

TBM で多量湧水を有する断層破碎帯を掘進する場合の問題点と対策

The Problem Points and Countermeasures for TBM Boring into the Fracture Zone Containing Spring Water

石井 正典* 亀山 克裕*
Masanori Ishii Katsuhiko Kameyama

要 約

中部縦貫小鳥トンネル牧ヶ洞工区工事は、本坑 2,957m 避難坑 3,057m の中部縦貫道（高山清見道路）のトンネル工事である。地質状況は、坑口から 1,500m 以降に F6～F1 と呼ばれる 6ヶ所の断層破碎帯の存在が想定されていた。避難坑の TBM 工事において、各断層破碎帯を通過するために様々な補助工法を実施しさらに機械的な改良等を進めて H14 年 6 月に TBM の掘進を完了した。本文は、TBM の断層破碎帯通過時に施工した対策工について報告するものである。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 工事概要
- § 3. 断層破碎帯における施工報告
- § 4. 断層破碎帯通過方法の提案
- § 5. 今後の課題
- § 6. おわりに

§ 1. はじめに

本工事は本坑 2,957m、避難坑 3,057m の高速道路トンネル工事である。この内、避難坑 3,057m は TBM 発進坑 46m (NATM)、TBM 2,795m、F1 断層 NATM 200m、坑門工 16m で施工された。

当工事は、避難坑の TBM による施工が国土交通省のパイロット工事であり、断層破碎帯通過が注目されていた。実施工においては、H12 年 10 月 26 日に掘進開始し、多量湧水および断層破碎帯の影響で TBM が難工事になったが、H14 年 6 月 11 日に無事掘進を終了することができた。

本文では、避難坑 TBM の多量湧水を含んだ断層破碎帯通過の施工法について報告し、今後の類似工事の際の問題点と対策について述べるものである。

§ 2. 工事概要

2-1 工事概要

- (1)工 事 名：平成 11 年度中部縦貫小鳥トンネル牧ヶ洞工区工事
- (2)発 注 者：国土交通省中部地方整備局
- (3)施 工 者：西松・飛鳥特定建設工事共同企業体
- (4)工 期：平成 11 年 10 月 1 日～平成 15 年 2 月 28 日
- (5)工事場所：岐阜県大野郡清見村夏厩～牧ヶ洞
- (6)工事内容：本工事の内、トンネル部分の施工内容について表-1 に示す。なお、坑外の本線盛土として約 210,000m³ の盛土工（トンネルズリを使用）が残土処理から変更となっている。

2-2 地質条件

小鳥トンネル周辺には白亜紀～古第三紀の濃飛流紋岩類およびそれに伴う花崗斑岩が広く分布している。事前調査によるトンネル区間の地山性状は、跡津川断層に関連して派生した断層（F1 断層）を含め約 6ヶ所推定されるものの、全体的には一軸圧縮強度が 50MPa、弾性波速度が 3.4～5.2km/sec 程度の中硬岩～硬岩地山と推定されていた。実際に掘削を進めてみると、大量湧水を伴い熱水変質作用を強く受けた安山岩岩脈や亀裂の発達したアプライト等の当初想定には無かった脆弱層が出現し、本坑に先行して掘削した避難坑の TBM 掘進に多大

*中部（支）小鳥トンネル（出）



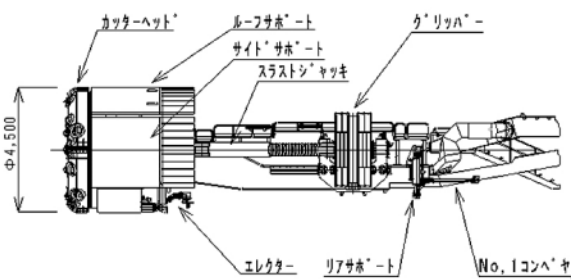
図ー1 小鳥トンネル地質縦断図

表ー1 トンネル工事一覧表

トンネル内容	本坑 NATM	避難坑 TBM	避難坑 NATM	避難連絡坑 NATM
トンネル延長	L=2,941m	L=2,795m	L=246m	L=24.1m×8箇所
掘削断面積	A=87.3 ~126.6m ²	A=15.9m ²	A=17.8 ~71.0m ²	A=11.8 ~20.1m ²
仕上り断面積	A=73.6 ~89.9m ²	A=13.9 ~15.9m ²	A=22.7 ~63.9m ²	A=8.2 ~15.5m ²
掘削土量	V=276,684m ³	V=44,460m ³	V=6,370m ³	V=2,522m ³
覆工コンクリート	V=37,540m ³	無し	V=104m ³	V=566m ³
掘削	発破工法	TBM工法 改良オープン型TBM	発破工法	発破工法
ズリ出し坑門工	タイヤ工法 16m	連続ベルコン 16m	レール工法	タイヤ工法



