トンネルと地下　平成20年11月1日発行第39巻第11号　昭和45年11月18日第3種郵便物認可
出版元　株式会社土木工学社　東京都新宿区岩戸町16番地メイジャー神楽坂

長年の多くの実績から得た豊富なノウハウという「宝物」を新しい技術に。
いらなくなった物で必要な物を作り出す。それが私たちの技術です。
トンネル、電線共同溝、空港、工場敷地内、ありとあらゆるニーズにお答え出来ます。
資源循環型リサイクル製品「セラダクトA(エース)」。

トンネル内専用として
セラダクトA(エース) ネオ
neo

熊本県 熊本3号トンネル
西日本高速道路株 第二名神 栗東トンネル
名四国道事務所 足助バイパス 足助トンネル
高山国道事務所 中部縦貫道 前原1号トンネル

－特長－
標準管の長さは65cmの新規格
※従来のセラダクトAは60cm。
接続はカップリング方式で簡単スピーディー
※従来のセラダクトAはパッキン介在ボルト締め

セラダクトAシリーズは「エコマーク認定基準」に適合し、財団法人 日本環境協会から「エコマーク商品」として認定されました。

再生材料を使用 採石および窯業粘土、陶磁器屑 50%以上
セラダクトAはエコマーク認定商品です 第 04 131 014 号

ISO 9001:2000取得
杉江製陶株式会社
sugie

本社・工場　愛知県知多郡武豊町字上山一丁目76番地　〒470-2387
TEL(0569)35-2360(代)　FAX(0569)35-4087
東京支店　東京都渋谷区恵比寿一丁目21番8号セラ51ビル　〒150-0013
TEL(03)3442-6181　FAX(03)3442-1691
大阪支店　大阪市都島区御幸町1丁目3番1号　〒534-0012
TEL(06)6922-6991　FAX(06)6922-2498

http://www.sugie.co.jp/

定価 1,575円
本体価格1,500円
雑誌06619-11
4910066191184
01500

11
459号
トンネルと地下
JTA 2 KR
●飛騨トンネル開通記念特集号
vol. 39 no. 11 2008

昭和45年11月18日第3種郵便物認可　平成20年11月1日発行(毎月1回1日発行)　第39巻第11号　通巻459号　ISSN 0285-631X

トンネルと地下 11

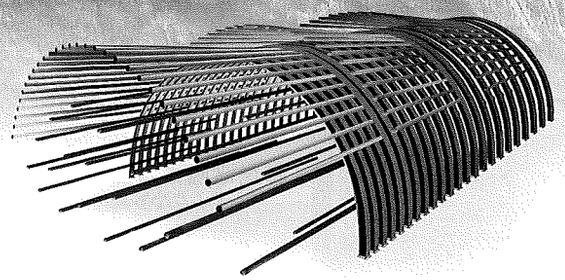
vol. 39
no. 11
2008

Tunnels and Underground

飛騨トンネル開通記念特集号

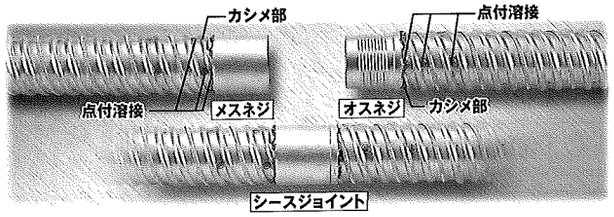
日本トンネル技術協会誌

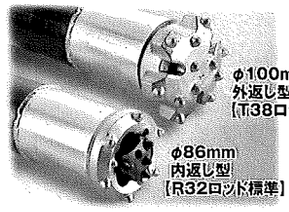
ユニークな発想と高品質・自信の価格



FIXチューブ工法

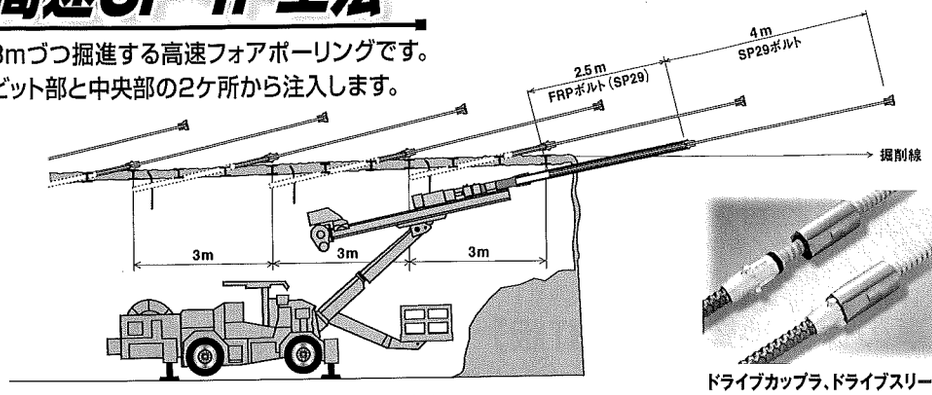
※天端にφ76.3長尺鋼管、鏡部に連続突起を有する長尺鋼製シースを引込み薄肉鋼管を挿入して注入。周辺地山にしっかりと"**FIX**"します。

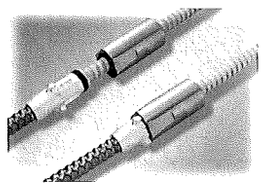




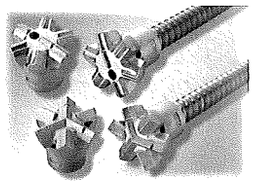
高速SP-IF工法

※3mづつ掘進する高速フォアポーリングです。
ビット部と中央部の2ケ所から注入します。



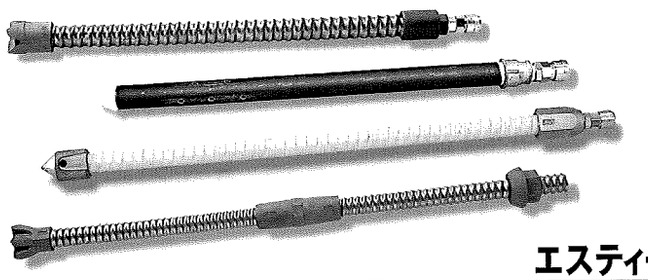


ドライブカップラ、ドライブスリーブ



φ65mm ロストビット(SP29)

自穿孔ボルト&注入管

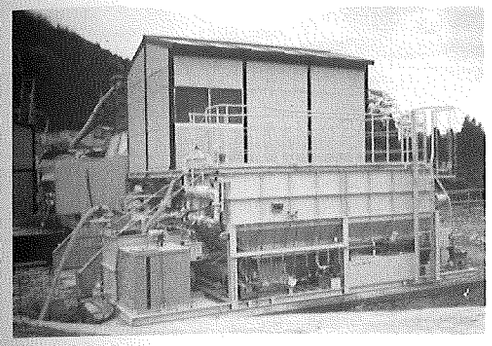


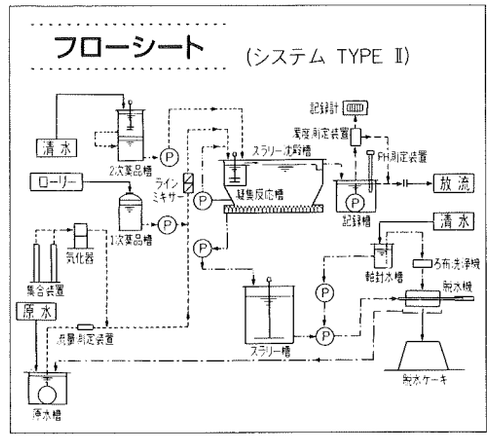
※他にも脚部や坑口周りに利用できる各種の補強土工法、マイクロパイル工法を準備しております。

STE
エスティーエンジニアリング株式会社
ST ENGINEERING CORPORATION
〒581-0833 大阪府八尾市旭ヶ丘1丁目108番地2
TEL.0729-90-0250 FAX.0729-90-0251
http://www.st-eng.co.jp

TWS型シリーズ 濁水処理装置

コンパクトながら 大きな処理能力





特　長

1．基礎、土木工事の期間が短く安価である。
設置面積が小さくフラット基礎で設置可能である。

2．運転経費が少ない。
ラインミキサー及び余剰ガス循環システムの組み合せにより効率の良い中和が出来炭酸ガス使用量の節約になる。角型シックナー沈降面積及び容積をより大きく設計しており又傾斜板を採用していることから一次、二次薬品が少量でも効率の良いSS処理が出来る。複式沪板型の脱水機を採用していることから沪布等の消耗費が少ない。
又、加圧型脱水方式の為無薬注で脱水出来る。

3．シックナー内流速を最少にする設計であることより清澄度の高い処理水が得られ、再利用が可能である。

4．運転管理が容易である。
原水流入に合せた自動運転方式を採用している。パトライトによる異状警報装置を標準装備している。
脱水機は、全自動無人化タイプを採用している。処理水の水質監視装置及び記録を自動化しており、運転状況の確認が容易である。

5．多種多様な原水に対応出来る。
凝集反応槽攪拌機及び集泥用レーキにインバーターを採用し、水量及び濃度に幅広く対応する。

6．豊富なオプション装置
高分子凝集剤の自動溶解装置
処理水返送装置（異状警報装置と連動）
炭酸ガス後中和処理装置
鉄分除去処理装置（エアレーション装置等）
スラリー再濃縮装置
脱水助材添加装置
自動沪布洗浄装置

シックナー5機種、脱水機4機種を標準化し、処理量に応じた自由な組み合わせが可能です。
あなたの現場にピッタリフィットのシステムを御検討下さい。

Waste Water Treatment System

詳細資料請求、お問い合わせは

株式会社 フジテックス
本社　〒930-0821 富山市飯野12-1
TEL (076)452-1616(代)　FAX (076)452-1617

トンネルと地下　11月号目次　Vol.39, No.11, 2008 Nov.

CONTENTS CONTENTS CONTENTS CONTENTS CONTENTS CONTENTS

■巻　頭　言

飛騨トンネル完成，そして東海北陸自動車道全線開通にあたって
横田　耕治……5

■特　　集

飛騨トンネルの建設を省みて
足立　紀尚……7

飛騨トンネルの開通までの歩み
寺田光太郎……9

計画と地質調査
佐野　信夫・川北　眞嗣・森山　　守……17

避難坑の設計と施工
佐野　信夫・兼松　　亮……27

本坑TBMの計画
佐野　信夫・小林　伸次……37

本坑の設計と施工
川北　眞嗣・領家　邦泰……47

高圧大量湧水への挑戦
川北　眞嗣・築地　　功……59

CONTENTS CONTENTS CONTENTS CONTENTS CONTENTS CONTENTS

シングルシェルへの挑戦
森山　　守・大塚　　勇・小原　伸高……69

安全・安心のためのトンネルの設備技術
東　晋一郎・森吉　應之・川村　康史……77

飛騨トンネルの施工を終えて
鈴木　幾雄・山田　隆昭・寺田光太郎・松原　利之・小林　伸次……85

■連 載 講 座

山岳トンネル先進ボーリング入門(3)
―ボーリング機器とその性能(2)―
山岳トンネル先進ボーリング連載講座小委員会……91

■現場だより

「杜の都」仙台市青葉山より
浅川　敏郎……16

■資　　料

トンネル千夜一夜(47)
小野田　滋……14

土木情報
編　集　部……46

トンネルジャーナル
編　集　部……68

工法・技術・製品ニュース
編　集　部……84

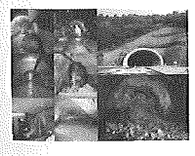
トンネルワールドニュース
JTA国際委員会……100

■会　　報

会　　報
日本トンネル技術協会……102

【表紙説明】

飛騨トンネル開通記念特集



トンネルの調査検討が開始されてから約20年，避難坑の掘削を開始してから約10年を経て，2008年7月5日に日本の道路トンネルで2番目に長い飛騨トンネルが開通した．飛騨トンネルは，日本で初めて10m超級のTBMを使い全断面掘削に挑戦したトンネルである．高土かぶり圧や高水圧と大量の湧水の中，避難坑や本坑でのNATMとTBM掘削をさまざまな技術を駆使することによって無事開通を迎えた．また，完成したトンネルは，長大道路トンネルでの安全や安心のためのトンネル設備を備えている．

〔写真提供：中日本高速道路(株)〕

Kanaflexの電力・通信ケーブル保護管

都市部での電線集中化工事を省力化・効率化

電力・通信ケーブル用多条保護管　特許出願中

カナレックスML

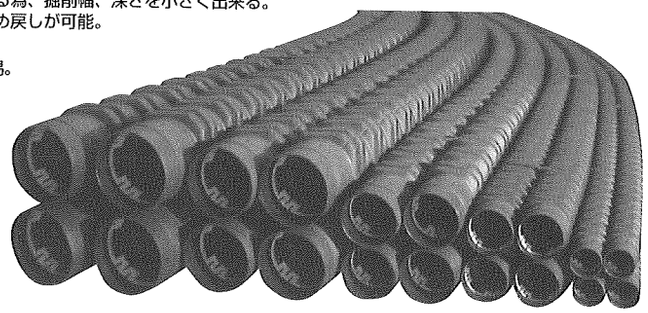
電線共同溝をはじめとする
電力・通信ケーブルの埋設管工事
情報化時代に伴う
光ファイバーの多条敷設
都市部での電線地中化工事を
省力化・効率化

1.独自構造（波付き管と管台一体型リブの連続構造）
・リブに平面部があり、管を密着させて敷設できる為、掘削幅、深さを小さく出来る。
・従来品に比べ、良好な砂の充填ができ、一括埋め戻しが可能。

2.可とう性に優れる
・上下左右に曲がり、既設物や障害物の回避が容易。

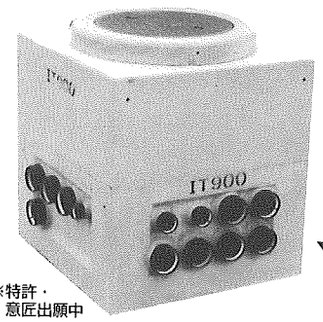
3.優れた性能
・軽量で、全サイズワンタッチ接続の採用により、工事の省力化が図れる。
・ワンタッチ式のロングベルマウス、ベルブロックを採用することによりハンドホール接合部の省力化が図れる。
・JIS C3653（附属書1及び3）の圧縮強度試験、難燃性試験をクリア。

4.摩擦係数が低く整直性が良い為通線がスムーズ



ハンドホール工事の工期短縮・工費削減に現場の加工作業を大幅に軽減できる

ワンタッチ継手付ハンドホール



※特許・意匠出願中

管路に継手差口をねじこみ　継手受口に差しこむだけ　これで接続完了。

ワンタッチ継手（ベルマウス付直材）を工場で取り付けてご納品。
管路接続がスピーディー、確実に行えます。

●本商品には、専用FEP管として、カナフレックスの「カナレックス」をご使用下さい。

TVコマーシャル放映中　テレビ朝日系「サンデープロジェクト」（日曜　朝10:00～11:45）

カナフレックス コーポレーション株式会社　ISO 9001認証取得
株式会社 インテック

東京本社　〒106-6117　東京都港区六本木6-10-1（六本木ヒルズ森タワー17F）
TEL(03)5770-5111　FAX(03)5770-5130
大阪本社　〒530-6017　大阪市北区天満橋1-8-30（OAPタワー17F）
TEL(06)6881-0767　FAX(06)6881-0769
営業所　札幌・仙台・横浜・金沢・名古屋・神戸・広島・高松・福岡・鹿児島
直営工場　北海道・仙台・栃木・千葉・滋賀・愛東・広島・四国・九州

総務委員会広報小委員会会誌WGの構成（五十音順・敬称略）

〔主　　査〕

大　島　洋　志　　国際航業株式会社上席フェロー技術センター長

〔幹　　事〕

池　田　豊　人
国土交通省大臣官房技術調査課技術企画官

大　石　敬　司
東京地下鉄株式会社建設部工事課課長

久多羅木　吉治
東亜建設工業株式会社土木事業本部技術部長

城　間　博　通
株式会社高速道路総合技術研究所
道路研究部トンネル研究担当部長

高　瀬　昭　雄
独立行政法人鉄道建設・運輸施設整備支援機構
鉄道建設本部計画部計画課長

千　葉　　隆
清水建設株式会社土木技術本部
地下空間統括部部長

長　島　芳　雄
株式会社竹中土木常務取締役

濱　　建　介
株式会社アオバ取締役会長

福　家　佳　則
鹿島建設株式会社土木管理本部土木工務部
トンネルグループ長

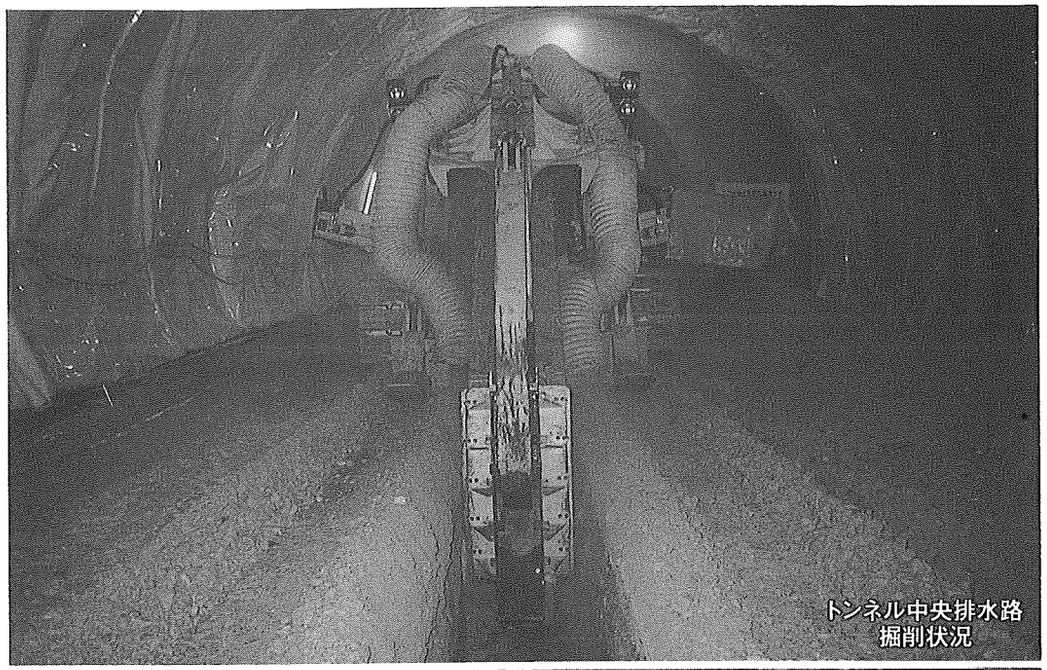
松　原　利　之
飛島建設株式会社土木事業本部技術統括部
トンネル技術グループ部長

山　道　哲　二
株式会社大林組東京本社生産技術本部
統括部長

領　家　邦　泰
大成建設株式会社土木本部土木技術部
トンネル技術室部長

トレンチャー

硬質地盤の溝堀はトレンチャーをお試し下さい。



トンネル中央排水路
掘削状況

施工例

トレンチャーによる
施工

トレンチャーの性能・諸元

トレンチャーの種類	TRS-985	1175/D7	40/30	60/35
メーカー名	テスメック	テスメック	マステンブルグ	マステンブルグ
掘削幅(最小)cm	45	75	70	70
掘削幅(最大)cm	60	100	110	110
掘削岩の硬さ(最大)	500kg/㎠	700kg/㎠	700kg/㎠	1000kg/㎠
重量 t	36	53	50	59
長さ m	13.0	10.8	14.0	15.4
幅 m	2.5	3.2	2.95	2.98
高さ m	3.30	2.86	3.00	3.20
エンジンの出力 PS	300	402	450	600

※掘削岩の硬さは目安になります。詳細はご相談ください。

ワールド開発工業株式会社

●本社/営業部　〒381-0101 長野県長野市若穂綿内7484

☎(026)282-3671㈹ FAX(026)282-5803

http://www.wkk.co.jp/

編集委員会の構成（五十音順・敬称略）

〔編集委員長〕

大島洋志　国際航業株式会社上席フェロー技術センター長

〔編集参与〕

今田　徹
東京都立大学名誉教授

定塚正行
日本シビックコンサルタント株式会社
参与・技師長(山岳トンネル担当)

高橋良文
東京都下水道サービス(株)管路部長

橋本定雄
(元)東京都公営企業管理者下水道局長

濱　建介
株式会社アオバ取締役会長

〔委員〕

木谷日出男
財団法人鉄道総合技術研究所
防災技術研究部部長

佐山順二
東京電力株式会社電力流通本部工務部
設備渉外・調整グループ課長

清水　満
東日本旅客鉄道株式会社東京工事事務所
立体交差課長

城間博通
株式会社高速道路総合技術研究所
道路研究部トンネル研究担当部長

田村聡志
東京都水道局建設部工務課長

中本忠道
独立行政法人鉄道建設・運輸施設整備支援機構
鉄道建設本部工務部工務第一課総括課長補佐

西村　聡
東京地下鉄株式会社鉄道本部改良建設部
第二工事事務所所長

野邑敏行
東京都交通局建設工務部計画改良課長

袈岩滋之
東京都下水道局建設部設計調整課長

真下英人
独立行政法人土木研究所
道路技術研究グループ長

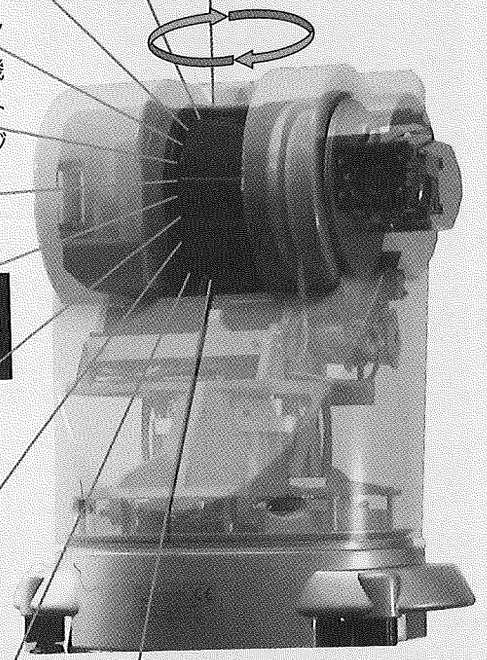
Callidus™ レーザースキャナー

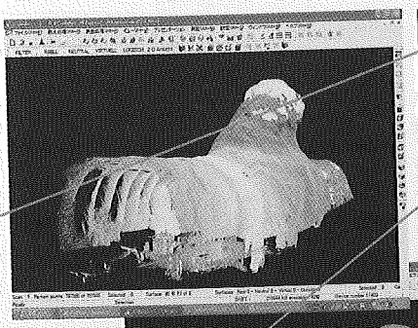
3次元トンネル断面計測機

測距精度±5mmで、1秒に1000点以上計測する3次元トンネル断面計測機。1つの機械点からトンネルの約20m(1)の範囲を10分で計測できます（機械点前後）。測定データの3次元展開図は、まさにトンネルを絵画のように詳細表示します。又、内蔵デジタルカメラで測定範囲を写真として記録可能です。

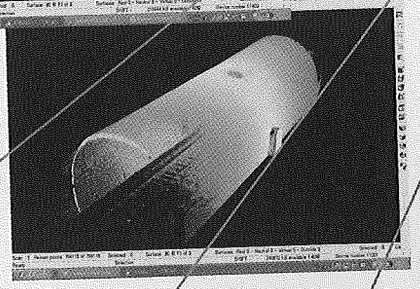
(1) 直径約8mのトンネルの場合

全周360°を10分でスキャン





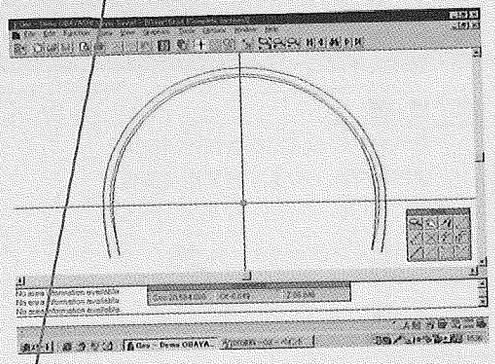
特殊なトンネル形状も対応可能です。



単独スキャンを合成し、トンネル全体を簡単に3次元表示できます。

データ解析および製図「GEOWIN」

AUTOCAD搭載の後処理ソフト「GEOWIN」は、測量計算ソフトを中心としたトンネル管理システムです。カリダスで計測したデータを3次元メッシュ（ポリゴン）で補間した後、断面を指定するだけで設計断面との比較図、設計断面に対する各観測点の差、観測断面の円周長、観測断面の面積、観測範囲のボリューム計算などが計算・表示・出力できます。



■ 販売・レンタル 株式会社ソーキ
〒550-0025 大阪市西区九条南4−2−4
TEL：06-6586-1707 FAX：06-6586-1277
URL：http://www.sooki.co.jp/

■ 製造元 トリンブルジャパン株式会社
〒135-0007 東京都江東区新大橋1−8−2
新大橋リバーサイドビル101
TEL：03-5638-5022 FAX：03-5638-5016

トンネルと地下 VOL. 39 No. 11 掲載概要

祝 飛騨トンネル開通

トンネルの調査検討が開始されてから約20年，避難坑の掘削を開始してから約10年を経て，2008年７月５日に日本の道路トンネルで２番目に長い飛騨トンネルが開通した．飛騨トンネルは，日本で初めて10m超級のTBMを使い全断面掘削に挑戦したトンネルである．施工では，高土かぶり圧や高水圧と大量の湧水の中，避難坑や本坑でのNATMとTBM掘削をさまざまな技術を駆使することによって無事開通した．また，完成したトンネルは長大道路トンネルでの安全や安心のためのトンネル設備を備えている．

本特集号では，飛騨トンネルの開通にあたり計画から設計・施工を振り返り，結果や適用されたトンネル技術などについて報告するものである．また，関係者に施工を振り返っていただいた．

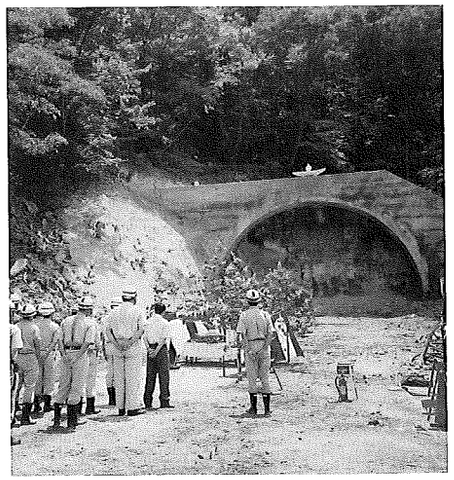
Special Edition: Hida Tunnel, Tokai Hokuriku Expressway

Approximately 20 years after its investigation and approximately 10 years after the commencement of excavation of an evacuation tunnel, the Hida Tunnel, the second longest road tunnel in Japan opened on 5th July, 2008. The Hida Tunnel is the first tunnel in Japan to attempt full-face excavation by an over 10 m class TBM. Construction was accomplished with diverse technology in NATM and TBM method for the evacuation tunnel and the main tunnel in a condition with high overburden and water pressure and a large volume of water inflow. In addition, it is a very long tunnel equipped with safety and security installations.

