地すべり跡地の坑口部における超長尺大口径鋼管先受け工法（LL-Fp 工法）の適用

Application of Long distance and Large caliber Forepiling method “LL-Fp method” to tunnel portal section located within landslide area

山下　雅之*
Masayuki Yamashita
石山　宏二*
Koji Ishiyama
亀谷　英樹**
Hideki Kameya
諏訪　至***
Itaru Suwa
河原　博***
Hiroshi Kawahara
柳沢　一俊***
Kazutoshi Yanagisawa

要　約

超長尺大口径鋼管先受け工法「LL-Fp 工法」は，山岳トンネルの施工機械であるドリルジャンボを使用して ϕ139.8 mm の大口径鋼管を切羽前方のトンネルアーチ部へ超長尺打設し，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．専用の削孔機を必要とする従来工法と比べて大幅な工程短縮・コスト縮減が期待される．

今回，地すべり跡地の坑口部（L＝39.5 m 区間）において，トンネルおよび地山の安定対策として本工法を初適用し，高い鋼管打設精度（1/240 以上）や当初計画していた他工法（AGF 工法）に比べて約 30％の工程短縮等の施工実績が得られた．その後のトンネル掘削では，懸念されたトンネル変形も問題なく，安定した掘削を行うことができた．

目　次

§1. はじめに
§2. LL-Fp 工法の概要
§3. 実施工への適用
§4. 成果と課題
§5. おわりに

§1. はじめに

山岳トンネルを既設道路や地中構造物等の直下で掘削する際，トンネル掘削に伴う地山の変形・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 m の鋼管（ϕ114.3 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 20 m 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 ϕ139.8 mm）を打設するパイプルーフ工法が採用される．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，昨年度，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

開発した工法（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（ϕ139.8 mm）の超長尺打設および鋼管か

* 技術研究所土木技術グループ
** 土木設計部
*** 関東土木（支）八十里トンネル（出）

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．

2—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（1,000 N·m 以上）まで増加させた．

図—2 は LL-Fp 工法開発段階で実施した約 40 m の大口径鋼管長尺打設試験における回転トルクの挙動である．図中の網掛け部は標準仕様の回転モーターを使用した場合の最大トルクの範囲（300～500 N·m）を示す．図のように，全区間において回転トルクは概ね 400～600 N·m の範囲を示しているが，局所的に 600 N·m を越える個所も認められた．また，標準仕様の最大トルクの範囲を超える区間も多いことから，標準仕様での大口径鋼管打設は困難であったと考えられる．LL-Fp 工法では削岩機の改良により最大回転トルクを 1,000 N·m 以上に増加させていたため，大口径鋼管打設に伴う回転トルクの不足も生じず，L＝40 m の鋼管を無事打設することができた．

2—2 専用の削孔ビットの採用

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（ϕ147 mm）およびインナービット（ϕ85 mm）を新たに製作した（**写真—1**）．

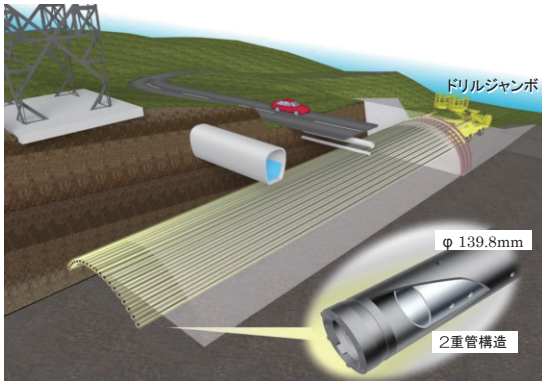
2—3　2 重鋼管構造の採用

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工法で使用されている大口径鋼管の肉厚は最大 11 mm 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な肉厚 6.6 mm の鋼管を採用した．鋼管剛性は，打設後の大口径鋼管内にϕ114.3 mm の AGF 鋼管（肉厚 6 mm）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 11 mm 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．

