

特集>>> トンネル

超長尺大口径鋼管先受け工法を用いた 地すべり区間のトンネル安定化対策工

LL-Fp 工法の開発と適用

山下 雅之・諏訪 至・塚田 純一

山岳トンネルの汎用掘削機械であるドリルジャンボでφ139.8mmの大口径鋼管を長区間打設する超長尺大口径鋼管先受け工法「LL-Fp工法（Long distance and Large caliber Forepiling method）」（以下、本工法）を開発し、地すべり跡地に位置する坑口部のトンネル安定化対策工として実現場に適用した。本工法は、切羽前方のトンネルアーチ部へ大口径鋼管を超長尺打設し、さらに鋼管から地山へ薬液を注入することで、掘削時のトンネルの変形抑制・切羽安定を図る補助工法の一つである。本報告では、本工法の概要について述べるとともに、実現場への適用事例を紹介する。

キーワード：山岳トンネル、補助工法、長尺鋼管先受け工法、大口径鋼管、ドリルジャンボ

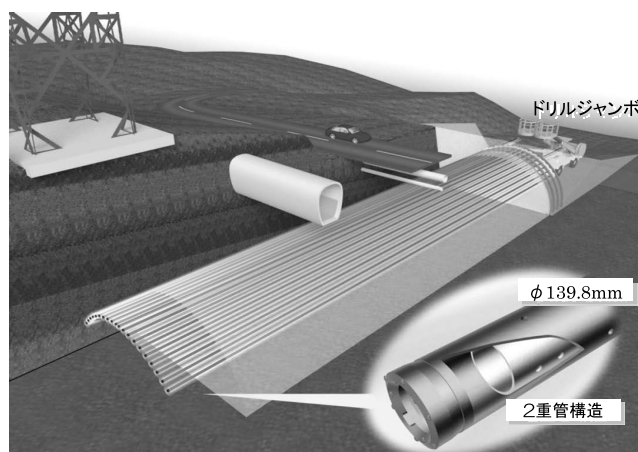
1. はじめに

山岳トンネルにおいて、掘削時のトンネル変形・沈下抑制を目的としたトンネル安定化対策工の一つに長尺鋼管先受け工法（AGF工法）がある。AGF工法は、削岩機が搭載された施工機械のドリルジャンボでL=12.5mの鋼管（φ114.3mm）を複数シフト打設するのが一般的であるが、更なる変形・沈下抑制、加えて工期・工費縮減を目指し、1シフトが20mを超える超長尺鋼管打設の実施事例も増えている。超長尺鋼管先受け工法の適用検討にあたり、さらに要求条件の厳しい地山の変形・沈下抑制対策が必要な場合には、剛性のより高い大口径鋼管（たとえばφ139.8mm）を打設するパイプルーフ工法等の特殊工法が採用される。しかし、特殊工法を実施するためには専用の削孔機械や作業員を別途準備する必要があるため、施工効率の低下やコスト増加に加えて工程の長期化は避けられない。

このような背景から、AGF工法と同様にドリルジャンボを使用して大口径鋼管を簡便かつ迅速に超長尺打設する手法を開発した¹⁾。本稿では、開発工法の概要を紹介するとともに、実施工への初適用となった地すべり区間に対する補助工法としての施工事例を紹介する。

2. 本工法の概要および特徴

本工法は、ドリルジャンボを使用した大口径鋼管（φ

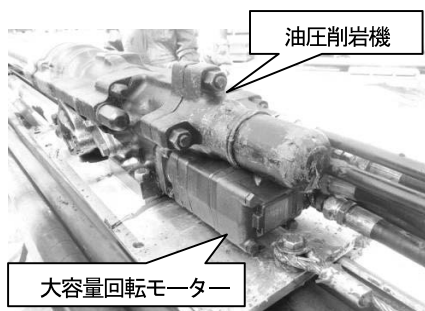


図—1 工法のイメージ図

139.8mm）の超長尺打設および鋼管からの地山注入により、高い沈下抑制・切羽安定効果を発揮するものであり（図—1）、専用の削孔機を使用する従来工法と比較して低コスト・工期短縮が期待される。以下に本工法の特徴を示す。