写真ー1 TBM 本体



図ー2 TBM 本体図

な影響を与えた。図ー1に縦断図を示す。

2-3 TBM 主要諸元

表ー2にTBM主要諸元、図ー2および写真ー1に使用したTBMを示す。

§ 3. 断層破碎帯における施工報告

TBMの掘進停止を余儀なくされた断層破碎帯は、F5およびF4の2箇所である。これら2つの断層破碎帯

表ー2 TBM 施工設備主要諸元一覧表

項目	主要諸元
機種	改良オープン型 TBM
掘削径	φ4.5m
機長	13.0m
全長	約76m
総質量	約279t (本体:196t, 台車:83t)
総出力	約1,110kW
電源	AC 6,600V, 60Hz
カッタ	カッタ径: φ432mm (17インチ) カッタ数: 32個
カッタ駆動装置	カッタ用電動機出力: 150kW×6台 カッタ回転速度: 1.25r.p.m~10r.p.m
スラスト装置	総推力: 8,036kN (820tf) 推進ストローク: 1,500mm
補助推進ジャッキ	総推力 4,155kN (424tf)
グリッパ装置	総押付力: 16,268kN (1,660tf) シューの面圧: Max 3.1MPa (32kgf/cm ²)
プロテクタ装置	ルーフサポート: 油圧平行リンク式×1基 サイドサポート: 油圧平行リンク式×2基
後続台車	7台
ベルトコンベヤ	ベルト幅: 600mm×容量 322m ³ /h コンベヤ台数: 3基 (No.1~No.3)
集塵装置	湿式 300m ³ /min×1台
ボーリング機	TBM搭載型 (アトラス製 BOOMER TD-1838) フィード長 2,200mm 削岩機 COP 1838 (190kg級)

の主な掘進停止理由は、多量湧水がTBMチャンパー内に土砂とともに流入したためTBMベルトコンベヤが過負荷となり掘進を停止したという点で共通しているが、停止後の地山の変化に大きな違いがあるため、個々について特徴的な地山トラブルとその対策を述べる。

3-1 F5断層破碎帯

原設計では、TD1,900m~1,980m区間がF5断層破碎帯であると想定されていた。TD1,931m付近で、コンベヤから搬出されるズリの性状が岩ズリから土砂に変化したため、掘削を停止しチャンパー内を確認した。確認中にカッタヘッドの1時方向のスクレーパ搔込口から700ℓ/minの土砂を含んだ湧水が発生した。土砂の流入が、連続するものかスポット的なものか判断するために、カッタを1.3r.p.mで約2回転させたが、TBMが前進していないにも関わらず、2m³/rev程度の土砂の流入が見られたため、断層破碎帯に入ったと判断し掘進を停止した。その後、表ー3に示す補助工法を施工した。

(1) 空洞発生とその対策

土砂流出により、TBMカッタヘッドとルーフサポート隙間の2時方向に奥行き12m程度の空洞(断面積1m²程度)が発生した。空洞充填工法は一般的な手法であるエアモルタル充填を実施した。空洞部口元がφ50cmと

狭いため、口元は土嚢袋を使用したパッカーでコーキングし、その後に２段階に分けて、エアモルタルの注入を行った。図－３に施工概念図を示す。

口元処理は注入管の隙間に土嚢袋を入れ、その中にシリカレジン注入して固化させた。空洞充填は、対湧水性に優れる２液性のエアモルタルを使用したため、２段階に分けて注入することで充填効率をあげた。第１段階用注入管を用いて筒先のレベルまで注入し、次に第２段階用注入管より充填注入を行った。