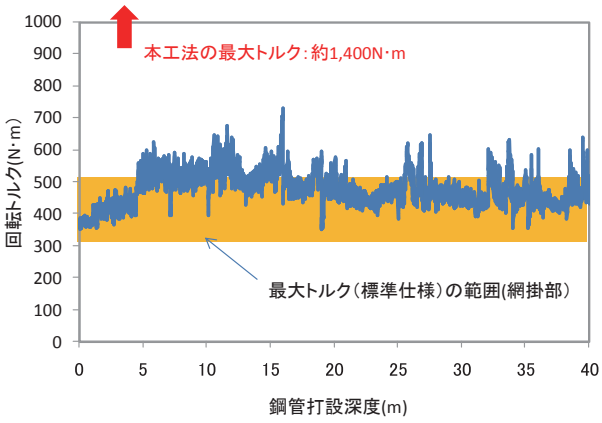
なお，挿入された鋼管は，地山注入時にインサート管を挿入するための注入鋼管としての役割も有する．

2—4　特殊治具による打設精度の向上

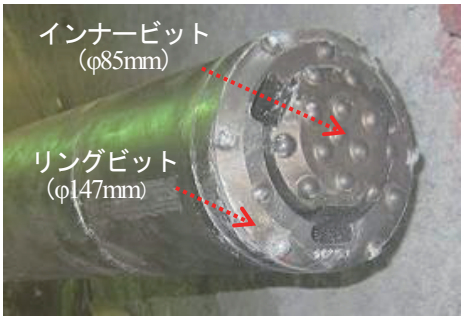
鋼管の打設時には，ガイド支保工に設置した特殊治具（特殊鋼管受け治具）で大口径鋼管を所定の打設方向に固定することにより打設精度の向上を図った．**写真—2** に示すように，この治具は 4 方向から鋼管を固定する構造である．また，鋼管を固定する高さを自由に調節する機



図—1　LL-Fp 工法のイメージ



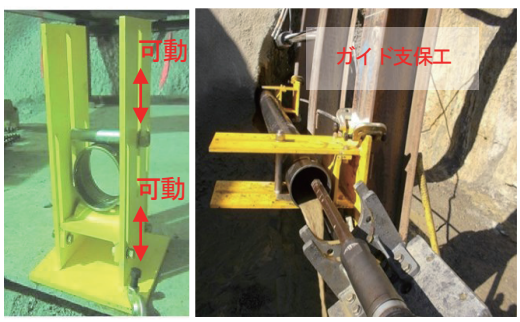
図—2　大口径鋼管打設時の回転トルクの挙動



写真—1　LL-Fp 用大口径ビット

表—1　鋼管の曲げ剛性比較

	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　特殊鋼管受け治具

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．前述の大口径鋼管打設試験時に実施した孔曲がり計測の結果，AGF 工法 4 シフトに相当する 36 m 地点において約 1/200 程度の打設精度が得られた．

§3. 実施工への適用

3—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 952 m
・掘　削　断　面：55.1 m^2（C Ⅱ-b-B 断面）
・掘　削　方　式：機械掘削および発破掘削（NATM）

3—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＝37 m）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（**写真—3**，**図—4** 参照）．

3—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 ヵ所において，L＝3.0～3.5 m の大口径鋼管を継ぎ足しながら所定の 39.5 m 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，39.5 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．**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—4** に大口径鋼管打設の状況，**写真—5** に代表的な作業項目の施工状況を示す．

今回の実施工への適用にあたり，いくつかの部材について改良を加えた．以下にその詳細を述べる．

(1)　特殊鋼管受け治具

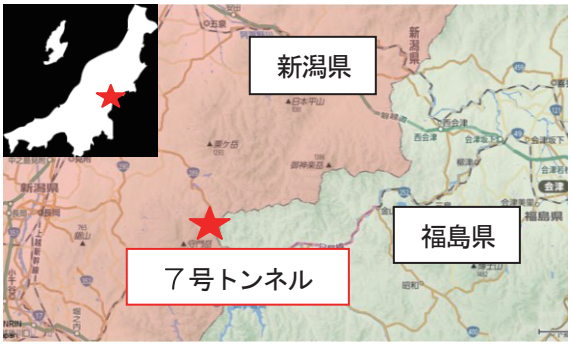
写真—6 に示すように 4 面の鋼管接触部すべてに回転ローラーを設置し，鋼管打設時の固定性向上と摩擦低減の両立を図った．

(2)　スライム除去治具

大口径鋼管内のスライム除去が不十分な場合，インナー鋼管挿入が著しく困難となる．それを避けるため，孔口に向かって（後ろ向きに）噴射されるようなスライム除去治具を新たに製作・導入した（**写真—7** の治具は現場で改良を加えたタイプ）．