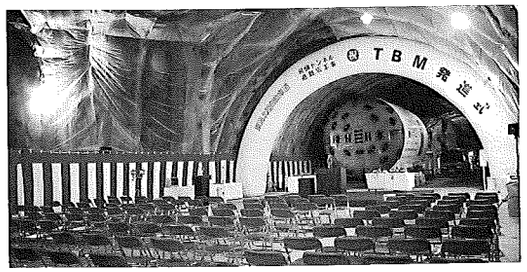
This special issue was edited for opening of Hida Tunnel, looks back on subjects from planning to design and construction, and reports the construction results and applied tunnelling technologies. In addition, the articles about the experiences and memories of this construction by persons concerned are put in.

飛騨トンネル開通までの歩み

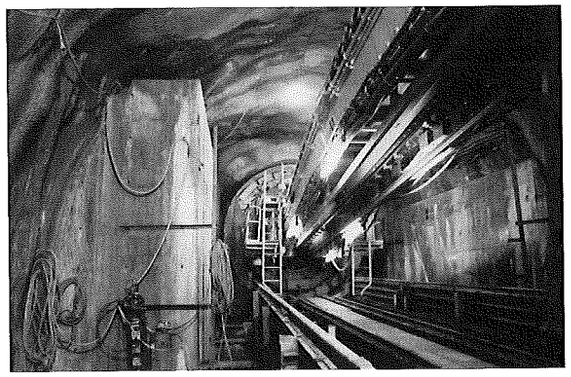
起工式



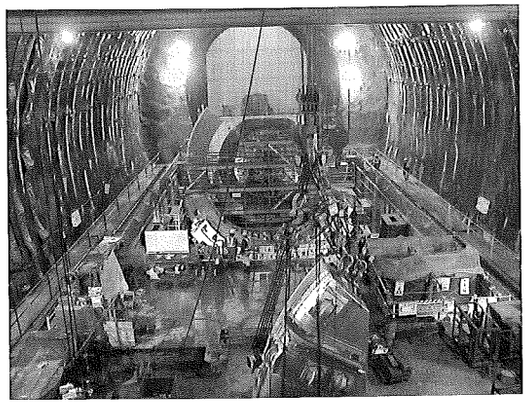
安全祈願祭



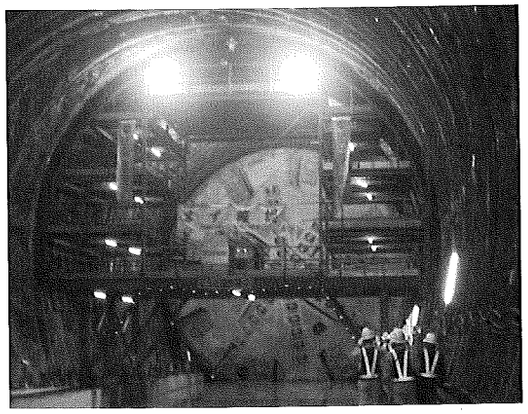
避難坑TBM発進式



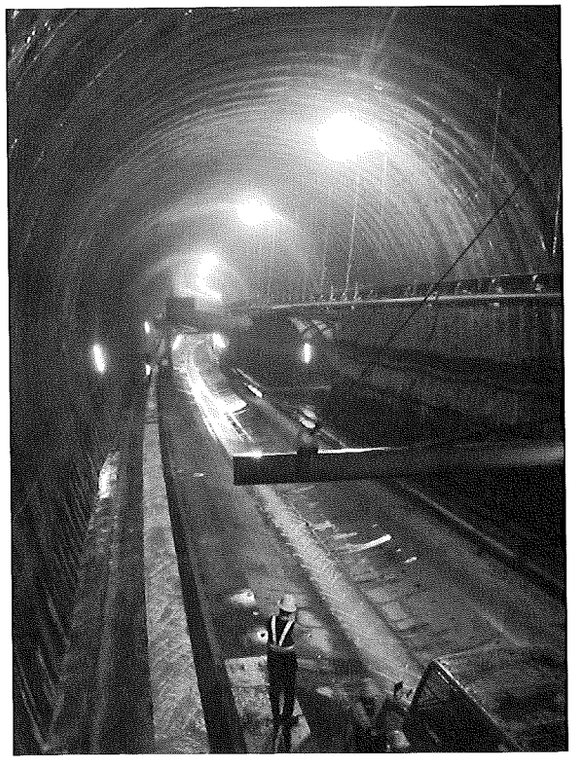
避難坑TBM発進



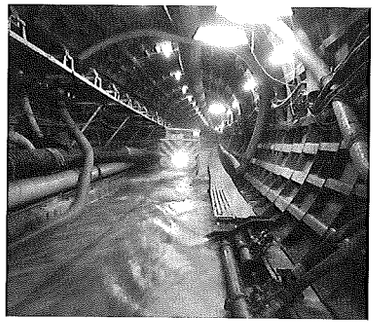
本坑TBM組み立て



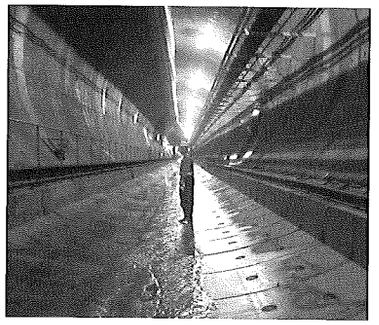
本坑TBM発進前



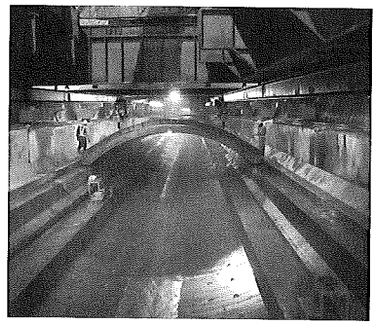
本坑TBM通過断面（NATM）



先進坑湧水



TBM RCライナー組み立て完了

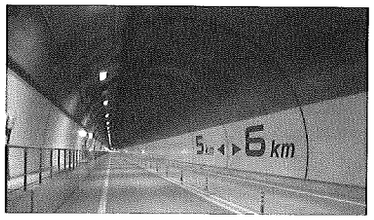


路盤下構造物の施工

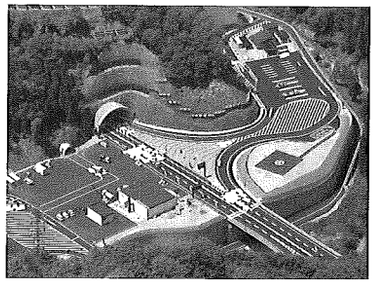
「臥薪嘗胆」の合言葉を前に，高々と万歳！

本坑貫通式

開通式



坑内距離案内

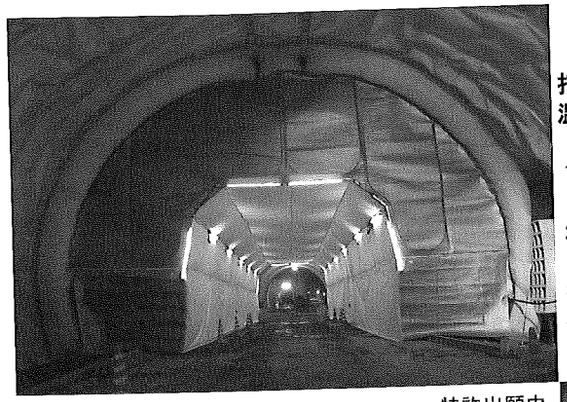


飛騨河合PA（飛騨トンネル坑口）

トンネルバルーン覆工コンクリート
トータル養生工法

長期耐久性に優れた高品質な覆工コンクリート施工を実現します！

NETIS登録
(No.HR－040005)



特許出願中

セントル温度養生バルーン

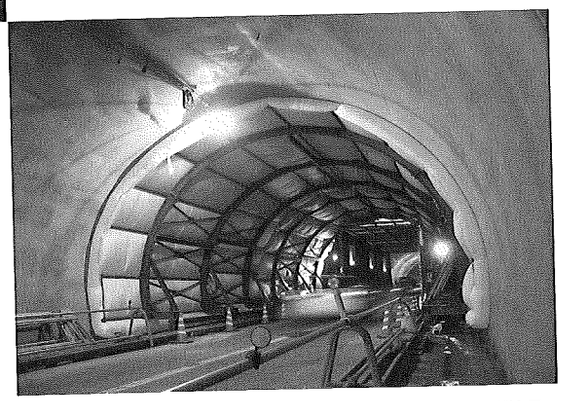
打設後から脱型までセントルをバルーンで覆い温度養生をします。

【特徴】
1．若材齢時に温度管理をすることで初期強度が向上します。
2．高品質コンクリートの確保が可能です。
（脱型時コンクリートの付着が減少します）
3．サイクルタイムの短縮が可能です。
4．洗い水が車両通行部に落ちません。

覆工養生バルーン

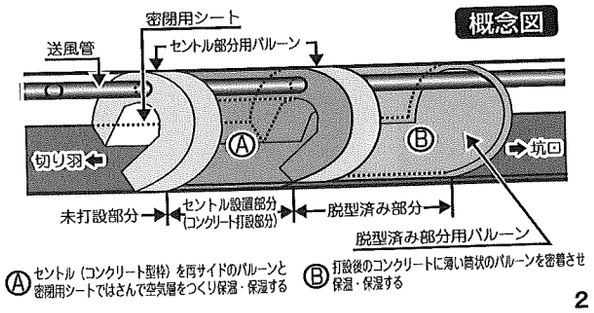
脱型後の覆工コンクリートを覆います。

【特徴】
1．長期材齢の強度アップ
2．覆工コンクリートの表面を湿潤状態に保ちます。
（乾燥収縮クラックの低減に貢献します）
3．断熱効果が期待できます。
（内部と表面の温度差が少ない⇒温度応力の低減）



特許3811478号

概念図



Ⓐセントル（コンクリート型枠）を両サイドのバルーンと密閉用シートではさんで空気層をつくり保温・保湿する　Ⓑ打設後のコンクリートに薄い筒状のバルーンを密着させ保温・保湿する

実　績	セントル温度養生	覆工養生バルーン
新幹線	５現場	２現場
高速道路	２現場	２現場
国土交通省	３現場	８現場
地方自治体	７現場	５現場
ＪＲ東日本	２現場	１現場
合　計	19現場	18現場

２００５年『日経ＢＰ技術賞　建設部門』受賞

岐阜工業株式会社
GIFU KOGYO CO.,LTD.
本社・工場　岐阜県本巣市十四条１４４番地
TEL 058(323)2000(代)　Fax 058(323)1176
東京支店　TEL 03(5836)0531　Fax 03(5836)0532
仙台営業所　TEL 022(259)2239　Fax 022(259)3664
九州営業所　TEL 092(713)5265　Fax 092(714)3028
URL http://www.gifukogyo.co.jp/

TOUKOU 株式会社 東宏
本社　北海道札幌市東区北２０条東５丁目１番７号
TEL 011(742)3331　Fax 011(742)3333
東京支店　TEL 03(3683)8011　Fax 03(3683)8028
道東営業所　TEL 0155(34)6311　Fax 0155(34)8494
URL http://www.k-toukou.jp/

巻頭言
（題字　小森　博会長）

飛騨トンネル完成，そして東海北陸自動車道全線開通にあたって

中日本高速道路(株)専務執行役員建設事業本部長
横田耕治

前日までの梅雨空が嘘のような真っ青に澄み渡った空に，ひときわ大きなドドーンという雷鳴のような音がとどろいた．テープに鋏（はさみ）が入れられた瞬間だ．青空に花火が上がり，同時に歓声と万雷の拍手に包まれた．その一瞬に，そこに集う人たち，いやむしろそこに集まれなかった数多くの人たちの万感の気持ちが凝縮されたように．

東海北陸自動車道の最後に残された難工事「飛騨トンネル」を含む飛騨清見～白川郷間25kmが，この７月５日に全線開通を迎えることができた．４か月が経過したが，東海地域からの観光客により高山・白川郷はもとより北陸・能登半島方面への行楽客が大幅に増加し，富山県氷見市にある道の駅「海鮮館」の入場者が５割増えるなど，ガソリン価格の高騰で，全国的にはマイカー利用の行楽客が減少する中で一人気を吐いている感がある．また産業面においても北陸地域の工業団地に対する東海地域の企業からの引き合いも増えており，北陸道とのダブルネットワークによる両地域の補完・結合関係が今後大いに進んでいくものと期待される．これからの北東・東アジアの時代において，日本海から太平洋までを有機的に結合した両圏域は，まさに国土形成計画における自立した圏域構造再編のモデル地域としての資格を備えたと言っても過言ではないだろう．

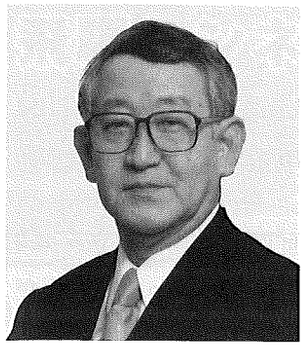
それではこうした路線の整備は，いつ始まったのだろうか．実はこの路線は昭和39年７月にできた「東海北陸自動車道建設法」という議員立法を出自としている．当時，縦貫５道以外の個別法にもとづく高速道路整備は，中央道と路線争いをした結果，個別法で整備が始まった東海道（東名高速道路）と日本一長い関越トンネルの関越道だけである．名神高速道路の栗東～尼崎間が開通したのがその前年の昭和38年７月であり，アメリカのテレビ映画「ハイウェイ・パトロール」を夢のように見ていた時代にこうした国土の新たな軸を作ろうとした先人の叡智と慧眼にただただ敬服するのみである．その整備のスタートは，昭和47年に一宮から美濃までの整備計画が出されてからであり，その後昭和53年に北陸側からも福光～小矢部間の整備が始まり，昭和61年の岐阜各務原～美濃間の初開通以来，平成14年の白川郷～五箇山まで順次開通し，今回の飛騨清見～白川郷間25kmを残すのみとなっていた．この区間には，

10本のトンネルが連担するなど厳しい地形条件にあり，中でも日本の道路トンネルで２番目に長い10.7kmの飛騨トンネルは，土かぶり1,000mを超す籾糠山を貫くルートであり，地質的にもまた被圧湧水でも国内屈指の難工事となった．詳細については，本号の各論文での紹介を見ていただきたいが，その難工事に世界最大級のTBMの全断面施工で果敢に挑戦し，迂回坑やNATMの併用，さらに河合側からの迎え掘りなどを駆使して，平成９年７月の避難坑の掘削から11年の歳月を要することとなったものの，この間１人の犠牲者を出すこともなく無事開通まで成し遂げられたことは，高く評価されてしかるべきものと考える．これもひとえに，現場で苦労しながらもあらゆる知恵と技術を総動員し，不屈の闘志と精神力で乗り切ってこられた施工者の皆さん，また開通を心待ちにしながら温かく見守り励ましてくださった地元関係者の皆さん，そしてトンネル工事の最初から技術指導はもとより叱咤激励していただいた足立紀尚委員長をはじめ施工に関する技術検討委員会の先生方など多くの方々のおかげであり，この場を借りて厚くお礼申し上げる次第である．この貴重なチャレンジ体験は，わが国のトンネル技術の発展に大きく寄与するものと期待している．

こうした高速道路ネットワークの整備効果については一定の評価を得ているが，先の「道路国会」と呼ばれた中での議論を思い起こすまでもなく，世情，道路整備に対する風当たりは依然厳しいものがある．この要因の一つには，東海北陸自動車道の全線の整備に結局36年を要するなど，あまりに時間が掛かりすぎていることも挙げられるのではなかろうか．長い時間経過の中で，社会経済情勢や利用の態様も大きく変化し，土地利用の高度化や地域の発展などの整備効果にしても時代の変化の中に埋没してしまい，印象が薄まることにもなる．

日本道路公団からネクスコ中日本になって３年，矢野会長のもと「よい会社になることを目指して，結果として強い会社になること」を理念に高速道路ネットワークの整備を進めているが，これらの整備については(独)高速道路保有・債務返済機構との間で路線ごとに整備費用と整備期間が定められている．弊社では決められた期間から一年でも一月でも早く供用し，高速道路の整備効果を一日でも早く発現できるよう整備のスピードアップに全力を挙げて取り組んでいる．このため工事発注についてもデザインビルド方式や施工技術競争型など設計・施工の総合技術力にもとづく高品質で早い工期に対する高いインセンティブを付与したうえでの競争をお願いしているところである．

今回完成した飛騨トンネルは“対面通行”であり，高速道路ネットワークとしては道半ばと言わざるを得ない．技術力を結集した競争条件のもと，また今回の施工で得た知見を活かし，何より国民の皆様のコンセンサスを得て，もう一本のトンネルに早くチャレンジしたいものである．



飛騨トンネルの建設を省みて

飛騨トンネル施工技術検討委員会委員長
((財)地域地盤環境研究所理事長)
足　立　紀　尚

2008年７月５日，飛騨トンネルの竣工による東海北陸自動車道の全線開通式典が挙行され，参列した．14年にわたり飛騨トンネル建設に関与した私にとって喜びの一日であり，数々の思い出が蘇えった．

初めて現地に立ったのは，「東海北陸自動車道天生トンネル(後日飛騨トンネルと改名，以下は飛騨トンネルと称す)の施工に関する技術検討委員会」の第１回委員会が開催された1994年７月25日である．その際，念願の白川郷や御母衣ダムも訪れることができた．

それから11年半後の，2006年３月９日先進導坑(当初避難坑と称した)の感激の貫通に委員会のメンバーともども立ち会うことができ，日夜現場で不良地山と高圧湧水にTBMおよびNATMにより果敢に挑み，大変な苦労をされた現場の方々に深甚なる敬意と感謝の念をもった．この難航したトンネルの技術検討委員会の委員長として，トンネル工事を省みることにする．

1994年当時，飛騨トンネルは経済上から実現しないであろう夢のトンネルとされていた．しかし，地質状況や掘削工法だけでも勉強だけはしておこうとの目的で，検討委員会が設置されたのである．

地質調査はすでに1986年３月から行われており，当初提示されていたトンネル地山区分では，両坑口と跡津川断層部のみD級で，大半はC～B級と推定されており，９割以上は良好な地山であると判定されていた．しかし，委員会では，トンネル延長が長く土かぶりが大きいことから，岩質は堅硬ではあっても破砕帯などの存在が予測され，また地下水の影響も十分に把握しておくことが重要であるとさらなる調査の重要性を強調した．

1994年度の委員会では，本坑掘進に先立ち先進坑を安全かつ迅速に施工することによって，全体工程の効率化をはかる目的で，TBMによる先進坑の掘進を提案した．

ついで，1995年度の委員会では，本坑の高速施工による効率化に関し，NATMと全断面TBM双方について比較検討した結果，限られた工期内に長大トンネルを速やかに掘削するにはTBM工法が適していると判断して委員会提案とした．なお，大規模な断層部など，不

良地山においては，事前に先進坑からアプローチしNATMで本坑を掘削しておいて，TBMを前方へ通過させる方法，すなわちTBMとNATM双方を柔軟に適用する，いわゆるハイブリッド工法を提示した．

委員長として本坑TBM工法の適用を考えた理由は，第1に大断面TBM技術の確立，第2に新たな技術開発過程における人材育成，第3に都から遠い故，雑音がなくゆっくり施工ができる，の3点であった．それに加え，1994年度の第2回委員会において，山を甘く診ず飛騨トンネルの工期は，施設工事，舗装工事も含めて10年以内とすることとした．

夢のトンネルと考えていた1996年，日米構造協議における向こう10年間に630兆円の公共事業を実施するとの確約により，突如飛騨トンネルの施工命令がでた．

1998年2月，先進坑TBMは初期掘進を開始した．当初順調であった掘進も，TBMの故障，不良地山における度重なる切羽崩壊やTBMの拘束，高圧湧水に遭遇し，NATMを適宜適用しながら掘進を続けたが，2005年9月高圧湧水を含む軟質粘土層に拘束・変状をきたし，掘進の役割を終了して，永久支保へと役割を変えた．幸いにも，河合側からの迎え掘りにより，先進坑は2006年3月9日，無事貫通した．

一方，本坑の白川側約3kmを地山不良のためNATMで掘削したが， 2004年6月に本坑TBMによる掘進が開始され2007年1月に貫通した．この間，切羽面の崩壊，硬岩部での磨耗，TBMの補強など幾多の困難はあったものの，トンネル延長の約40%，4km余を2年7か月で掘進できた．

本トンネル工事で大きな貢献を果した設計変更に，白川側の作業坑の設置と河合方からの迎え掘りがある．大島洋志委員の提案による作業坑は，本坑の円滑なNATMによる掘進のための水抜き坑としての役割とともに本坑TBMの面盤補修などに活躍し，トンネル完成後には換気横坑として利用されている．一方，河合側からの迎え掘りは，冬季の積雪とアクセスの問題および突っ込みとなるため不可とされ，当初白川側からの片押し掘削のみで計画されていた．しかし，先進坑の掘進が難航していた，2001年6月河合側からNATMによる掘削を開始，2002年末いったん中断されたが，2004年7月に再開され，貫通まで継続された．この河合側からの迎え掘りがなければ，現在でもトンネル掘削は継続していることであろう．

困難な地山において大断面TBMの技術開発に挑んだことにより，多くの人材が育ったことは確信したが，広く知れわたり雑音だらけであった．

終わりにあたり，とくに飛騨トンネル区間は当面対面2車線の安全上からいえば欠陥道路である．2期線トンネルの一日も早い着工を強く願っている．

飛騨トンネルの開通までの歩み

(元)中日本高速道路(株)名古屋支社清見工事事務所所長(第5代)
中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋(株)羽島道路事務所所長
寺 田 光太郎

1 はじめに

東海北陸自動車道は，愛知県一宮市を起点に富山県小矢部市に至る全長185kmの高速自動車国道であり，名神高速道路一宮JCTと北陸自動車道小矢部砺波JCTを相互に連絡し，東海地方と北陸地方の二つの経済圏を直結する重要路線である．

本路線は，1964(昭和39)年に議員立法により東海北陸自動車道建設法が施行されて路線として産声を上げた．その後1972(昭和47)年に施工命令がなされ，36年を経てこのたび，最後で最大の難関であった飛騨トンネルの完成により，2008(平成20)年7月5日に全線開通を迎えた．

東海北陸自動車道の開通は，沿線地域の生活・産業・経済・文化・観光などの発展と振興に大きく寄与するものと考えられる．

本稿では，飛騨トンネルの計画から開通までを振り返りたい．なお，飛騨トンネルは，平成9年まで「大生(あもう)トンネル」と仮称されていたが，ここでは，「飛騨トンネル」に統一して述べる．

2 東海北陸自動車道の歴史

東海北陸自動車道は，計画当初は中部横断高速自動車道路と呼ばれ，1963(昭和38)年6月に建設省中部地方建設局((現)国土交通省中部地方整備局)がルート案を初めて公表した．

翌年の1964(昭和39)年7月には，東海北陸自動車道建設法が公布され，1966(昭和41)年7月に同法廃止，国土開発幹線自動車道建設法の改正に伴い，国土開発幹線自動車道となり，現在の東海北

