

地すべり地形の坑口部における 複合注入式多段フォアパングの設計と効果

VERIFICATION OF PLANNING AND DESIGN BY USING AGF-HITM AT TUNNEL PORTAL LOCATED ON AREA WITH LANDSLIDE EXPERIENCE

和久田 睦¹⁾・山田浩幸²⁾・井上雅人³⁾・井越邦彰⁴⁾

Mutsumi WAKUDA, Hiroyuki YAMADA, Masato INOUE, Kuniaki IGOSHI

The tunnel portal is located on the slope with unstable condition on geologic and topographic, so that the inadequate arch formation for tunnel supports would be shown generally. Pipe-roof method, Umbrella method or any other methods is applied as the auxiliary method for tunnel stability.

In this paper, the planning and design for AGF-HITM as an auxiliary method are described, depending on the ground condition with geological/topographic property mentioned above. Additionally, it is verified that AGF-HITM was effective as an auxiliary method and appropriate at design stage, based on the measurement data during construction.

Key Words: Landslide, Auxiliary Method, Umbrella Method, AGF-HITM, Measurement

1. はじめに

山岳トンネル坑口部においては、一般的に地形・地質的に不安定な場合が多く、NATMの支保メンバーである地山のアーチ形成が不十分となりやすい。したがって、坑口付けや掘削などにより、斜面崩壊、偏土圧の作用、さらには地表面への影響による地すべり等を誘発し、その対策に難渋したり、結果的に多大な経費を要する場合もある。

近年、補助工法の進歩につれて坑口部の施工条件が厳しくなっていることを反映して、パイプルーフ工法をはじめと

したアンブレラ工法の採用事例が多くなっている。補助工法の検討にあたっては坑口部の施工条件、工期、工事費等に関して比較検討を実施した上で効果的な工法を選定することが重要となる。

本論文は、地すべり地形を呈する坑口部において採用した複合注入式多段フォアパング(AGF-HITM)に関して、地形・地質条件に基づき実施した設計・計画について述べるとともに、施工時に得られた計測結果を分析・評価する事で補助工法の効果と設計の妥当性に関して検証したものである。

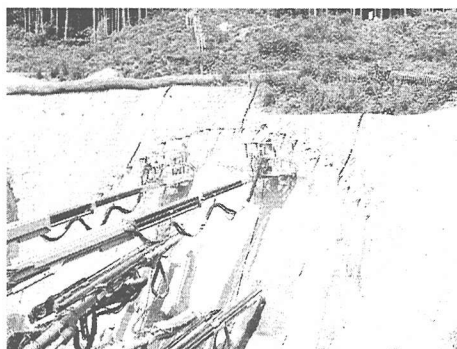


写真-1 坑口部施工状況

1) (株) 鴻池組 大阪本店 大崎横田トンネル工事所長

2) 正会員 (株) 鴻池組 土木本部技術部

3) 正会員 (株) 鴻池組 土木本部技術部

4) 国土交通省近畿地方整備局

2. 適用トンネルの概要

今回、AGF・HITM(複合注入式多段フォアパイリング、以下 HITM と称す)を適用した大崎横田トンネルは、舞鶴自動車道春日 IC と兵庫県和田山町を結ぶ春日・和田山道路の内、同県氷上郡氷上町に NATM で施工中の延長 L=464m の山岳トンネル工事である。

トンネル周辺の地質は、基盤岩として古生代二疊紀～中生代ジュラ紀のいわゆる丹波層群の堆積岩類(砂岩・頁岩互層、チャート、緑色岩類)が分布し、その上層に新生代第四紀の崖錐堆積物が厚く堆積している状況であった。

本トンネルの工事始点側である、横田側坑口部分に関しては、傾斜の緩やかな斜面が続く、地すべり跡地と思われる地形を呈するとともに、トンネルの軸線に対して、左右の土被りが異なる偏圧地形であった。

事前の地質調査結果(天端水平ボーリング)より坑口から約 60m 付近に断層破碎帯(F-2 断層)が確認されており、既設ボーリング孔からは 60 ㈬/min 程度の恒常湧水が観察されていた。