充填材料は、施工性や充填効率を考えると流動性に富む液体が良いが、硬化まで数時間を要することや、湧水に洗い流される問題があるため、早期に塑性体になり速やかに強度発現する材料が要求された。そこで、シールド工事で使用される裏込注入と同じ二液混合方式による可塑状注入材料を採用することとし、ゲルタイムが早く

強度発現が早いエア系注入材を選定した。

エア系材料は、非エア系材料に比べて単位水量が少なくすむため、以下の利点を有する。

- ・ブリージング等による材質ムラが無い。
- ・凝結開始後に圧密等の容積変化が無い。
- ・ゲルタイムが２～５秒以内と早い。
- ・二液混合後のゲル強さが大きく早期強度が得られる。（水希釈に強い）

基本配合を表－４に示す。

上記配合により施工した結果、口元コーキングの方法が成功しリークもほとんど無く注入を完了した。注入量は、以下のようになった。

第１段階注入量：９.０ｍ³，注入時間 ５１３min（１.０６ｍ³/h）

第２段階注入量：６.６ｍ³，注入時間 ２２４min（１.７７ｍ³/h）

総注入量 １５.６ｍ³

(２) フォアパイリング (AGF)

①目的

断層破碎帯における補助工法の施工サイクルは、TBM ６m 掘削毎に ９本の AGF １５.５m（内 ９m が注入範囲）の施工を φ１１４mm の鋼管を使用して行うこととした。また、AGF で地山補強が不十分と考えられる箇所では、フォアボーリングを追加で施工することとした。本文においては、遮水工完了後の AGF 施工について記載する。

②使用機械、使用材料

施工は TBM 搭載ボーリング機で行う。また、AGF 管の管径は打設間隔が広いことから φ１１４mm を採用した。ビットは、内周用のパイロットビット（回収可能）と外周のリングビット（回収不可能）に分かれる。ビットは不良地山であることから内外周共にボタンビットを選択した。

注入材は、地山が約 １０００ℓ/min の湧水量があったため通常のシリカレジン、白濁化した状態で河川に流出する可能性があったため、成分の溶出が少ないスーパーシリカレジンを採用した。

③打設計画

打設位置を図－４に示す。

注入量は、 $Q=144\text{kg/本}$ （ 48kg/バルブ ）、１シフト計 $1,296\text{kg/シフト}$ とした。この数量は、対象土質を砂礫（レキ含有率 ５０％以下、間隙率 ３５％、充填率 ９５％）として算出した。注入完了条件は定量管理を基本としたが、地山性状・湧水状況に応じて圧力管理（ 3MPa ）に変更した。

④施工方法

湧水が １ヶ所に集中しないように、奇数孔の削孔・注入を完了後偶数孔の削孔・注入を行った。

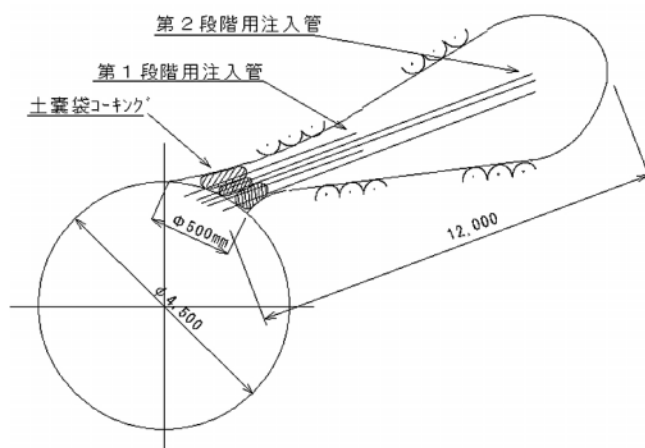
⑤施工結果

湧水による注入材の流出は避けられなかったが、鋼管により地山は保持され TBM は掘進再開することができた。

F５断層破碎帯で施工した AGF の先行削孔から注入完了までの所要時間は平均で 193.4min/本 であった。また、注入量は平均で 123kg/本 であった。計画値に対し