表-1 飛騨トンネル開通までの歩み

年 月	出 来 事
1961(昭和36)年	中部横断高速自動車道の図上選定調査開始
1963(昭和38)年6月	中部横断高速自動車道ルート概要公表
1964(昭和39)年7月	東海北陸自動車道建設法公布
1966(昭和41)年7月	国土開発幹線自動車道予定路線，東海北陸自動車道に名称変更
1970(昭和45)年6月	一宮JCT～白鳥ICで初の基本計画策定
1972(昭和47)年6月	一宮JCT～美濃ICに初の施行命令
1973(昭和48)年11月	荘川IC～白川郷ICが国幹審で御母衣ルートに決定
	—飛騨トンネルは存在せず—
1979(昭和54)年3月	美濃IC～白鳥ICに施行命令
1986(昭和61)年3月	岐阜各務原IC～美濃ICが初の開通
1988(昭和63)年5月	荘川IC～白川郷ICが高山寄りにルート変更
	—飛騨トンネルが生まれ初(もろかや)糠山(ぬかやま)を貫くことに—
1991(平成3)年9月	日本道路公団清見工事事務所開設
1993(平成5)年11月	飛騨清見IC～五箇山ICに施行命令
1994(平成6)年11月	飛騨清見IC～五箇山ICの路線発表
1996(平成8)年10月	避難坑工事発注
1997(平成9)年12月	本坑工事発注
1998(平成10)年1月	避難坑TBM発進式
1998(平成10)年6月	本坑NATM掘削開始
2000(平成12)年9月	本坑TBM発進式
2001(平成13)年6月	河合側からNATMで迎え掘り開始
2002(平成14)年6月	道路関係四公団民営化推進委員会設置法が成立
2003(平成15)年8月	小泉首相現場視察
2004(平成16)年1月	本坑TBM，坑口より2,950m地点から初めて掘削開始
2005(平成17)年10月	日本道路公団分割民営化，中日本高速道路株式会社設立
2006(平成18)年3月	避難坑貫通
2007(平成19)年1月	本坑貫通
2007(平成19)年11月	本坑で大規模変状が発生したため，開通延期に
2008(平成20)年7月	飛騨トンネル開通，東海北陸自動車道全線開通

陸自動車道に名称が変更された．

その後，1970(昭和45)年６月に，一宮JCT～白鳥ICで初の基本計画策定，1972(昭和47)年６月に，一宮JCT～美濃ICで初の整備計画・施行命令を受け，他区間についても，順次基本計画策定，整備計画・施行命令が行われた．

路線初の開通は，1986(昭和61)年３月の岐阜各務原IC～美濃ICであり，その後，順次開通していき，今回2008(平成20)年７月の飛騨清見IC～白川郷ICの開通をもって，施工命令から36年をかけて，東海北陸自動車道は全線開通を迎えた．

今後は，４車線化(拡幅)工事で，平成20年度末に，ぎふ大和IC～白鳥IC，平成21年度に郡上八幡IC～ぎふ大和ICの完成を目指している．

将来は，中部圏道路ネットワークが完成すると，名神高速道路(一宮JCT)，中部縦貫自動車道(油坂峠道路・白鳥IC)，東海環状自動車道(美濃関JCT)，中部縦貫自動車道(高山清見道路・飛騨清見IC)，北陸自動車道・能越自動車道(小矢部砺波JCT)と接続している本路線の重要性は，ますます高まるものと考えられる．

3　飛騨清見IC～白川郷ICの歴史

飛騨トンネルの位置する飛騨清見IC～白川郷ICは，1973(昭和48)年11月の基本計画策定(白鳥IC～福光IC)，1989(平成元)年３月の整備計画策定(荘川IC～福光IC)，1993(平成５)年11月の施行命令(飛騨清見IC～五箇山IC)を受け，1994(平成６)年11月に路線発表した．

その後，1996(平成８)年４月より中心杭設置，同年６月から設計協議を開始し，同年９月には幅杭の設置，1996(平成８)年１月より用地買収に着手した．1996(平成８)年10月には，最初の工事となる，飛騨トンネル避難坑工事を発注し順次工事を進めた．途中，飛騨トンネルの掘削において，断層破砕帯でのTBMの拘束や大量湧水などにより工事がストップするアクシデントに何度も見舞われ，(独)日本高速道路保有・債務返済機構との協定の完成予定年月日である2008(平成20)年３月31日に対して，完成予定時期の変更を余儀なくされたが，約３か月の遅れで今回の開通となった．

4　飛騨トンネルの誕生

飛騨トンネルが位置する荘川IC～白川郷ICについては，1973(昭和48)年11月に国土開発幹線自動車道建設審議会(国幹審)で基本計画が決定されており，予定ルートは，他区間と同様に国道156号とほぼ同じで，御母衣ダムの脇を通って白川村に至る「御母衣ルート」であった．

この御母衣ルートには，高山の玄関口となる飛騨清見ICや飛騨トンネルは存在していなかった．

ところが，同時期に計画されていた中部縦貫自動車道がきっかけとなり，東海北陸自動車道のルートが1988(昭和63)年５月に変更された．

中部縦貫自動車道は，長野県松本市を起点に岐阜県を東西に通過し，福井県福井市に至るルートで，東海北陸自動車道と御母衣湖の南側，現在の荘川IC付近で交差する計画で考えられていた．

しかし，このルートでは，以下の問題が生じた．

① 富山方面から東海北陸自動車道を南下し，中部縦貫自動車道を松本方面に乗り換える場合，接続地点から北東方向に戻るような大回りが生じる．

② ルート上に活断層(御母衣断層)が存在する(「計画と地質調査」p.17 図-3参照)．

これらの問題を解決するため，図-1に示すように，荘川IC付近で東側に向かい，高山の玄関口

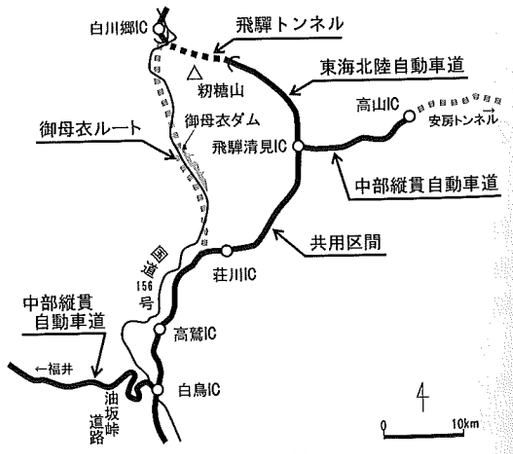


図-1　ルート検討図

となる飛騨清見ICを経て白川郷ICに至る現在のルートが選定された．これにより，利便性の向上が図れるうえに，飛騨清見IC～白鳥ICの40kmを両自動車道で共用することにより，建設効率の向上も図れた．

こうして，御母衣ルートは幻となり，かわりに，籾糠山を貫く「飛騨トンネル」が誕生した．

5　景観・環境への配慮

本路線の白川郷IC付近は，世界文化遺産「白川郷合掌造り集落」に近接していることから，景観・環境に配慮する必要があった．そのため，「東海北陸自動車道白川村景観基礎検討委員会」を設置し，検討が進められた．

その結果，同集落から見える高速道路については，道路の縦断線形を下げ，橋梁規模を縮小し，橋桁と橋脚を極力細くするとともに，橋桁の色彩は土壌や伝統的構造物の建物などに多く見られる「墨色」を基調とするなど，周辺環境に溶け込ませるよう配慮している．なかでも大牧トンネルと白川橋については，同集落から構造物がほとんど見えなくすることができたことなどから，(財)日本産業デザイン振興会より，「2005年度グッドデザイン賞」を受賞した．

なお，縦断線形が下がったことにより，飛騨トンネルは近接する鳩谷ダムの貯水面以下になり，ダムの水を引き込む恐れがあった．しかし，検討の結果，引き込む可能性は少ないと判断され，実施工でも問題はなかった．

6　飛騨トンネルの特徴

飛騨トンネルは，延長10.7kmの長大トンネルで，国内の道路トンネルとしては関越トンネルに次いで２番目(世界で11番目，2008年７月現在)の長さである．

6-1　新技術・新工法

掘削工法は，長大トンネルであるため，基本的にTBM工法を採用し，本坑はϕ12.84mの世界最大規模の大断面TBM，避難坑はϕ4.5mのTBMを用いた．

避難坑は，本坑に先行して掘削を行い，先進させることで本坑前方地質調査および水抜き効果を目論み，本坑施工の補助工法としての位置付けも兼ねている．

主な新工法としては，「RCライナー」，「覆工省略型ライナー」，「吹付けコンクリートの多層構造による覆工」などを開発し，適用した．また，前方地山探査方法，高圧大量湧水対策，軟弱地山対策などについても，試行錯誤を行い，より効果的な方法および対策を採用した．

6-2　換気設備

本坑TBMで掘削した円形断面の下半分については，換気坑として利用することで，長大トンネルとしては珍しく換気立坑を不要としている．

換気システムは，交通量の時間変動に応じて五つの排気口を自由に選択できる『選択排気式縦流換気方式』を世界で初めて採用した．

換気制御方式は，(株)高速道路総合技術研究所(NEXCO総研)で開発した『MPVC(Model-based Predictive Ventilation Control)システム(モデルベース予測換気システム：実交通量の計測結果からジェットファン・排風機・排気口の組み合わせをシミュレートし，要求されたVI値，CO値を満足し，最小の消費電力量の組み合わせで制御を実施するシステム)』を，対面通行では世界で初めて採用している．

6-3　コスト削減

建設事業全体の命題として，建設コストの削減を常日頃より実施しているが，本区間では，主に以下の削減策を行った．

① 覆工構造の変更
　避難坑および一部の非常駐車帯の覆工構造を，従来の現場打ちコンクリートから吹付けコンクリートによる多層構造に変更．

② トンネル換気用ジェットファンの再利用

③ トンネル照明器具の資材直接調達

6-4　交通安全対策

暫定２車線で整備されている路線の安全対策については，関係機関と連携を図りながら４車線化事業の促進と併せ，事故件数の多い箇所を優先的

に，凹凸型路面標示，導流レーンマークなどの安全対策を実施してきた．今回開通する区間においても，これまでの開通区間の対策状況を踏まえ，トンネル連続区間での注意喚起標識，事故や火災などの緊急時に対応するための信号機設置，長大トンネルである飛騨トンネルでは漫然運転防止のためのアクセント照明の設置，トンネル壁面に坑口までの距離を1kmごとに表示，事故や災害時における被災者緊急搬送などのための飛騨河合PA上り線への緊急用ヘリポートの設置を行っている．また，高山市や白川村など，日本有数の豪雪地帯を通過することから，冬季の降雪に対応するため，雪庇防止柵・雪崩防止柵を設置，トンネル坑口付近の橋梁には融雪設備を設置，山岳部を通過しているため，カモシカや小動物の進入対策として動物進入防止の立入防止柵を設置するなど，安全対策にも十分な配慮を行っている．

7　工事の経緯

飛騨トンネルは，籾糠山(標高1,744m)を貫く，延長10.7kmの長大トンネルであり，約1,000mの大土かぶり，断層および脆弱地山，高圧大量湧水などの悪条件のなか，大断面TBMの採用などの技術革新にも果敢に挑み，避難坑の掘削開始から本坑の貫通までに約9年6か月を要し，土木史上でもまれな難工事となった．

本工事は，1997(平成9)年7月の避難坑作業横坑掘削から始まり，翌1998(平成10)年1月に避難坑TBM発進式が行われ，約112mの初期掘進を経て，本掘進を開始した．本掘進開始後1か月は，月進約330mと順調な滑り出しであったが，その後，不良地山に遭遇し，TBM停止を余儀なくされた．それ以降，地山によるTBMの拘束，高圧大量湧水などにより，停止・再開をくり返し，NATMへの掘削切り替え，河合側からの迎え掘りなどの変更を行った．そして，2005(平成17)年9月に高圧粘土層に遭遇し，TBMが拘束され停止し，同年11月に約120mを残しTMB再開を断念し，NATMによる迎え掘りを行い，2006(平成18)年3月31日に避難坑は貫通した．

本坑については，1998(平成10)年6月に作業横坑を経由して河合側に向かいNATMで掘削を開始し，2000(平成12)年9月に本坑TBM発進式が行われた．その後，避難坑が遭遇した不良地山帯をNATMにて施工し，白川側坑口から約3kmの地点より，TBM掘進を開始した．本坑TBMについても崩落，拘束などが発生したが，避難坑が先に施工されたことによる，前方地質状況の把握，水抜き効果により，避難坑TBMに比べ，順調な施工であり，2007(平成19)年1月13日に本坑も貫通した．

なお，本坑の施工状況より，当初期待された避難坑TBMの本坑に対する補助工法としての目的は達成され，かつ非常に有効であったと考えられる．また，結果として避難坑TBMの施工延長は，約6.4km，本坑TBMの施工延長は，約4.3kmであった．

貫通後に，トンネル壁面に変状が生じ，年度内開通を断念・延期したが，2008(平成20)年7月5日に無事開通を向かえた．

8　開通の効果

飛騨トンネルが完成し，東海北陸自動車道が全線開通したことにより，以下の効果が見込まれる．

(1)　移動時間および距離の短縮

名神高速一宮JCT～北陸道小矢部砺波JCT間が，北陸道米原JCT経由よりも移動時間で大型貨物車約35分，小型車約15分，移動距離で約65km短縮し，東海地方と北陸地方がより早く，より近くなる．

(2)　ネットワークの完成

本区間と並行する一般国道156号の代替路として，定時性・安全性が確保されるとともに，北陸道・中央道・上信越道と相互に代替路としての機能を発揮することで，交通事故や自然災害に強いネットワークが完成する．

(3)　緊急医療体制への支援

ネットワークの完成に加え，高度な救急医療を行える第三次救急医療機関への搬送時間が短縮され，沿線地域の医療環境が向上する．

(4)　環境負荷の軽減

一般道からの交通転換により，走行環境が改善されることより，CO_2が3.4万t/年，NO_xが111t/年，SPM(浮遊粒子物質)が6.5t/年の排出量削減が見込まれ，生活環境の保全，地球温暖化防止の抑制に寄与するものと考えられる．

(5)　地域開発の進展および物流の効率化

太平洋側と日本海側との繋がりがより強くなるため，企業立地の促進や広域観光の支援，路線バスの運行の増加，生活圏域の拡大などが期待でき，地域開発の進展や物流の効率化が，また環日本海沿岸各国と中部圏との物流を担う路線として期待される．

9　おわりに

飛騨トンネルは，国内の山岳道路トンネルとして本坑掘削に初めて掘削径12.84mの大断面TBMを採用し，これまで経験のない数々の問題に直面しながらも種々の新技術を適用しながら克服し，2007(平成19)年1月13日に無事貫通，2008(平成20)年7月5日に開通を迎えることができた．これもひとえに飛騨トンネル施工技術検討会(委員長：足立紀尚・京都大学名誉教授)の委員をはじめとする関係者の方々のご指導，ご助言の賜物であり，深く感謝する次第です．

最後に，ここで得られた成果が，今後のトンネル施工の発展に寄与できれば幸甚である．

参考文献

1) 中日本高速道路(株)：秘境を貫く　飛騨トンネルの物語，2008.7.

秘境を貫く　飛騨トンネルの物語

中日本高速道路(株)

四六判　191頁　定価840円(税込み)　2008年7月刊

中日本高速道路(株)では，東海北陸自動車道の全線開通に伴い，それを記念して「秘境を貫く　飛騨トンネルの物語」を発行いたしました．

本書は，東海北陸自動車道の最後の難関となった飛騨トンネルがいかにして計画され，完成したのかを関係者のヒヤリングなどをもとに取りまとめたものです．土木専門用語を平易な言葉に直し，広く一般の方にも読んでいただけるように編集いたしました．

販売場所：高速日和(http://kousokubiyori.jp/)の「オンラインショップ」で購入いただけます

その他名古屋地区・北陸地区の一部のサービスエリアおよびパーキングエリア，中日本高速道路(株)本社・支社にて販売しています．

明治時代の変状トンネル(5)
—牧ノ原トンネルをめぐる2人の土木技術者—

(財)鉄道総合技術研究所
小野田　滋

■佐藤古三郎と丹那トンネル

明治時代の東海道本線・牧ノ原トンネルの変状調査について4回にわたって連載したが，このトンネルにかかわった2人の土木技術者については，これまでほとんど知られていなかったので，この機会に紹介しておきたい．

牧ノ原トンネルの修繕工事を担当した佐藤古三郎は，1861(文久元)年3月19日，現在の岐阜県大垣市で生まれた．士族の家系であったこともあり，1878(明治11)年に岐阜県に出仕して，訓導(旧制小学校の教員)として岐阜県師範学校などに勤務したが，1884(明治17)年には内務省土木局に転じて山形県に赴任し，東京勤務を経て1886(明治19)年に鉄道局横川出張所に採用された．

1890(明治23)年には新橋建築課で国府津～興津間の線路増設工事に従事し，翌年には横川出張所軽井沢在勤となって碓氷峠の鉄道建設工事を担当した．1893(明治26)年に工務課勤務となり，1896(明治29)年に技師へと昇進した．1897(明治30)年に国府津保線事務所，1902(明治35)年に静岡保線事務所を渡り歩き，牧ノ原トンネルの修繕工事などを担当したのち，1904(明治37)年から1年間，日露戦争に伴う京釜鉄道速成工事のため朝鮮半島に渡った．その後は，静岡保線事務所に復帰し，さらに1906(明治39)年には金沢保線事務所長を拝命したのち，金沢運輸事務所長を兼務した．

1911(明治44)年には中部鉄道管理局工務課勤務となり，計画が進められていた東海道本線(当時は熱海線)・丹那トンネルの実測調査に従事することとなった．丹那トンネルの計画は，1909(明治42)年に実施された鉄道院・辻太郎技師による現地踏査の復命書に端を発し，同年には山口準之助技師や尾崎錦太郎技師による調査報告が行われて，熱海経由線，熱海経由比較線，湯河原経由線などの比較案が検討された．そして1911(明治44)年5月，佐藤古三郎を主任とする15名の測量隊が編成され，東組と西組に分かれて測量が進められた．その結果は翌年4月に報告され，6本のルートのうち，熱海線の小田原中央経由線をもっとも有望な路線として推薦した(**図-1**)．その後，同年5月に曲線緩和を目的とした改測調査が実施され，1913(大正2)年1月にほぼ現在のルートに確定したのである．丹那トンネルのルート選定を終えた佐藤は，同年6月に鉄道院東京改良事務所へ転じたが，翌年3月24日に53歳で急逝した．

佐藤古三郎の世代は，技術者のための高等教育機関が未発達であったため，実務経験を積みながら土木技術を学んだ者が多かった．空中写真やレーザー測量などの手段がなかった当時，ルート選定のための測量は土木技術者としての腕の見せ所でもあり，佐藤にとっても歴史にその名を残す晴れ

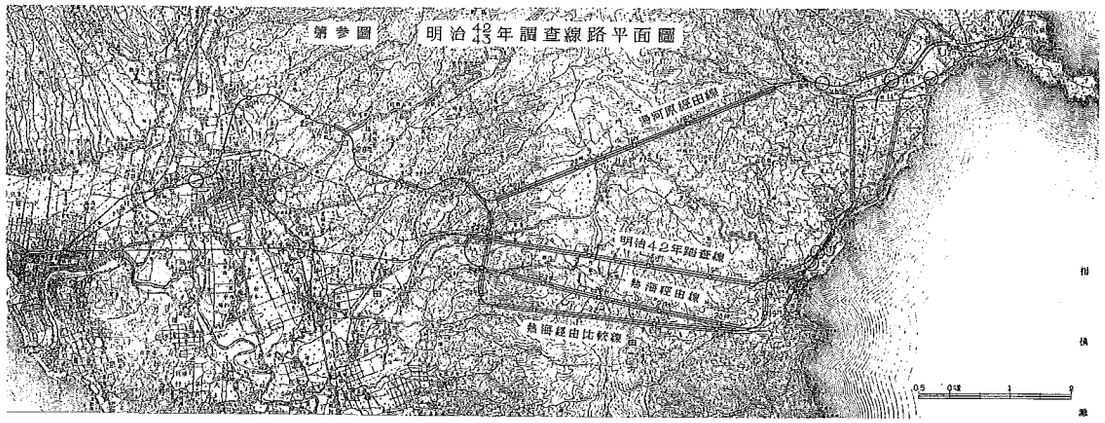


図-1　丹那トンネルのルート比較線
『丹那隧道工事誌』鉄道省熱海建設事務所(1936)より

舞台とも言うべき仕事となった．

■海軍技師となった奥平清貞

京都帝国大学の卒業論文で，『隧道修繕工事』を書き上げ，牧ノ原トンネルを記録した奥平清貞は，1876(明治9)年10月18日に愛媛県松山市で生まれた．祖父の奥平貞幹(1817～1882)は，松山藩士として，新田開発や殖産興業に功績を残した人物として知られ，宝塔寺(松山市朝日ヶ丘)にあるその墓は松山市指定記念物となっている．清貞は，1903(明治36)年7月に京都帝国大学土木工学科を卒業し，京都市嘱託技師として水利事務所に勤務した後，翌年9月に召集されて鉄道大隊などを経験し，1905(明治38)年10月に召集解除となった．同年11月に海軍技手となって，呉海軍経理部建築科に配属され，翌年4月には技師に昇進した．

海軍在官中でもっとも著名な業績は，1909(明治43)年11月に完成した中国・旅順の表忠塔の建設を担当したことであった．この塔は，日露戦争の旅順攻略で戦没した約二万名の将兵の霊を慰めるために，乃木希典，東郷平八郎の発起で建設されたもので，旅順市街を見下ろす白玉山に建設された高さ66.8mの砲弾型のモニュメントであった．工事にあたっては，顧問として神田下水の設計者として知られる元海軍公務監・石黒五十二(第4代土木学会会長：1855～1922)，初代帝国ホテルの設計者として知られる海軍技師・渡辺譲(第4代造家学会((現)日本建築学会)会長：1855～1930)を迎え，工事主任として奥平清貞がこれを担当した(**写真-1**)．

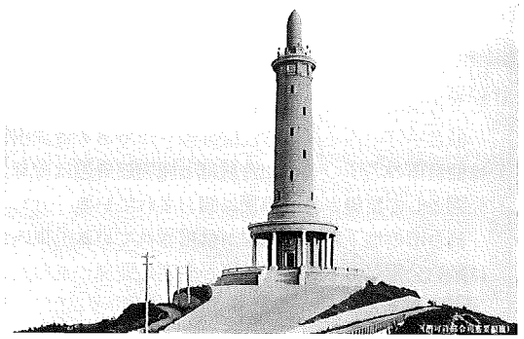


写真-1　表忠塔(中国・旅順)

1918(大正7)年10月25日付で海軍を辞し，故郷に戻って松山市土木課長となり，雑誌『道路の改良』(Vol.10，No.12，1928)に「道路工事費受益者負担規程の運用」と題した論文を寄稿するなどしたが，1932(昭和7)年3月に57歳でこの世を去った．ちなみに，同じ松山市出身で，東郷平八郎の名参謀として活躍し，司馬遼太郎の小説『坂の上の雲』の主人公としても知られる海軍中将・秋山真之(1868～1918)とは，縁戚関係にあった．

卒業後は，トンネルとはあまり縁のなかった奥平であったが，乃木，東郷の両将軍に絶賛されたと伝えられる表忠塔は，その後「白玉山塔」と名前を変え，現在も旅順のランドマークとして白玉山の山頂にそびえ建っている．

「杜の都」仙台市青葉山より

浅 川 敏 郎

仙台市は宮城県の中南部に位置し，人口約103万人を擁する東北地方最大の都市である．広瀬川や青葉山などの自然が都心にあり，また街路樹などの緑が多いことから「杜の都」として知られている．

伊達政宗が伝統的な当地の中心地である長町−利府活断層沿いから内陸に入った河岸段丘上に仙台城下町を建設し，現在の仙台市の基盤となっている．

青葉山丘陵は，西には蕃山丘陵に続き，それを介して遥かに奥羽山脈に連ねる．北に伸びる尾根は東流する広瀬川に迫って断崖をなし，南では竜の口沢が八木山との間に深い渓谷を刻んでいる．広瀬川は緩く湾曲して青葉山の南東で竜の口沢をあわしている．

仙台平野の西を縁取る丘陵郡の一つである青葉山には仙台市の名所の一つ仙台城址と博物館周辺は青葉山公園として整備され，市民に親しまれている．

仙台市の地下鉄は南北線が供用されている．東西線は動物公園がある八木山地区から宅地開発の進む荒井地区を結ぶ仙台市第２の地下鉄路線として建設が進められている．東西線の開通により公共交通ネットワークが充実し，利便性の高い暮らしが実現する．

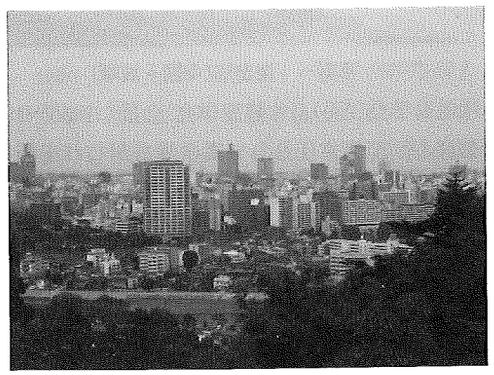
本工事はこの仙台東西線のうち，竜の口渓谷から青葉山駅までの延長1,077.3mのトンネルを施工するものである．

