

# 直径12.84m大断面TBMの設計と施工

山崎哲也<sup>1</sup>・川北眞嗣<sup>2</sup>

<sup>1</sup>日本道路公団中部支社建設第二部（〒460-0003 名古屋市中区錦2-18-19三井住友銀行名古屋ビル）

<sup>2</sup>日本道路公団中部支社清見工事事務所（〒506-0101 岐阜県高山市清見町牧ヶ洞2447）

飛驒トンネルは当初、大断面TBMを用いた施工を計画していたが、予想外の不良地山帯・高圧大量湧水帯の出現により、TBMの施工を延期していた。しかし平成15年には、不良地山帯を脱し堅岩帯となったため、平成16年1月より大断面TBMの施工を開始した。本論文では、これまでの掘削状況と、そこで浮き彫りとなった問題点やその対処方法について述べるとともに、このような状況のなかで考えられた新工法について、合わせて紹介するものである。

**キーワード:** 大断面TBM, 改良オープン型, 高浸透型注入材, 飛驒トンネル

## 1. はじめに

飛驒トンネルは、東海北陸自動車道最後の未開通区間である、飛驒清見IC～白川郷IC間に位置する全長10.7kmの高速道路トンネルである（図-1）。

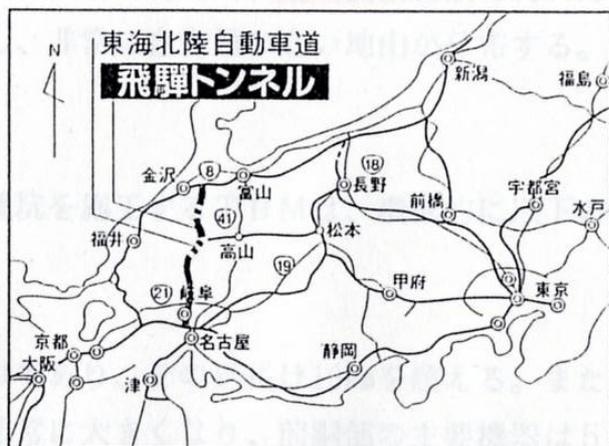


図-1 飛驒トンネル位置図

トンネルの特徴としては、縦断勾配が白川側（富山側）から河合側（名古屋側）に向けて2%の上り勾配となっていること（図-2）、最大土盛りが約1,000mと非常に大きいこと、両坑口ともに10年再現最大積雪深が3mを超え、特に河合側の坑口部はアクセス道路が冬期通行止めとなるような、気象・地形条件が非常にきびしい場所に位置していることなどがあげられる。

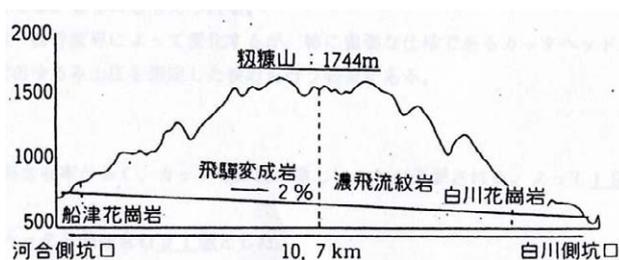


図-2 飛驒トンネル縦断面図

また、当初の地質調査結果からは、中硬岩が大半を占めると想定された。

以上のような条件から、トンネル掘削は白川側からの急速施工を基本とし、道路用に供される本坑、緊急時および維持管理用に使用される避難坑（当面は先進坑と呼ぶ）ともにTBMによる施工で計画された。

平成17年2月現在の進捗は、先進坑77%、本坑51%である。

## 2. 地質概要

トンネル内に分布する地質は、白川側より概ね白川花崗岩・濃飛流紋岩類・花崗斑岩・飛驒片麻岩類で構成される（図-2）。

現在掘削中の濃飛流紋岩類は、白亜紀末（約7,000万年前頃）に形成され、岩相は溶結凝灰岩類・火山角礫岩・火山礫凝灰岩・結晶質凝灰岩・細粒凝灰岩など変化に富むが、そのすべてが硬質であ

る。濃飛流紋岩類中には、しばしば2～3セットの板状節理が交差して発達しており、それらによりブロック状に分離しやすい。また、亀裂面は平滑で連続性がよく、比較的狭在物が少ない。湧水は非常に多い部分があり、先進坑（本坑に先行するパイロットトンネル、将来の避難坑）TBMテール部で最大10t/minを記録している（写真-1）。