（1）削岩機的能力向上

ドリルジャンボに標準装備されている削岩機を使用して大口径かつ長尺の削孔を実施するにあたり、回転トルク不足が懸念された。そこで、本工法では標準装備されている回転モーターの3倍程度の容量を有する大容量回転モーターを導入するとともに油圧回路も改良し、最大回転トルクを標準型の4.5倍程度（1,000 N・m以上）にまで増加させた（写真—1）。



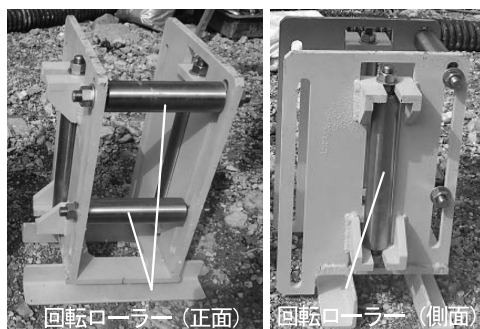
写真一 大容量回転モーター

(2) 専用ビットの開発

ドリルジャンボによる大口径鋼管打設が可能な専用のロストリングビット（ $\phi 147$ mm）およびインナービット（ $\phi 85$ mm）を新たに製作した。

(3) 鋼管打設精度の向上

油圧削岩機を用いた鋼管打設では、削孔中に打設鋼管の方向制御を行うことは非常に困難である。本工法では、写真一2に示すような特殊鋼管受け治具を使用して大口径鋼管を所定の進行方向に固定することにより、打設精度の向上を図った。特殊鋼管治具は、写真一2に示すように鋼管を4方向から回転ローラーで把持する構造とし、固定性向上と摩擦抵抗の低減を実現した。本治具の使用状況を写真一3に示す。



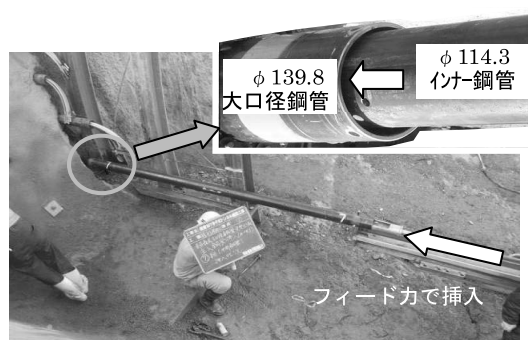
写真二 特殊鋼管受け治具



写真三 特殊鋼管受け治具使用状況

(4) 作業性を考慮した二重鋼管構造

従来工法で使用される $\phi 139.8$ mmの大口径鋼管は鋼管肉厚が最大11 mmとなる。その場合、約3 mの鋼管重量は100 kgを超過するため、鋼管継ぎ作業を人力で行うのは非常に困難となる。そこで本工法では、より軽量な肉厚6.6 mmの大口径鋼管を採用し、人力による鋼管継ぎ作業を可能とした。また、写真一4に示すように、大口径鋼管の内部に $\phi 114.3$ mmのインナー鋼管（肉厚6 mmのAGF鋼管）を削岩機のフィード力を利用して挿入した二重鋼管構造とすることにより、鋼管肉厚11 mm相当の曲げ剛性を確保した（表一1）。



写真四 インナー鋼管挿入状況

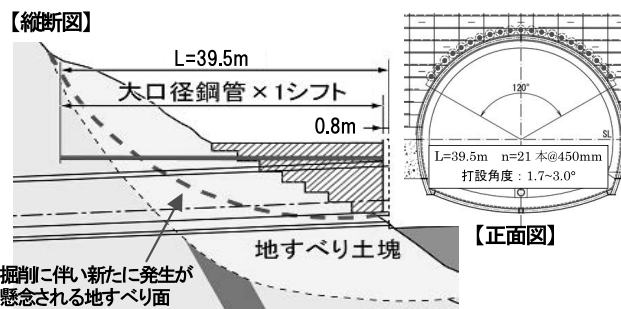
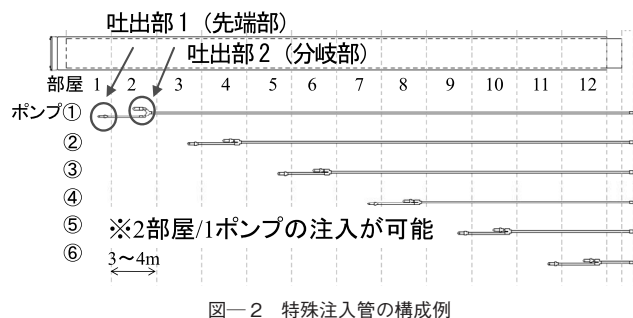
表一1 鋼管の曲げ剛性（断面二次モーメント）