トンネルの掘削に伴う資機材・トンネルのずりの搬出入口は立坑(深さ$H \fallingdotseq 40$m)を構築し，使用する．掘削ずりは立坑より垂直ベルトコンベヤを使用し，仮置場まで搬出する．

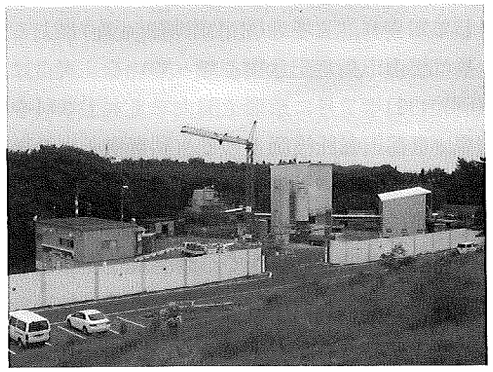
立坑掘削を平成20年１月より掘削を開始し，４月に構築を完了．本坑トンネル掘削を５月より開始し，７月末の進捗は80mとなっている．

今後も，発注者および関係各位のご指導やご協力のもと，無事故・無災害での完成を目指して鋭意努力していく所存である．

(鉄建・みらい・佐藤JV青葉山作業所所長)

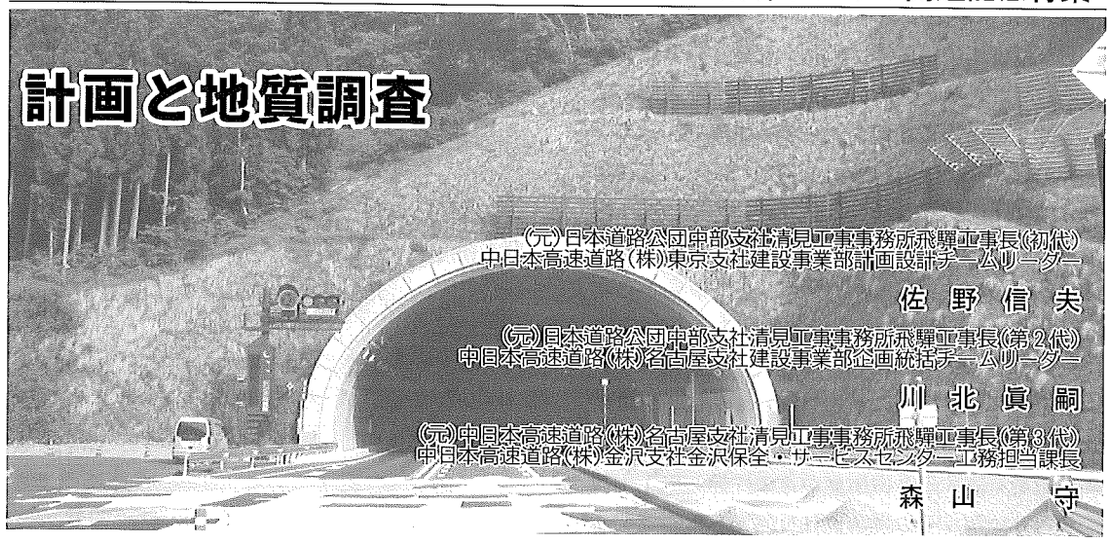


仙台城址地より仙台市内を望む



旧ゴルフ場にある仮設ヤード

位 置 図



計画と地質調査

(元)日本道路公団中部支社清見工事事務所飛驒工事長(初代)
中日本高速道路(株)東京支社建設事業部計画設計チームリーダー
佐 野 信 夫

(元)日本道路公団中部支社清見工事事務所飛驒工事長(第２代)
中日本高速道路(株)名古屋支社建設事業部企画統括チームリーダー
川 北 眞 嗣

(元)中日本高速道路(株)名古屋支社清見工事事務所飛驒工事長(第３代)
中日本高速道路(株)金沢支社金沢保全・サービスセンター工務担当課長
森 山 守

1 はじめに

飛驒トンネルは，全長10.7kmの高速道路トンネルである．本トンネルは，山岳道路トンネルの本坑掘削として国内で初めて掘削径12.84mのTBMが適用された．

本工事は，本坑TBMの施工に先立ち先進坑TBM(掘削径4.5m)の掘削を平成10(1998)年２月に開始したが，既報[1)~3)]のように施工は不良地山と高圧大量湧水により難渋を極め，6,045mを掘削して平成18(2006)年３月に貫通した．一方，本坑TBMは先進させた避難坑TBMで得られた地質情報を活用して，不良地山区間をNATMで施工し，平成16(2004)年１月に白川側坑口から2,945m入った比較的切羽自立性が良化した地点よりTBM掘削を開始し，4,290mを掘削して平成19(2007)年１月に貫通した[4),5)]．

本稿では，まず，本坑と避難坑ともにTBMで掘削することにした飛驒トンネルの当初計画の概要について報告し，次いで計画，設計および施工の各段階において実施した地質調査とその結果について報告する．

2 計画概要

飛驒トンネルは，図−1に示すように本坑と避難坑から構成されており，トンネル間の中心離隔は30mである．本トンネルの特徴を以下に示す．

① 延長10.7kmの長大トンネルである．

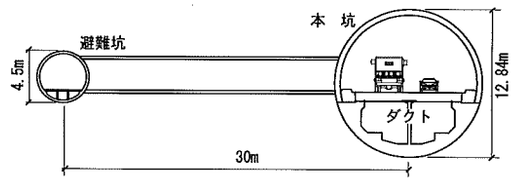
② 最大土かぶり厚が1,000m以上と非常に大きい．

③ 縦断勾配が白川(富山)側から河合(名古屋)側に向け２％の上り勾配となっている．

④ 両坑口部とも10年再現最大積雪深が３mを超える豪雪地帯であり，河合側坑口へのアクセス道路は気象・地形条件が厳しく冬期通行止めとなっている．

⑤ トンネルで通過する天生峠一帯はブナ原生林，高層湿原植物群落，水芭蕉群生地などが存在する．

⑥ トンネル地山を構成する地質は，白川側坑口から順に中生代(白亜紀)の白川花崗岩類，中生代(白亜紀)の濃飛流紋岩類，中央部付近に貫入する花崗斑岩，先三畳紀の飛驒変成岩



図−1 飛驒トンネルの本坑と避難坑の位置関係と路盤下構造(当初)

類，中生代(ジュラ紀～三畳紀)の船津花崗岩類の大きく5種類に分類される．

⑦ 白川側坑口付近は平成7年12月に世界文化遺産に登録された白川郷合掌集落の入口に位置する．観光客は平成7年当時年間約70万人でありその後の増加が予想された．平成19年には年間約200万人に達した．

このような地形・地質・環境などの諸条件を踏まえ施工法が検討され，以下の技術的判断から本坑，避難坑ともTBM工法を適用することに決定した．

① 河合側坑口からの施工は，冬期休止，縦断勾配2％の下り勾配となり突発湧水などの対策を考慮すると白川側からの片押し施工が望ましいが，その場合には長大トンネルであるため急速施工を必要とする．

② TBMの長距離，大断面施工に関しては，当時，海外では施工延長10kmを超えるものが60件以上あり，掘削径10m以上のものが28件あったこと，また，近年の国内の施工実績からTBM性能の向上やTBMのオペレーション技術の進歩などから，わが国のような複雑で変化の多い地質にも対応が可能な状況にあると判断した．

③ 地質は，当初約92％がB，C級の良好地山と想定されたので，TBMによる急速施工が可能と判断した．

④ 換気立坑の施工は，土かぶり厚が大きいため立坑規模が大きくなり，かつ気象・地形条件が厳しいため冬期工事休止とせざるを得ず工程のクリティカルパスとなり，また，自然保護にも留意する必要がある．本坑をTBMで施工する場合には，円形断面の下半分を換気ダクトとして利用する換気システムが採用できることにより換気立坑が不要となるので，工程，経済性，環境面で有利と判断した．

⑤ 避難坑TBMを本坑TBMに先行して掘進することで，本坑施工に役立つ地質状況の把握を可能とし，さらに水抜き効果や不良地山に対する事前補強など補助工法機能を果たすことで本坑TBMの掘削時の地質リスクを低減できると判断した．

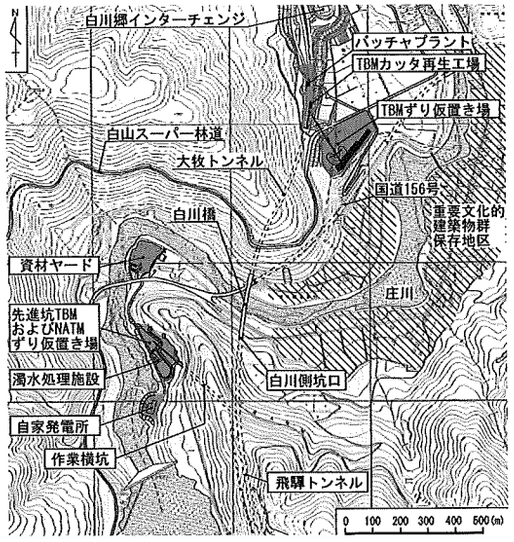


図-2 工事中の作業横坑と仮設関係の位置

上記の検討を経て，避難坑(以下，「先進坑」)と本坑とも白川側坑口からのTBMによる片押し施工とした．TBMは，先進坑では掘削径4.5mのフルシールド型，本坑では12.84mの改良オープン型を採用した．

白川側坑口は，「世界文化遺産」に登録されている白川郷荻町合掌集落近傍に位置するため，景観に配慮し，トンネル坑口，橋梁，坑口換気所などの道路構造物が合掌集落からほとんど見えない位置となるように平面・縦断線形を設計した．しかし，坑口位置を20m程度下げたため，坑口から約1,000m間が隣接するダム湖の高水位より低くなった．

また，工事中の景観にも配慮し，図-2に示すようにトンネルの施工は，合掌集落とは尾根を挟んで反対側の位置から作業横坑で取り付き，仮設備ヤードやずり仮置場なども同集落から見えない位置に設置した．さらに，隣接する白川橋，大牧トンネルの工事を先行施工することにより，本坑TBMの掘削残土の運搬を夏期は白山スーパー林道利用，冬期は国道156号利用とに分ける計画とし，国道156号を利用する観光客の動線と極力重ならないように配慮した．

3 地質想定の変遷と実際に遭遇した地質

飛騨トンネルでは，事業の進捗に応じて各種地質調査を実施して，より詳細な地質構造の評価を図った．こうした一連の調査・検討作業は，つぎのような段階に区分できる．

① 計画段階(昭和61～平成6年度)：地形地質踏査を行って地質図を作成し，地山の概略評価を行った．

② 設計段階(平成7～8年度)：トンネルルート沿いで，地形地質踏査，弾性波探査，ボーリング調査のほかに，電磁探査などによる詳細調査を実施し，設計・施工に必要な地質構造の把握，地山評価を行った．

③ 施工段階1(平成9～11年度)：白川側坑口からT.D.980m(本坑STA.414＋65)地点において白川花崗岩と濃飛流紋岩類の境界周辺の変質帯・破砕帯に遭遇し先進坑TBMが地山に拘束され，掘削困難になったことを契機に，この不良地山の範囲・性状を把握するために，広域地形地質踏査，水平長尺ボーリング(坑内)を実施するとともに，籾糠山山頂付近にて鉛直長尺ボーリング(L=971m)などを実施し，地質構造・地山評価を見直した．

④ 施工段階2(平成10～17年度)：先進坑TBM施工と併行して，坑内からの切羽前方探査工(水平ボーリング)，地形地質踏査(精査)などを実施した．

ここでは，それぞれの段階において実施した地質調査とその結果について述べる．

3-1 計画段階における地質調査

計画段階の調査は，文献調査，空中写真判読，地質概査(精度：1/25,000，調査面積17km²)を主体に実施し，後半には地形地質踏査(精度：1/5,000，調査面積10km²)，坑口付近の弾性波探査，岩石試験を実施した．トンネルを構成する地質は前述のように大きく5種類が想定された．

地質構造でとくに注目したのは活断層であった．図-3に示すように飛騨トンネル周辺には東北東～西南西と北北西～南南東の直交する2方向の活断層の集中域であり，前者には跡津川断層，後者に

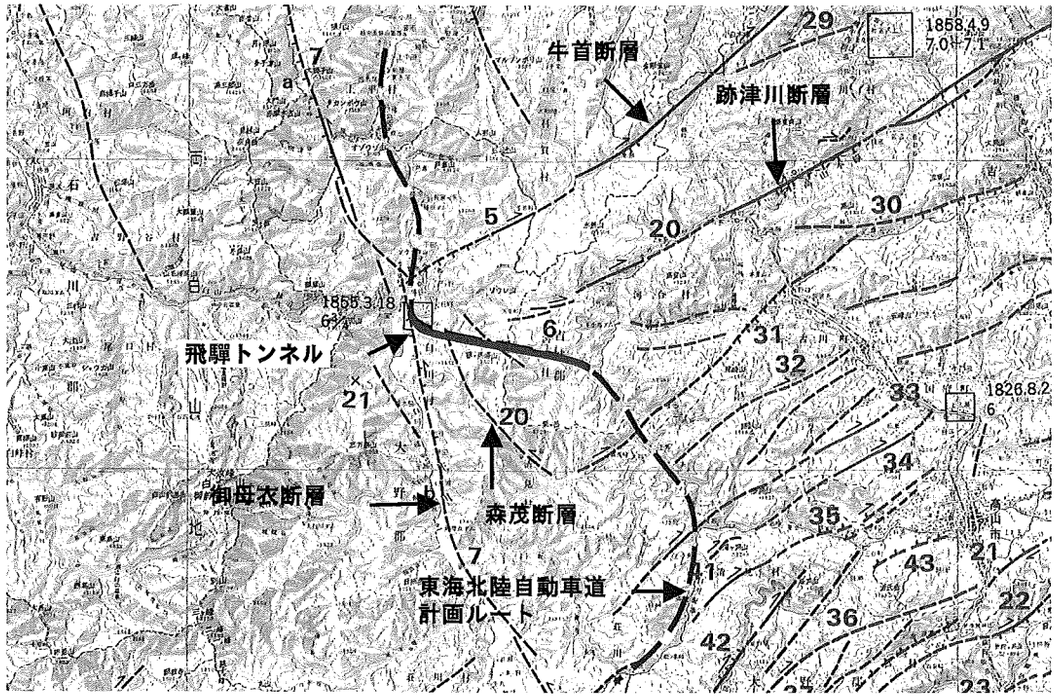


図-3 飛騨トンネル周辺の活構造([新編] 日本の活断層：1991より)

は御母衣断層と森茂断層がある．踏査の結果，跡津川断層は幅10mの断層破砕帯として確認されており，白川側坑口から4.6km付近で交差すると推定された．一方，御母衣断層の主断層は直接トンネルに接しないが，その派生断層が白川側坑口付近を通過すると推定された．しかし，白川側坑口

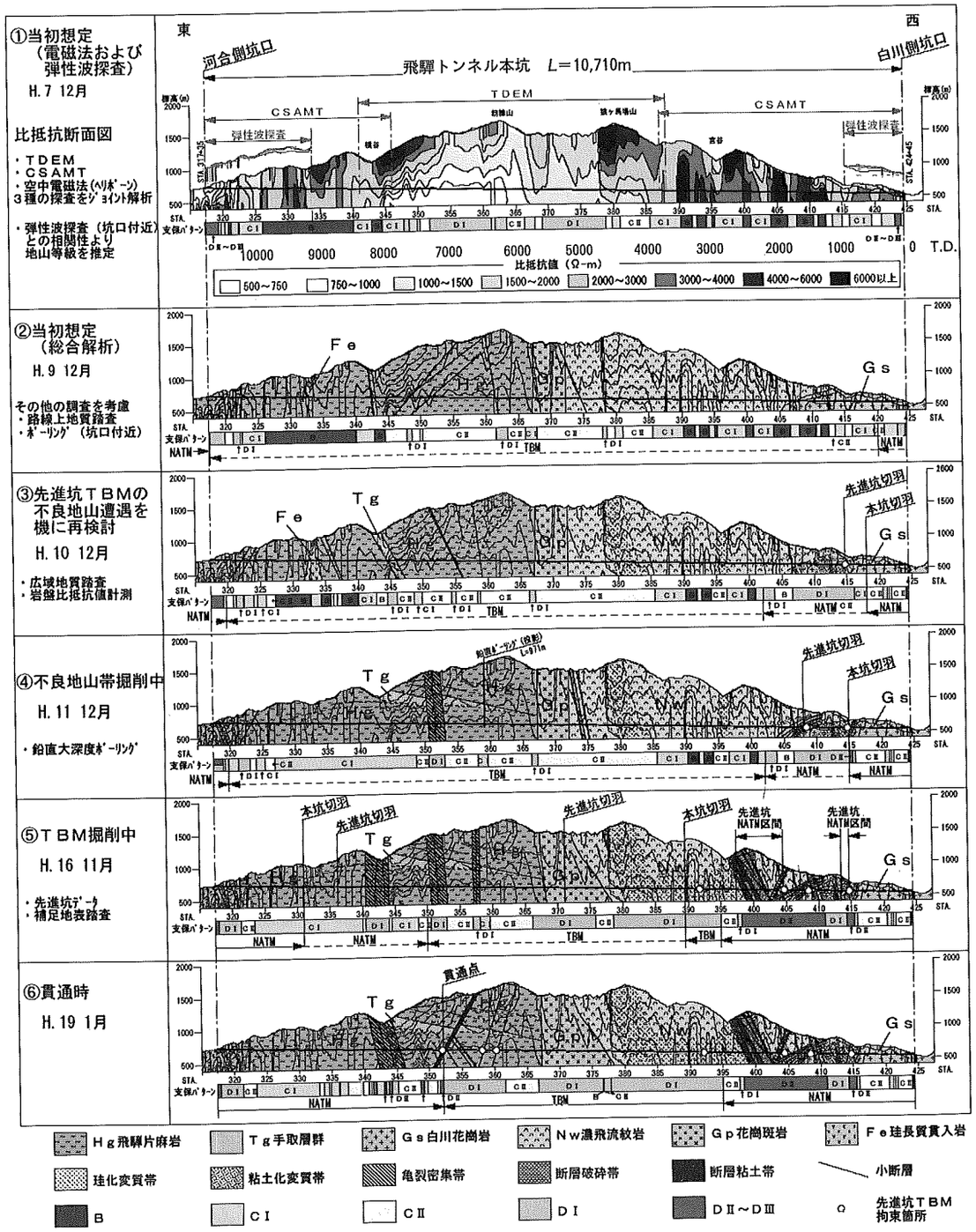


図-4　地質想定の変遷

付近で行われた弾性波探査では同系統の低速度帯は確認されなかったことから，施工段階で問題となる熱水変質帯の分布，性状，規模などについては検討がなされなかった．また，森茂断層についてもこの段階では検討されることがなかった．

地山区分は，推定される地質と土かぶりに着目して行っており，地山等級ＣⅠ～Bが主体と想定され，総じて良好な地山という評価となっていた．

3-2　設計段階における地質調査

本トンネルの土かぶり厚は全体の約55%の区間が500m以上であり，最大1,041mに達する．また，地形は急峻でアクセス道路も少なく，トンネル深部の地質調査には大きな制約があった．山岳トンネルの事前調査で一般的に行われる弾性波探査は，発破の薬量や精度の面などで深部の探査には限界があり，当現場では両坑口付近の１km程度に限られた．トンネルルート全延長については探査深度の大きい調査法として資源調査や一部のトンネルで用いられた電磁探査に着目した．

電磁探査のうち，TDEM法では土かぶり500m以深を，CSAMT法では土かぶり厚500m以浅を対象として，地表面からトンネル施工基面付近までの深度方向の比抵抗分布を測定し地質想定の基本情報とした．併せてヘリコプターを用い広域的に空中電磁法探査を行い，土かぶり厚200m以浅の平面的な比抵抗分布（トンネル軸方向の東西11km，南北２～４km）を測定し地質境界や断裂系の走向の地質的な検討を行った．また，空中電磁法で得られた比較的高精度の浅部比抵抗値を地表面から実施した電磁探査の解析に取り込み，精度を向上させた（ジョイント解析）．図-4①，図-5①に解析結果を示す．

地山区分は，両坑口それぞれ１km範囲で得られた比抵抗値と弾性波速度に正の相関性が認められたことから，これにもとづいて行っている．すなわち，比抵抗値が大きい場合には弾性波速度も大きいと推定し，良好な地山に区分した．白川側坑口からT.D.3,400～9,100mの5.7km区間は地表付近に比べ深部の比抵抗が相対的に低く，とくにT.D.6,100～7,600mを中心に750Ω・m以下の低比抵抗帯が認められＤⅠと判定した．ただし，この原因として片麻岩中の石墨や熱水鉱床などの影響が想定されたが，実際には良好な岩盤を過小評価している可能性もあった．

上記の比抵抗値とトンネル直上の地形地質踏査や坑口周辺のボーリングデータを総合的に解析した結果，図-4②に示す地質想定となり，想定支保パターンの内訳はB＝25%，ＣⅠ＝27%，ＣⅡ＝40%，D＝８%となった（図-5②）．また，この段階ではそれまでの地質情報に以下の修正・追加が行われた．

- 御母衣断層の派生断層は，白川側坑口付近でルートとほぼ併走し，本線に近接する可能性がある．破砕幅は40cm～2m程度と推定される．
- 森茂断層は，「新編　日本の活断層（1991）」で知られるようになった活断層であるが，ルート沿いでは確認されていない．
- 白川花崗岩と濃飛流紋岩との接触部は，白川側から1.4kmの区間では幅数m程度の変質帯が数条出現する可能性が高

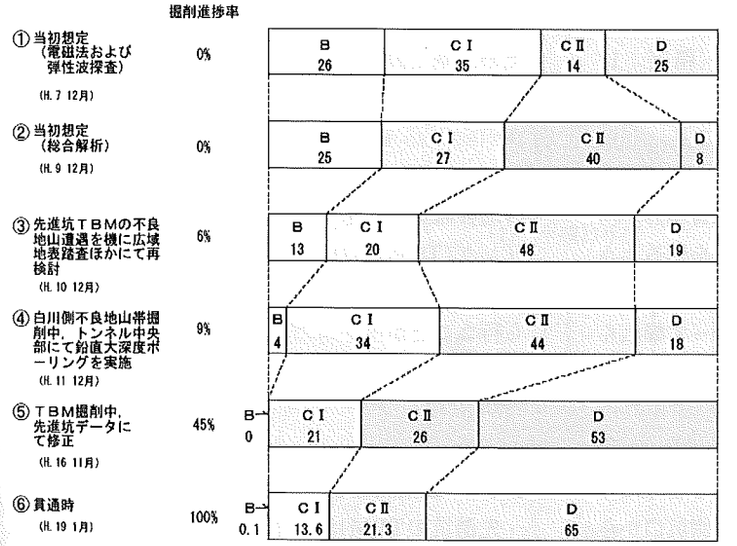


図-5　支保等級割合の変遷

い．

・濃飛流紋岩中の変質帯は，規模が小さく，せいぜい１～２m幅であり，出現頻度は少ない．

3-3　施工段階１における地質評価

施工状況は，先進坑の掘削を中心に述べる．

3-3-1　白川花崗岩と濃飛流紋岩類の境界周辺の破砕・変質帯

先進坑TBMは平成10年２月に発進した．初期掘進以来，ダム湖からの引水の有無を確認しながらの施工であったが，５月には月進383mを記録するなど順調に進捗していた．

平成10年６月，先進坑TBMの掘削は，次第に白川花崗岩の熱水変質の影響が顕著になり数度にわたる切羽崩落・拘束が発生し，白川側坑口からT.D.980mの地点において切羽崩落・拘束とともにTBM減速機が破損する事態が生じた．この区間の地質は，電磁探査でいくつかの断層の存在を推定はしていたものの，比抵抗値から推定される弾性波速度から地山区分はＣⅠ～ＣⅡとしていた．予期せぬ事態であり，電磁探査による地山区分の妥当性が問われた．不良地山箇所はNATM施工することとしたが，先進坑TBMの再発進位置や，本坑TBM発進位置の再検討など計画の見直しが必要になった．しかし，電磁探査による比抵抗値分布だけでは地質構造の見通しを立てることができず，追加調査としてトンネル施工基面の深度に見合った広域にわたる地形地質踏査(精度：1/5,000，白川側33km²，河合側31km²)，坑内から水抜きを兼ねた水平長尺ボーリング(７孔，総延長約2,400m)により地質構造を再検討した．その結果，白川花崗岩と濃飛流紋岩との地質境界が河合側に向かって低角度で傾斜し，それを切るように複数の変質帯・破砕帯が分布する構造となっており，変質帯は地質境界と破砕帯に沿って幅広く発達していると推定された．この変質帯は白川側坑口からT.D.2,300m付近まで続くと推定された(図-4③，図-5③)．一連の地質調査で，この変質帯は，御母衣断層の派生断層に起因すると考えられた．実施工では，この変質帯は白川側坑口からT.D.2,700m付近まで続いた．

