジ継手で190～230kNであった。鋼管継手破断時の変位分のひずみに弾性係数を掛けた値と同等もしくはそれ以上であった。ネジ継手では、ネジ山部分の多少の遊びが生じて、そのひずみ分の応力がGFRPに上乗せされると考えられる。(削り加工) < (溶接突起半周1列) < (溶接突起全周1列) < (溶接突起全周2列)の順で補強効果が大きくなった。
- ・ 継手破断後は、図-9に示す通り、全ての荷重がGFRPに作用している。そのため、内部突起なしの供試体②、⑤については、充填モルタルと鋼管の付着強度150kNで引き抜けることが予想されたが、それ以上の耐力を発揮した。原因としては、継手破断までの引張荷重により鋼管が周方向に収縮したため、鋼管内部が締め付けられることでフラットバーが拘束され、付着強度以上の引抜け耐力を発揮したと考えられる。内部突起を設置した場合には、付着力と突起による抵抗力が付加されて、さらなる耐力を発揮したと考えられる。継手破断時の鋼管負担荷重が大きい溶接継手の供試体は、フラットバーの拘束力がより強くなるため、モルタルが引き抜けることなくフラットバーの破断に至ったと考えられる。

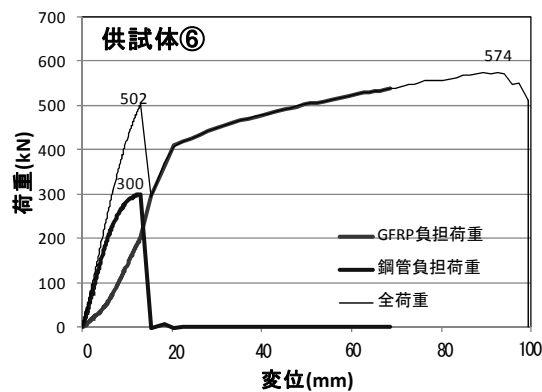


図-9 鋼管、GFRP 荷重分担状況

- ・内部突起を半周2列で設置した場合は、溶接継手、ネジ継手ともに 640 kN 程度の引張耐力を発揮することを確認した。
- ・フラットバーが破断した供試体の最大荷重は、600～640kN 程度となり、フラットバーの引張耐力 840kN よりも小さい値となった。原因として考えられるのは、引張荷重が鋼管からモルタルを介して伝達されるため、フラットバーの外側に引張荷重が集中したためと考えられる。
- ・ほとんどの供試体において、破断時の最大変位は、フラットバー単独の場合の許容変位を超える結果となった。複合構造にすることで、鋼管とモルタルもしくはモルタルとフラットバーの間で、少しずつずれが生じることで、最大引張耐力は GFRP 単体の場合から落ちるものの、許容変位は大きくなり、靱性が向上したものと考えられる。

6. おわりに

本報告では、新型鋼管鏡ボルトの引張耐力をさらに向上させる補強方法について記述した。引張耐力を400kNから640kN 程度まで向上出来ることを確認した。既往の研究より付着耐力も600kN/m 程度まで向上できることから、新型鏡ボルトは補強工法を併用することで図-10に示す範囲の高耐力を発揮できることが確認できた。従来の鏡ボルトと比較すると、引張、付着ともに最大2倍以上の耐力を発揮できる。そのため、押出しの大きい地山で破断なく抑制効果が得られる。また、従来の鏡ボルトを適用できる地山においても、打設本数を半分以上削減できるため、掘削後早期に切羽の安定を確保できると考えられると共に、コストも削減できる。

最大引張耐力の目標値700kNは、達成することがまだ出来ていない。そのため、さらなる改善が必要となる。改良の方法としては、内部突起形状の変更やGFRPフラットバーの増強などが考えられる。内部突起については、設置時の排泥の支障にもなるため、現場適用試験を行って、検証が必要である。

参考文献

- 1) 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.120~128, 2010
- 2) 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.64~65, 2009.
- 3) 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.
- 4) 高橋佳孝, 木梨秀雄: 高耐力鏡ボルトの支保効果に関する解析的検討, トンネル工学報告集, 第21巻, pp.169~174, 2011

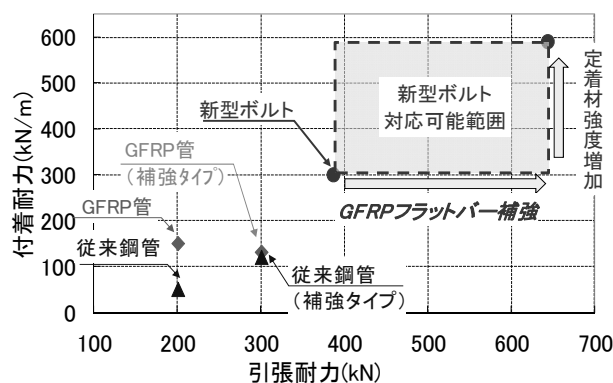


図-10 新型ボルト材料特性対応範囲

(2013.9.2受付)

Development of High Strength and High Toughness Face Bolt

Goro Iwata, Hideo Kinashi, Satoshi Ito, Koji Hata

Long face bolts are frequently used as the reinforcement of tunnel face. The bolts, made by GFRP pipe or steel pipe, are popularly used. However, tensile strength of screw joints of GFRP pipe and bond strength of steel pipe are low and the strength of the bolt is inevitably reduced as a result. Therefore, Takahashi etc. had newly developed a high-strength face bolt which have about 400kN tensile strength and 300kN/m bond strength. Then we found that more than 400kN tensile force can act on the face bolt under severe condition, so we conducted further improvement. In this report, the method of reinforcement of the new steel face bolt is described with results of tensile strength test.