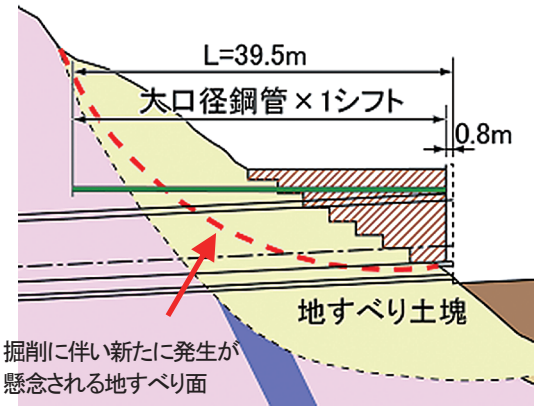
(3)　特殊注入管

注入は注入管をスポンジパッカーで 12 部屋に分割し，

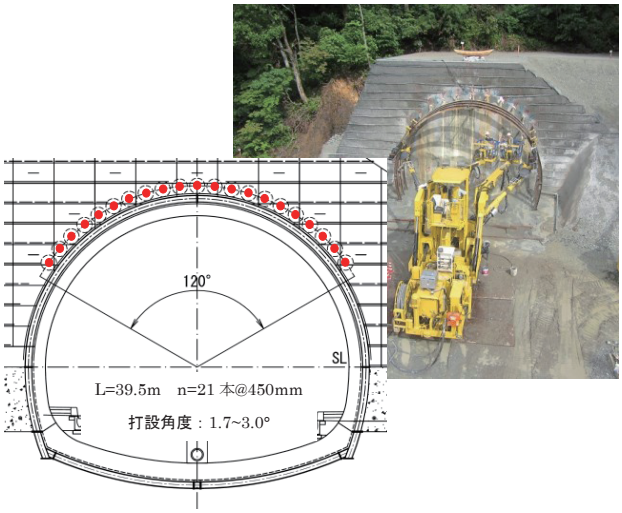


図—3　適用トンネル位置図

写真—3　坑口部の状況



図—4　地すべり跡地の坑口部への LL-Fp 工法の適用方法



図—5　大口径鋼管打設レイアウト（正面図）

各部屋をシリカレジンで同時注入する手法を用いた．その場合，部屋数分のポンプ（12 台）が必要となるが，今回は**写真―8** のような薬液吐出部を分岐させた特殊な注入管を新たに製作し，2 部屋を 1 ポンプで同時注入可能な構造とした．また，注入管の長距離挿入を容易にするため，最深部の部屋用の注入管をある程度の剛性を有するガス管で製作し，それを芯材として他部屋用の注入管（ホース）を束ねた．

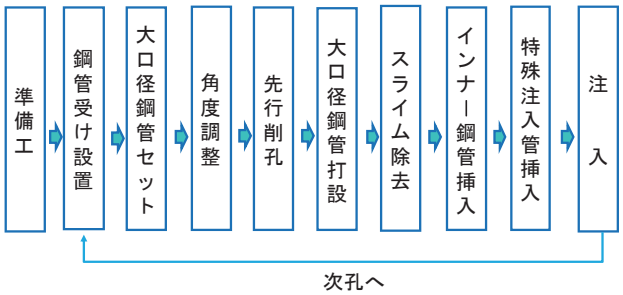
⑷　注入仕様

今回のような約 40 m 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，事前に実施し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 180 sec の低粘性タイプの薬液を 7 kg/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（403 kg/本）を無事注入することができた．

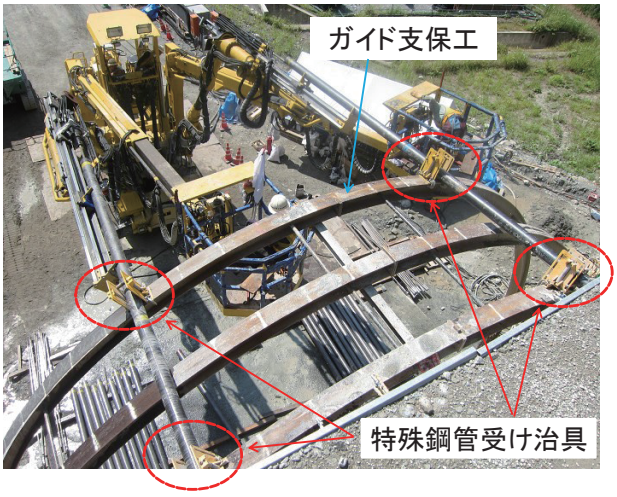
3―4　適用結果

⑴　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―2** に示した現場適用実験時の回転トルクよりも若干低い値を示しているが，ここでも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 26～30 m 付近ではその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した大容量回転モーターの上限トルクの半分程度に相当す



