

超長尺大口径鋼管先受け工法（LL-Fp 工法）の開発と現場適用事例

西松建設 正会員 ○山下 雅之
西松建設 柳沢 一俊
西松建設 諏訪 至

1. はじめに

既設道路や地中構造物等の直下に山岳トンネルを掘削する際、それに伴う地山の変形・沈下がこれらの既設構造物に重大な影響を及ぼすおそれがある。このような場合、周辺環境の保全を目的とした補助工法として長尺鋼管先受け工法（AGF 工法）が採用されることが多い。

AGF 工法は、削岩機が搭載された施工機械であるドリルジャンボで $L=12.5\text{m}$ の鋼管（ $\phi 114.3\text{mm}$ ）を複数シフト打設するのが一般的である。また、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 $\phi 139.8\text{mm}$ ）を打設する特殊工法が採用される。しかし、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（LL-Fp 工法）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の掘削に対する補助工法としての施工事例を紹介する。

2. LL-Fp 工法の概要

LL-Fp 工法（Long distance and Large caliber Forepiling method）は、ドリルジャンボを使用した大口径鋼管（ $\phi 139.8\text{mm}$ ）の超長尺打設および鋼管からの地山注入により、掘削時のより高い沈下抑制・切羽安定効果を期待するものである（図－1）。本工法は、通常のトンネル施工機械の使用により、専用の削孔機を使用する従来工法と比較して低コスト・工期短縮を実現した。

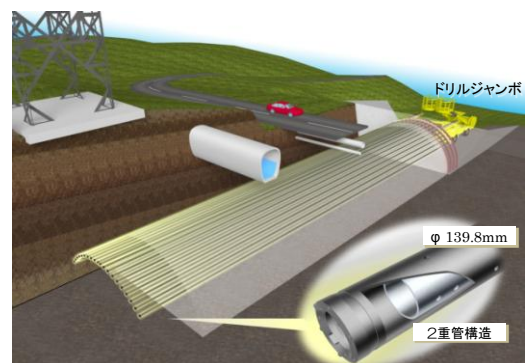
本工法における開発の要点を以下に示す。

（1）削孔能力の向上

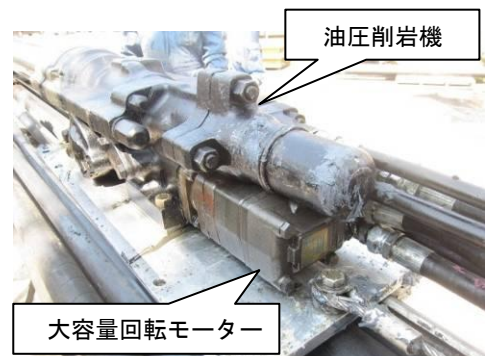
大口径鋼管の長尺打設に必要な削岩機の回転トルクを確保するため、標準仕様の 3 倍程度の容量を有する大容量回転モーターを導入するとともに、回転油圧回路も改造し、最大回転トルクを標準仕様の 4.5 倍程度（約 $1,400\text{N}\cdot\text{m}$ ）まで増加させた（写真－1）。

（2）2 重管構造の採用

トレヴィチューブ工法などの専用削孔機を使用した従来の大口径鋼管先受け工法で使用されている鋼管の



図－1 LL-Fp 工法



写真－1 大容量回転モーター

キーワード 鋼管先受け工法，大口径鋼管，ドリルジャンボ

連絡先 〒105-8401 東京都港区虎ノ門 1-20-10 西松建設株式会社 技術研究所 TEL 03-3502-0279

肉厚は最大 11mm 程度であるが、本工法では鋼管接続時の作業性を考慮してより軽量の肉厚 6.6mm の鋼管を採用した。鋼管剛性は、打設後の大口径鋼管内に $\phi 114.3\text{mm}$ のインナー鋼管（肉厚 6mm）を削岩機のフィード力を利用して挿入した 2 重鋼管構造として、鋼管肉厚 11mm 相当の曲げ剛性を確保した（表－1）。この AGF 鋼管にはスペーサーを設けており、挿入後に大口径鋼管と管芯が一致するよう配慮した。なお、挿入されたインナー鋼管は、地山注入時にインサート管を挿入するための注入鋼管としての役割も有する。また、大口径鋼管打設後の鋼管内スライムを確実に除去するために、写真－2 のようなスライム除去治具（孔口へ向かって高圧噴射しスライムを除去）を開発した。