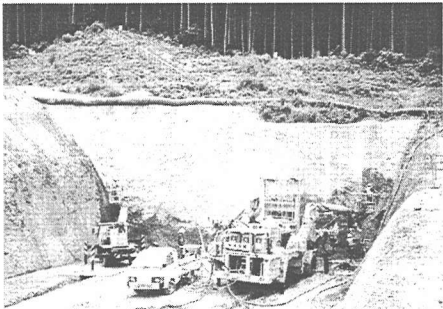


写真-2 坑口部全景

これらの状況を受けて、排水を主目的とする追加水平ボーリング(L=60m、2本:SL 部分)を実施した。合わせて実施した地質確認状況から破碎帯の傾斜が当初と異なりすべり目であることが判明した。

したがって、坑口の施工に際しては、上部斜面への影響を抑制し、地すべり等の誘発を防止できる補助工法の採用が必要であると判断した。なお、SL 付近の地山劣化も著しく、地耐力不足も懸念された。

3. 補助工法の検討

本トンネル坑口部の施工にあたっては、トンネル掘削の影響で地すべりを誘発する事が懸念されたことから、上部斜面に対してゆるみの影響を極力抑える事のできる切羽安定対策工(補助工法)の採用が必要であると判断された。

補助工法の検討にあたっては、(1)すべり対策を兼ねた切羽安定対策(2)地耐力確保のための脚部補強工(3)鏡面の安定対策といった観点からそれぞれ検討を実施した。

(1) 切羽安定対策

坑口部切羽安定対策としては、坑外、坑内からの対策に分類できるが、本トンネルの施工条件をふまえて

- ① パイプルーフ工法(坑外)
- ② 注入式長尺先受け工法
- ③ ウレタン圧入式フォアボーリング
- ④ 薬液注入工法
- ⑤ 垂直縫地工法(坑外)

表-1 坑口部補助工法比較検討

対策工	①パイプルーフ工法	②注入式長尺先受け工法	③ウレタン圧入式フォアボーリング	④薬液注入工法	⑤垂直縫地工法
概要図					
信頼性	上部積み土圧に対して坑内より剛性の高いパイプを平行に施工し、トンネル掘削時に応接上で受けながら掘進する。	坑内より剛性の高い鋼管パイプ(φ89.1mm L:6.0m)をダブルに打設し、シェル構造により掘削地山のゆるみを抑える。	坑内より天端付近に 3m、4m の圧入パイプを打設し、ウレタンを注入することで、ウレタン改良体による地山固結改良をする。	坑内より天端付近を中心にセメント系地盤を注入し、地山を固結改良する。	地表面ボーリングを行い、セメント系土を注入した時、地盤のゆるみ(③④)を抑制することに上り、地山のゆるみ、および地下水位を抑制する。
施工性	クランピング機、掘削機、地山改良機に併用して掘削が容易。掘削機は、掘削機を動かして掘削する。掘削機は、掘削機を動かして掘削する。	長尺でかつダブルに鋼管を配設するため、先受け効果が高い。地山の要位に応じて施工順序を変更できる。	セメント系地盤の注入時に比べて掘削機が効率的に掘削できる。注入の掘削機は高い先行変位に止まる。掘削された範囲を掘削機で改良する。掘削機は、掘削機を動かして掘削する。	地山の要位に応じて掘削機を動かして掘削する。掘削機は、掘削機を動かして掘削する。	掘削機は、掘削機を動かして掘削する。掘削機は、掘削機を動かして掘削する。
経済性	地山改良機は、掘削機と併用して掘削する。掘削機は、掘削機を動かして掘削する。	掘削機は、掘削機を動かして掘削する。掘削機は、掘削機を動かして掘削する。	掘削機は、掘削機を動かして掘削する。掘削機は、掘削機を動かして掘削する。	掘削機は、掘削機を動かして掘削する。掘削機は、掘削機を動かして掘削する。	掘削機は、掘削機を動かして掘削する。掘削機は、掘削機を動かして掘削する。
工期	トンネル掘削に先立ち施工する必要があるため、工期に大きく影響する。	掘削機は、掘削機を動かして掘削する。掘削機は、掘削機を動かして掘削する。	掘削機は、掘削機を動かして掘削する。掘削機は、掘削機を動かして掘削する。	掘削機は、掘削機を動かして掘削する。掘削機は、掘削機を動かして掘削する。	掘削機は、掘削機を動かして掘削する。掘削機は、掘削機を動かして掘削する。
総合評価	△	◎	○	×	△

響を押さえるための先行変位抑制効果の高い注入式長尺先受け工法を最終的に選定した。

注入式長尺先受け工法としては、これまで AGF 工法の採用事例が多く報告されているが、本トンネルの場合、地質が複雑で岩種的には砂岩・頁岩互層、チャートであり岩塊が硬く亀裂が多い状態であること、AGF 工法は一般的に拡幅を伴うためかえってゆるみを助長する恐れがあったため、無拡幅で地山の変化に応じて打設本数や打設範囲を変更する事が可能な HITM の採用に至った。

