

偏圧地形の坑口部における 複合注入式多段フォアポーリングの設計と効果

DESIGN AND EFFECT OF SITE EXECUTION BY USING AGF-HITM METHOD AT TUNNEL PORTAL WITH UN-EQUIVALENCE PRESSURE

斎藤泰信¹⁾・山田浩幸²⁾・井上雅人³⁾・松山健司⁴⁾・田畑正昭⁵⁾

Yasunobu SAITO, Hiroyuki YAMADA, Masato INOUE, Kenji MATSUYAMA, Masaaki TABATA

Presently, the tunnel portal is located on the slope of halfway up the mountain with un-equivalence pressure or at the creek with small overburden.

In many cases in auxiliary methods, AGF method is applied because of the effective forepiling. Additionally, Tunnel-Jumbo of the general type can be used for AGF method.

In this paper, the basic ideas on the design and the construction of AGF-HITM method developed from the current AGF method were mentioned. In addition, economy, site execution and stability at the cutting face were studied based on the measurement data during construction.

Key Words: AGF-HITM, Auxiliary Method, Forepiling, Un-equivalence Pressure, Measurement

1. はじめに

近年、山岳トンネルの施工条件に関して、用地収用の困難さ、NATMにおける補助工法の発達に伴い、トンネル坑口の位置が山の中腹（偏圧地形）や沢部（土被り小）といった従来より厳しい施工条件の下に計画されている事例が多くなっている。

坑口部においてはNATMの支保メンバーの一員である地山のアーチ形成が不十分となる事から、天端安定対策、沈下対策を目的として先受け工法を主とした補助工法が採用される事例が多くなっている。採用される補助工法としては、現状では汎用機のトンネルジャンボで施工でき先受け効果の期待できるAGF工法（L=12m）が多用されている。

しかしながら、AGF工法はL=12mの鋼管を先打ちするため、短尺（L=4.0m）のフォアポーリングに比べて高い先受け効果が期待できる反面、原則として拡幅を伴うこと、地山の変化に即座に対応できず結果的に過大となる場合も多く、建設コストの増大につながるケースも考えられる。

本論文は、AGF工法の欠点を補完する型で開発されたAGF-HITM（複合注入式多段フォアポーリング）を実際のトンネル現場で適用した事例の設計的な考え方を示し、施工時に得られた計測結果等により本工法の切羽安定効果とともに、コスト面、施工面の両面から合理性を検証したものである。

1) (株) 鴻池組 九州支店 第3紫尾山（北）トンネル工事

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) 日本鉄道建設公団 九州新幹線建設局

5) 日本鉄道建設公団 九州新幹線建設局

2. 適用トンネルの概要

今回、AGF・HITM（複合注入式多段フォアリング、以下 HITM と称す）を適用した第3紫尾山トンネルは九州新幹線 鹿児島ルート内の内、八代～鹿児島間で最長の延長約 10km のトンネルである。

本トンネルの終点側坑口部においては、地形的に坑口位置が山裾の中腹に位置し、トンネル軸線が斜面に斜交する、いわゆる斜面斜交型坑口となっており、近くにすべり崩壊箇所が点在し、対岸の法面工事においても斜面崩壊が生じるなどトンネルの掘削に伴い偏土圧の作用や地すべりといった不測の事態が生じる懸念があった。