	鋼管径 (mm)	肉厚 (mm)	曲げ剛性 (断面二次モーメント) (cm^4)
AGF 工法	114.3	6.0	300
従来工法	139.8	11.0	930
本工法	139.8	6.6	914
	114.3	6.0	

(5) 超長尺区間に対応した注入システム

本工法の地山注入はシリカレジン注入を標準としている。AGF 工法等の鋼管先受け工法におけるシリカレジン注入では通常、3～4 m 毎に注入区間（部屋）をパッカー等で分割して各区間からほぼ同時に地山注入する。この方法に従うと、例えば約40 mの超長尺区間への適用では12部屋の同時注入となり、ポンプも12台必要となる。ただし、その場合には12本以上の注入管を $\phi 114.3$ mmのインナー鋼管（内径102.3 mm）内に挿入する必要があるため、この手法を超長尺区間に適用するのは困難であった。

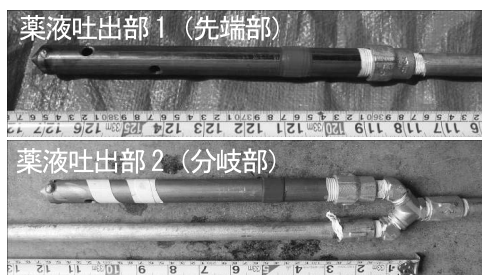
そこで本工法では、図一2、写真一5に示すような注入材の吐出部を2ヵ所に分岐させた特殊注入管（DSチューブ）を新たに製作し、1台のポンプで同時に2部屋の注入を可能とした。これにより、ポンプ台数お



ら地すべり土塊背面の安定地山までの区間（ $L = 39.5 \text{ m}$ ）に適用した（図-3）。

(2) 適用状況

本トンネルでは、トンネルアーチ部 120° 範囲内の 21 ヲ所において、 $L = 3.0 \sim 3.5 \text{ m}$ の大口徑鋼管を継ぎ足しながら所定の 39.5 m まで $1.7 \sim 3.0^\circ$ 上向きに打設した（打設範囲は図-3 参照）。さらに、より一層の沈下抑制効果を得るため、 39.5 m の鋼管打設後に即時注入する手法（1 孔即時注入）を採用した。写真



よび注入管数の半減が実現した。また、長距離注入時や複雑な構造の二重管内における閉塞リスクを低減させるため、ゲルタイムが 180 sec の低粘性薬液を採用した。

3. 現場適用事例

(1) 適用トンネルの概要と適用経緯

本工法を適用したのは、新潟県に建設中の延長約 952 m の道路トンネル（国道 289 号 八十里越 7 号トンネル）である。本トンネルでは、終点側坑口およびその周辺に地すべり土塊が分布しており、掘削による地すべり土塊の再活動やトンネルの不安定化が懸念されていた。その対策工の一つとして、本工法を坑口か