(2) 脚部補強対策

水平ボーリングにより、SL 付近の地山劣化が確認されており、今回、注入式長尺先受け工法 (HITM) を採用するにあたり、前方地山の荷を受け支保工反力が大きくなる可能性が高い事も考え、地耐力対策として脚部補強工を検討した。

通常の側方施工では、核残しで掘削するため、核 (3 間 (3 m) 程度) と切羽作業の支障を考えれば切羽離れ $0.5 \sim 1.0D$ (D : トンネル径) の時間遅れを生じ、図-1 に示すとおり、脚部補強完了までの先行沈下は免れない。

したがって、本トンネルでは、支保工沈下を極力起こさないように切羽前方に向け先行打設を実施した。

(3) 鏡面の安定対策

坑口付けに際しては、トンネル周辺の法面を急勾配 1:0.5 で掘削するため、法面吹付け及びロックボルトによる補強を実施して施工した。

また、亀裂の傾斜が坑口に向かってすべり目であることから、鏡面が不安定になることが考えられたため、鏡吹付および鏡ボルトによる鏡面の安定対策について検討した。

鏡ボルトに関しては、近年トンネルの大断面化、偏平化や坑口条件が厳しくなってきたことを受けて長尺鏡ボルトの採用事例が増えており、今回切羽安定対策として HITM を採用することもあり、施工サイクルや定着の確実性に着目して $L=9\text{m}$ の長尺鏡ボルトを採用した。

なお、長尺鏡ボルトの材料に関しては、トンネル掘削時の切断作業の安全性、地山状況を考慮して自穿孔タイプのファイバーボルトを採用した。

断面内のボルト配置についてはこれまでの実績を参考にして打設ピッチを 2 m と設定し、1 本 / 4m^2 とした。

表-2 AGF 工法と HITM の比較

工法	HITM	AGF 工法
ビット	ロストビット	拡張ビット
打撃方法	ロッドによる先端部直壁の損傷はほとんどなし。	鋼管及び直壁部直壁の損傷により破壊されやすい。
鋼管と直壁との接続	ネジ加工・カップラー式	ネジ加工 (ねじ込み)
改良範囲	いずれの範囲でも 2 段以上の鋼管で支持する。(多段)	先端部 (ラップ長さ: $3 \sim 4\text{m}$) のみ 2 本の鋼管で支持。他は断面に 1 本の鋼管で支持する。(シングル)
施工性	鋼管径を小径化できるので施工性が良い。 鋼管が短いためトラブりが少ない。 ビットの選択不要。	鋼管が長尺なためトラブが多い。 ビットの選択が必要。
効果	多段のため支持効果が非常に大きい。	直壁などでは支持効果が小さい。 鋼管のジョイントが弱点となる。
断面図		

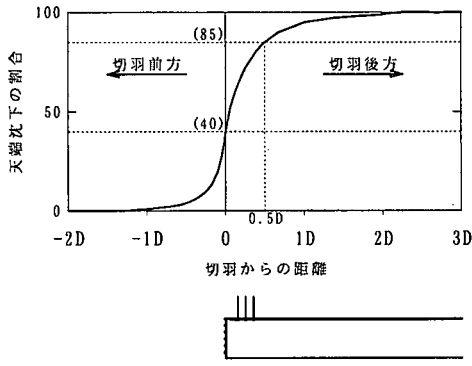


図-1 トンネル掘削による壁面変位の挙動

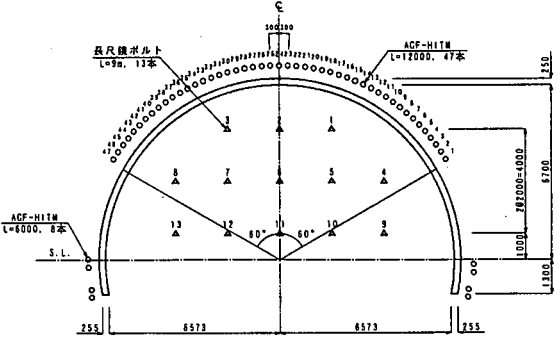
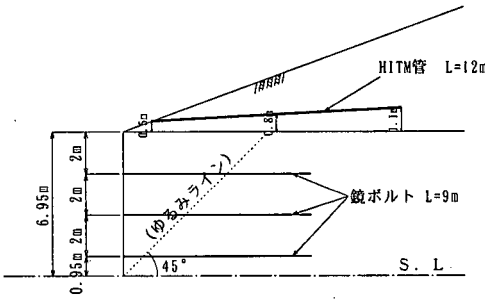