表－３ F５断層補助工法施工数量一覧表

工法名称	日数	施工数量
水抜きボーリング	１６日	φ１１４mm、２０～３０m×１５本（上半部） φ１１４mm、４０m×４本（SL 付近）
フォアボーリング	２日	φ６５mm、６m×６本 注入量 ４,０００kg（シリカレジン）
鏡ボルト	２日	樹脂ボルト、１.６m×３０本 注入量 ６,０００kg（シリカレジン）
空洞充填工	３日	エアモルタル １５.６ｍ³
遮水注入工	２５日	削孔 １３m×１６本 注入 急硬性懸濁型 ７７,０００L
フォアパイリング（AGF）	６日	削孔 φ１１４mm、１４.５m×９本 注入 計 １,２９６kg（シリカレジン）



図－３ 空洞充填施工概念図

表－４ 基本配合（１.１ｍ³ 当たり）

A 液（１ｍ³）						B 液（０.１ｍ³）
セメント	細骨材	起泡剤	ゲル促進剤	水	空気量	塑強調整剤
５００kg	１５０kg	１.０kg	１.０kg	５８２L	２００L	１００L

※１ A 液性状：フロー値 ３５cm 以上、生比重 １.２３t/ｍ³

※２ A+B 性状：ゲルタイム ２～５秒程度

一軸圧縮強度 $\sigma_{1H}=0.3\text{N/mm}^2$ （気温 ２０℃）

$\sigma_{28\text{日}}=4.0\text{N/mm}^2$

平均注入量が少ないのは、部分的に圧力上昇により設定数量が入らないバルブがあったためである。

TBMの補助工法としてAGFを採用した理由は、長尺で施工可能なことにある。フォアポーリングは施工可能な距離は9m程度であり、ルーフサポート上部のロスの関係からカット前方3mの改良しかできないが、AGFはカット前方9mまでの改良が行えることからTBMの停止時間や段取替え時間が短縮できる。特に多量湧水が発生した場合、薬液の流出が問題となるが、鋼管の剛性により地山を保持できる点からもフォアパイリングが有効であった。

3-2 F4断層破碎帯

TD 2116.9mでチャンパー内に土砂が流入しNo.1ベルトコンベヤが過負荷となり停止した。その4時間後に約900ℓ/minの湧水がチャンパー内に流入した。F5断層破碎帯との相違点は、AGF施工中にルーフサポートが限界まで押し下げられたことにある。地山の空洞発生状態等を比較すると、状況はF5に比べて安定していたため、AGF、鏡およびスリットからの注入で脱出する計画であった。しかし、AGFの施工期間中にルーフサポートが3度にわたり降下し限界に達した。カットヘッドが回転しない状態でルーフサポートが限界まで降下すると、TBM本体が拘束された状態となり掘進を再開できないため上部拡幅を行った。

表-5にF4断層破碎帯における補助工法施工数量一覧表を示す。

(1) スリット注入

PUボルトは、局所的な改良において効果を発揮した。特に各サポート背面の土砂を固結させることで地山耐力を向上させ、素掘り面がサポートからの露出時に起こる崩落を抑制することができた。鏡ボルトはTBMチャンパー内からの施工となるため口元コーキングができず薬液が流出したので、樹脂ボルトの口元にくると想定される箇所を布を巻きつけて施工したところリーク量は低減できた。

(2) 上部拡幅工

TBM本体上部の拡幅発破に際し、TBMの作業デッキ上部全面を鉄板で覆い、またルーフサポートの位置で鉄板の壁を作り、モータの防護を行った。ズリ出しは、TBMコンベヤを用いて連続コンベヤによるズリ搬出とした。

拡幅範囲は、ルーフサポート上部の土砂が完全に除去できる範囲(上部120°)として、図-5及び図-6に示す範囲の拡幅を行った。施工期間は延べ31日間を要した。

(3) AGF-Rの採用

ルーフサポート上部拡幅に先立ち、掘削の安全を図るためにAGF-Rを採用した。AGF-Rは一般的なAGFと比較し多量湧水を含む土砂性地山での注入効果が期待できる。表-6にAGFとAGF-Rの比較を示す。