（3）特殊鋼管受け治具による打設精度の向上

鋼管の打設時には、ガイド支保工に設置した特殊治具（特殊鋼管受け治具）で大口径鋼管を所定の打設方向に固定することにより打設精度の向上を図った。写真－3 に示すように、この治具は 4 方向から鋼管を固定する構造である。また、鋼管を固定する高さを自由に調節する機能も有しており、打設角度を容易に設定することができる。

（4）長尺区間に対応した注入システム

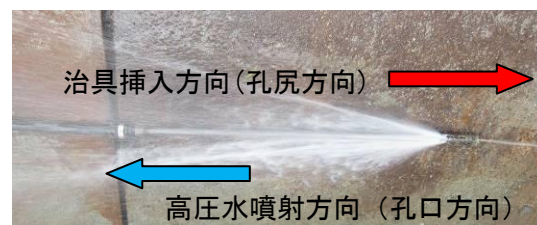
本工法の地山注入はシリカレジン注入を標準としている。AGF 工法等の鋼管先受け工法におけるシリカレジン注入では通常、3～4m 毎に注入区間（部屋）をパッカー等で分割して各区間からほぼ同時に地山注入する。この方法に従うと、例えば約 40m の超長尺区間への適用では 12 部屋の同時注入となり、ポンプも 12 台必要となる。また、12 本以上の注入管を $\phi 114.3$ インナー鋼管（内径 102.3mm）内に挿入する必要があるため、この手法を超長尺区間に適用するのは困難である。

そこで本工法では、図－2、写真－4 に示すような注入材の吐出部を 2 ヶ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、ポンプ台数および注入管数の半減が実現した。また、長距離注入時の閉塞リスクを低減させるため、ゲルタイムが 180sec の低粘性薬液を採用した。

これら部材および薬液の適用性を確認するため、長距離注入を模擬した室内試験を実施した。特殊注入管を使用した吐出試験では、2 ヶ所の吐出部から等量の薬液が吐出される孔径および孔数の最適な組み合わせを確認

表－1 鋼管の曲げ剛性（断面二次モーメント）比較

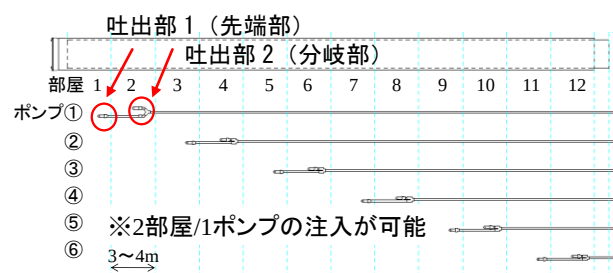
	鋼管径 (mm)	肉厚 (mm)	曲げ剛性 (断面二次モーメント) (cm^4)
AGF 工法	114.3	6.0	300
従来工法	139.8	11.0	930
本工法	139.8	6.6	914
	114.3	6.0	



写真－2 スライム除去治具



写真－3 特殊鋼管受け治具



図－2 特殊注入管（DS チューブ）



写真－4 薬液吐出部



写真－5 薬液吐出試験状況

した（写真－５）．模擬土層による注入試験では，水締したマサ土中にインナー鋼管を挿入した延長 6.0m の大口径鋼管（２部屋分の鋼管長を想定）を埋設し，インナー鋼管内に挿入した特殊注入管から前述の低粘性薬液を 7.0～9.0kg/min の速度で２カ所の吐出部から土層へ合計約 70kg 注入した．写真－６に示すように，複雑な二重管構造であっても薬液が大口径鋼管から模擬土層中に問題なく注入されることを確認した．

３．実施工への適用

（１）適用トンネルの概要

- ・工事名称： 国道 289 号 7 号トンネル工事
- ・施工場所： 新潟県三条市（図－３参照）
- ・発注者： 国土交通省北陸地方整備局
- ・トンネル延長： 約 952m
- ・掘削断面： 55.1m²（CⅡ-b-B 断面）
- ・掘削方式： 機械掘削および発破掘削（NATM）