また、地質的には、四万十層群の砂岩・頁岩の互層が主体となっていたが、事前の地質調査の結果から風化が進み、未固結な状態が観察された。

以上のことから、坑口部の掘削にあたっては切羽安定および上部斜面への影響を抑制できる補助工法の採用が必要であると判断された。

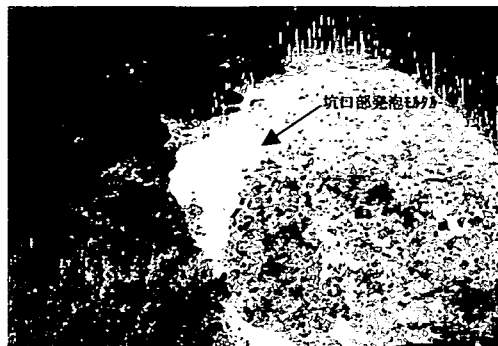


写真-1 始点側坑口部状況

3. 施工条件及び補助工法の選定

坑口部の地形・地質状況をふまえトンネルの掘削にあたっては

- ① 切羽の安定性確保（天端崩落防止）
 - ② 地すべりや斜面崩壊の防止
 - ③ トンネルの支保構造と長期安定性確保
- といった観点から切羽安定および上部斜面への影響を抑制できる補助工法の採用が必要であると判断された。

また、坑口部は出てすぐ河川があるという地形的な制約条件から、坑口側からのアクセスが困難なため、原則として坑内から作業できる工法に限定された。

以上のことから、補助工法の選定については、まず一次選定として

- ① ウレタン圧入式フォアポーリング
- ② 注入式長尺先受け工（AGF工法）
- ③ 薬液注入工法
- ④ 垂直縫地工法（坑外）を選定し、

これらの各工法に関して、施工性、信頼性、経済性といった観点から工法比較を実施した。

その結果、工法の効果を重視し注入式長尺先受け工法を二次選定した。

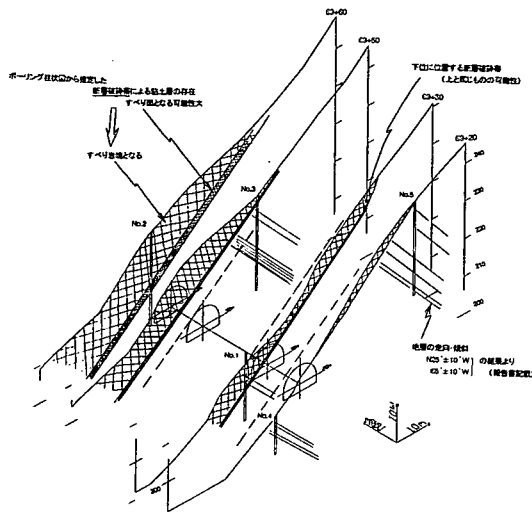


図-1 坑口付近ボーリング調査に基づく地質構造の推定

表-1 坑口部補助工法比較検討表

対象工	①ウレタン圧入式 （劣化阻害工法）	②複合注入式多段HITM（99） （HITM）	③薬液注入工法	④垂直縫地ボルト工法
概要図				
適用性	坑内より天端付近に10m程度の圧入ボルトを打設し、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。	坑内より断続的な高圧の鋼管パイプ（φ99.1mm×16.0mm）をダブルに打設し、シェル構造により前方地山のゆるみを抑える。	坑内より天端付近を中心にセメント系を注入し、地山を固結改良する。	地山にボルトを打ち、セメント系を注入した後、縫地ボルト（SBS）を挿入することにより、地山の縫付け、および掘下げ効果を得る。
信頼性	セメント系の圧入材に比べて砂子が多くて流動性が高いため、圧入の確実性が高いが先行変位は止められない。限定された範囲に固結改良でき改良ゾーンが連続。効果の確実性も高く見込める。	長尺でかつダブルに鋼管を配置するため、先受け効果が高い。地山の状況に応じて施工規模を変更できる。	湧水や亀裂の多い地山での効果により、圧入の確実性に懸念があり十分な改良効果が得られない。均一な地山改良ができれば、切羽の自立性の向上、クラウン部地山の崩落、掘削防止に効果がある。	すべり土質を多く含む軟弱で過剰な土質であり、すべりの方向性に左右されず効果がある。別途先受け工が必要。
施工性	掘削サイクルに切り込める。特別な機械を必要としない。	設備が不備で索引方式によるため掘削が困難。特別な機械を必要としない。	地盤からの排水は可能であるが、掘削長が長くなる。坑内の掘削の場合、掘削サイクルには取れない。	施工ヤードが狭小となり、工事用搬入搬出及び足場が必要となる。急斜面での施工性に劣る。
経済性	圧入範囲は地盤圧入工法に比べて少なくても済むが、材料が高価で経済性に不利。	3m毎に打設する数や範囲を変更でき、ウレタン系とセメント系の複合圧入により経済的。	圧入範囲が広範囲となり圧入量も多くなることから経済性は劣る。	坑内からのアクセスが困難でロープ等の使用が必要となる。
工期	掘削サイクルに切り込めるため、工期の短縮に期待できる。	鋼管打設は3m毎の打設となるが多少時間がかかる。	圧入作業に時間がかかり掘削サイクルに切り込めない。	事前に施工できるため掘削サイクルには影響を及ぼさない。
総合評価	△	○	×	△