しかしAGF-R工法は、注入プラントが大きく後方台

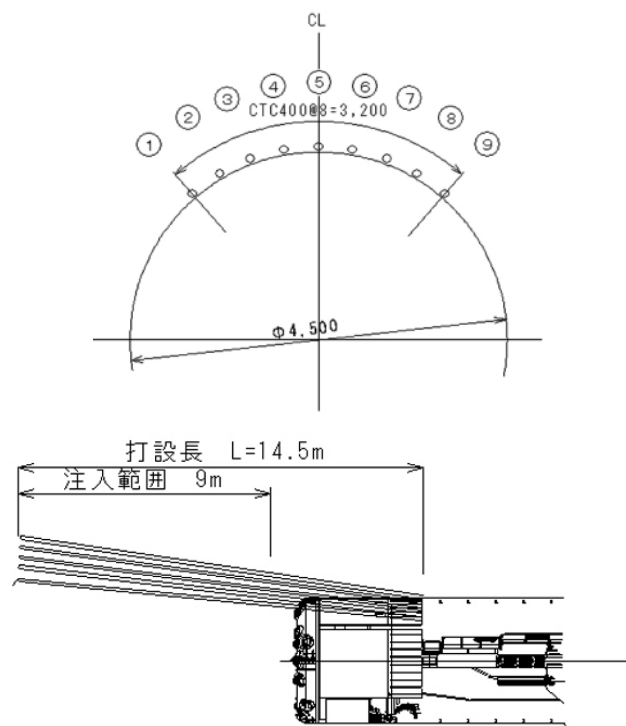


図-4 AGF打設位置図

表-5 F4断層補助工法施工数量一覧表

工法名称	日数	施 工 数 量
スリット注入	2日	PUボルト計20本、注入量90kg.
AGF (1シフト)	6日	φ114mm, L=15.5m×9本 注入量計 700kg
鏡ボルト	1日	13本、注入量1,300kg
AGF-R 1シフト	9日	ルーフサポート上部の先受け目的 φ114mm L=8.0m×15本 注入量 溶液型・懸濁型 23,000L
AGF-R 2シフト	9日	TBM発進のための切羽前方先受け φ114mm L=8.0m×11本 注入量 溶液型・懸濁型 23,000L

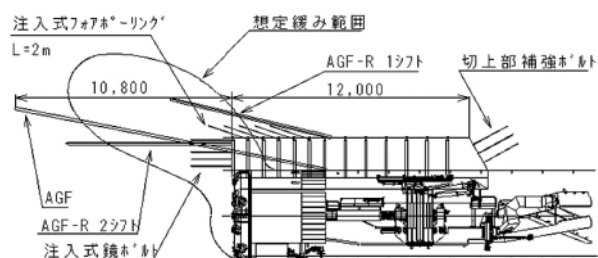


図-5 拡幅発破概要図

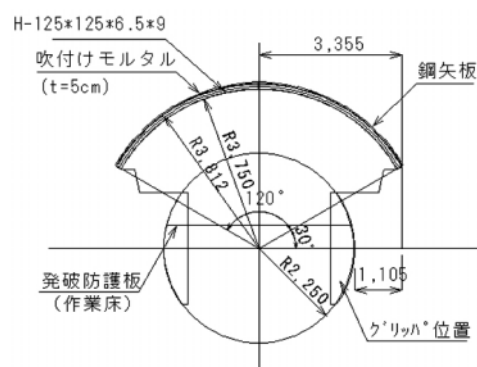


図-6 拡幅工標準断面図

表-6 AGF と AGF-R 比較表

工 法	AGF-R	AGF
注入材の特徴	・浸透性の薬剤（シラクソル UFA、瞬結性懸濁グラウト）を状況に応じ繰り返し注入できる。 ・定量注入後、脆弱部にダブルバックを用いて注入可能。	・注入途中で注入材の変更は出来ない。 ・定量注入後脆弱部が見つけられたとしても、追加注入ができない。
改良範囲	・浸透性が高く直径 2m 程度の改良体の形成が可能。	・浸透性は高いがゲルタイムが短いため、直径 0.6m 程度の改良体の形成が限度
薬剤逸走性	・浸透性が高いため逸走しやすい。	・逸走性は低い。
施工機械	・先進ボーリング機	・先進ボーリング機
打 設 長	・20m ・強度を要する薬剤は浸透性が高く、ゲルタイムが長い ため、鋼管長を長くする必要がある。 ・削孔機、鋼管の能力で削孔延長 20m がほぼ限界である。	・14.5m ・改良体の直径が 0.6m 程度で掘削断面との間隔から 14.5m が適切な打設長となる。
多量湧水下への適応	・AGF 鋼管に逆止弁がついており、地山からの湧水が鋼管内に入らないため改良効果が高い。	・鋼管内に湧水が入り込むため改良効果は薄い。
施工日数	・1 シフト当たり 5～10 日	・1 シフト当たり 2～4 日
硬化時間	・数 10 分～数日	・1 分程度
注入設備	・大型で設備の段取りが大がかり。	・コンパクトで後方台車の中に持ち込める。
TBM 施工での判定	○	◎
多量湧水下での判定	○	△