写真-1 先進坑TBMテール部の湧水状況

### 3. TBM仕様について

#### (1) TBMの形式

TBMの形式を選定するにあたって、断面が大きいため機体長が長くなり、地質変化への対応が遅れることを勘案し、オープン型とシールド型の有利な部分を採用した、改良オープン型TBM（図-3）に幅広い適用性があると考え、採用した。

本坑で採用したTBMは、掘削径12.84mと世界最大級のものであり、従来のオープン型と単胴シールド型の両方の機能を併せ持ち、良好地山での急速施工性と不良地山での対応性を向上させることを念頭に開発されたものである。すなわち、B・C級地山ではメイングリッパにより坑壁に反力を取り、メインビームを介してカッターヘッドに推力を与えるオープン型式の掘進を行い、吹付けコンクリート、ロックボルトなどのNATM支保が用いられる。D級地山では、現地製作したトンネルライナーをシールド内全周に建て込み、これに反力をとってシールドジャッキにより推力を与える単胴シールド型式での掘進が行える。また、不良地山対策として先進ボーリングや長尺鋼管フォアパイリング、鏡ボルトなどの補助工法を、TBM内から施工できる設備を常備している。

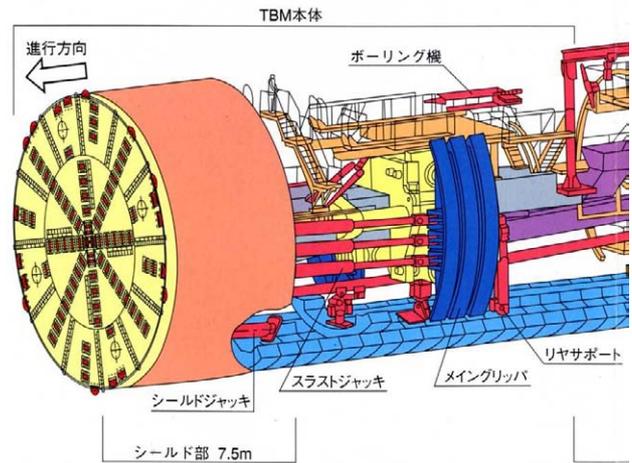


図-3 改良オープン型TBM

#### (2) 基本コンセプト

TBM掘削は、基本的には切羽が自立することが前提であり、良好な地山にメイングリッパを張り出すことにより反力を確保し、高速掘進を可能にする。しかし、切羽が自立しない場合や、坑壁での反力が十分確保できない不良地山区間での掘削では、掘進速度の低下を、地山改良とTBM装備能力によって、最小限にすることが重要になる。

切羽の自立が困難な地山状況においては、注入等の補助工法を行い、切羽を自立させて掘削することを基本とするが、補助工法の効果が不十分な場合や、突発的に不良地山に遭遇する可能性も否定できない。よってそのような事態に対処できる能力をマシンの基本仕様を含めることにより、不良地山遭遇時の工程短縮、コスト縮減につながるものと考えられる。

#### (3) 基本仕様

TBMの主要諸元は下記のとおり（表-1）。

表-1 TBM主要諸元

項目	参考諸元
カッター径×個数	19インチ×90個
スラスト推力	最大 3,400tf
カッターヘッド回転数	最大 4rpm
カッターヘッドトルク	低速域：3,246tf-m 高速域：1,034tf-m
カッターヘッド駆動動力	4,250kw
補助推進用推力	5,650tf
メイングリッパ推力	4,500tf×2

##### a) カッター径

飛騨トンネルでは、硬岩地山の岩盤が多く占め、かつ石英含有率が高く、カッターの磨耗が激しいことが予想された。よって、19インチカッターを採用している。

#### (4) 細部仕様

飛驒トンネルで使用するTBMは、吹付けコンクリート・ロックボルトの支保と、トンネルライナーによる支保の両方が施工可能でなければならない。支保作業は、TBMテールおよびTBMテール直後に行う必要があることから、それらの位置より安全、確実かつ迅速に行えるような機構とした。