しかしながら、事前の地質調査により地質の変化が予測され、頁岩等では岩塊は硬いが亀裂が多く削孔時にジャミングを生じやすいこと、坑内からの作業となるため従来のAGF工法では拡幅することでゆるみを誘発する恐れがあることから、先受け効果があり、地質の変化にも柔軟に適應できる HITM の採用に至った。

4. HITM（複合注入式多段先受け工法）の特長

注入式長尺先受け工法としては、AGF工法（鋼管径φ114.3mm、長さL=12m）がよく用いられているが、AGF工法の施工にあたっては以下に示す課題があった。

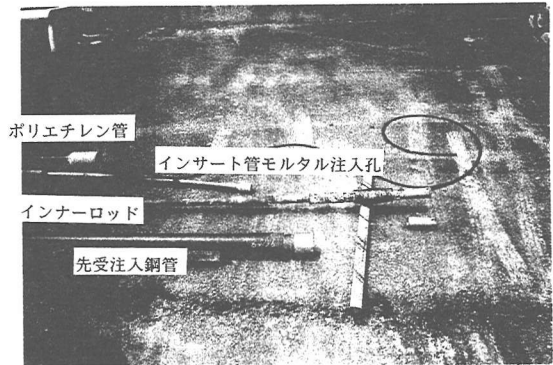
- ① 地山条件によっては削孔が困難となり時間を要する。
- ② 長尺であるがゆえに先端ではラップ状となり先受け効果が低下する。
- ③ できるだけ水平に打設し支保工で確実に支えるため、原則的に拡幅を伴い、その結果かえってゆるみを誘発する。
- ④ 1打設長が12m（有効長9m）であり、その範囲内での地山の変化には対応できない。
- ⑤ 注入材としては原則的にシリカジンをを用いるが、高価な材料であるため経済的に問題となる。

今回採用した HITM においては、これらの課題を解決するため以下に示す工夫がなされている。

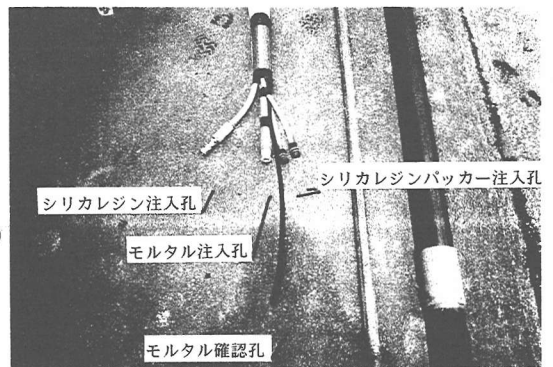
- ① に関しては削孔方式に牽引方式を採用し、鋼管径が89.1mm、長さが6m（鋼管）+3m（ポリエチレン管）であることから、地質の変化に対応でき、また適用地山範囲が広がり、確実に削孔時間の短縮が可能となった。
- ②、③に関しては、今回は6mの鋼管を採用したが、鋼管長を地質に応じて替えることができ、鋼管配置をダブル（多段）とすることにより、無拡幅で高い先受け効果が得られる。
- ④ に関しては、鋼管の打設を3～4m ごとに行うため、切羽の変化に応じて打設本数、打設範囲の見直しが行えることから、経済的である。
- ⑤ に関しては、HITM では注入材の選定を養生時間に着目し、HITM 施工完了後即座に掘削する区間（3m）をシリカジン、養生時間のある残りの6m区間を高強度モルタル（S&P モルタル）にて複合注入することにより経済性を追求した。