車の中に入れることができないことや、注入薬液の選定やゲルタイムの調整に専門技術を要するため、施工サイクルの中で行うことは難しかった。

§ 4. 断層破碎帯通過方法の提案

断層破碎帯を TBM で掘進する場合、最も重要な事は前方探査によりその位置や性状を明確にし、脆弱層に入る前に正確な位置で TBM を停止させて適切な補助工法を施工することにある。特に多量湧水を含む断層破碎帯では水が出てからでは注入材が流出や希釈により効果が半減するため正確な位置で TBM を停止させることが重要となる。以下にその方法を記述する。

(1) 前方探査方法

前方探査には DRISS を採用していたが、脆弱層において長尺（55m）で削孔する場合、穴荒れが起りジャミング回数が増加するためフィード圧を変更してクリ粉の排出をしなければならなかった。その結果、固定されたパラメータが無くなり、DRISS の解析結果のみで前方地山を予測することが困難であったため、TBM データによる推定岩盤強度をリアルタイム（2cm 毎）にオペレータ室にグラフ表示し、管理値を設定することで脆弱地山に入る前に TBM の掘進を止めることができた。小鳥トンネルでは TBM 坑壁の肌落ち程度の崩落が始まる推定岩盤強度が 10MPa であったことから、10MPa を管理値とした。10MPa が 1 ストローク継続した場合、TBM の掘進を停止し、DRISS による短尺（10～20m）の前方探査を行い、湧水やクリ粉性状および 50m 毎の前方探査結果と合わせて考察することで、ほぼ正確に前方の地山を把握することができた。

(2) 補助工法

前方探査により前方地山の性状を把握することができ

た場合の補助工法選定には、湧水量が大きな要素となる。また、地山性状の違いによっても選定要素は異なってくるが、小鳥トンネルにおいて実施した最終的な断層破碎帯通過時の補助工法は、前述した AGF による先受け工法を基本とし、さらに湧水や崩落土の状態で追加の補助工法を施工した。

①先受け工法

TBM の施工サイクルに与える影響が比較的少ない AGF が適切である（1 シフト/3 方）。しかし、前方探査により多量湧水及びマサ化した地山が確認できた場合は、その湧水帯に入る前に AGF-R により地山改良を行うことが効果的である。フォアポーリングは多量湧水下においては薬液のリークにより効果が期待できない。

②湧水対策

水抜きボーリングを基本とし、SL 近傍もしくは SL より下で行う。これは、地山改良範囲と競合し注入材が水抜きボーリング孔に逸走することを防止する意味である。

③切羽崩壊対策

鏡ボルトが効果的であるが TBM チャンバー内から施工するため口元からのリーク量が多くなる。よって、ウェスを予め樹脂ボルトに巻きつけておき、孔に挿入することで口元コーキングを行う。また、チャンバー内に薬液が入らないようにカッターの隙間をコーキングする場合、布で行うとシリカレジンで固化し取り除くことが困難となるため、ダンボールによるコーキングを行う。

④切羽前方への進行性崩落対策

TBM 掘削の場合、カッタヘッドからルーフサポート後部までの 5m 間は無支保の状態となる。よって、切羽で発生した坑壁の崩落は、放置して掘進を継続すると切羽とともに継続して抜けていく。そのため、カッタヘッド位置で発生した崩落箇所は、カッタヘッド内から早期に充填することで、切羽前方への進行性崩落を抑制できる。