図-2 鏡ボルト配置図

4. HITM（複合注入式多段フォアバイリング）の特長

- HITMの施工は、通常のAGF工法に比べて、
- ① 拡幅を伴わないことでゆるみが少ない。
- ② 鋼管を千鳥配置でラップさせる事で先端のラッパ部での地山抜け落ちが少なく。
- ③ 注入材の養生時間に着目し、切羽進行に合わせて複合注入する事で経済的である。
- ④ 3～4m毎に地山を確認した上で切羽状況に応じて支保規模を変更する事が可能である。
- ⑤ 削孔方式に牽引方式を採用し、精度を高めるとともに鋼管径が89.1mmで削孔時間が早い。

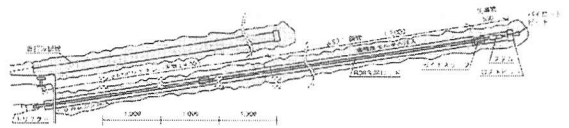


図-3 HITM注入削孔システム

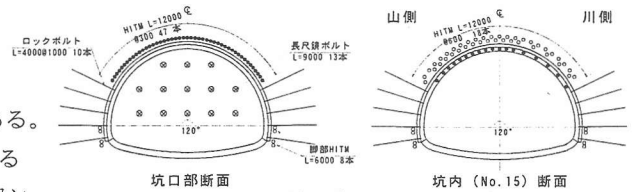


図-4 坑口部 HITM 施工断面図

といった特長があり、鋼管配置を適切に行う事で、前方地山に剛性の高いシェルゾーンを構築し、高い先受け効果を発揮することによりゆるみ抑制効果が期待できる。

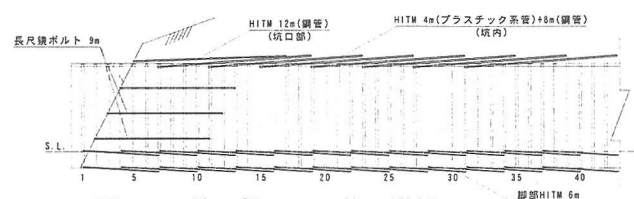


図-5 坑口部 HITM 施工縦断面図

5. 補助工法の設計と施工

土被り1D（14m）以下の部分に関しては、HITMで計画したが、今回は上部斜面への影響をできるだけ少なくするために1ステップの打設長を8m鋼管+4mポリエチレン管のL=12mと設定したが、坑口の第1スパンに関しては切削の必要が無い

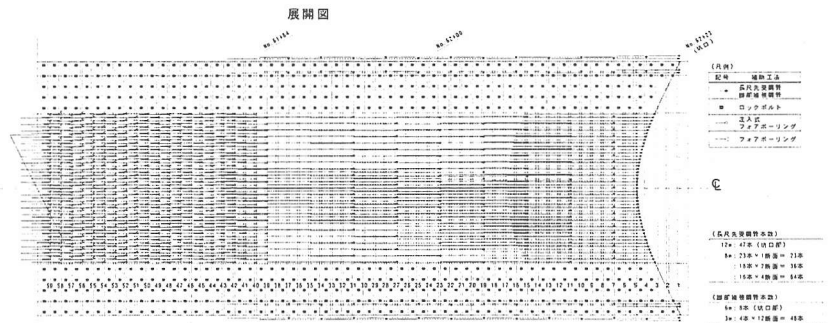


図-6 鋼管配置平面図

ことから12mの鋼管とした。1断面当たりの鋼管配置に関しては、天端120°範囲に坑口第1スパンではダブル配置（@300，47本）坑内に関しては、山側をダブル配置（@300），川側をシングル配置（@600）で計画し、施工範囲に関しては掘削時の切羽観察結果に基づき地山の劣化度合い、湧水状況に応じて変化させた。