図―6　LL-Fp 工法の施工フロー（1 孔即時注入の例）



写真―4　特殊鋼管受け治具を使用した大口径鋼管打設状況

写真―5　代表的な作業項目の施工状況（1 孔即時注入）

写真－6　特殊鋼管受け治具（改良型）

るため，問題なく打設することができた．

⑵　鋼管打設精度

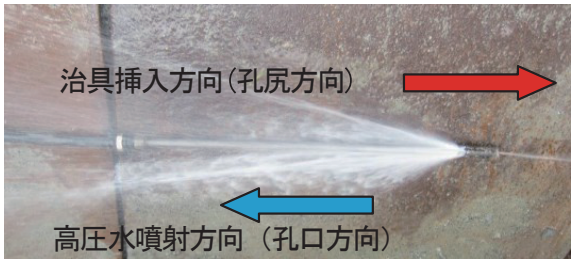
打設鋼管 21 本のうち，左右肩部およびセンター部の 3 箇所において鋼管の孔曲がりを計測した．**図－8** にセンター孔（水平方向）の計測結果を示す．図のように，孔尻地点の変位はわずか 16 cm（精度約 1/240）となっており，先述の現場適用実験で得られた打設精度（約 1/200）よりも良好な結果が得られた．なお，その他の地点についての計測結果は何れも水平・鉛直方向変位ともに 5 cm 以下という結果が得られており，更に良好な鋼管打設精度が得られている．今回の実施工で精度が向上した理由については，地質性状の違い等，様々な要因が考えられるが，鋼管受け治具の改良効果も大きかったと考えられる．

⑶　削孔データによる地山評価

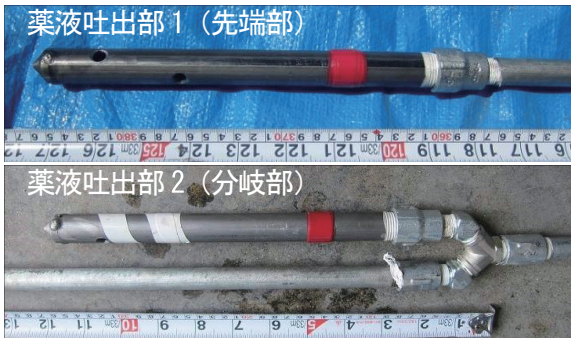
今回の施工では鋼管打設時の削孔データを穿孔探査装置（DRISS）で計測・解析し，地すべり面の 3 次元分布状況や不動層への鋼管の根入れの確実性も併せて評価した．**図－9** に DRISS の結果を示す．図中の色パターンは暖色系になるほど脆弱な地山を示す．探査の結果，深度 30 m 付近において硬質な地山（流紋岩）と脆弱な地山（変質した安山岩）の境界が地すべり面（図中の赤破線）として明瞭に識別された．また，鋼管の流紋岩削孔区間は 10 m 以上に達しており，鋼管の根入れも十分であることも定量的に評価できた．

⑷　施工サイクル実績

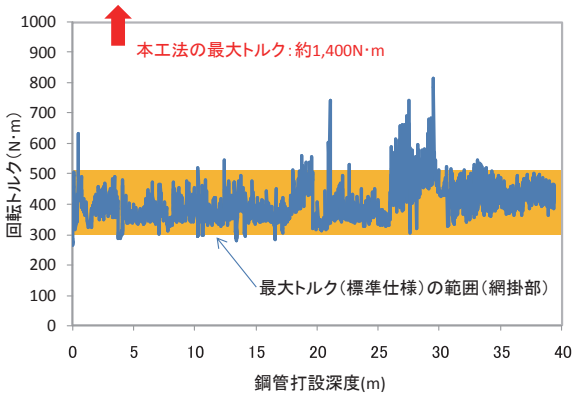
LL-Fp 工法の施工実績を**表－2** に示す．施工初期段階（表中の 4 日目の昼勤まで）において，作業上の不慣れやインナー鋼管挿入時のトラブルにより作業が大幅に遅延する状況も見られた．鋼管接続作業の慣れやスライム除去治具の改良により上述の問題が解決されてからはほぼ 2.0 本/1 方以上のサイクルで施工し，最終的には 5.8 日（昼夜換算，平均サイクル：約 1.9 本/1 方）で全工程を終了することができた．これは，当初計画されていた AGF 工法（4 シフト）と比較して約 30%の工程短縮となっている．**表－3** に 2.0 本/1 方のサイクルを標準とした場合の各作業時間の内訳を示す．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