（２）適用経緯

本トンネルでは，入札時の技術提案に坑口部の地すべり区間における補助工法に関する工夫が求められた．標準案では地すべり区間（L=37m）に対して AGF 工法を 4 シフト施工する計画であったのに対し，より効果的な連続したアーチ状改良体形成が期待できる方法として「LL-Fp 工法による超長尺大口径鋼管打設（1 シフト）」を提案した（図－４参照）．

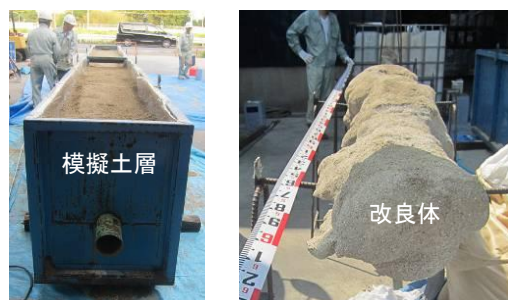
（３）適用方法および施工状況

本トンネルにおける LL-Fp 工法では，トンネルアーチ部 120°範囲内の 21 ヲ所において，L=3.0～3.5m の大口径鋼管を継ぎ足しながら所定の 39.5m まで 1.7～3.0°上向きに打設した（図－５）．また，より一層の沈下抑制効果を得るため，39.5m 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．図－６に示すように，使用する部材等は若干異なるものの，施工手順は従来の超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．写真－７に大口径鋼管打設の状況，写真－８に代表的な作業項目の施工状況を示す．

（４）適用結果

①回転トルクの挙動

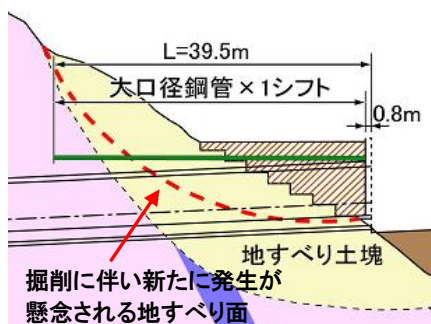
大口径鋼管打設時の回転トルクの挙動（右肩孔）を図－７に示す．図に示すように，全区間にわたって標準仕様の回転モーターの上限範囲での打設が続いている．とくに地すべり面に相当する深度 26～30m 付近ではその