3-3-2　鉛直大深度ボーリングによる修正

平成10年度の追加調査の結果，地質が濃飛流紋岩になってもしばらく地山の好転が期待できないこと，低比抵抗帯の地質の良し悪しの詳細が不明なことから，トンネルの全体工程が問題視された．そのため，平成11年６月，雪解けを待って土かぶり厚の大きい区間の低比抵抗帯を直接的に調査することを目的としてトンネル直上からの鉛直ボーリング(L＝971m)と地形地質踏査(精度：1/5,000)を実施した．

その結果，トンネル施工深度ではＣⅠ級の良好な岩盤を確認し，その周囲にはＣⅡ級の岩盤の分布を推定した．また，構造地質学や変成岩岩石学などの学術的な見地から踏査・解析を行い，ボーリングでは直接手取層群の堆積岩類は確認していないが，それらの分布はそれまでの想定よりも低角度となり，トンネルには出現しないと推定した．また，新たに白川側坑口からT.D.7,300m付近に北東-南西方向の跡津川断層系の一つである断層(籾糠山東方断層と命名)を確認した．この断層は地表露頭で破砕幅13mのほぼ直立した断層で，幅１～５mの軟質な破砕物質を伴い，T.D.6,500～T.D.7,500mの約１kmが同系統の断層の密集した脆弱帯となっていると推定した(図-4④，図-5④)．

3-4　施工段階２における地質調査

トンネル坑内に出現する岩盤劣化区間が続いたため，施工段階の地質調査は，常にトンネル坑内地質観察と削岩機(HD-190)やアロードリル(RPD-100)，あるいは穿孔探査ボーリング(DRISS)による切羽前方探査のセットで行った．より前方の地質確認と大量の水抜きのために水平長尺ボーリング(TOP-LS21)や水抜き坑を追加したが，これらは先進坑TBMが拘束される事態になってから行うことが多かった．また，脆弱地山とリニアメントとの対応関係の調査・解析のために地表地質踏査(精査)と空中写真判読を３次にわたって行った．

3-4-1　濃飛流紋岩中の不良地山

先進坑のTBMは，白川側坑口からT.D.1,110mの地点から再発進した．しかし，地質が濃飛流紋

岩に変わったものの，白川側坑口からT.D.1,600～2,000mの400m間で切羽崩落とそれに伴うTBM拘束が５回頻発したため，再度NATMに工法変更を行った．

(１)　森茂断層

平成10年度の広域地形地質踏査では，宮谷沿いの珪化変質帯が確認されたが，周辺の地質露頭が非常に少ないこともあり，森茂断層とはみなされていなかった．

白川側坑口からT.D.2,300m付近より断層破砕帯に遭遇し，トンネル幅の６％を超える大変位が発生したため多重支保構造などの対策を行いT.D.2,700mまでNATMで施工した．その後，本坑の掘削と地表での新たな断層破砕帯の確認などにより，この区間は森茂断層に相当すると判断し，地質縦断面図を図-6のように変更した．

先進坑工事は，T.D.980mから続いた不良地山帯1,700mの突破に約４年の月日を費やした．

(２)　大量湧水帯

地質が白川側坑口からT.D.2,700m地点においてCM～CL級の比較的良好な濃飛流紋岩からなる亀裂性の堅岩に変わったことから先進坑TBMを再発進した．白川側坑口からT.D.2,300m地点より掘削中の水抜き坑は，T.D.3,000mまで継続されたが，水抜き坑の施工速度では近いうちにTBMに追いつかれること，坑内ボーリング自体が土圧による拘束の心配がなくなったと判断し，水平長尺ボーリングに切り替えた．

水平長尺ボーリングL孔(L孔はボーリング孔名，L＝303m)では，前方270m付近に２～３条の断層粘土帯を確認した．図-7に示すように抜管時に毎分12ｔを超える大量の湧水と5.4MPaに達する高圧の湧水圧を確認した．L孔ボーリングの終点位置付近は亀裂密集帯であり，先進坑TBMはこの地点で突発湧水に伴う切羽上半の大規模な崩落に見舞われ，この区間６回目のTBM拘束が発生した．水抜き坑や水平長尺ボーリングなどの湧水対策と切り拡げを行い，４か月後に再発進した．

なお，水平長尺ボーリングで使用するシールドリ

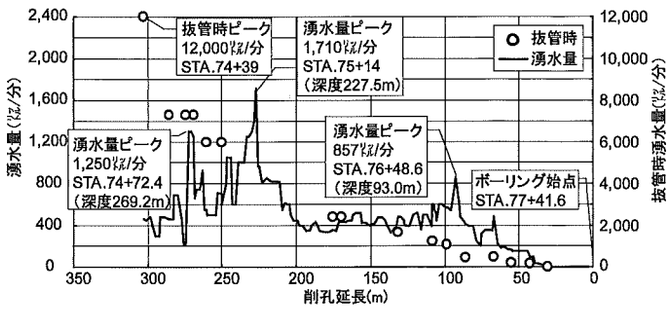
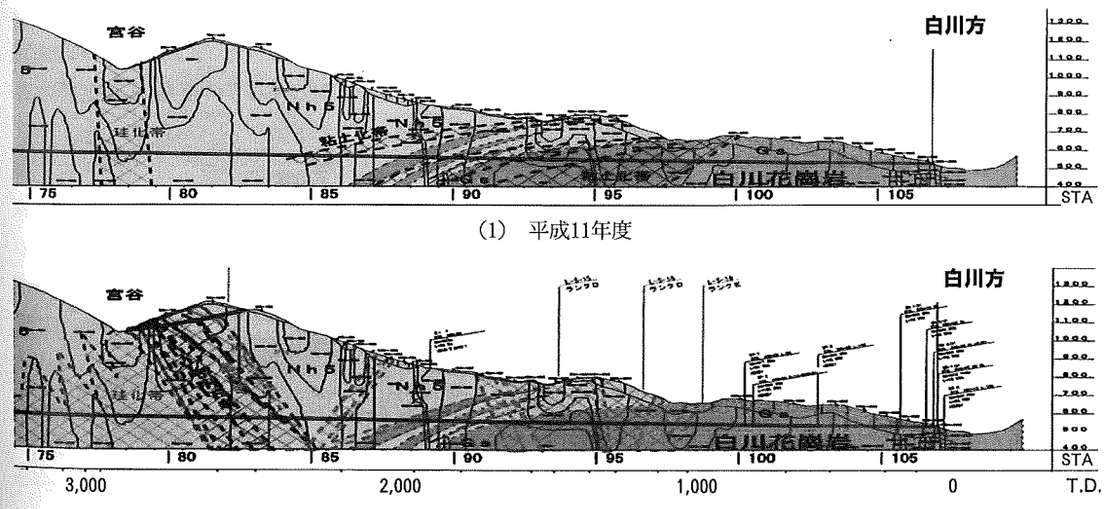


図-7　水平長尺ボーリングL孔からの湧水量



(１)　平成11年度

(２)　変更後

図-6　地質縦断面図の変更

バース工法(TOP-LS21)は，削孔速度の改善を図るためにM孔，N孔の２孔を用いて削孔機械(ビット，ロッド)の改良や他の削孔方法(シングルリバース工法)の検討などの試験を行っている．その結果，M孔に対してN孔の平均日進は53%向上した．

ここで遭遇した高圧大量湧水帯は，事前の地質調査で想定したものではなかった．トンネル全体の湧水量は，最大毎分70ｔに達した．

（３）　跡津川断層

跡津川断層は，計画段階では白川側坑口からT.D.4,600m付近でトンネル部に進入すると想定していたが，詳細な地形地質踏査で発見した断層露頭での破砕帯の分布状況から，大規模な破砕帯は存在せず，跡津川断層からの派生断層が分布する可能性が高いというようにこれまでの想定を修正した．実際の先進坑掘削では，比較的良好な地山状態のまま花崗斑岩に達している．

（４）　山はね

調査段階において，濃飛流紋岩と飛騨片麻岩類における土かぶり700m以上の塊状岩盤部分で，トンネル掘削時に山はねが生じる可能性が予想されていた．

本坑TBMにおける濃飛流紋岩区間の掘削(白川側坑口からT.D.3,400～4,700m)において，12回の山鳴りを確認し，そのうち５回は掘削中に鏡面が崩壊し，一時的なカッタヘッド拘束に至った．一方，先進坑TBMでは，花崗斑岩区間の掘削(白川側坑口からT.D.4,700～4,800m)において，山はね現象が発生している．いずれの場合も，TBM外殻の範囲で山はね現象が発生している．

3-4-2　先進坑データによる修正

平成16年11月，先進坑の進捗率は70%，白川側からT.D.5,300m，河合側からT.D.1,900mとなった．本坑TBMは同年１月に掘削開始したが切羽の自立性が悪くAGFなどの補助工法適用を余儀なくされこの間の掘削延長は550mであった．先進坑は本坑に対し約1,900m先行しており，本坑にとっての前方地質データが充実してきたことにより，前方地質想定を当初からの各種データも考慮し総合的に再検討した．その結果，濃飛流紋岩および花崗斑岩はD級の岩盤が主体であり，TBM掘削予定区間の片麻岩もCⅡ～D主体であると判断された(図-4⑤，図-5⑤)．

3-4-3　籾糠山東方断層

図-8に示すように白川側坑口からT.D.6,500～7,500mの約１km間は断層が密集した脆弱帯であり，先進坑TBMはこの区間に達してから３回の拘束を受けた．白川側坑口からT.D.7,300m付近の３回目の拘束では，高圧流動化した土砂の流入，土圧によりTBM中胴の変形，機内各所の損傷が発生し，先進坑TBMは掘削機能を失い掘削を断念した．当地点は，平成８年度の電磁探査による比較的低比抵抗のコンターと一致していた．

先進坑TBMが拘束される平成17年９月時点で，すでに河合側坑口からT.D.3,100mまでNATMによる迎え掘りが進行しており，残延長は310mとなっていた．先進坑TBMが機能停止した地点から河合側切羽までの区間では，HSP(Horizontal Seismic Profiling)および白川側から５孔，河合側から１孔の水平長尺水抜きボーリングを行った．その結果，拘束地点の不良地山は１～３m幅の破砕帯が50mにわたってくり返す構造で，破砕帯の連続方向はほぼ北西-南東方向を示し籾糠山東方断層の方向と合わないこと，また，TBM拘束地点の約20m前方には６MPaを超える高圧湧水帯

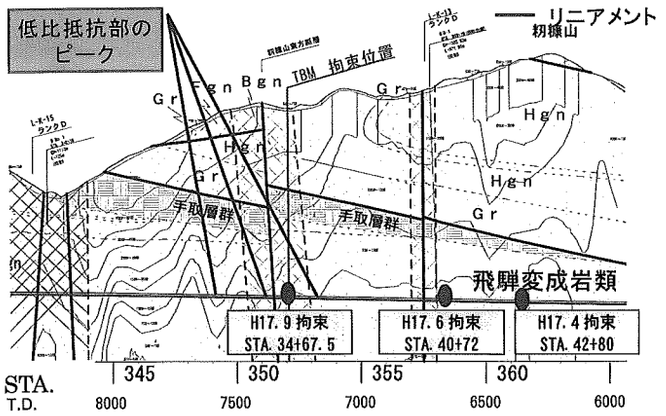


図-8　籾糠山東方断層付近の脆弱帯とTBM拘束位置

が存在することが判明した．

一方，白川側坑口からT.D.7,400m付近より河合側の地質構造は，北東-南西方向で籾糠山東方断層と方向が合うこと，また，安山岩岩脈の挟在する幅約100mの珪化帯を形成していることが判明した．

先進坑TBMは，その本体の駆動部などを除去し，トンネル支保として活用する計画とした．そのためには，どの程度の補強が必要であるか，また，先進坑の貫通後に本坑のTBM掘削により先進坑付近のゆるみ領域がどの程度拡大するかが問題となった．ゆるみ範囲を確認するボーリング調査を試みたが，ロッドが抜けなくなるなどの不具合が相次いだので，間接的な方法として，三次元弾性波トモグラフィ調査を実施した．

この調査から，TBM上部のゆるみ範囲はトンネル直径の３倍弱である12m程度であること，ゆるみ層は約30°程度の傾斜で白川側へ傾いていることを確認した．本坑断面までゆるみ範囲が広がっていない結果であったため，慎重な施工により本坑のTBM掘削は可能であると判断した．

3-4-4　貫通時

先進坑は，６本の水平長尺ボーリングにより，高圧湧水帯の湧水圧が約１MPa以下へ減少するのを待ち，平成18年３月に河合側からのNATM掘削により貫通した．

先進坑を拘束した粘土帯は，その後の坑内からの調査で東傾斜約70°で本坑にも連続していると想定した．本坑は，この位置まで河合側から迎え掘りで到達し粘土層を確認，さらに中央導坑にて延長103mの地質を確認した．その後本坑TBMは，中央導坑に平成19年１月に到達，順調に掘削し河合側切羽の手前４mまで達した時点で天端崩落が発生，TBMが拘束されたため，残り４mを河合方からの迎え掘りを行い翌２月に全断面貫通となった．奇しくも２台のTBMは同じ粘土帯で拘束されトンネル支保として活用することになった．最終的な地質縦断面図を図-4⑥に示したが，その実績支保パターンの内訳は，B＝0.1%，CⅠ＝13.6%，CⅡ＝21.3%，D＝65.0%となり(図-5⑥)，当初想定と大きな差異が生じる結果となった．

4　おわりに

飛騨トンネルの地質調査は，トンネルが大土かぶりであり調査手法に制約があること，構成岩種が比較的多くさらに断層や変質の影響を受け地質が複雑であること，当初の地質調査に時間的制約があり補足調査を行う余裕がなかったことなどに起因して，当初想定と大きな差異が生じる結果となった．

飛騨トンネル施工技術検討委員会の大島洋志委員は，「国鉄のトンネル技術者，あるいはトンネル地質技術者に何となく引き継がれてきているノウハウの一つとして，工事の死命を制するような長大トンネルの路線は，できるだけ地質条件が良いところ，それが叶わぬならば地質の状態が良かろうが悪かろうが，その程度がある程度まで把握できているところに選定するという基本原則にもとづき計画・実施されるのが一般的であるという思想がある」と述べている．

このような観点で飛騨トンネルのこれまでの経過を見た場合，路線選定段階の地質調査が果たして十分であったか，地質条件の十分な把握をしないまま路線を決め，その後に厳しい地形・地質条件下で地質調査を行うことになっていなかったか，という反省は必要であろう．

いざプロジェクトを推進していく段階で，とくに不良地山帯において，本坑を挟むかたちで先進坑の反対側に作業坑を追加し，本坑の掘削前に地質状況を把握し，地下水位を低下させておく方法を採用した判断は，本工事の重要なエンジニアリングジャッジメントの一つであった．

最後に，飛騨トンネルでの経験が今後の長大トンネルの路線選定，事前地質調査技術の発展に少しでも寄与できれば幸甚である．

参考文献

1) 寺田光太郎・川北眞嗣・小林伸次・松原利之：不良地山・高圧大量湧水との闘い(不良地山編)，東海北陸自動車道飛騨トンネル，トンネルと地下，Vol.35,

No.8, pp.17–15, 2004.8.
2) 寺田光太郎・川北眞嗣・小林伸次・築地功：不良地山・高圧大量湧水との闘い(大量湧水編)，東海北陸自動車道飛騨トンネル，トンネルと地下，Vol.35, No.9, pp.15–25, 2004.9.
3) 森山守・寺田光太郎・松原利之・築地功：土かぶり1,000m，6 MPaを越える高圧湧水下で貫通，東海北陸自動車道飛騨トンネル先進坑，トンネルと地下，Vol.38, No.2, pp.17–24, 2007.2.
4) 森山守・寺田光太郎・小林伸次：世界最大級(φ12.84m)のTBMで地下1,000mを掘削(設計編)，東海北陸自動車道飛騨トンネル本坑，トンネルと地下，Vol.38, No.10, pp.15–25, 2007.10.
5) 森山守・寺田光太郎・小林伸次：世界最大級(φ12.84m)のTBMで地下1,000mを掘削(施工編)，東海北陸自動車道飛騨トンネル本坑，トンネルと地下，Vol.38, No.12, pp.15–24, 2007.12.

わかりやすい **トンネルの力学**

B5判　286頁　本体価格 5,825円　〒340円

福島啓一 著

NATMの導入以来，トンネル工事の現場に計測が大幅に取り入れられるようになって，トンネルの力学がますます重要視されるようになった．

本書はトンネル力学の基礎的な事項に基づく問題点を経験則と理論則から説明し，設計・施工に携わる実務者がトンネルを掘るとき，また，計画・設計するときに考慮しなければならないトンネルの力学を主眼にした入門書である．

〔目　次〕 ○従来のトンネル力学の考え方／トンネル力学の発展，NATM以前の考え方／ゆるみ高さの推定，ゆるんだ地山の釣り合い，沈下量の差により変わる土圧，切羽の安定，地山の分類による支保の設計，NATMの考え方／せん断破壊説，変形による圧力の低減，地山のゆるみ防止，アンカーボルトによる地山の補強，地山挙動の時間依存，せん断破壊説による設計法，経験的設計法，地山分類と地山等級に対応した支保工の標準設計，NATM力学についての問題点，○弾性論による解析／弾性学の基礎，軸対称円形トンネル，線対称円形トンネルの弾性解，円形トンネルの弾性解析，地表面に近いトンネル，だ円形のトンネル，球形空洞周わりの応力と変位　○弾そ性論による解析／そ性力学の基礎，軸対称円形トンネル，線対称円形トンネルの弾そ性解，円形トンネルで地山の自重を考えた弾そ性解析　○弾そ性解以外の検討／トンネルの大きさの影響，時間の影響，表面の影響，山はね，ゆるみと締まり，地山のゆるみ，再圧密を考えた考察　○その他の検討／二次覆工の役割とひび割れ，安全率，支保工の設計・観察・計測の解釈と逆解析，力学的に好ましい，または好ましくないトンネルの設計および施工法，有限要素法，トンネルと地下水

株式会社 **土木工学社**　〒162-0832 東京都新宿区岩戸町16メイジャー神楽坂
電話 (03) 3267-2888 (代)　振替 00110-8-190072

避難坑の設計と施工

(元)日本道路公団中部支社清見工事事務所飛騨工事長(初代)
中日本高速道路(株)東京支社建設事業部計画設計チームリーダー
佐野信夫
(元)飛島建設(株)・鉄建建設(株)飛騨トンネル避難坑工事共同企業体工事担当
飛島建設(株)土木事業本部土木技術部設計グループ
兼松亮

1 はじめに

平成9年の作業横坑着手，翌年のTBM掘削開始を経て9年，平成18年3月に避難坑(以下「先進坑」)は無事貫通した．

当初計画では10.7kmを3年強で掘削完了する予定であったが，予想を超える不良地山の出現により予定年数に加え6年の歳月を費やすこととなった．

本稿では，先進坑の施工経緯を概説し，基本計画から設計に至るまでの流れと，掘削開始から貫通までの施工状況について報告する．

2 先進坑施工経緯

飛騨トンネル先進坑は，平成9年7月から作業横坑，発進作業坑に着手，坑外でTBMを組立て後，平成10年2月にTBMの掘削を開始した(図-1)．

当初，白川花崗岩でのTBM掘削は順調に開始したものの，濃飛流紋岩との境界付近から御母衣断層の派生断層に起因する変質帯とそれに連なる森茂断層帯による不良地山が約1.7km続き，先進坑はこの区間の突破に約4年の月日を費やした．

その後濃飛流紋岩堅岩部に入ったものの，亀裂性岩盤からなる大量湧水帯が続き，水抜きボーリ

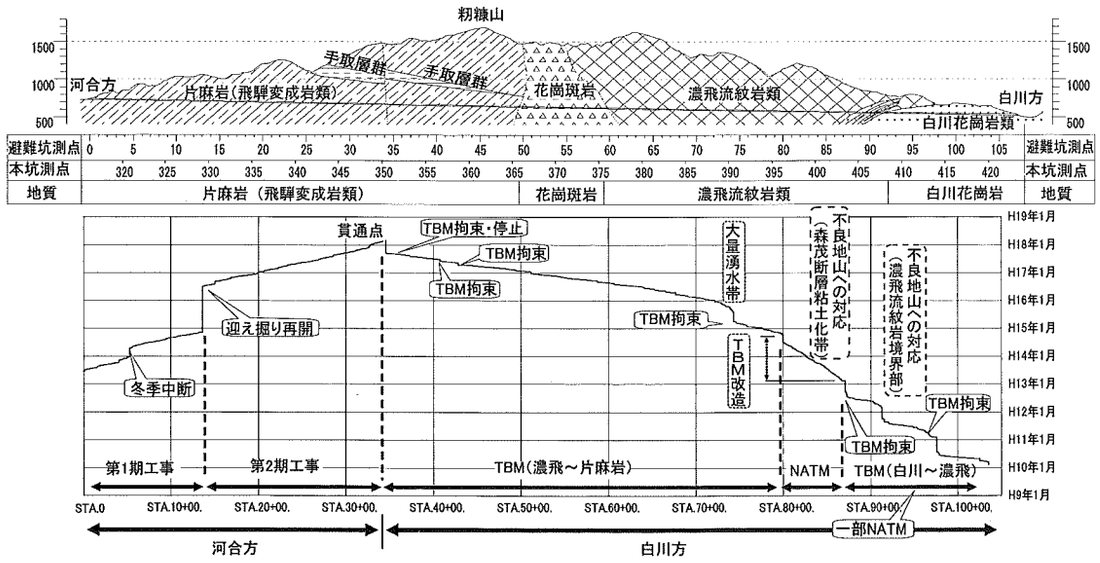


図-1　地質縦断および実施工程表

ングを併用しながらの施工を行った．

平成13年７月には，工事工程の遅延を取り戻すために，河合側からの迎え掘りを開始した．迎え掘りは当初NATMレール方式で行い(第１期工事)，途中１年半の中断を挟んで平成16年７月には再度タイヤ方式により再開(第２期工事)，貫通まで継続した．

白川側の地山状況は，濃飛流紋岩を過ぎ花崗斑岩から飛騨片麻岩にかけては，比較的安定した地山が続いたものの，800mを超える土かぶりが影響し，高圧地下水による突発湧水や弱層部での地山の押し出しが発生して，TBMは２度拘束を受けた．

また，貫通を目前にした平成17年９月には，幅２mの粘土層の押し出しによりTBMが拘束・停止し，最終的にこの地点でTBM掘削を断念し，迎え掘りによる貫通を行うこととなった．

3　当　初　計　画

3-1　TBM工法の採用

先進坑の掘削工法は，縦断勾配が白川側から河合側に向かって２%の上り勾配であること，南坑口である河合側坑口への冬季のアプローチが困難なことなどから，白川側からのTBMによる片押し施工を採用することとした．

TBMの機種選定にあたっては，破砕帯や豊富な地下水の存在が懸念されていたことから作業の安全性を考慮し，地質の変化に適応性の高いフルシールド型TBMを採用した(**写真-1**)．

3-2　支保形式の選定

支保形式の選定にあたっては，排水機能やシールド掘進時の反力などを考慮して，下部90°にはコンクリート製のインバートライナーを採用，上部270°はB級を無普請，C級を吹付けモルタルと鋼製支保の組み合わせ，D級を鋼製の簡易ライナーとして各地山状況に応じた４タイプを採用した．最終的に簡易ライナーは施工の効率化のため，盛り替え時の小崩落に対応するもっとも軽いタイプのTypeⅠと，シールド掘進の反力として使用できるもっとも重いタイプのTypeⅣの２種類に限定して使用することとした(**表-1**)．

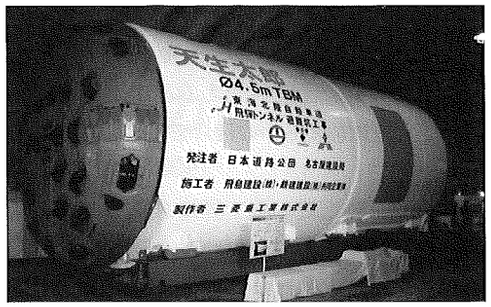
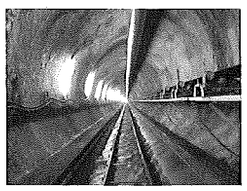
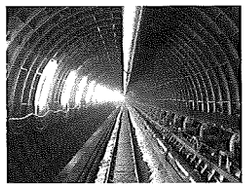
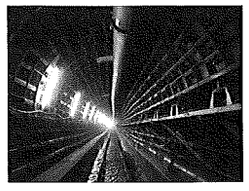


写真-1　先進坑TBM

表-1　支保パターン表

	Bパターン	Cパターン	D：TypeⅠ	D：TypeⅣ
支保パターン図	無普請 インバートライナ インバート背面グラウトモルタル	吹付けモルタル t=20mm インバートライナ インバート背面グラウトモルタル	裏込め充填(豆砂利) t=70mm 鋼製ライナ t=75mm インバートライナ インバート背面グラウトモルタル	裏込め充填(豆砂利) t=70mm 鋼製ライナ t=100mm インバートライナ インバート背面グラウトモルタル
支保完了写真				