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塩ビ管の損傷はほとんどなし。	鋼管及び塩ビ管の後端部塩ビ管が打撃により破壊されやすい。
鋼管と塩ビ管との接続	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：3～4m）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。 鋼管が短いためラップが少ない。 ビットの選択不要。	鋼管が長尺なためラップが多い。 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。	圧縮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。
概要図		



写真－2 HITM の構成



写真－3 HITM 注入システム（複合注入方式）

5. 支保構造及び HITM の設計

坑口部の支保構造は一般的に地山強度が低くアーチアクションの形成が不十分であるため、トンネル標準部に比べて剛性の高い支保構造とする必要がある。

今回、HITM の施工を行うにあたり、十分な支保反力を確保する必要性があることにも配慮して表－3 に示すとおり、標準部についてはテルツアギーのゆるみ土圧、坑口部では偏土圧を考慮した荷重条件の下で骨組構造解析を用い、限界状態設計法により支保構造を検討した。

その結果、鋼製支保工を H-150 とした場合、十分な耐力が得られないことが判明し、支保工のランクを上げて H-200 を使用した。

HITM の設計については、掘削に伴う切羽前方のゆるみ範囲を 4 m と想定し、鋼管長を 6 m に設定し、鋼管打設を 3 m ごとに切羽状況を観察した上で実施するよう計画した。

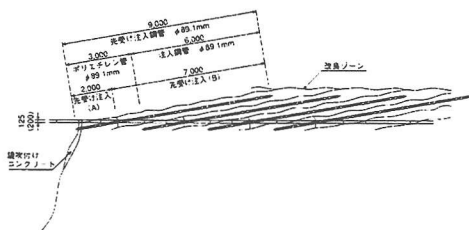
掘削面にかかる部分 3 m に関しては掘削の容易性に配慮しポリエチレン管とした。

HITM の施工範囲に関しては地形的な特徴をふまえて、標準部（土被り 1D 以上）は天端部 120° の範囲、坑口部（1D 未満）では偏土圧の作用が考えられる山側を SL 範囲まで広げて打設した。

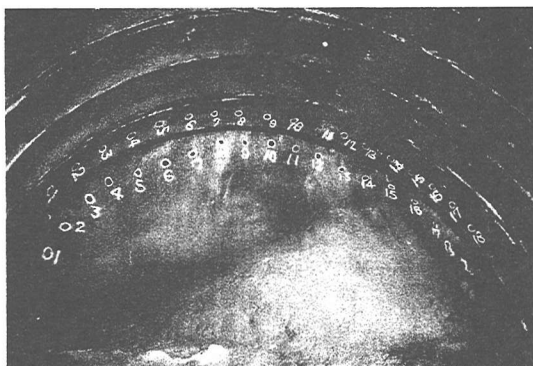
なお、脚部補強工に関しても計画はしたが、足元ふまへの地山状況が良好であったため実際の施工には至らなかった。