なお、HITMの設計にあたっては、パイプルーフの設計に準じTerzaghiのゆるみ荷重を考慮して鋼管の応力照査を実施した。

脚部補強工もHITM鋼管を用い支保工との離れを考慮し打設長を6m（3m鋼管+3mポリエチレン管）とし、3m毎に打設した。

また坑口部の長尺鏡ボルトについては、これまでの施工実績から打設ピッチを2m×2m（打設密度1本/4㎡）で施工した。

なお、鏡ボルトに関しては2スパン目からは切羽の自立状況が好転したため部分的な鏡吹付けだけで対応できた。

計測データからの効果の分析は後述するが、施工時の切羽状況から判断すれば、地山の肌落ちも少なく掘削に支障を生じることもなく期待した効果が得られたものと判断された。

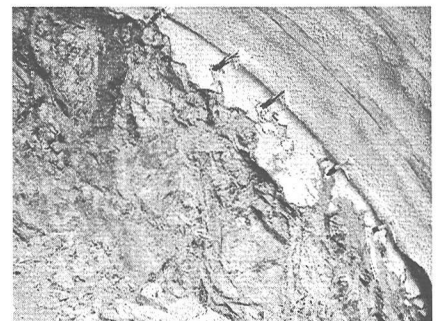


写真-3 HITM部掘削状況

6. 計測結果と効果の分析

坑口部の施工においては、トンネル掘削時の安全管理のために以下に示す項目に関して計測管理を実施した。

- ① 計測工 A (内空変位, 天端沈下)
- ② 地表面沈下 B
- ③ 地すべり伸縮計
- ④ 鋼管歪み測定

これらの計測結果により得られた知見と HITM の効果に関して考察する。

・計測工 A の結果からは、天端沈下量は 6.5mm、内空変位量は 13.8mm で収束しており、管理基準値の注意レベル I (天端沈下: 25mm、内空変位 50mm) 以下であった。また、内空変位の初期変位速度も 1.0mm/day となり、通常の D パターンの初期変位速度に比べて小さい値を示した。

通常、坑口部で土被りの薄い D パターン断面では、地山のアーチアクションが形成されずトンネル内空変位に比べて天端沈下が卓越するようなモードを示すことが多いが、計測結果からすると、このような傾向は見られず、HITM によるアーチ形成効果が発揮されたものと判断された。

・地表面沈下 B の結果からも明確なすべり挙動は見られず、沈下量の絶対値も管理基準値内で収束した。

・伸縮計の測定結果を図-8 に示す。

伸縮計の測定結果を見るとトンネルの掘削時に断続的に変位を生じている。

これらの変位は累計変位で 3mm (引張側) 日別変位で最大 0.8mm/日であったが HITM の効果により地表への影響を最小限に押さえられたものと判断される。

・HITM 鋼管歪み測定結果に関して、図-9 に各測点の経時変化を示し、図-10 に上半掘削完了時の歪み分布を示した。

これらの結果を見ると、最終的な歪み値は天端 (1.5m 地点) で 400 μ (応力換算 78N/mm²) で収まった。経時変化から、切羽が 9m (HITM 4m 地点) の時に 10m 前後の測点に変化が生じており、掘削の影響は前方 5m ~ 6m まで及んでいることが確認できた。

しかしながら、分布図を見てもわかるように、上半完了時で 10m 付近の歪みは $\pm 100\mu$ 程度であり、鋼管ラップ部分においてもさほど大きな歪みを生じることがなかった。

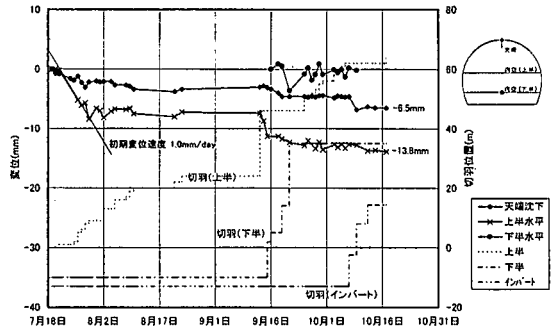


図-7 計測工 A 測定結果

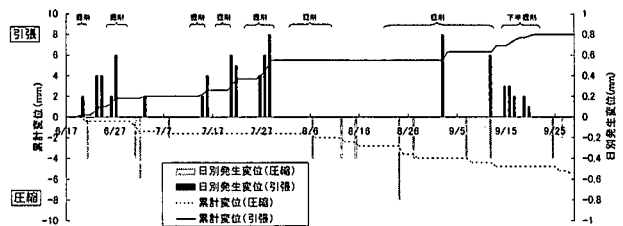


図-8 地すべり伸縮計測定結果

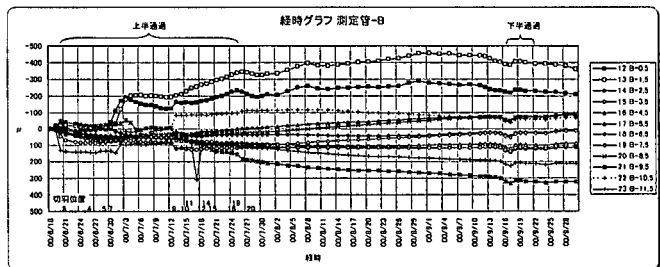


図-9 HITM 鋼管歪み測定結果 (経時変化)