##### a) 吹付けコンクリート

前方（TBMテール直後）で行う吹付け範囲は、上部約150°で、それ以外の範囲はグリッパ後方の作業台車にて実施することで、インバートライナーまでの290°をカバーすることとした。

##### b) ロックボルト

TBMの掘進に影響を与えずに作業できるように、TBMテール直後では、約120°の範囲を施工、その他はTBMと独立して動くことのできる、後方の作業台車より打設する機構とした。

##### c) アーチライナー

TBMテール直後までホイストにて運搬後、エレクターにて組み立てを行う。上部の組み立ては可動作業足場にて、横部の組み立てはスラストシリンダーからはね出し足場にて行う。

##### d) カッタ

内取り付け方式で、点検・交換が容易にできること。

##### e) 補助工法

フォアパイリングは、メイングリッパ上部の作業デッキに搭載された先進ボーリング機にて行う。注入式長尺先受工は、貫通孔を利用し上部120°の範囲を打設できる機構とした（**図-4**）。差し角は約10°、削孔長は15mで計画した。

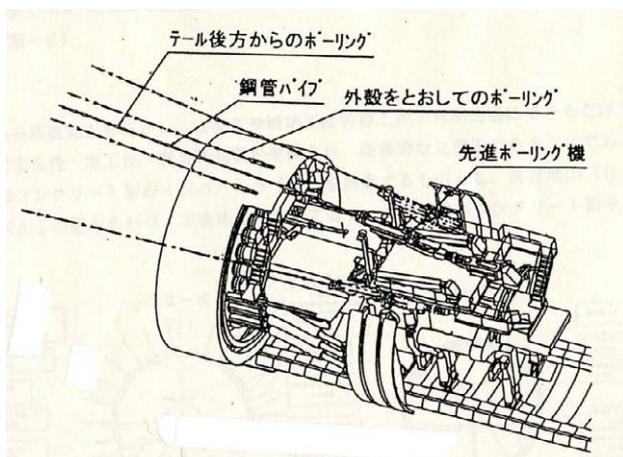


図-4 フォアパイリング施工のイメージ

切羽前面へのボーリングは、上部はグリッパ上部に搭載した先進ボーリング機を使い、下部は外部からクローラタイプのボーリング機を持ち込んで施工する計画とした。

#### 4. 掘削状況

本坑の地質は、先行する先進坑および作業坑（本坑掘削を助けるために掘削された本坑左側のトンネル）の切羽観察・施工データから、白川側坑口から約3,000mの地点より、比較的自立性の良い安定した濃飛流紋岩となり、かつ両坑による水抜き効果も認められたことから、同地点より本坑TBMの掘進を開始することにした。



写真-2 アーチライナー施工状況

2004年1月より、TBMは掘進を開始した。掘削径12.84mのTBMによる山岳トンネルの掘削は、国内外においても初めてのことであり、最初の200m区間は試験施工と位置付け、TBMに実負荷をかけての機能確認と調整、各補助工法の試験などを行いながらの掘進とした。同区間の地質は先進坑のデータから、亀裂の発達した濃飛流紋岩で、岩自体の強度は十分大きいものの、亀裂により切羽の小崩落が想定されていたため、掘削は支保に全周アーチライナー（**写真-2**）を用いた、シールド掘進モードでスタートした。

試験施工においては、掘削開始直後より岩盤亀裂の影響が顕著に現れ、切羽では複数の卓越した節理面が組み合わさり、カッタヘッド前面の地山が大きなブロック状に抜け落ちる現象（以下「先掘れ」と呼ぶ）が多発した。この現象は特に下半部（**写真-3**）に多く発生し、先掘れによってできる空洞はあ

たかも古墳の石室のような形状となり、奥行きは3mから最大7mにも達し、上半部がオーバーハング状態となることも多かった（写真-4）。



写真-3 先掘れ状況（下半部）



写真-4 先掘れ状況（上半部）

この先掘れ現象のため、カッタヘッド面盤のディスクカッタの圧砕による掘削はほとんどなく、外周ドーム部のカッタのみによる掘削となり、崩落岩盤は二次破碎されてカッタヘッドチャンバーに取り込まれるような状況となった。そのため、大きなずりによるベルトコンベヤの損傷やホッパー部の閉塞トラブルが頻発した。また、切羽と面盤の間で崩落した岩盤が二次破碎（いわゆる芋洗い状態）されるため、面盤の外周付近やカッタ、スクレーパー等の磨耗が顕著であった。ちなみにこの時の地山状況は、岩塊の強度は150～490Mpa、石英含有率は、95%と非常に高い値を示したこともあった。