表－3 支保構造検討時荷重条件

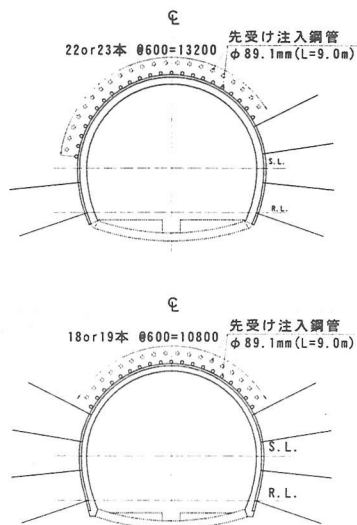
トンネル坑口部（1D 未満） 荷重条件	トンネル標準部（1D 以上） 荷重条件



図－2 HITM 鋼管配置図



写真－4 HITM 鋼管配置状況（標準部）



図－3 HITM 施工範囲

6. 計測結果と効果の分析

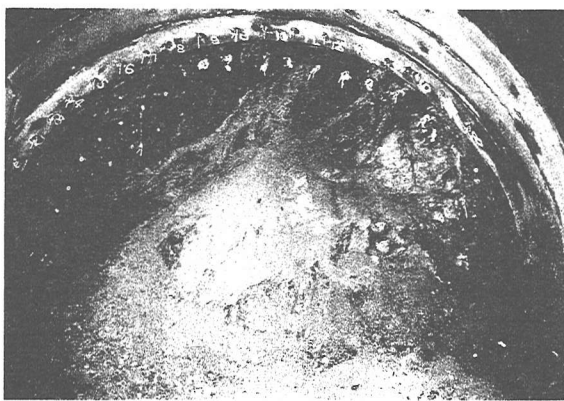
施工時に得られた計測結果をまとめると以下のとおりとなる。

- トンネル A 計測では、図－4 に示すとおり、内空変位で 18.9mm、天端沈下が 14.3mm で収束しており、十分なアーチアクションの形成が期待されるトンネル標準部（HITM 未施工区間）の計測結果と比較して厳しい条件下にも関わらず、ほぼ同等の変位を示し、管理基準値の注意レベルⅡ（内空：24mm）内で収まった。

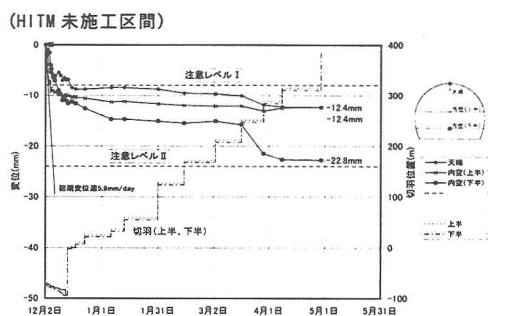
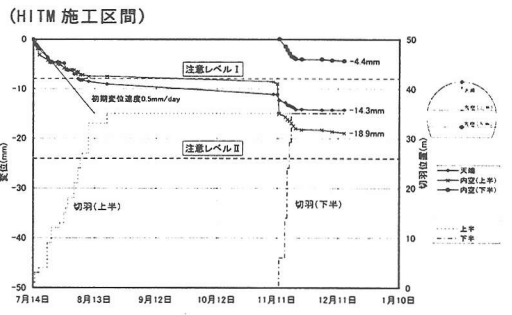
なお、初期変位速度に着目すると、未施工区間が 5.9mm/日であるのに対して HITM 区間については 0.5mm/日とかなり小さくなった。このことは加背割の違いはあるにしても先受け効果が見られたものと考えられる。

- 斜面挙動計測については、図－5、6 に示すとおり最終的に地表面沈下が 39mm（沈下）、地すべり伸縮計が 22mm（伸び）と少し大きな変位を示したものの管理基準値である変位速度としては基準値（変位速度が 5～50mm/5日）内で収束しており、傾斜計に関してはほとんど動きが見られず掘削に伴うすべりの抑制が実現できたものと判断される。
- 掘削時の切羽状況は写真－5 に示すとおり天端からの肌落ちもほとんど見られず天端及び切羽面の安定は確保されていた。

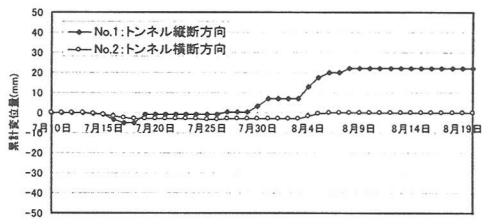
以上の結果から判断して、今回実施した HITM の先受け効果が実証されたと考えられる。