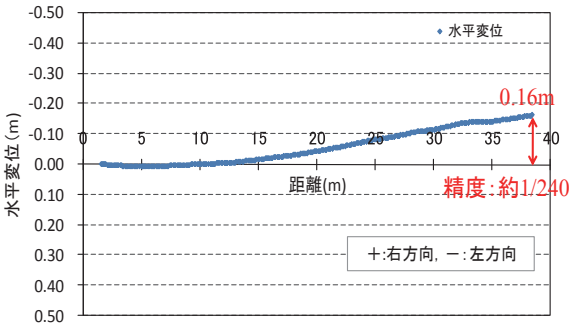
写真－7　スライム除去治具（現場改良型）



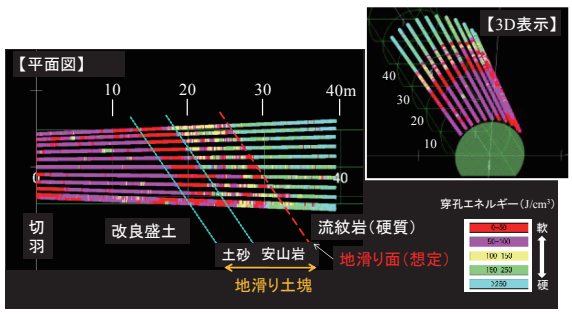
写真－8　特殊注入管（薬液吐出部）



図－7　大口径鋼管打設時の回転トルクの挙動（右肩孔）



図－8　鋼管打設精度計測結果（センター孔）



図－9　DRISS による地山評価結果

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．

§4. 成果と課題

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＝39.5 m，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 39.5 m 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）のサイクルで施工できた

その一方で，大口径鋼管の継ぎ足し作業やインナー鋼管挿入作業に関する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 70 kg 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圧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．

これらの作業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，作業の効率化・確実性の向上に向けた更なる検討が必要である．

§5. おわりに

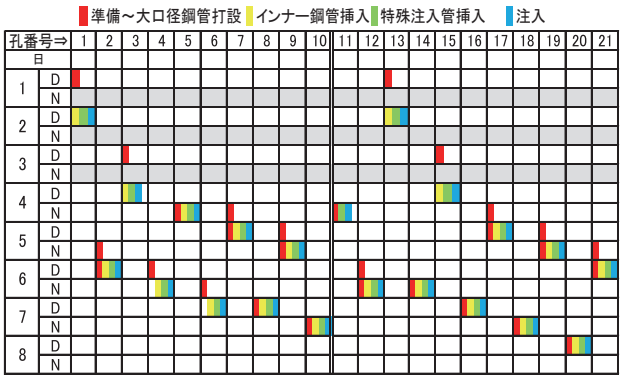
昨年度開発した超長尺大口径鋼管先受け工法（LL-Fp 工法）を地すべり区間の補助工法として実施工に初適用し，その施工を無事終えることができた（**写真―9**）．また，その後の掘削ではおおむね安定してトンネル掘削を行うことができた

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おける変形抑制対策や大口径鋼管を利用した水抜きボ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，本工法についてはより長尺化（L＝45 m）および坑内からの実施に向けた検討を進めており，適用性の更なる拡大を目指した工法改良を今後も継続していく予定である．

謝辞．本工法の開発にあたり，関西支店後呂地トンネル出張所および四国支店千丈トンネル出張所の皆様には開発段階における現場適用実験において多大なご協力をいただいた．ここに，厚く御礼申し上げます．

表―2　施工実績（D：昼勤，N：夜勤）



表―3　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	

写真―9　LL-Fp 工法完了状況

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