こうした現象の発生は、当現場の濃飛流紋岩の特

性とTBM掘削径の大きさから考えて、防止が困難と思われたことから、そのような場所では先掘れがTBM断面外に広がらないよう、先進ボーリング等により確認された不良地山部分には、長尺鋼管フォアパイリングにより、補強を行いながらの掘進を実施している。

現在、試験施工は終了し、切羽が自立する区間においては、掘削～支保の作業がほぼ想定どおりに行えることを確認した。最近では、AGFの施工をせずに掘削できる区間が大部分となり、平成16年12月には月進200mを超えた。しかし、今後も先進坑が遭遇した高圧・大量湧水区間の掘進も控えており、慎重な掘進を続けている。

## 5. 施工上の問題点と対処方法

施工状況でも述べたように、現在のTBM掘削においては、面盤前面の崩落（先掘れ）や断面外へ至る崩落が起きている。そのため、下記のような問題が発生しており、それぞれに対策を講じている。

### a) ベルトコンベア，ホッパー部の破損

大きなずりの取り込みによる、ベルトコンベヤの損傷や、ホッパー部の閉塞トラブルについては、ホッパー部を改良することにより対応した。

### b) 面盤等の磨耗

面盤の外周付近の磨耗については、耐磨耗板を貼り付けて凌いでいる。

カッタやスクレーパーの磨耗については、取り替えるしか方法がないため、極力掘削に影響しないタイミングで交換を行っている。

### c) 先掘れ

そもそも上記問題の原因は、先掘れであるので、これについては詳しく記述することとする。先掘れについては、AGFを用いた切羽注入の施工（図-5）を試みたが、密着した亀裂に対しては、直径12.84mのTBMの切羽全体に注入材を浸透させることは難しかった。

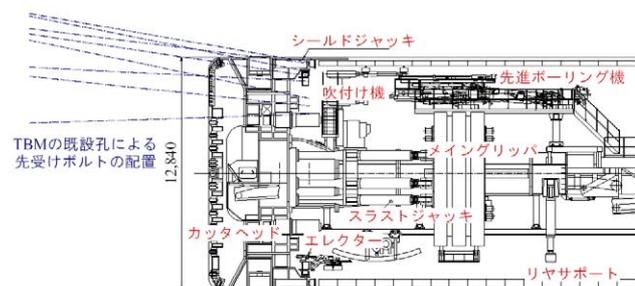


図-5 先受けボルト，切羽ボルトの配置

そこで高浸透型注入材による工法が考案された。不良地山での断面外崩落を抑制するには、亀裂面に粘着力を与えることが有効と考えられたため、地山改良注入を試みた。当初、超微粒子セメントやシリカレジンをういて掘削前の非開口亀裂に対する注入を行ったが、ほとんど浸透しない結果となった。そこで注入材混合粘度が約  $10\text{mPa}\cdot\text{s}$  (水： $1\text{mPa}\cdot\text{s}$ ) となるアクリル酸塩系の注入材を開発し、適用した (図-6)。