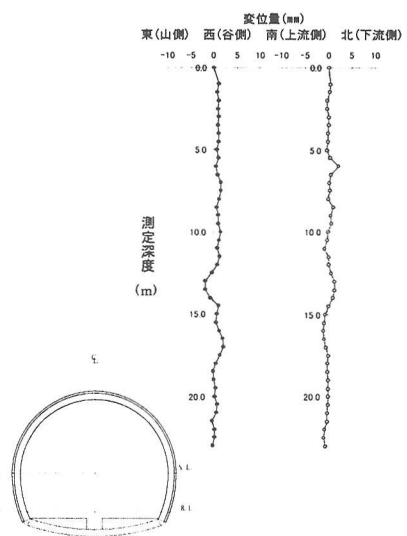
写真－5 掘削時切羽状況



図－4 計測結果（計測工 A）



図－5 計測結果（地すべり伸縮計）



図－6 計測結果（傾斜計）

HITM の先受け効果とメカニズムに関して考察すると、図-7 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。

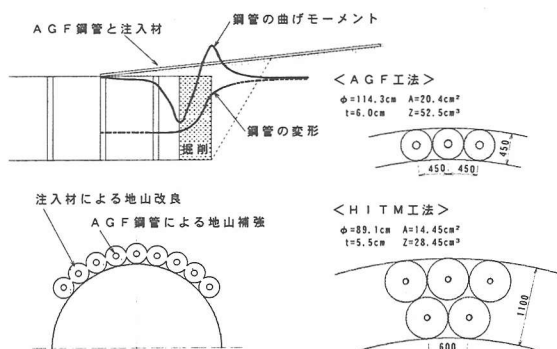


図-7 先受けのメカニズム

偏圧地形で地すべり跡の見られる急峻な斜面に位置する坑口部の施工にあたり、トンネルの切羽の安定はもとより、トンネル掘削に伴う上部斜面への影響を極力抑制する必要性から、補助工法として複合注入式多段フォアパイリング (HITM) を採用し、厳しい施工条件下の工事を無事完了することができた。

HITM の施工では、従来から多く用いられている注入式長尺フォアパイリング (AGF 工法) の課題を改善し、無拡幅で多段配置とすることで、シェル構造を構築し、先受け効果の向上を図った。

また、注入方式に複合注入 (セメント系+ウレタン系) を導入し、3m毎に地山を確認して地山の状況に合わせて施工範囲を変更することで経済性を追求した。

さらに、鋼管径を $\phi 89.1\text{mm}$ とし、削孔方式に牽引方式を採用することで施工の確実性、サイクルタイムの短縮も実現できた。

HITM の設計と効果に関しては、掘削時の切羽の安定を確認するとともに、施工時に実施した挙動計測の結果の分析からもその先受け効果が確認された。

今後、山岳トンネルを取り巻く環境は現在にも増して都市化、大断面化、偏平化の方向へと進むことが予測され、地山条件に関しても厳しくなることも考えられる。このような環境の中で採用される補助工法についても、適用範囲、効果、経済性といった項目が重視されるものと考えられる。

今回の HITM の実施工への適用と効果の確認を受け、今後適用事例を増やし、その先受け効果のメカニズムを解明していくとともに、さらに小口径化を図ることでトンネル規模や地山条件に応じた適用範囲の拡大ならびに設計法の確立を進めていきたいと考えている。

最後に、HITM の検討ならびに採用にあたり、日本鉄道建設公団 九州新幹線建設局を始め関係各位の方々のご協力をいただいたことに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 松山・田畑・山田・斎藤・井上：偏圧地形の坑口部における補助工法の設計と効果
土木学会 第 55 回年次学術講演会 2000.9
- 2) 注入式長尺先受け工法 (AGF 工法) 技術資料 (三訂版) ジェオフレ研究会 1997.9



写真-6 始点側坑口部掘削完了状況