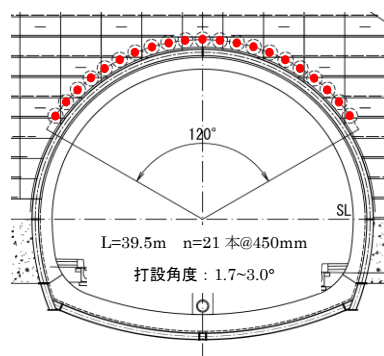
写真－６ 模擬土層による注入試験状況



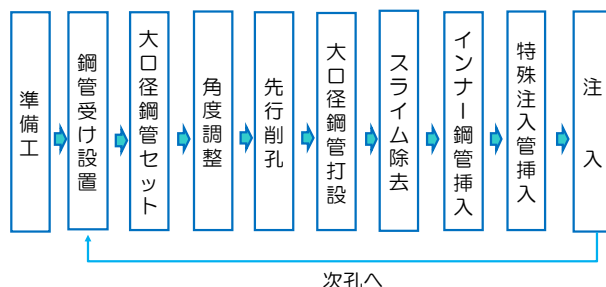
図－３ 適用トンネル位置図



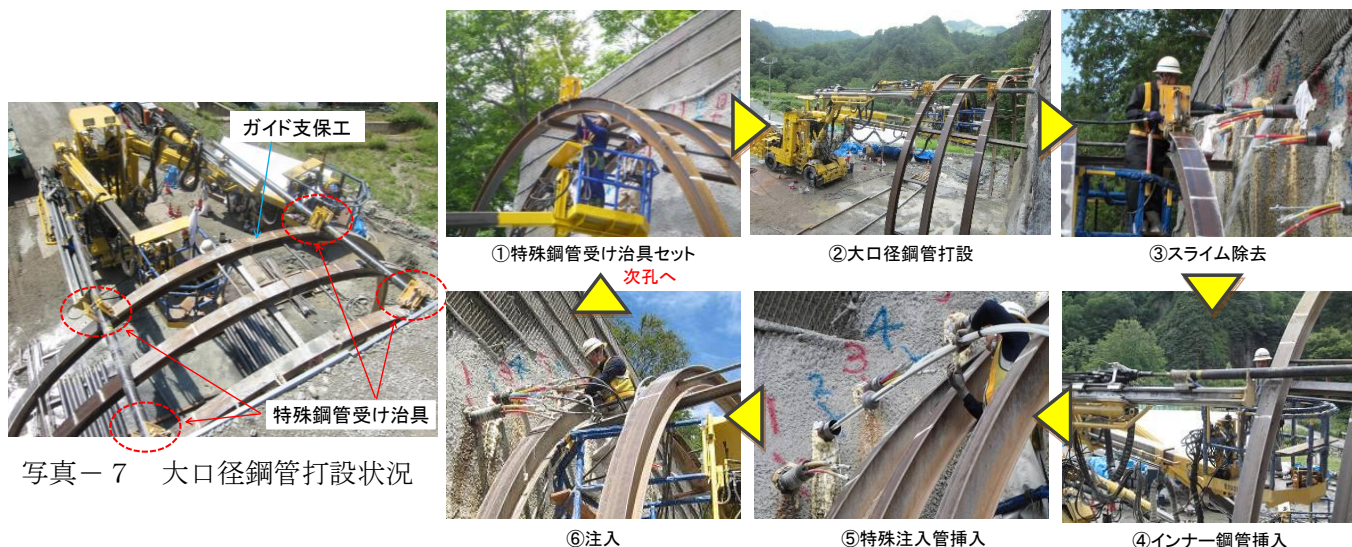
図－４ 地すべり区間（坑口部）への適用方法



図－５ 大口径鋼管打設レイアウト（正面図）



図－６ 施工フロー（1孔即時注入の例）



写真－7 大口径鋼管打設状況

写真－8 代表的な作業項目の施工状況（1孔即時注入）

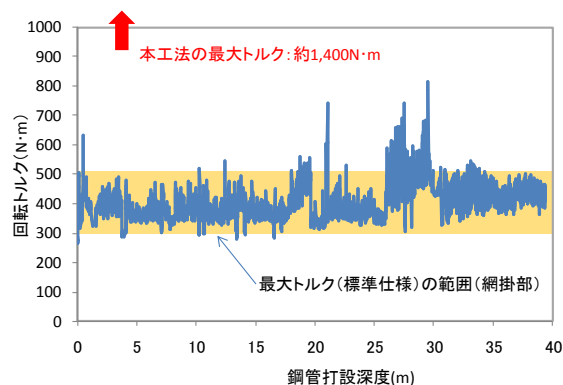
上限範囲を大きく超過しており、標準仕様では打設が困難であったと推察される。しかし、その値は本工法で使用する大容量回転モーターの上限トルクの半分程度に相当するため、問題なく打設することができた。

②鋼管打設精度

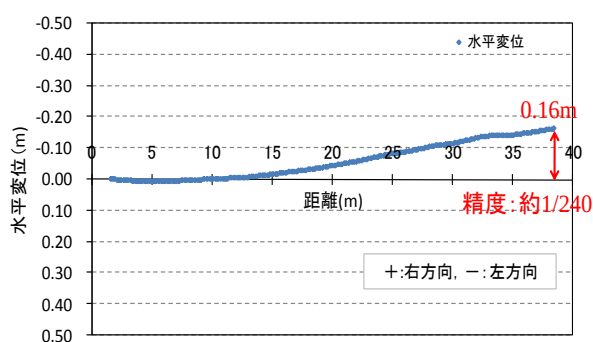
打設鋼管 21 本のうち、左右肩部およびセンター部の 3 ヶ所において鋼管の孔曲がり計測した。図－8 にセンター孔（水平方向）の計測結果を示す。図のように、孔尻地点の変位はわずか 16cm（精度約 1/240）となっており、今回の実施工に先立ち他現場で行なった約 40m の鋼管打設試験の精度（約 1/200）よりも良好な結果が得られた。なお、その他の地点の計測結果は何れも水平・鉛直方向変位ともに 5cm 以下という結果が得られており、更に良好な鋼管打設精度が得られている。今回の実施工で精度が向上した理由については、地質性状の違い等、様々な要因が考えられるが、鋼管受け治具の改良効果も大きかったと考えられる。