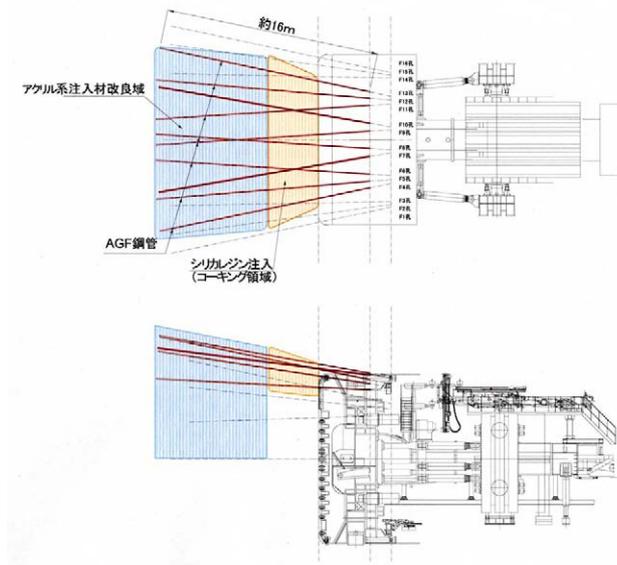


図-6 アクリル系注入材の施工イメージ

これを用いた注入では、上記と同条件の岩盤亀裂に対しても高い浸透性が確認され、掘削時においても注入による地山崩落の抑制効果が確認された (写真-5)。



写真-5 アクリル系注入材の浸透状況

アクリル系注入材の材料特性を表-2に示す。

表-2 アクリル系注入材の材料特性

混合量比 (A液 : B液 : C液)	1 : 1 : 1
比重	1.17
ゲルタイム	約 30~300 秒 (調節可能)
危険物関連法規制	無し

### (1) 材料の特徴

アクリル系注入材は、これまでのレジ系、セメント系注入材と比較して、下記のような特性をもつ。

#### a) 強度特性

シリカレジ系、懸濁型注入材と比較した主な強度特性は下記のとおり (表-3)。

表-3 強度特性比較

材料	シリカレジ系	懸濁型	アクリル系
単体強度 (1時間)	$2\text{N}/\text{mm}^2$	---	$0.8\text{N}/\text{mm}^2$
単体強度 (1日)	$2\text{N}/\text{mm}^2$	$2\text{N}/\text{mm}^2$	$0.8\text{N}/\text{mm}^2$
7号珪砂注入体	浸透せず	浸透せず	$2.8\text{N}/\text{mm}^2$

#### b) 浸透性

粘性の低い液体注入材であることから、細かい亀裂にも浸透しやすい。一般のシリカレジ系と粘性の比較を行った結果を下記に示す (表-4)。

表-4 粘性比較

材料	水	シリカレジ系	アクリル系
粘性	$1\text{mPa}\cdot\text{s}$	$80\sim120\text{mPa}\cdot\text{s}$	約 $10\text{mPa}\cdot\text{s}$

#### c) 鉄との付着

化学分子構造的に、鉄と付着する基を持っていないため、鉄との付着性に乏しい材料である。したがって、ロックボルトの定着材等、鋼材を地山に固定するための用途としては不利な材料であるが、TBMの機体直近でリークしたり、カッターヘッド内にリークした場合でも、注入材により TBM 本体を拘束されたり、カッターリングやベアリング部分に重篤な損傷を与える可能性が低く、TBM 機体付近の地山改良のための用途としては好都合な特性と言える。

#### d) 安全性

人体に有害な物質ではなく、また、危険物としての管理を必要とするものでもないため、取り扱い、管理が容易である。

### e) 施工性

レジ系注入とほとんど同じ要領（図-7）で施工が可能である。また、現場で配合が変えられるため、ゲルタイムの調整が容易に行える。

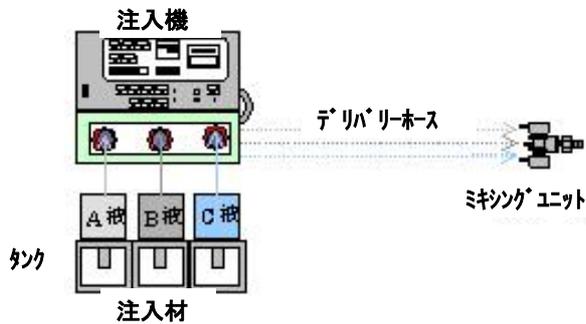


図-7 アクリル系注入系統概念図

飛驒トンネルの大断面 TBM による掘削は 900m を越えた。本論文では、これまで掘削状況が良好とは言い難い地山が大部分であったこともあり、大断面 TBM の施工上の課題を中心に記述してきた。施行経過より、先掘れ現象の発生するような切羽の安定性が十分でない状況でも、適切な対策を講じることにより、大断面 TBM の掘進が可能であることが確認されている。

今後は、先行する先進坑 TBM の施工実績より、地質は良化する傾向にあることから、TBM 本来の急速施工を実現するための施工技術の確立が必要と考える。

### 参考文献

- 1) 寺田光太郎, 川北眞嗣, 島屋 進, 領家邦泰 : 12.84m TBM による高速道路長大トンネル施工に関する考察, 建設機械シンポジウム, 2005.1

## 6. おわりに