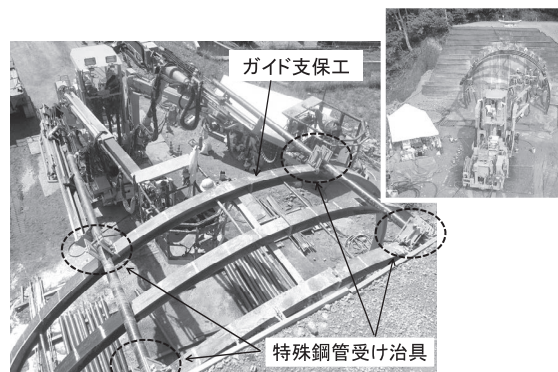


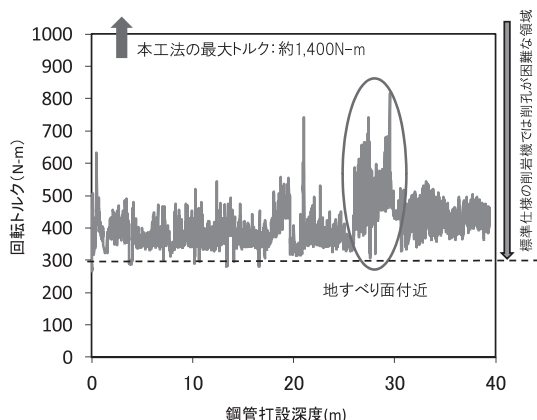
写真-7 代表的な作業項目とその流れ

—6に鋼管打設状況を、写真—7に代表的な作業項目とその流れを示す。写真に示すように、使用する部材等は若干異なるものの、施工の流れは従来の長尺鋼管先受け工法と大きく変わらない。ただし、スライム除去やインナー鋼管挿入等、若干作業工程が新たに加わっている。

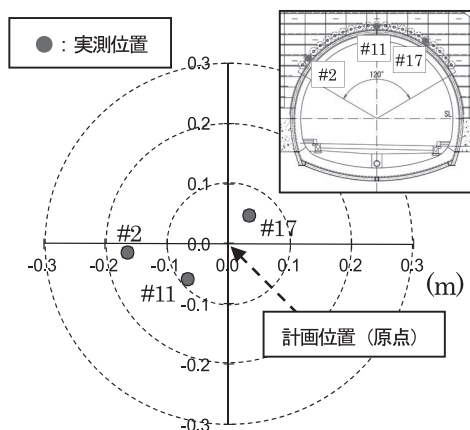
(3) 適用結果

(a) 鋼管打設および地山注入実績

今回の施工で大口径鋼管 ($L = 39.5$ m) を 21 本打設したが、懸念された削岩機的能力不足は発生しなかった。図—4に大口径鋼管打設時の回転トルクの挙動の一例を示す。図に示すように、全区間にわたって標準仕様の削岩機では削孔が困難な回転トルク領域 (300 Nm 以上) を示しており、地すべり面付近では 800 Nm 程度までの上昇が認められた。本工法では装備回転トルクを 1,000 Nm 以上にまで増加させていたため、安定した鋼管打設を行うことができた。今回の施工では、鋼管打設精度を確認するためにトンネルセンターおよび左右肩部の 3 か所において鋼管の孔曲り計測を実施した (図—5)。図のように、39.5 m の鋼管打設において計画位置との“ずれ”はいずれも



図—4 大口径鋼管打設時の回転トルクの挙動



図—5 鋼管打設精度計測結果 (深度 39m 付近)

20 cm 以内という結果が得られており、1/200 以上の精度を確保することができた。また、インナー鋼管挿入後に実施した地山注入では、薬液の閉塞等のトラブルもなくすべての個所において所定量 (403 kg/本) の薬液を注入することができた。

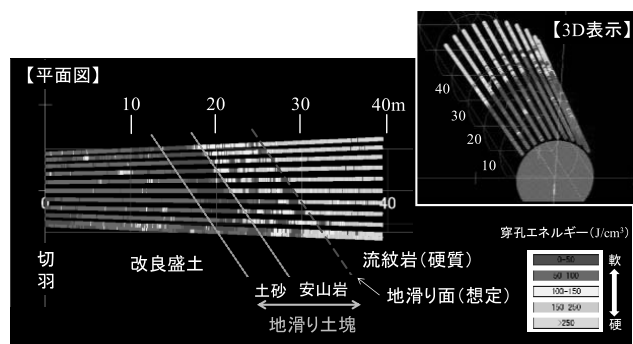
実施当初は作業上の不慣れやインナー鋼管挿入時のトラブルにより作業が遅延する状況も見られたが、最終的には 5.8 日 (昼夜換算, 平均サイクル: 約 1.9 本/1 方) で全工程を終了させることができた。これは、当初計画されていた AGF 工法 (4 シフト) と比較して約 30% の工程短縮となっている。表—2 に 2.0 本/1 方のサイクルを標準とした場合の各作業時間の内訳を示す。