③削孔データによる地山評価

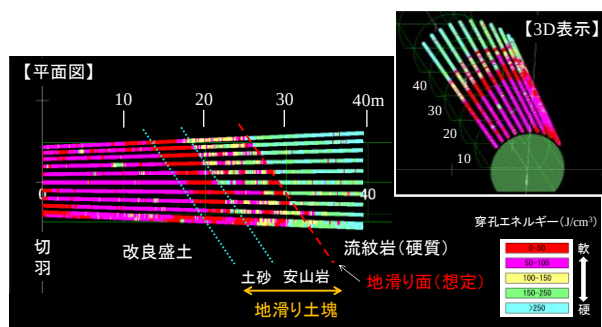
今回の施工では鋼管打設時の削孔データを穿孔探査装置（DRISS）で計測・解析し、地すべり面の 3 次元分布状況や不動層への鋼管の根入れの確実性も併せて評価した。図－9 に DRISS の結果を示す。図中の色パターンは暖色系になるほど脆弱な地山を示す。探査の結果、深度 30m 付近において硬質な地山（流紋岩）と脆弱な地山（変質した安山岩）の境界が地すべり面（図中の赤破線）として明瞭に識別された。また、鋼管の流紋岩削孔区間は 10m 以上に達しており、鋼管の根入れも十分であることも定量的に評価できた。



図－7 大口径鋼管打設時の回転トルクの挙動



図－8 鋼管打設精度計測結果



図－9 DRISS による地山評価結果

④注入結果

今回のように約 40m 区間にもおよぶ長距離区間のシリカレジン注入の実施例はなく、注入に際して長距離圧送中の薬液反応・管閉塞が懸念された。そこで、先に述べた長距離注入を模擬した室内試験の結果を参考に、ゲルタイム 180sec の低粘性タイプの薬液を 7.0kg/min の速度で注入することとした。その結果、注入時の閉塞等の大きなトラブルもなく 21 本すべてにおいて所定量（403kg/本）を無事注入することができた。

⑤施工サイクル実績

LL-Fp 工法の施工実績を表－2に示す。施工初期段階（表中の4日目の昼勤まで）において、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大幅に遅延する状況も見られた。鋼管接続作業の慣れやスライム除去治具の改良により上述の問題が解決されてからはほぼ 2.0 本/1 方以上のサイクルで施工し、最終的には 5.8 日（昼夜換算、平均サイクル：約 1.9 本/1 方）で全工程を終了することができた。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－3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。なお、本工法は AGF 鋼管の 2 倍程度の曲げ剛性で良い場合には、インナー鋼管の挿入を省略することができ、サイクルもその分短くなる。また、今回のサイクルは 1 孔即時注入によるものであり、通常の AGF 工法のように奇数孔・偶数孔をそれぞれまとめて注入する手法を採用した場合には更なるサイクル短縮が見込まれる。

⑥トンネル掘削時の変形挙動

LL-Fp 工法を適用した終点側坑口位置から約 19m の区間は、一軸圧縮強度が 1N/mm²程度のソイルセメントによる押え盛土（改良盛土）のトンネル掘削であった。また、その後の約 10m 区間は、地すべり土塊の掘削であった（図－9 参照）。両区間においては、LL-Fp 工法に加えて長尺鏡ボルトを施工し、全断面掘削・早期閉合による掘削工法を採用した。ソイルセメント盛土中のトンネル掘削において切羽は安定していたものの、地すべり土塊に入ると湧水を伴って切羽がやや不安定化する場合もあり、軽微な肌落ちが発生することもあった。しかし、LL-Fp 工法を適用した区間では、後述する様に、計測結果による変位量や地表面沈下も小さく、おおむね安定してトンネル掘削を行うことができたと評価できる。