4　白川花崗岩～濃飛流紋岩境界部におけるTBM掘削

4-1　施工の概要

TBM発進から500m区間の白川花崗岩帯は，おおむね良好な地山であり，最大日掘進長35m，最大月進383mを記録するなど，順調な進捗であった．

しかし，発進から560m地点の白川側TD910mで，熱水変質による変質帯に遭遇し切羽崩壊に至った．このためボーリング座を施工し，地質探査および水抜きを目的としたボーリングを行い，いったんTBM掘削を中断しNATMにより130mを掘削した．変質帯区間をNATMにより施工後，再度TBMによる施工を開始した．

TBM再発進後の地質状況は，白川花崗岩と濃飛流紋岩の境界部であり風化・熱水変質により地山の細片化，粘土化が著しく，不安定な状況下での施工となった．この間TBM周辺の地山の押し出しによるTBMの拘束が頻発し，400m間で合計５回の拘束と解放のための切り拡げ掘削を行った．とくに白川側TD2,000mにおいては連続的にTBMの拘束が発生したため，この地点でTBMによる掘進を中止しNATMへの工法変更を行うこととした．

4-2　不良地山への対応

4-2-1　TBM拘束と切り拡げ

当区間では，粘性土地山の押し出しによるTBMの拘束が合計９回発生し，そのつど人力による切り拡げを行いTBMにかかる応力を解放した．**図-2**に切り拡げ時の縦断図と断面図を示す．作業は多くが人力作業となる(**写真-2**)．掘削は手動ブレーカーを使用し，ずりの搬出はポータブルベルコンを設置し手作業で積み込みを行う．掘削終了後は速やかに一次吹付け，鋼製支保の建て込み，二次吹付けを実施し，状況に応じロックボルトの打設を行う．鏡面は吹付けを行い，自立困難な場合はフォアパイリングを実施する．

4-2-2　水抜き坑の施工

白川花崗岩と濃飛流紋岩との境界部では粘性土を主体とする粘土化帯と地下水を多く胚胎する亀裂密集帯が交互に出現した．白川側TD1,560m付近では切羽から200～300 ℓ/minの湧水が発生し，切羽が不安定となったことから，TBMを一時中断し，後方右側に延長約100mの水抜き坑を施工するとともに，左側にボーリング基地を設置して地質調査と水抜きを兼ねた長尺ボーリングを施工した．**図-3**に平面図を示す．

4-2-3　前方探査

掘削当初より，ロータリーパーカッション式ボー

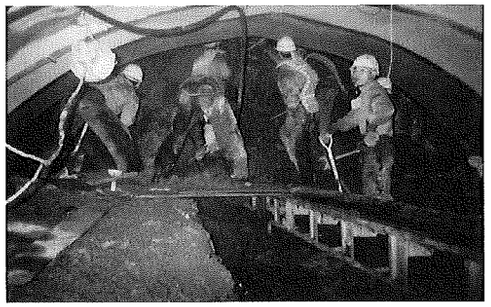


写真-2　切り拡げ状況

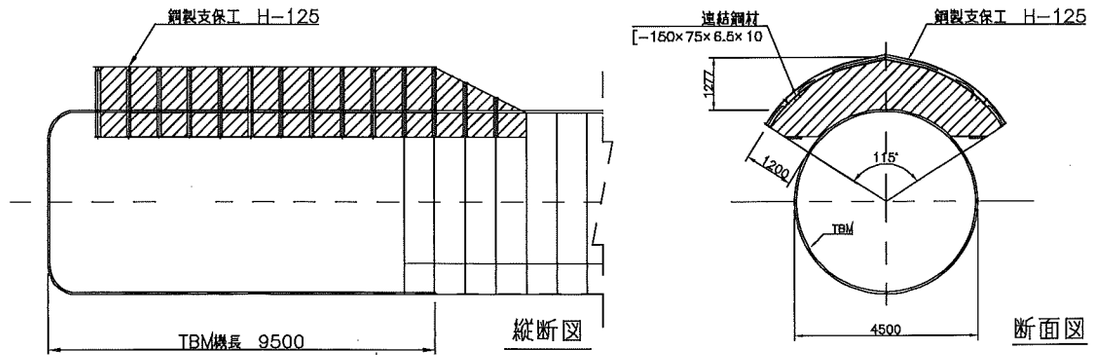


図-2　切り拡げ図

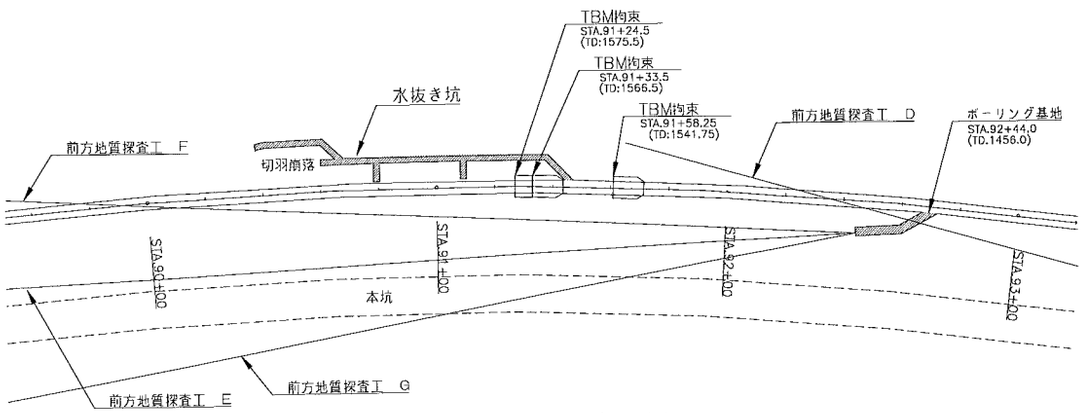


図-3　水抜き坑付近平面図

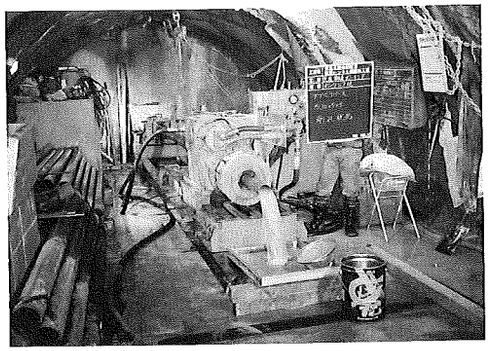


写真-3　長尺ボーリング

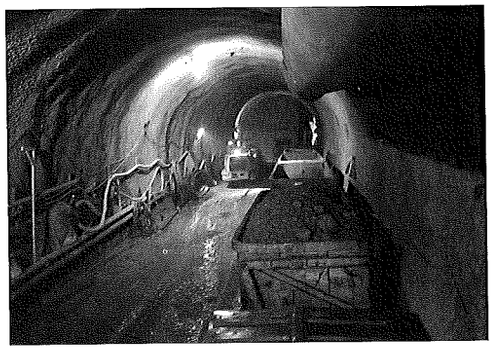


写真-4　NATM掘削状況

リング機RPD-100により，随時100m程度の前方探査を実施した．ボーリングはTBMと後続台車間のスペースに機械を持ち込み行われた．地質予測はノミ下がりやスライムの状態，湧水量の測定により行った．

一方，TBM発進から560m地点で発生した大規模崩壊時には，長尺ボーリングとしてシールドリバース工法を採用した．削孔状況を**写真-3**に示す．この工法は不良地山に対しても300m以上の水平削孔が可能であり，また，コア採取が可能なことから，目視により前方の地山状況を把握することができた．当区間においては前方探査および水抜きを目的として，3か所で7本実施しており，削孔延長はこの区間で延べ2,400mに達した．

5　NATM掘削

5-1　NATM区間施工概要

TBM発進から2年半経過した時点において，掘削は全延長の4/5を残していた．また，これまでに数度のTBM拘束が発生し，この時点においても拘束が3回連続して発生していた．このような状況から先進坑工事は全体工程を踏まえ，いったんTBMからNATMへの変更を行うこととした．

NATMにより施工を行った白川側TD2,000～2,700m間の700mは，切羽全体が粘土混じりの土砂状を示し，切羽自立性が著しく低下した．後の考察で，この区間は森茂断層の主断層であったと推定されている．とくに粘土化の著しい区間においては変位量が大きく，多重支保構造を採用し施工を行った．なお，当区間は先進坑施工の1年後，本坑の通過にともない大きな変状が発生した．

また，白川側TD2,270mからは先進坑に併行して水抜き坑を施工した．

以下にNATMの施工様式を示す．

5-2　NATM施工様式

NATMへの工法変更にあたり，掘削方法やそれに伴う坑外設備の変更を実施した．

掘削機械として，2ブームクローラージャンボ（レール対応），ブレーカー・バックホウを使用，ずりだしは鋼車(4.5m²)を使用し，積み込みは，当初シャフローダーを使用し，途中よりロードホールダンプを使用した．また，坑外設備として，鋼車の転倒設備を設置し，レール設備も新たに追加した．

掘削状況を**写真-4**に示す．

5-3　多重支保構造の採用

NATM区間全体を通じて，切羽は自立性が低く，加背割りの細分化や高強度鋼繊維吹付けコンクリート(SFRC)の採用，鏡吹付け，フォアパイリングなどの補助工法を併用した．

とくに粘土化の著しい白川側TD2,450～2,620mにおいては掘削幅6mに対し最大325㎜の内空変位が発生するとともに，トンネル支保工に大きな変状が発生した．この区間の支保構造については，当初鋼アーチ支保(H-150)＋SFRC(t=350㎜)を施工した後，SFRCによるインバート吹付け(t=250㎜)を設置する高剛性の支保工を採用したが，30㎜/日を超える初期変位速度の発生により，支保工が頻繁に破壊した．このためアーチ部の吹付けコンクリートの施工時期を，掘削時にt=250㎜，インバート後方でt=100㎜と段階的に施工

写真-5　水抜き坑状況

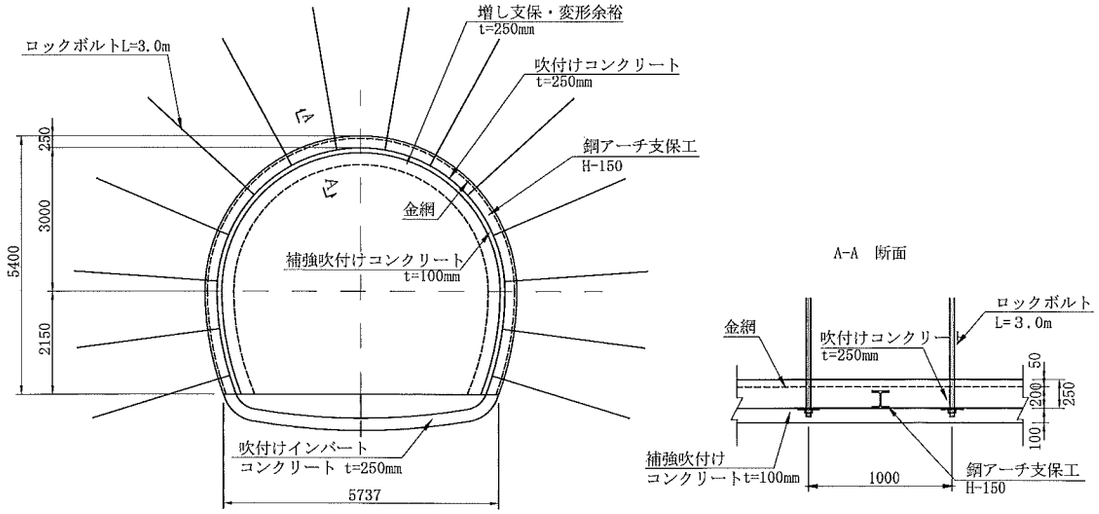


図-4　多重支保断面図

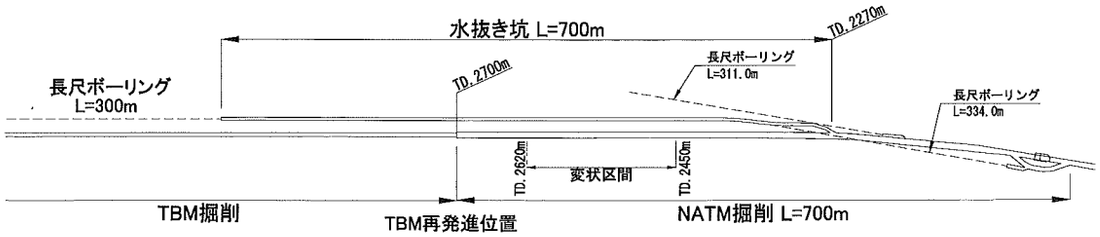


図-5　水抜き坑付近平面図

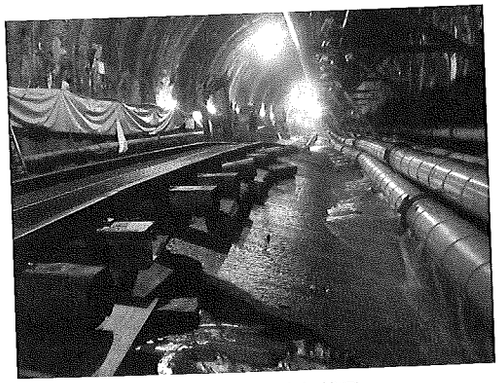


写真-6　盤ぶくれ状況

する多重支保構造により，変位速度を緩和し地山挙動を制御した．

断面図を図-4に示す．

5-4　水抜き坑の施工

NATM区間の施工状況を踏まえ，事前の水抜きによる切羽の安定，地質調査とTBM再発進位置の検討を目的として，白川側TD2,270mより先進坑に併行して水抜き坑を施工した(写真-5，図-5)．

水抜き坑は最終的にL=700mを施工し，この間の地質状況，地中変位計測結果からTBM再発進位置を設定した．また，水抜き坑最終切羽から長尺ボーリング(L=300m)を施工し，その結果ボーリング全体湧水量Q=12 t/min，湧水圧5.5 MPaを計測した．

5-5　本坑通過に伴う変状

先進坑施工の1年後，本坑上半切羽の通過に伴う応力再配分により大きな変状が発生した．

変状は，まず本坑先進導坑切羽が通過した時点で，吹付けコンクリートにクラックが発生し，これに伴って鋼アーチ支保工の座屈が発生した．その後，本坑上半切羽が通過した後，突然インバートコンクリートが破壊し瞬時に底版が50～80cmの高さで隆起した．最終的には延長120m，最大1.2mの規模に達した(写真-6)．この変状に対し，H形鋼によるストラットを加えて剛性を増したインバートの再施工を行うとともに，アーチ部についてはH-150とt=250㎜の仮巻きコンクリートを施工した．

6　ＴＢＭ改造

6-1　TBM改造の背景

NATM掘削実施期間中，不良地山に対する適応性の向上を主な目的として，TBMの改造を実施した．

改造項目は，TBMの進捗を低下させている要因を検討・分析し，その結果から，改造により不良地山においても掘進継続できる，あるいは掘進速度が向上する項目を抽出して決定した．

6-2　TBM改造項目と評価

以下に改造内容の5項目を示す．

(1)　ずりの取り込み効率向上

粘性地山での取り込み効率を向上させ，カッタトルクの上昇を抑制

(2)　拘束発生頻度の低減(余掘り量拡大)

TBMのオーバーカット量を増加させ，TBM通過中の地山の押し出しによる拘束を回避

(3)　周面摩擦の低減による推進効率の向上

切羽で取りこぼしたずりがTBM～地山間のクリアランスへの圧入を防止することによる推力低減

(4)　方向制御性能向上

TBMノーズダウンに対応するため，バーチカルシューを設置

(5)　その他(後続設備の改善)

ダクト，エレクタのスリム化による機内での作業性を向上

上記改造，改善項目の詳細を表-2に示す．また，表には，再発進後の実績による改善項目の評価もあわせて示す．

改造は平成13年9月より開始し，約1年間をかけて実施し，平成14年10月に再発進した．

7　河合側からの迎え掘り

7-1　迎え掘り区間の概要

白川側からの施工状況を踏まえ，平成13年6月，トンネル全体工程の短縮を図るため河合側からの施工を開始した．

施工は当初レール方式により掘削を開始した．

表-2　改造項目，評価一覧表

改善目的	改善提案項目	改造仕様	再発進後の実績による評価
ずりの取り込み効率の向上	スクレーパー取り込み口寸法拡張	スクレーパ刃先掬い角を25°から45°に変更.	取り込み効率の拡大はカッタヘッド回転不能，TBM拘束の頻度を低減したと評価する．ただし，大塊取り込みによるベルコン切断，ずりの取り過ぎによる線形逸脱の問題がある．地質状況に応じた微妙な調整が必要.
	取り込み口開口率増大	開口幅を130㎜から250㎜に拡大.	
	前面切羽とカッタ面盤間の隙間量拡大	状況に応じ，シングルカッタディスタンスピースを取り付け，クリアランスを現状の110㎜から150㎜に改善できるようにした.	再発進後では切羽と面盤の距離を短縮する目的での嵩上げの必要性はなかった.
拘束発生頻度の低減	余掘り量拡大	状況に応じ，ゲージカッタディスタンスピースの嵩上げにより対応. 現状のmax20㎜オーバーカットからmax50㎜オーバカット可能とする.	地山状況によってはTBM拘束に直接的に有効になる．最適な嵩上げ量の選定基準，変更のタイミングが課題.
周面摩擦の低減による推進効率の向上	スクレーパ掻き取り径の拡大による取り残しずり量の削減	スクレーパ掻き取り半径を現状の掘削径－30㎜から－20㎜へ変更.	オーバーカット量，スクレーパ出代量は拘束回避，掘削推力増大，縦断線形のコントロールに影響を与えるので，地質状況に応じた変更が必要．機械的な変更の容易化と変更基準の策定が今後の課題.
	カッタヘッドによる前胴下部回り込みずりの削減	カッタヘッド外周への排土板(鉢巻き)設置.	
	カッタヘッド後方への回り込みずり削減	最外周後端スクレーパ刃先に内向角度付ける(現状の0°から35°に変更).	
方向制御性向上	ノーズダウン時の姿勢回復機能追加	下部可動そり設置	改造設置した可動そりの伸び力85tf×2＝170tfに対して，TBM本体荷重310tfに加えて掘削時の推力も可動そりに載荷されるため，TBMのノーズダウンを制御するには至らなかった.
	後胴グリップ力確保	メイングリッパ出代増大(現状より77㎜増大させ掘削坑壁から155㎜とする).	グリッパ推進の適応範囲を拡げることができたが，亀裂性岩盤においては坑壁崩壊を助長させてしまった.
その他	坑壁・隙間観察	観察用点検口追設.	上部，側部の崩落状況を確認するには有効．しかしTBM本体の構造的な欠陥となるため，追加は必要最小限とする必要がある.
	機内出入性・機内作業性改善	機内エアダクト仕様を変更.	作業スペースとしては不十分である.
		エレクタのスリム化.	改造後のエレクタで十分な機能であり，作業スペースの確保面で有利.
	NATMへの切り換え容易化	後続台車を片寄せとし，先頭台車付近より迂回する.	TBM後方の作業スペースはNATMへのすばやい切り換えのほかに中尺ボーリングの作業スペースにもなり，有効だった.
	前方探査装置の追加	TBM直後に削岩機台車を設置.	アロードリルに比べ不良地山への削孔能力は低いが，準備時間，削孔時間とも大幅に低減した．比較的良好な地山状態において，前方50m程度を探査する場合には，非常に優れた設備である.

地質状況は全体的に堅硬な飛騨片麻岩が主体であり，平成14年12月，延長1,360mでいったん施工を終了した(第1期工事)．その後平成16年7月より再度タイヤ方式により掘削を再開し(第2期工事)，平成18年3月の貫通まで継続した．

以下に第1期，第2期工事の施工方法を説明する．

7-2　第1期工事

第1期工事は平成13年4月～平成14年12月の間，途中冬季間の中断期間を挟んで16か月施工し，施工延長は1,360m，この間の最大月進は174m/月であった．

断面は避難坑標準断面(18m²)を採用し，レール方式で施工を行った．掘削状況を写真-7に示す．

7-3 第２期工事

第２期工事は平成16年７月から平成18年３月の貫通までの20か月継続した．

第２期工事では迎え掘りを再開するにあたり，早期貫通のための高速施工，大量湧水・突発湧水対策などの技術的問題を解決する必要があったため，以下に示す施工方法を採用した．

① 高速施工および地質トラブルに迅速かつ的確に対応するために，補助工法の適応性や，断面変更に対する自由度の高いタイヤ方式を採用した．

② 効率的なずりの搬出および安全性を考慮し，自走式クラッシャー＋連続ベルトコンベヤシステムを採用した．

③ タイヤ方式による高速施工を主目的としたことから，掘削断面は使用する施工機械に合わせて，もっとも効率的施工が可能となる断面を設定した．

④ 想定される湧水量に対し，安全率1.5を確保し排水設備を配置した．また，非常電源設備と排水監視システムを構築し，非常時にも切羽水没を未然に防ぐ処置を行った．

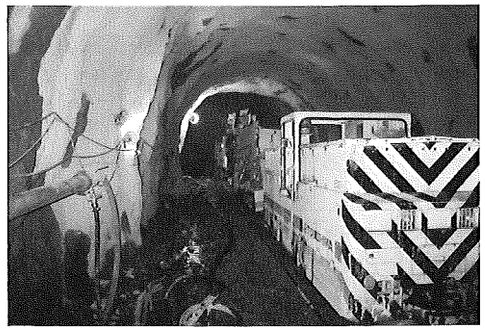


写真-7 河合第１期施工状況

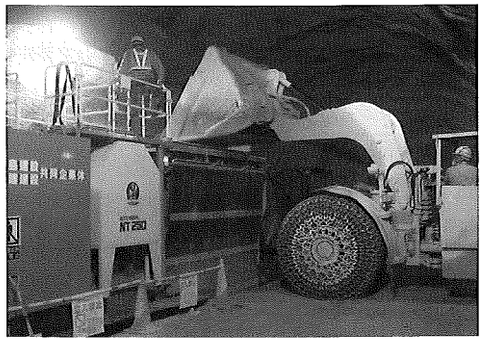


写真-8 河合第２期施工状況

図-6に施工次第図を，写真-8に施工状況を示す．

第２期工事の掘削延長は，第１期終了地点から貫通点までの2,094mとなり，この間の最大月進は207m/月であった．結果的に河合側からの延長は合計で3,454.5mとなった．

8 濃飛流紋岩堅岩部～飛騨片麻岩におけるTBM掘削

8-1 当区間の施工

NATM掘削を白川側TD2,700mで終了し，平成14年10月，TBMを再発進した．

TBM再発進後の施工は一転して大量湧水下での施工となった．再発進から550m地点においては突発的な大量湧水による切羽崩壊が発生しTBMは停止した．

大量湧水帯を越えてからは，比較的安定した花崗斑岩を抜け，飛騨片麻岩に入った．飛騨片麻岩は岩片の一軸圧縮強度が200MPaと堅硬で亀裂間隔も大きく密実であることから支保パターンもBパターンを採用することができた．

以下にTBM再発進後の施工状況とトンネル長大化にともなう設備の増強について記述する．

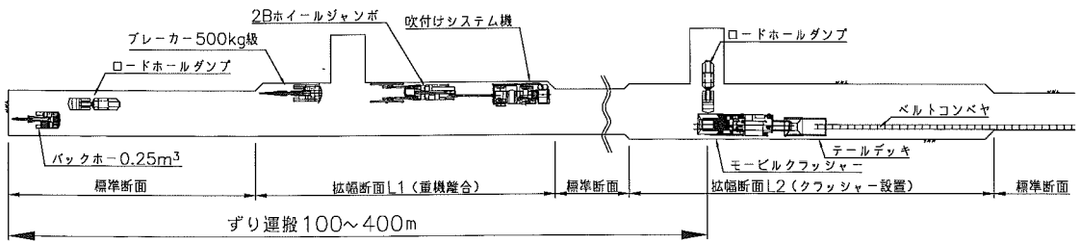


図-6 河合第２期施工次第

8-2 大量湧水帯の対応

白川側TD3,260m地点において２t/minの高圧湧水により切羽が崩壊しカッタ回転不能となり，TBMの掘進ができなくなった．この地点の大量湧水帯における対応については，本特集「高圧大量湧水への挑戦」に詳述する．

8-3 トンネル長大化に伴う設備増強

濃飛流紋岩の亀裂性地山における大量湧水帯以後，地質は花崗斑岩から飛騨片麻岩へと変化したが，地山状況は比較的安定しており，進行も200～300m/月を記録した．

延長が長大化するに従い，設備面でのいくつかの変更を行ったので以下に記す．

（１） 離合箇所の設置

TBM断面は単線であるため，TBM掘削延長が長くなるに従い，資材運搬に時間を要することが予想された．このためレール位置をバッテリーロコが離合できる位置まで嵩上げして複線とし，離合箇所を設置した(写真-9)．

（２） 清濁分離設備

掘進延長の増加に従い，トンネル全体の湧水量も増加したため，濁水と清水を分離することにより濁水処理の低減を図った．具体的には，(1)の離合箇所位置に釜場を設け，切羽側の濁水をポンプアップし濁水処理設備へと排水した．釜場より坑口側の湧水は自然流下しそのまま川へ放流した．