表—2 標準的な施工サイクル (2.0 本/1 方/2 ブーム)

	作業項目	時間 (min)	備考
準 備	準 備	30	
	鋼管受け設置・移動		
	大口径鋼管セット		
	先行削孔		
鋼管打設	大口径鋼管打設	300	鋼管接続含む
	削孔ロッド引抜き	60	粗孔掃除含む
	スライム除去	30	
	インナー鋼管挿入	60	鋼管接続含む
注 入	特殊注入管挿入	30	口元コーキング含む
	注 入	30	
	計	540	

(b) 削孔データによる地すべり面の可視化

今回の適用では、鋼管打設時の削孔データを収集・解析し、本工法適用区間の地山性状の定量評価を試みた。図—6に削孔データから求めた鋼管打設区間の穿孔エネルギー分布を示す。穿孔エネルギーは単位体積の岩盤を削孔するのに削岩機が要した仕事量を示しており、この値が小さいほど脆弱な岩盤であると評価される。図のように、深度 30 m 付近において硬質地山と脆弱地山 (地すべり土塊) の境界を地すべり面として明瞭に識別することができた。また、地すべり面

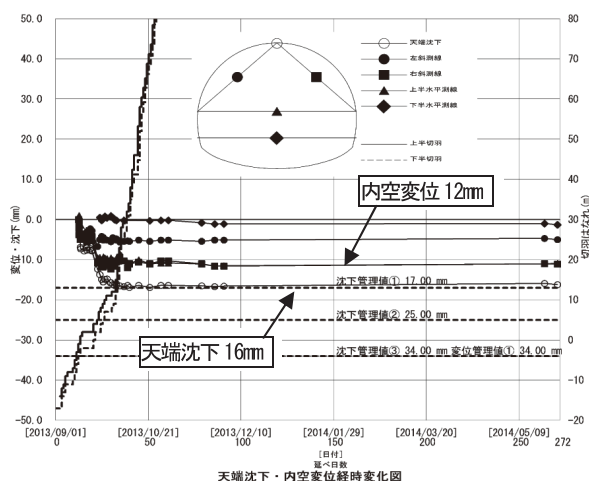


図—6 削孔データによる地山評価結果

背面の安定地山に対する鋼管打設長は 10 m 以上に達しており、鋼管の根入れが十分であることも定量的に評価することができた。

(c) トンネル掘削時の変形抑制効果

掘削時のトンネル変形挙動に関しては、改良盛土区間と地すべり土塊区間ともに大きな変形は発生せず、図一7に示すように最大 16 mm 程度（天端沈下量）であった。また、地表面沈下も 3～5 mm 程度と小さく、本工法の適用によりおおむね安定して地すべり区間の掘削を行うことができた。



図一7 掘削時のトンネル変形挙動 (TD17m)

4. おわりに

今回開発した汎用機のドリルジャンボを使用した超長尺大口径鋼管先受け工法（LL-Fp 工法）を地すべり区間のトンネル変形抑制工法として実施工に適用、施工性およびその効果を確認することができた。今後も本工法の更なる改良を継続し、実工事への積極的な活用を進めていく予定である。

J C M A

《参考文献》

- 1) 山下他：ドリルジャンボを使用した超長尺大口径鋼管先受け工法の開発，第 68 回土木学会年次学術講演会，VI -408，pp.815-816，2013

【筆者紹介】

山下 雅之（やました まさゆき）
西松建設(株)
技術研究所 土木技術グループ
上席研究員



諏訪 至（すわ いたる）
西松建設(株)
土木事業本部 土木設計部 設計二課
係長



塚田 純一（つかだ じゅんいち）
ドリルマシン(株)
技術部 技術サービス課
課長