LL-Fp 工法を適用した区間では、トンネル直上の地表面沈下の計測結果は、改良盛土区間と地すべり土塊区間とを比較しても大きな差異は無く、両区間の地表面沈下量はおおむね 3～5mm 程度と微小であった。A 計測工の天端沈下に関しては、地表面沈下計測の結果と同様に、ソイルセメント区間と地すべり崩積土区間とを比較しても大きな差異は無く、LL-Fp 工法を適用した両区間では最大 15mm 程度であった。一方、内空変位（上半水平測線）は、改良盛土区間では 3mm 程度、地すべり土塊区間では 5～12mm 程度であり、後者の方が若干大きい結果になったものの、工学的に有意な差異であるとは考え難いものであった。また、地すべり土塊に設置した傾斜計と伸縮計についても、軽微な変動は見られたものの管理基準値に比較して十分小さいものであり、地すべり土塊の安定性を損なう挙動は確認できなかった。

表－2 施工実績（D：昼勤，N：夜勤）

		■準備～大口径鋼管打設 ■インナー鋼管挿入 ■特殊注入管挿入 ■注入																				
孔番号⇒		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1	D																					
	N																					
2	D																					
	N																					
3	D																					
	N																					
4	D																					
	N																					
5	D																					
	N																					
6	D																					
	N																					
7	D																					
	N																					
8	D																					
	N																					

表－3 標準施工サイクル（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	

4. まとめ

本論のまとめとして、LL-Fp 工法の実施工への適用で得られた成果を以下に列挙する。

- L=39.5m, n=21 本の大口径鋼管を汎用機であるドリルジャンボを使用して精度よく打設できた（鋼管打設精度：1/240 以上）
- 前例のない 39.5m にも及ぶ超長尺区間のシリカレジン注入を問題なく実施できた
- 後述の施工初期トラブルを含めても約 1.9 本/1 方（2 ブーム使用）のサイクルで施工できた
- 地すべり区間掘削時の変形を最大 15mm 程度（沈下）に抑制し、概ね安定して掘削することができた

その一方で、いくつかの課題も明らかになった。大口径鋼管の継ぎ足しは作業スペースの問題もあり、作業員 1 名で行なった。ただし、その重量は約 70kg に達するため、施工当初は作業員の手作業で管芯を合わせて接続するのにかなりの時間を要した。また、施工初期にはインナー鋼管がうまく挿入できないトラブルも発生した。これは大口径鋼管内のスライムが十分除去されなかったことが原因と考えられた。当初用意したスライム除去治具は水压を優先させたタイプであったが、それでは本トンネルに分布する硬質な流紋岩スライムを十分に排出させることができなかった。そこで、現場において噴射水量を増加させた治具に改良したところスライムの排出がスムーズとなり、インナー鋼管挿入時のトラブルが解消できた。これらのトラブルは本工法の施工サイクルに大きな影響を及ぼすものであるため、現在、作業の効率化・確実性の向上に向けた治具の開発を進めている。

今回の適用トンネルは約 5% の下り勾配であったため、深度 30m 付近の地すべり面出現地点周辺における打設鋼管とトンネルの離れが約 3.0m に達した。その周辺では、小規模の崩落が一部認められたため、注入式フォアポーリングを一部併用した。このように 5% を超えるような下り勾配のトンネルに本工法を適用する際には、最適なシフト長の設定やフォアポーリングとの組合せの可否について事前に十分検討しておくことが望ましい。

5. おわりに

新たに開発した超長尺大口径鋼管先受け工法（LL-Fp 工法）を地すべり区間の補助工法として実施工に初適用し、その施工を無事終えることができた（写真－9）。また、その後の掘削ではおおむね安定してトンネル掘削を行うことができた。

本技術は今回のような地すべり区間の安定化対策以外にも、道路直下に坑口がある場合の地表面沈下抑制対策、水路等の重要構造物との近接施工時における変形抑制対策や大口径鋼管を利用した水抜きポーリングへの適用等が可能であり、技術提案への積極的な活用が期待できる。また、本工法については坑内からの実施に向けた検討を進めており、適用性の更なる拡充を目指した工法改良を今後も継続していく予定である。



写真－9 施工完了状況

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