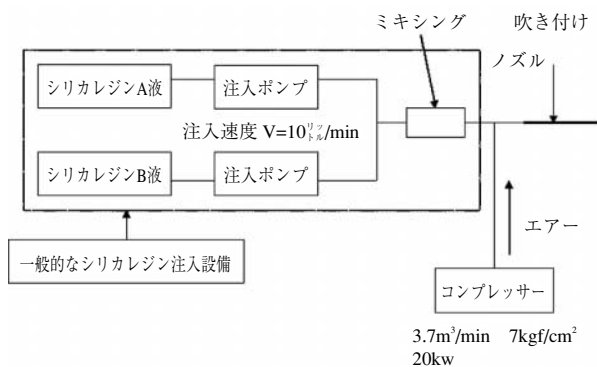


図-7 エアシリカ設備概要図



写真-2 発泡倍率比較

本工事ではカッターヘッドやカッターを痛めることなく可能な充填方法としてシリカレジンのエア吹付を行った。一般的なシリカレジンの発泡倍率は8倍程度であるがエア吹付を行うとエア量によって変化するが最大30倍まで発泡倍率が上がる。この方法はプラントも簡便であり狭い空間での施工が可能のため、TBMでの施工に適している。図-7に設備概要図、写真-2に発泡倍率比較を示す。

⑤各サポート背面の堆積土砂固結方法

サイドサポートやルーフサポートに堆積した土砂は放置して掘進すると、サポートから地山が露出した段階で抜け落ちてインバートに堆積する。その結果、支保工建込前の清掃に長時間を要し、さらにグリッパがその位置に来た時に、抜け落ちた隙間に土囊や尺角等で隙間を埋める必要がある。この土砂崩落を抑止する方法として、PUボルトをハンマで地山に打込みシリカレジンを注入した。その結果、土砂を固結させることができ、さらに各サポートが型枠の役目を果たしシリカレジジン及び土砂が平滑な面となって各サポートから出てくるため、グリッパを押し付ける際に手当てが不要となった。

(3) ルーフサポートの降下対策

補助工法はTBMのルーフサポート上部近傍で施工するため、ルーフサポートを降下させる力が発生する可能性がある。よって、補助工法施工中はルーフサポート圧力を高めにして、降下状態を連続的に監視する。また、ルーフサポートジャッキで押えることができないと判断される場合は、サポート用にジャーナルジャッキ等を用いて降下を止める。

§ 5. 今後の課題

(1) 補助工法

機械的な制約から、フォアボーリングやフォアパイリングはルーフサポート後部からの施工となる。一方改良範囲はカッターヘッドから前面となるためカッターヘッドからルーフサポート後部までの約5mが無駄な削孔となり、サイクルタイムが伸びてしまう。よって、さらに切羽に近い位置からの打設方法の検討が必要である。

(2) セグメントライナー

Ep-Tの場合にスチールセグメントライナーを採用したが、シールドと違いテールシールを持たないため、裏込めの際に妻止めが必要となる。また、ライナー設置時にインバートに堆積した崩落土砂を完全に除去する必要があるためサイクルタイムは820min/mを要した。当現場においてインバート清掃を簡略化できる中抜きセグメントライナーを作成したが、妻止め方法については簡易な方法の検討が必要である。

(3) ベルトコンベヤズリ運搬量

断層破碎帯においてはズリ取込み量が倍近くまで増加する。また、湧水の混入によるベルトの摩擦抵抗の低下により運搬量が減る。断層破碎帯の掘削はTBMの掘進速度を速くしてなるべくズリ取り込みを少なくして掘削したいが、コンベヤ能力で掘進速度および回転数に制約を受ける。よって、コンベヤ能力の増加が必要である。

§ 6. おわりに

TBMにおける断層破碎帯通過に際しての留意点は、切羽前方探査で前方地山を正確に把握し、多量湧水が出る前に補助工法を行うことである。小鳥トンネルにおけるTBM施工は難工事となったが、最終的に多量湧水を含む断層破碎帯の通過に適した前方探査技術及び施工法の1つを見出すことができたと考える。しかし、技術的に未完成なものも含まれるため、今後はこれらをさらに発展させ完成された技術とする必要がある。

最後に、避難坑TBM掘削に際し、御指導御協力頂いたトンネル委員会をはじめ、本社、支店の関係者の方々に感謝の意を表します。