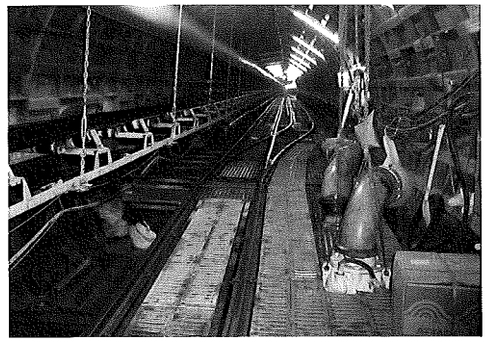


写真-9 離合箇所

（３） ベルトコンベヤブースタードライブの設置

掘進延長の増加に従い，連続ベルトコンベヤの駆動力を増幅するためのブースタードライブを設置した．ブースタードライブは延長3,000mごとに１台，合計３台設置した．

（４） 面盤補修

濃飛流紋岩から飛騨片麻岩にかけての堅岩部では，TBM面盤にかかる負荷が増大した．また，これらの区間ではずりの二次破砕による面盤の損傷も激しく，鉄板の一部に穴が開くなどの現象が発生した．このため貫通までに２度にわたりTBMを停止させ大規模な面盤補修を実施した．

9 貫通直前での拘束とTBM断念

9-1 TBM拘束までの経緯

飛騨片麻岩に入ってからの1,400m間は，弱層部での地山の押し出しによるTBMの拘束を２度受けたが，それ以外は比較的順調な掘進を続けていた．平成17年９月，白川側TD7,250m付近において厚さ２m程度の弱層部(粘土層)での押し出しにより，TBMが拘束された．TBM拘束解放のために切り拡げの実施を試みたが，高圧の粘土層に起因する切羽の押し出しが発生，その後流動化した粘土がTBM中胴の点検窓を破壊して機内に流入した．TBM後方左側より，迂回坑の掘削を開始したが，TBMを拘束した粘土層に達した時点

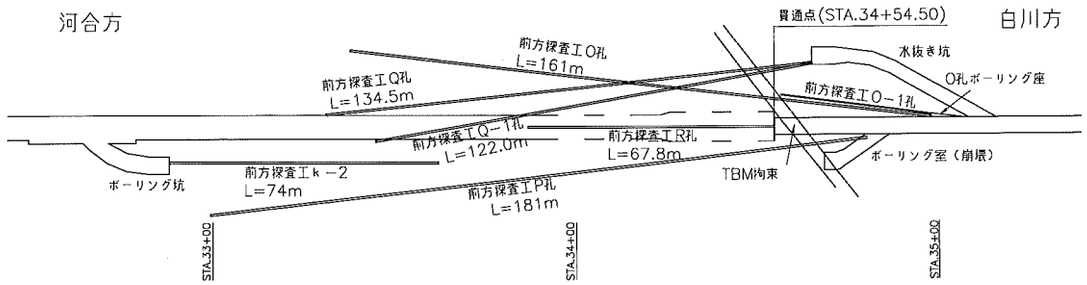


図-7 貫通点平面図

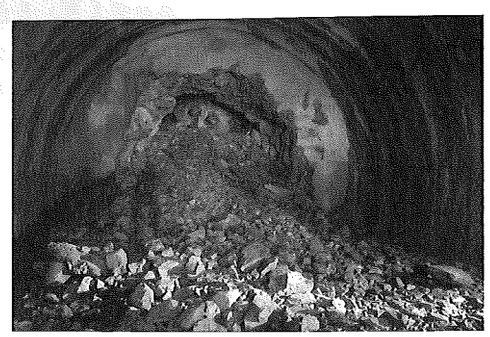


写真-10　貫通瞬間

で再び切羽が崩壊し，これにより迂回坑は完全に埋没した．この時点で白川側からのTBMによる掘進は断念し，河合側からの貫通を目指すこととした．

これらの経緯については本特集「高圧大量湧水への挑戦」に詳述する．

9-2　河合側からの貫通

TBM停止後の調査により，6 MPaの高圧湧水帯の存在が判明したことから，白川側からのボーリングに加え，河合側からもシールドリバースのボーリングを実施した(**図-7**)．この結果ボーリングによる排水は全6本のボーリングの全体で12 t/minを計測した．白川，河合両側からのボーリングによる水抜きの結果，平成18年1月の時点で湧水量が12 t/minから4 t/min，水圧も最大6 MPaから1 MPa程度まで減圧することができたため，迎え掘り切羽での排水設備を増強して貫通に向けて突っ込み勾配による掘削を再開した．

TBM停止から5か月後の平成18年2月に長尺ボーリングにより，白川側から河合側にノミ先貫通を行い，さらにその1か月後の3月31日，河合側から白川側へと貫通を果たした(**写真-10**)．

10　おわりに

土かぶり1,000m，延長10kmを超える飛騨トンネルにあって，先進坑が本坑に先立ち，地質確認，地下水位低下など，パイロット坑としての機能を十分に果たすことができた．また，当初の想定を超える大量湧水と不良地山に遭遇しながらも，長尺ボーリングや水抜き坑による湧水対策，大規模な工法変更の実施など，試行錯誤の連続ではあったが，多くの技術的な知見を得ることができた．

計画，設計段階での思想にとらわれることなく，その時々の臨機な状況判断と，柔軟な施工計画の見通しにより，無事貫通までこぎつけることができた．

これもひとえに飛騨トンネル施工技術検討委員会の委員をはじめとする関係各位の方々のご指導，ご助言のお陰であり，深く感謝する次第です．

参考文献

1) 佐野信夫・松尾勝弥・永島哲紀：飛騨トンネル避難坑用TBMの設計，建設の機械化，No.598，pp.23-30，1999.12.
2) 山田隆昭・川北眞嗣・勘定茂・築地功：飛騨トンネルにおける高圧大量湧水帯の施工，トンネル工学研究発表会，2003.11.
3) 寺田光太郎・川北眞嗣・小林伸次・松原利之：不良地山・高圧湧水との闘い(不良地山編)，トンネルと地下，Vol.35，No.8，pp.17-25，2004.8.
4) 寺田光太郎・川北眞嗣・小林伸次・築地功：不良地山・高圧湧水との闘い(大量湧水帯編)，トンネルと地下，Vol.35，No.9，pp.15-25，2004.9.
5) 森山守・寺田光太郎・松原利之・築地功：土かぶり1,000m，6 MPaを超える高圧湧水下で貫通，トンネルと地下，Vol.38，No.2，pp.17-24，2007.2.

〔土木工学社図書案内〕

岩盤の計測と解析　　工博　鈴木　光著

A5判　箱入　244ページ　本体価格4,200円　(〒380円)

最近では，有限要素法を利用し，地盤や構築物の変形や応力分布に関する予想解析が行われるようになりつつある．そのために入力などに信頼度の高い各種計測値が要求されるようになってきた．

このような理由から，建設工事では，従来にも増して計測や解析が重要となりつつある．

本書は，応用範囲も広く重要と思われる岩盤の計測と解析法の紹介と解説を試みた実務書である．

本坑TBMの計画

(元)日本道路公団中部支社清見工事事務所飛騨工事長(初代)
中日本高速道路(株)東京支社建設事業部計画設計チームリーダー
佐野信夫
(元)大成建設(株)・西松建設(株)・佐藤工業(株)飛騨トンネル工事共同企業体所長(第2代)
大成建設(株)土木本部土木技術部トンネル技術室次長
小林伸次

1　はじめに

飛騨トンネルは，山岳道路トンネルであり，その本坑と避難坑ともにTBMで掘削する計画となった．山岳道路トンネル本坑の2車線断面に岩盤用TBMを適用するのは国内で初めてであった．これまでの岩盤用TBMの国内実績のうちもっとも大きな掘削径は電力導水路トンネルの8.3mであり，今回の計画では掘削径は10mを超えることになる．

飛騨トンネルは，白川側からの片押し施工で10.7kmの掘削を予定していたため，急速施工が第一に求められた．また，わが国のような複雑で変化の多い地質に対応するため，不良地山対応性もTBM工法適用上および急速施工実現の上からも重要課題であった．工事が開始されると白川側坑口から約1km入った避難坑を掘削していたTBM(掘削径4.5m)が，予期せぬ不良地山に遭遇し，NATMに切り替える事態が発生した．そのため，本坑用のTBMの仕様について避難坑での不良地山事例を参考に再検討することになった．

本稿では，まず本坑用TBMの基本仕様について述べ，つぎに不良地山に対応するために変更した点を述べる．最後に今回採用したTBM仕様に対して事後評価を行う．

2　TBMの掘削径

飛騨トンネルで使用するTBMの掘削径は，道路トンネルに適用する岩盤用TBMとしては世界最大径である．

掘削径は，①内空断面半径，②測量誤差，覆工施工に対する余裕量，③覆工厚，④掘進蛇行量，⑤変形余裕量，⑥支保工の種類・形状寸法と施工法から決定する量，⑦TBM形式・細部寸法およびテールと地山のクリアランスから決定する量を検討し，設計された．ここで，④掘進蛇行量は，TBMの海外事例や国内のシールドトンネルの事例を参考にして半径方向に10cmとした．また，⑤変形余裕量は，NATMのDⅡの変形余裕量10 cmを考慮して地山区分Dの場合には5 cmとした．地山区分B，Cの場合には通常のNATMの変形量に土かぶりを勘案しNATM実績の2倍程度の半径方向に2 cmを見込み，かつ防水シート設置代や吹付けコンクリートの不陸を考慮し5 cmを設定した．⑥支保工は，地山区分Dでは鉄筋コンクリート製ライナー(t=25cm)，地山区分B，Cでは吹付けコンクリート(t=5 cm)とロックボルトの組み合わせを考慮した厚さとした．その他の掘削径にかかわる項目も検討し，掘削径を12.84mとした．TBMの掘削径は，地山が良いところでは建築限界に対して余裕があり，地山の悪いところでは余裕が少ない設計となる．

3　TBMの型式選定

TBMの型式はトンネル地山の自立性により，大きくオープンタイプとシールドタイプに分けら

表-1　TBM型式比較表

TBMの機種		単胴シールドタイプ	複胴シールドタイプ	オープンタイプ	改良型オープンタイプ
掘削径(mm)		12,840	12,880	12,350	12,840
掘削機の特徴		・全周にわたってシールドシェルを有する. ・全周にわたって機器を地山の崩落より保護できる. ・グリッパ機能がなく，掘削反力確保のため，全線にライナーが必要となる. ・掘進と支保作業を同時に行えない. ・シールドシェルを有することから，地山に捕捉される可能性がある.	・全周にわたってシールドシェルを有する. ・全周にわたって機器を地山の崩落より保護できる. ・地山の手当が切羽より機長分後方でしか行えない. ・シールド掘進およびグリッパ掘進が可能である. ・不良地山において，全周ライナーが使用できる. ・掘進と支保作業を同時に行うことが可能である. ・シールドシェルを有することから，地山に捕捉される可能性がある. ・掘削における余掘り量が他の機種に比べて多い.	・ルーフサポートを有する ・天端部において機器を地山の崩落より保護できる. ・切羽にもっとも近い位置で地山の手当ができる. ・掘進と支保作業を同時に行うことが可能である. ・フォアパイリングなどの補助工法が必要となる	・必要最小限のシールドシェルを有する. ・全周にわたって主要機器を地山の崩落より保護できる. ・切羽にもっとも近い位置で地山の手当ができる. ・シールド掘進およびグリッパ掘進が可能である. ・不良地山において，全周ライナーが使用できる. ・掘進と支保作業を同時に行うことが可能である. ・ライナーのスプリング部に型枠ライナーを配置することで，グリッパ掘進が可能な範囲を拡大できる
支保形態		全線トンネルライナー (インバートライナー)	吹付け・ロックボルト ＋トンネルライナー (インバートライナー)	吹付け・ロックボルト リング支保工 ＋インバートライナー	吹付け・ロックボルト ＋トンネルライナー (インバートライナー)
掘進方法	良好地山	シールドジャッキ ＋ライナー	スラストジャッキ ＋メイングリッパ	スラストジャッキ	スラストジャッキ ＋メイングリッパ
	不良地山		シールドジャッキ ＋ライナー	＋メイングリッパ	シールドジャッキ ＋ライナー
支保作業位置 (組み立て位置)		シールドシェルテール内	シールドシェルテール内 (メイングリッパ後方)	ルーフサポート後方 (メイングリッパ前方)	シールドシェルテール内 (メイングリッパ後方)

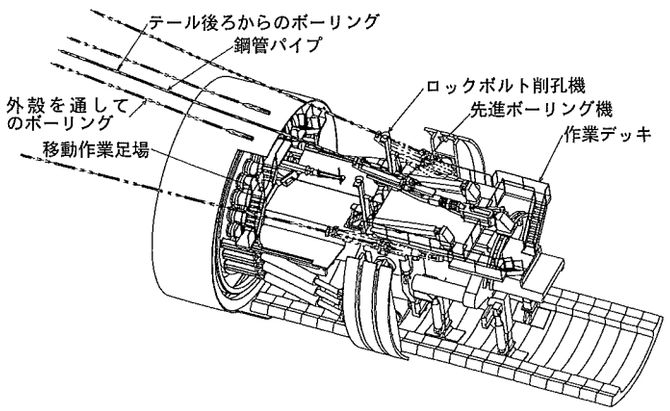


図-1　改良型オープンTBM

れる．飛騨トンネルでは事前地山調査より自立性の高い地山の比率が大きいと予想されたため，自立性の高い硬岩部を高効率で掘削できるオープンタイプを主体として設計された．ただし，10.7 kmという長大トンネルであること，小規模であるが断層破砕帯が出現する可能性があること，対象地山は今までにトンネルなどの掘削実績がなく地質情報が少ないなどの事由により，従来のオープンタイプTBMに対し，不良地山対応として全周RCライナーの使用を可能とした「改良型オープンTBM」が検討された．TBM型式の比較表を**表-1**に示す．

改良型オープンTBMは，自立性の良い地山ではメイングリッパで推進し，シールド部から地山がでたところで吹付けコンクリート，ロックボルトにより支保を施工する．自立性の悪い地山では，RCトンネルライナーをシールド内で全周組立て，これに反力を取ってシールドジャッキにより推進する．切羽前方探査のための先進ボーリング，長尺鋼管先受け工などの掘削補助工法をシールド内部より施工できるようシールド部にさや管を設置し，施工設備もTBM内に常備した(**図-1**)．

4　TBMの仕様

自立性の良い良好な地山では急速施工が可能な排土設備，支保設備を計画した．自立性の悪い不良地山では作業員の安全対策としてシールドシェル内でRCライナーの組み立てなどに支保作業から前方探査などの補助作業まで作業員が直接地山に接することなく作業できる構造とした．

4-1　TBMの主要諸元

本坑TBMは安定した地山での高速掘削が求められていたため純掘進速度向上とカッタ消費量を考慮し，カッタ径19インチを採用した．カッタヘッド駆動装置は，インバータ制御により始動電流を低くし徐々に定格回転速度まで上げる方法を採用し不良地山対策として低回転時の最大トルクを最大限発揮できるように設定した．

掘削ずりの坑外搬出は連続ベルトコンベヤを使用し，毎時1,200 tの搬出能力を確保した．RCライナーなどの資材搬入は，TBM本体内まで汎用車両が使用できるタイヤ方式で運送可能とした．

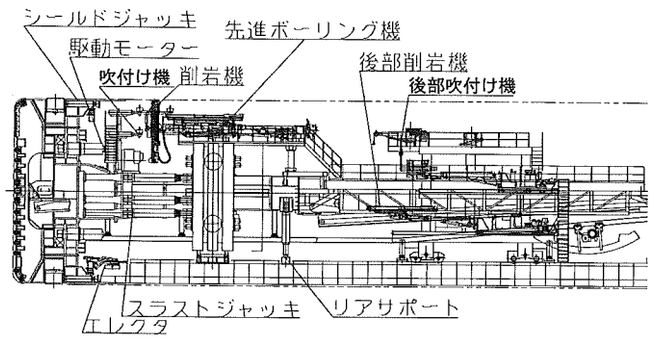
本坑TBMの主要諸元を**表-2**に示す．また，本坑TBMの全体図を**図-2**に示す．

4-2　支保施工設備

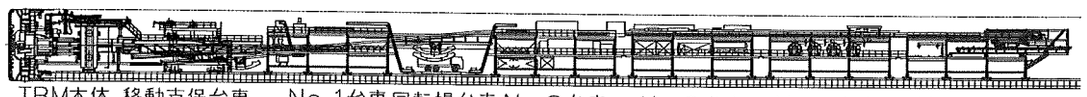
吹付けコンクリートは，シールドが抜け地山がでたところでTBM本体メインビーム上に設置した吹付け機(**写真-1**)により上部120度を施工し，メイングリッパ通過後，側壁部をTBM本体とNo.1後続台車間に設置した移動支保台車により施工する．ロックボルトについても，吹付けコンクリートと同様に，上部120度と側壁部を分割施工する計画とした．これにより自

表-2　TBM主要諸元

項目	仕様
型式	改良型オープン
掘削径	φ12.84m
全長	197.15m
重量	28,940kN (うち本体部19,130kN)
総出力	7,200kW
ディスクカッタ径×個数	19インチ×91個 (オーバーカッタ3個含む)
カッタヘッド旋回動力	4,250kW (250kW×17台)
カッタヘッド回転数	0～4.0rpm (インバータ制御)
カッタヘッドトルク	低速(1.275rpm)：31,843kNm 高速(4.0rpm)　：10,143kNm
スラストジャッキ推力	33,372kN
スラストジャッキストローク	2,050mm
メイングリッパ推力	44,100kN×2基
シールドジャッキ推力	55,426kN
補助ジャッキ	2,943kN×6本 (フリクションカット用)
ずり搬出	連続ベルトコンベヤ (幅900mm，1,200t/hr)
発電機	1,500kW×6台 (うち1台は予備機)



(1)　TBM本体～移動支保台車



(2)　TBM本体～No.5台車

図-2　TBM全体図

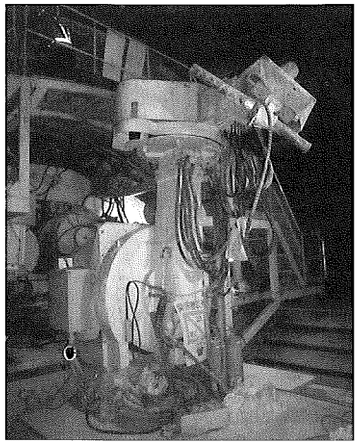


写真-1　TBM搭載上部吹付け機

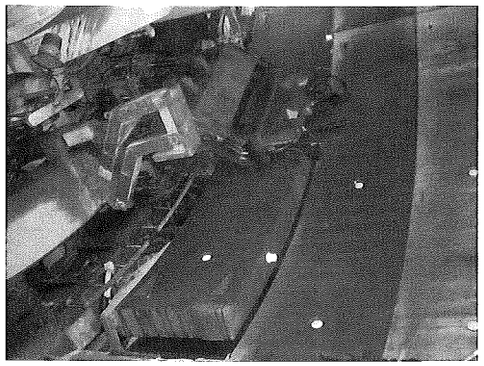


写真-2　RCライナー組立てエレクタ

立性の良い地山において掘削ロスタイムの低減を図った．自立性の悪い地山で使用したRCライナーは直接TBM本体までトラックで運搬し，本体装備のエレクタ(**写真-2**)によりシールド内で全周組立てを行った．

4-3　補助工法施工設備

掘削補助工法設備として，前方探査ボーリング，注入式長尺先受け工が可能な専用削孔機を**図-3**に示すようにTBM作業ステージに設置したものを使用した．施工状況を**写真-3**に示す．

4-4　坑外設備

TBM本体および坑内外で使用する電力は通常のトンネル工事に比較し大幅に大きく，商用電力

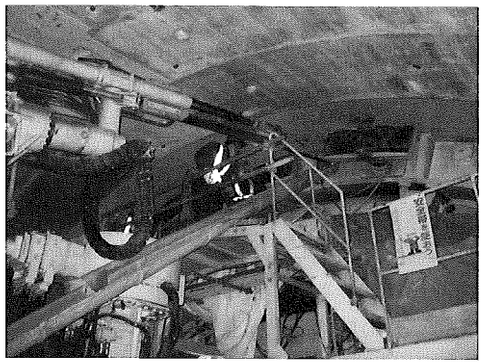


写真-3　補助工法専用削孔機

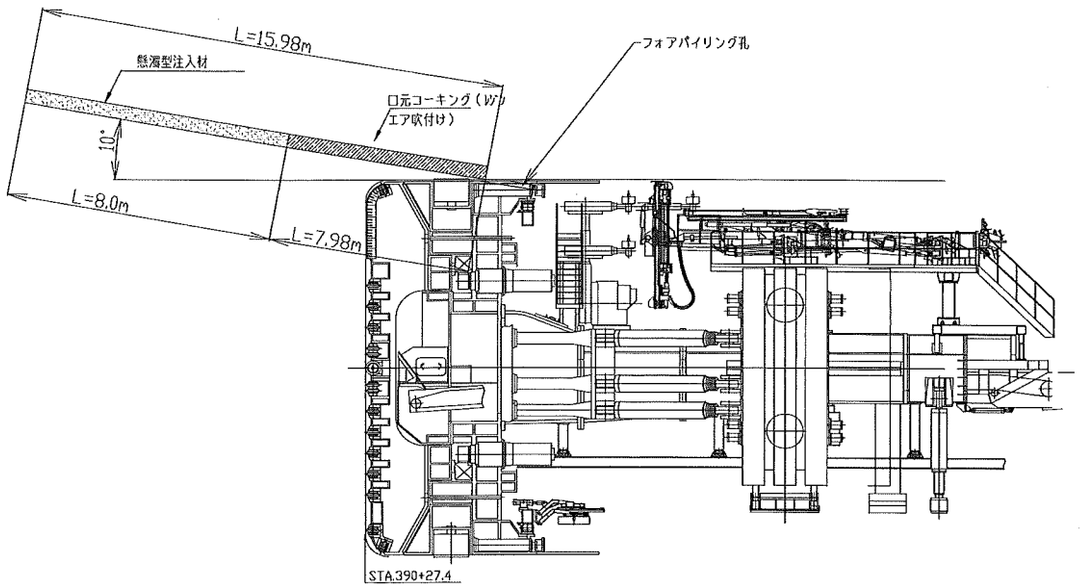


図-3　長尺先受け施工図

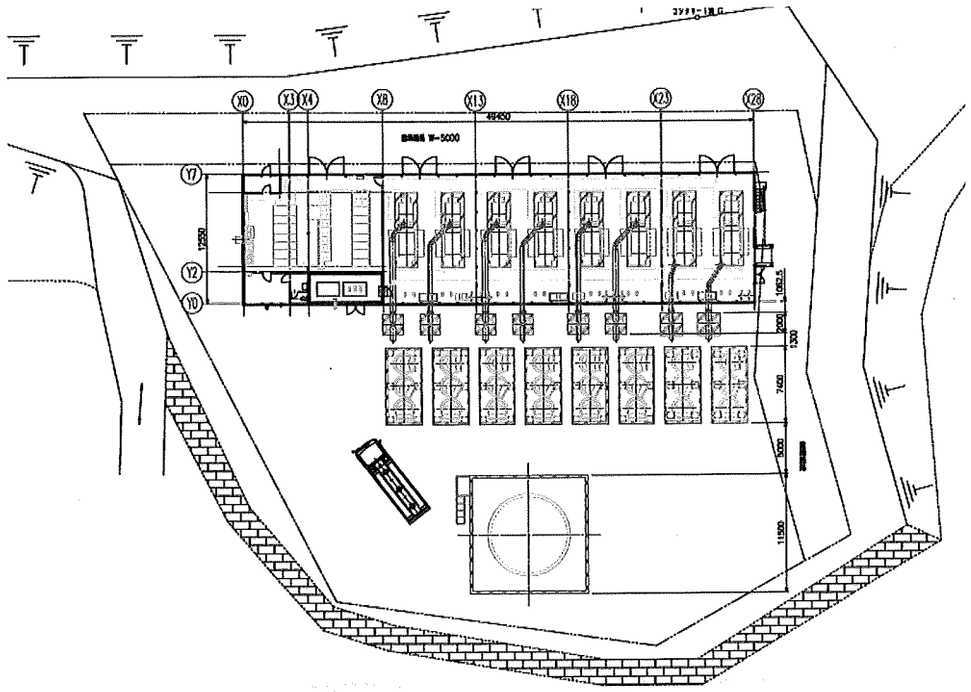


図-4　自家発電所配置

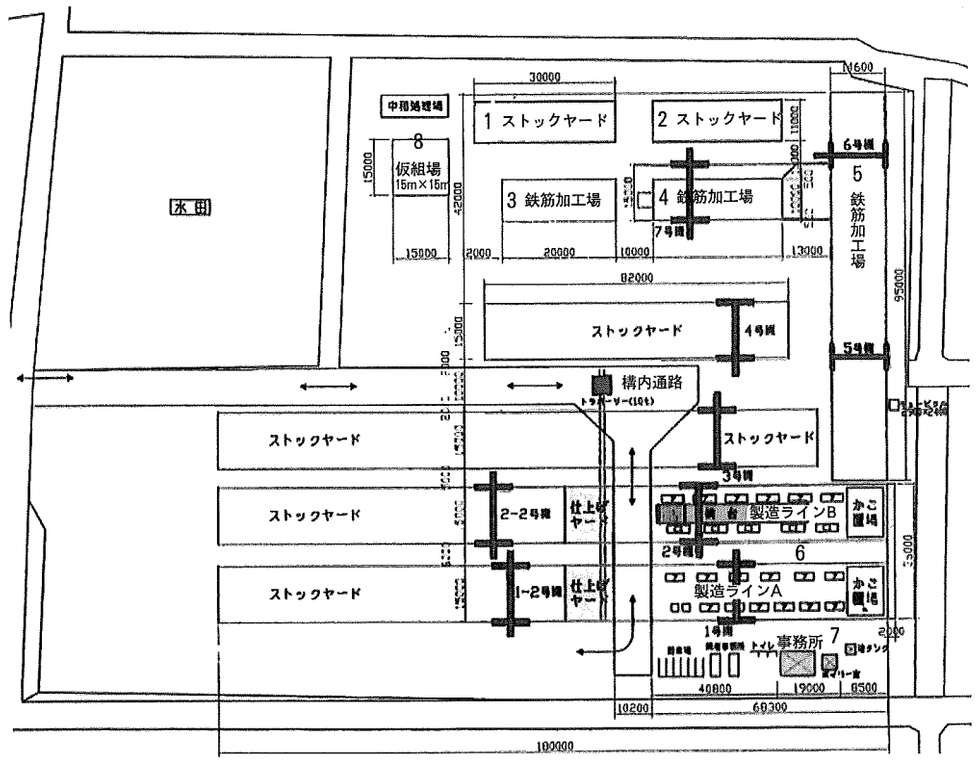


図-5　RCライナー工場配置

では供給不足となるため，A重油を燃料とした自家発電所を設置した．発電機は1,500kW×6台設置し，最大7,500kWの発電を行った．発電機は最大5台運転とし6台の発電機が常に同等の運転時間となるよう管理した．送電は6,600Vで行った．発電所の配置図を**図-4**，全景を**写真-4**に示す．