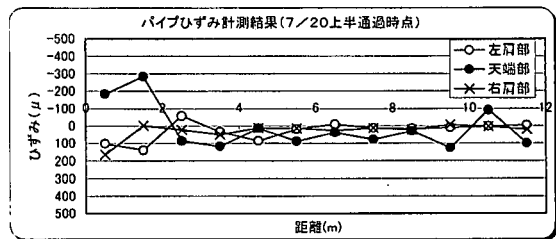


図-10 HITM 鋼管歪み分布

HITM の先受け効果とメカニズムに関して考察

すると、図-11 に示すとおり AGF 工法が 45cm ピッチに打設した鋼管の曲げ剛性による梁としての先受け効果を考えるのに対し、HITM では多段打設により結果的に鋼管のピッチが 30cm となり AGF 工法に比べて鋼管の打設が密になることにより、鋼管としての曲げ剛性は若干小さいものの改良範囲全体として剛性の高いシェルゾーンが形成されることで先受けの効果が得られるものと考えられる。

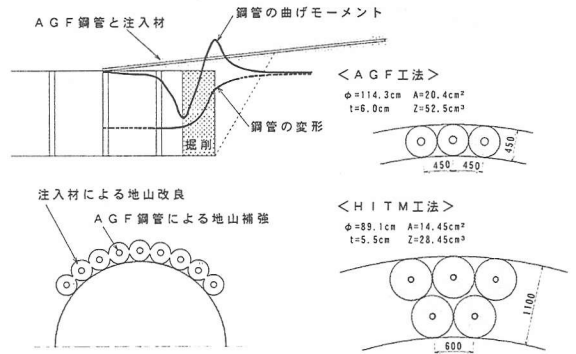


図-11 先受けのメカニズム

今回、偏圧地すべり地形の坑口部という厳しい施工条件の下で補助工法として AGF-HITM を用いることで上部斜面への影響を最小限に押さえ、無事掘削を完了できた。

施工時に安全管理のため実施した計測結果によれば、土被りが薄いにもかかわらず、標準部同様の挙動を示しており、地表面の地すべり挙動も見られなかった。

また、HITM 鋼管の歪み計測により掘削時の挙動把握を試みたが、鋼管ラップ部分においても AGF 工法とは異なり多段となることで、大きな歪みの集中を生じることもなく確実な先受け効果を確認する事ができた。

これまで地質変化の著しい偏圧地形の坑口で AGF-HITM の採用を実施してきたが、今回、地すべり地形の坑口部での補助工法の設計において複合注入式多段フォアパング（AGF-HITM）の適切な配置に加えて、脚部補強工（先行打設）、および長尺鏡ボルトといったアンブレラ工法の採用により、低土被りで脆弱な地山においても切羽前方に剛性の高いシェルゾーンを形成することで上部に影響を与えることなく施工できたことは今後の同種条件での施工の参考になると考えられる。

今後、山岳トンネルを取り巻く条件は都市化、大断面化、偏平化を受けて、一層厳しくなる事が予想され、都市部での施工や厳しい地山条件下での施工が増えてくるために補助工法の役割はますます重要になってくると考えられる。

このような環境の中でも今回採用した複合注入式フォアパング（AGF-HITM）は、施工時に地山条件を確認して鋼管配置を決定する事で確実かつ経済的な先受け工を実現する事ができるものと考えられる。

最後に、今回の複合注入式多段フォアパングの検討及び採用にあたり、国土交通省近畿地方整備局を始め関係各位の方々にご協力いただき、ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 井越・和久田・山田・井上：地すべり跡地における坑口部補助工法の設計と効果
土木学会 第 56 回年次講演会 2001.10
- 2) 注入式長尺先受け工法（AGF 工法）技術資料（三訂版）ジェオロン研究会 1997.9
- 3) 長尺鏡ボルトの施工実績調査とその分析（その 2）ジェオロン研究会 2000.11



写真-4 坑口施工完了状況