RCライナーは白川村村内に工場を設置し現地製作を行った．当初計画では，RCライナー支保工の延長が約600mと少なかったため切羽までの運搬はTBM切羽回転場で回転可能な専用運搬車

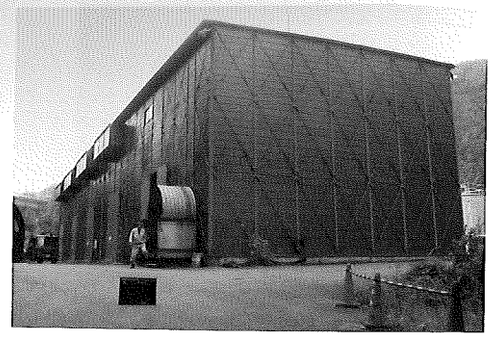


写真-4　自家発電所全景

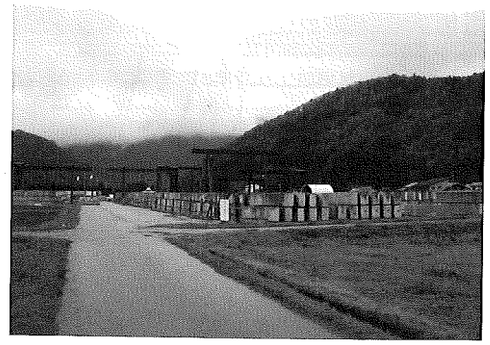


写真-5　RCライナー工場全景

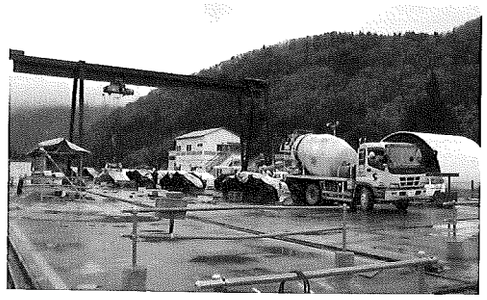


写真-6　RCライナー製作状況

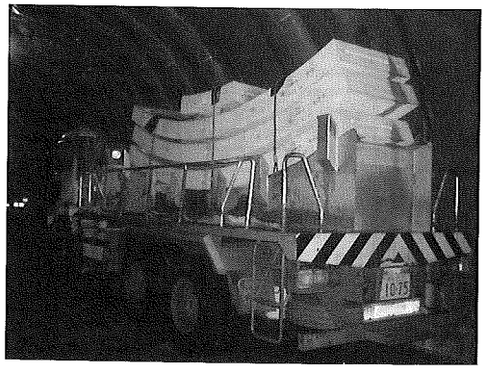


写真-7　RCライナー運搬状況

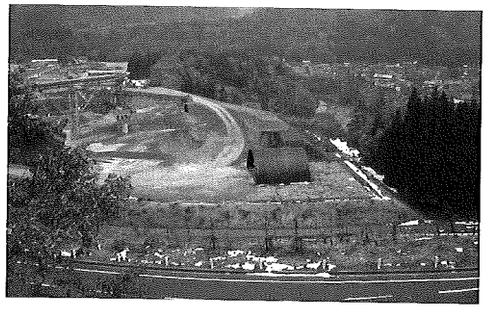


写真-8　寺尾仮置場より白川郷を望む

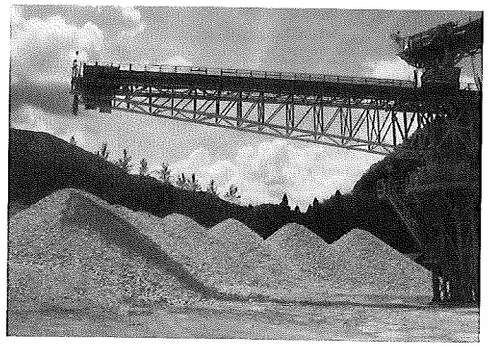


写真-9　旋回ベルコンによる仮置き状況

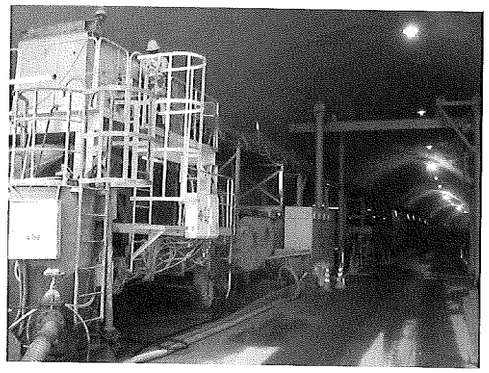


写真-10　大牧トンネル内仮設設備

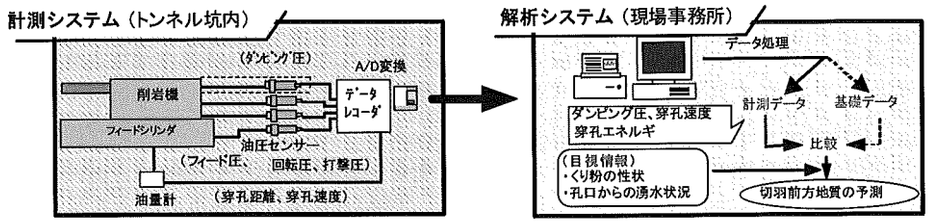


図-6　前方探査システム

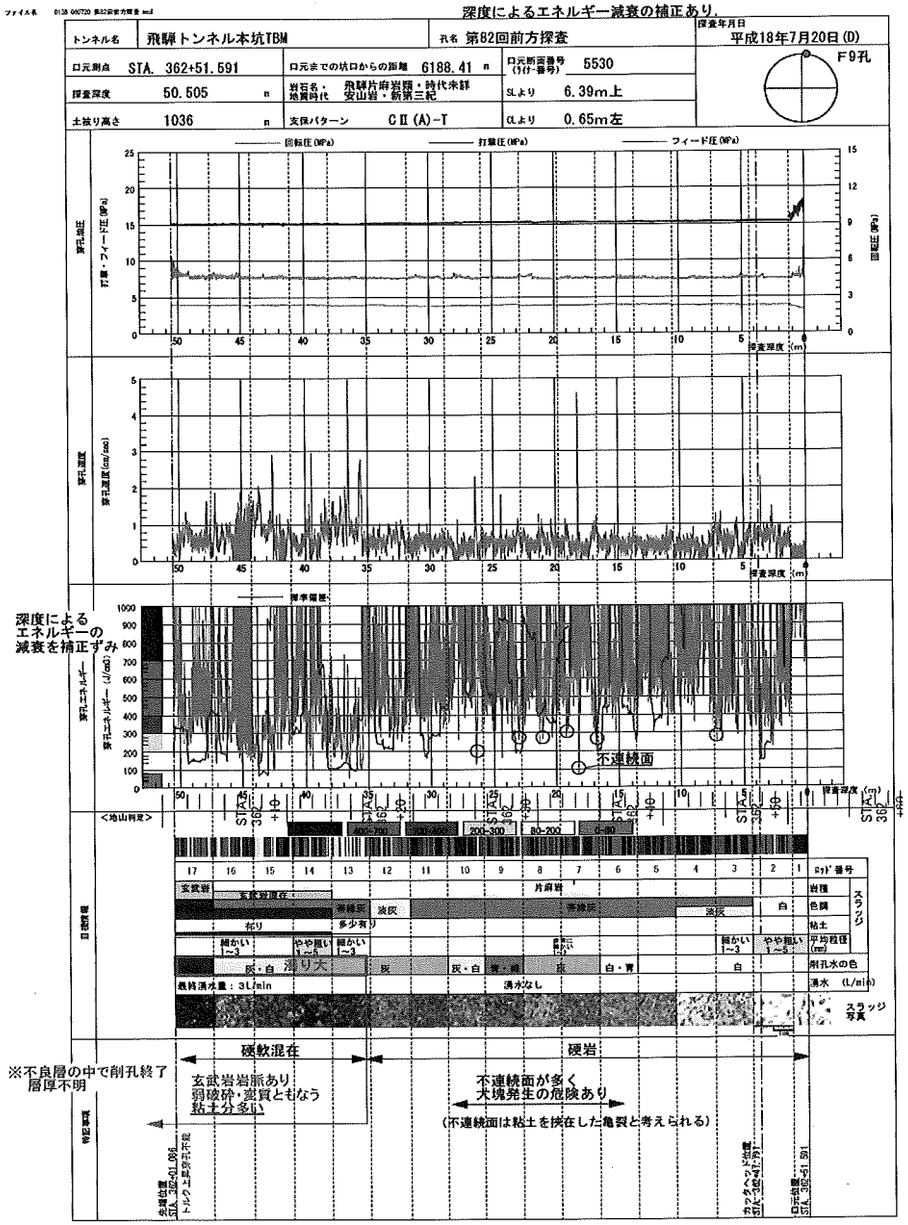


図-7　前方探査解析結果の一例

両2台で計画を行ったが，TBM掘削区間ほぼ全長がRCライナー支保となったため，本坑白川側坑口付近に橋型クレーンを設置し仮置き二次運搬を行った．工場配置図を**図-5**，全景写真を**写真-5**，製作状況を**写真-6**，運搬状況を**写真-7**に示す．

TBM掘削ずりは連続ベルトコンベヤにより白川側大牧トンネル坑口まで運搬し，3基の固定ベルトコンベヤを経由し寺尾仮置場へと搬出した．寺尾仮置場は白川郷保存地区からの景観を考慮し，仮置土の高さを制限しかつ仮置土量が確保できる旋回ベルトコンベヤを使用した(**写真-8, 9**)．

連続ベルトコンベヤのメインドライブ，ストレージカセットなどの設備は積雪などの影響を考慮し既設の大牧トンネル内に設置した(**写真-10**)．

4-5　前方探査・評価システム

前方探査の探査システムを**図-6**に示す．油圧削岩機の削孔時のフィード圧，打撃圧，回転圧などの穿孔油圧および，削岩機を前進させるときのフィードシリンダの油量から算出された穿孔距離をそれぞれ自動計測しデータ保存する．地質状況は保存されたデータを穿孔速度，穿孔エネルギー，回転圧およびスライムなどの目視情報を総合的に判断して行った．解析結果の例を**図-7**に示す．

4-6　掘進管理システム

TBMの位置，姿勢を把握するシステムとしてジャイロコンパスを用いて掘削中常時，姿勢管理を行った．計測されたデータはリアルタイムにTBM操作室および企業体事務所のモニタに計画線とのずれとして表示され姿勢制御を行った．

5　TBMの仕様変更

本坑TBM設計中に先進する避難坑(以下，「先進坑」)TBMが予期せぬ不良地山に遭遇し，掘削を中断していた．本坑はTBM坑内組立てのための組立て基地の掘削を開始しようとしていたが先進坑の掘削情報より大断面掘削が必要な組立て基地の位置を変更し，TBMの基本仕様に関して設計の見直しを行った．新たな地山情報として対応

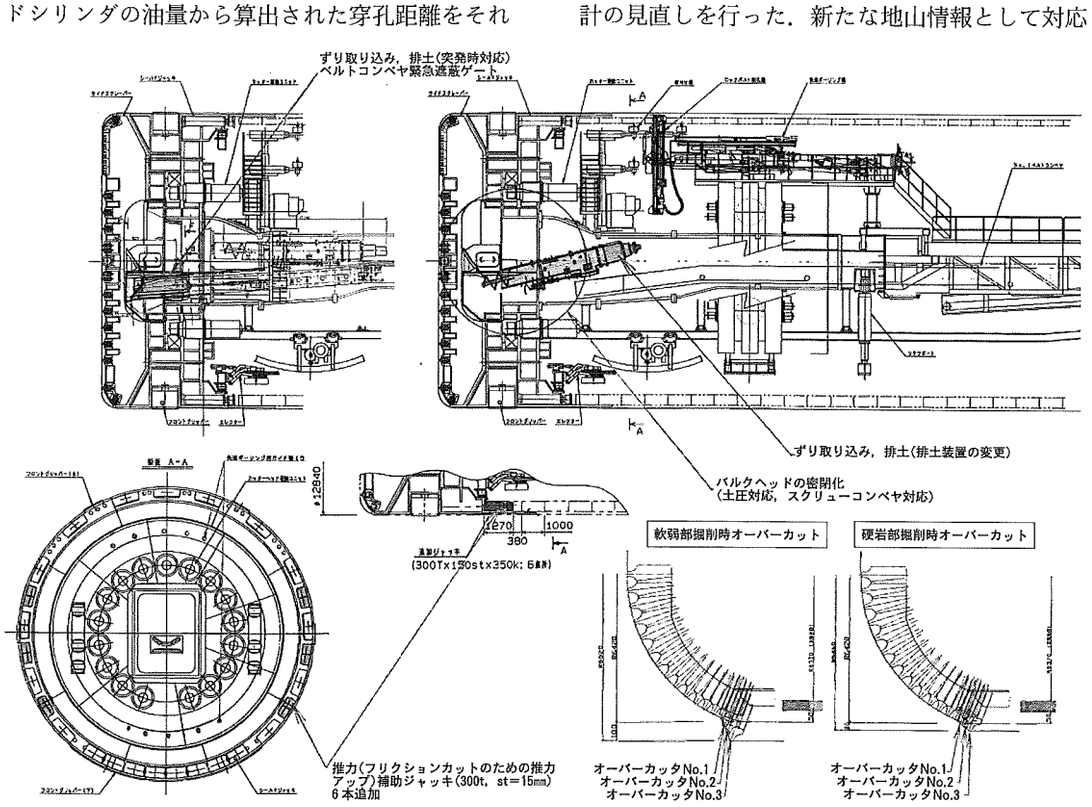


図-8　TBM不良地山対策

が必要と思われたものを下記に示す．

(1)　カッタヘッドの軟弱土対応
- ローラーカッタをティースカッタに取り替え可能とした．
- スクレーパ取り付け部にティースカッタを取り付け可能とした．
- 面盤開口部の開口率を7～17%まで可変とした．

(2)　フリクションカットのための推力アップ
- 既設シールドジャッキ間に補助ジャッキを取り付けた．

(3)　流砂現象対応としてバルクヘッドの密閉化
- 圧力最大0.1MPa対応の隔壁を設置した．
- スクリューコンベヤを取り付け可能とした．

(4)　ずり取り込み，排土
- 突発時の対応としてNo.1 ベルトコンベヤに緊急遮断ゲートを設置した．

上記の変更点を**図-8**に示す．

追加装備以外として，駆動モーターのインバータ制御化による低速回転時の発生カッタトルクの増強，方向制御も含めシールドジャッキの能力の増強などを行った．

6　TBM仕様の事後評価

本坑TBMは掘削開始地点より約500m間が自立性の悪い地山を掘削し，6回のTBMカッタヘッド拘束が発生している．崩落土砂の撤去，崩落土補強工などでNo.1 ベルトコンベヤの緊急遮断ゲートの設置変更は有効だった．その後の岩盤亀裂に沿って前面が崩落する地質についてもカッタヘッドの回転不能となる状況が発生したが，カッタトルクの増強が有効に作用し，発生回数，復旧作業とも最低限にとどめることができた．

7　おわりに

本坑TBMは先進坑および作業坑による地質確認と水抜き効果により大きな地質的トラブルもなく約4,290mの掘削を完了できた．当初TBMの基本計画時は切羽が自立しない場合は切羽を自立させる対策工を行い掘削するとしていたため，地山の硬軟にかかわらず発生した先掘れ現象は，面盤の損傷，カッタリング，ハブの異常損耗，大塊ずりによるベルトコンベヤの損傷などトラブルの大半を占める結果となった．このような先掘れ現象は，掘削径4.5mの先進坑TBMでは見られない現象であり，2車線断面TBM特有の問題と思われる．

本坑が今後の大断面TBMの技術の参考になれば幸いです．

『トンネルと地下』投稿原稿応募のご案内

1. 原稿は弊社ホームページ(http://www.tunnel.ne.jp)に掲載されている投稿規定により執筆して頂きます．
2. 原稿のボリュームは，原則として刷上がりで8頁以内とします(図・表・写真含む)．
3. 原稿掲載の採否は，本誌編集委員会で審査のうえ決定します．
4. 掲載論文については当社規定の原稿料をお支払いいたします．
5. 原稿は，原則として返却いたしません．

(注：「現場だより」の投稿は受付けしておりません)

送付先　株式会社土木工学社 編集部 投稿係
〒162-0832東京都新宿区岩戸町16　メイジャー神楽坂
電話 (03) 3267-2888(代)

土木情報 No.425 今月の主な入札結果

（9月10日～10月9日）

事業主体	工事名	請負会社	請負額 単位百万円
関東農政局	両総農業水利事業松潟支線用水路その2	梅林建設	155
〃	〃 〃 その3	守谷商会	161
〃	神流川沿岸農業水利事業新児玉幹線その9	東亜建設工業	288
中部地整	41号高山国府T高山工区	鹿島建設	3,670
中日本高速道路	第二東名高速道路額田T他1T	戸田建設	10,600
〃	〃 秦梨T他1T	大林組	5,090
都・財務局	下水道管布設及び整地(20六-1)	大基建設	285.6
〃	下水道管布設及び街路築造(20田-1)	三和建設	239.4
都・水道局	港区西新橋二丁目地先から同区西新橋三丁目地先間配水本管(1600㎜・500㎜)移設及び布設替	アイサワ工業	543
〃	新宿区下落合四丁目地先から同区上落合一丁目地先間配水本管(900㎜)布設替	西武建設	629.7
都・下水道局	江東区東雲二丁目付近再構築その5-1	機動建設工業	178.92
〃	台東区三筋一，二丁目付近再構築	イチフジ・星輝JV	321.69
〃	台東区上野三丁目，千代田区外神田五丁目付近再構築	加藤建設	124.95
〃	品川区東五反田二丁目付近再構築	渡辺建設	254.1
〃	芝浦水再生センター雨天時貯留池その2	鴻池組	246.75
〃	中央環状品川線事業に伴う目黒川幹線整備その3	日鋪建設	351.54
〃	中野区新井四丁目付近枝線	ティーディーイー	140.7
三重県	一般国道167号第二伊勢道路(仮称4号T)国補道路改良	NIPPO・稲葉・宮本JV	1,456
〃	中南勢2期地区広域農道事業松阪工区1号T	水谷・北村・倉口JV	1,495
奈良県	(仮称)那知合T	大林・三和・中和JV	1,350.73
宮崎県	H20広域農道整備事業西臼杵4期地区2工区T	坂下・大淀・工藤JV	1,683
〃	H20連携国道第7-2-4-1号国道327号野地T	フジタ・矢野・内山JV	1,790.4
一戸町	町道鳥海線道路改良(T)その他1	本間組	1,045
宇都宮市	合流改善貯留施設築造	山本・宇都宮・小川JV	617.58
牛久市	20国補公下第1号下町雨水幹線管渠布設	常陽・塚原JV	170.1
立川市	法務省関連施設雨水調整池築造	古久根建設	415
横浜市	南部処理区大岡右岸幹線(第2工区)下水道整備	日本国土・芦澤JV	1,145.7
〃	戸塚駅前地区中央土地区画整理事業都市計画道路柏尾戸塚線道路本体築造(その4)	紅梅組	341.52
川崎市	宿河原1号雨水幹線その4	坪井・大恵JV	205.09
厚木市	公下相模川右岸第6排水区枝線9工区	国土開発工業	130.7
大阪市	阿倍野公共地下通路外1建設	ノバック	750
〃	阿倍野地下自転車駐車場建設	南海辰村建設	291

本坑の設計と施工

(元)日本道路公団中部支社清見工事事務所飛騨工事長(第2代)
中日本高速道路(株)名古屋支社建設事業部企画統括チームリーダー
川北眞嗣

(元)大成建設(株)・西松建設(株)・佐藤工業(株)飛騨トンネル工事共同企業体技術部長
大成建設(株)土木本部土木技術部トンネル技術室部長(担当)
領家邦泰

1 はじめに

本坑工事は，当初，白川側坑口より掘削径12.84mの大断面TBMによる片押し施工で計画されていた．しかし，先行する避難坑TBMの掘削経緯から想定外の不良地山[1]と高圧大量湧水[2]の存在が明らかとなり(詳細は本特集「避難坑の設計と施工」および「高圧大量湧水への挑戦」参照)，本坑工事計画は大幅な変更を余儀なくされた．本坑TBMは，上記不良地山区間を回避し白川側坑口から約3kmの地点から掘削開始し，これまで経験のない1,000mを越える大土かぶり下で数々の問題に直面しながらも種々の新技術を適用しながら最終的な掘削距離は約4.3kmとなった．

本稿は，本坑工事の当初計画と主な変更内容，不良地山帯でのNATM施工，TBM施工経緯，河合側坑口部拡幅断面，TBM施工区間の非常駐車帯施工などについて報告する．

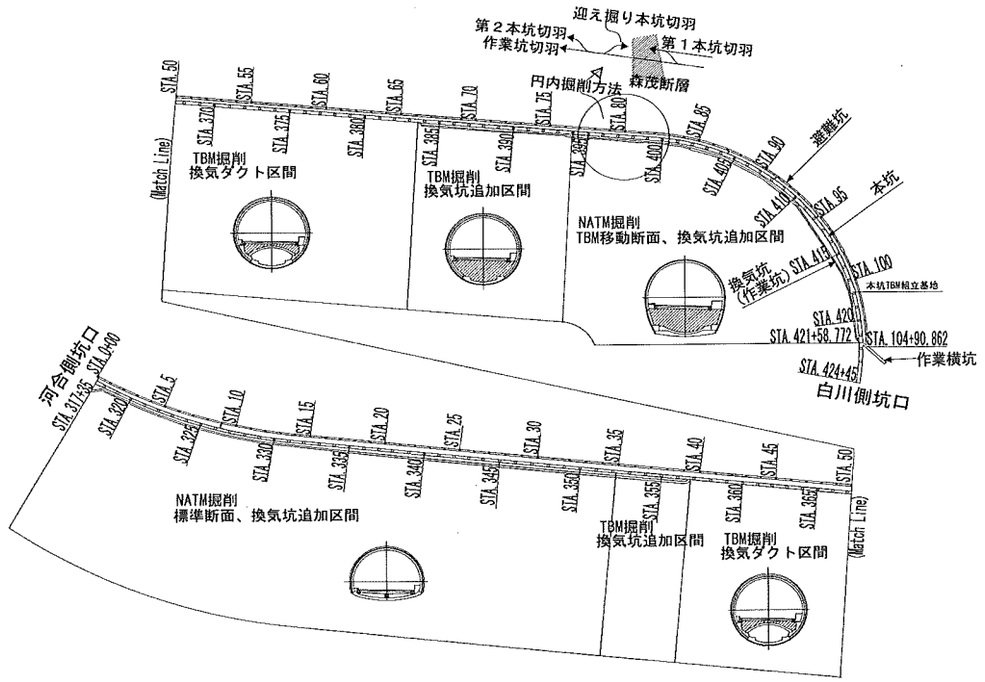


図-1 トンネル全体配置平面図(当初計画と完成時)

2　当初計画と支保設計

2-1　トンネル全体計画

図-1に飛騨トンネルのトンネル全体配置平面図を示す．当初は本坑と避難坑で計画されていたが，施工段階で高圧大量湧水などの状況により後述する作業坑を追加した．飛騨トンネル本坑も，大断面TBMを避難坑と同様に白川側から片押し施工で計画した．本坑TBMの組み立ては，仮設備ヤードが狭隘でかつ避難坑施工と共用する作業横坑を介して本坑にアクセスする状況から，本坑内に組み立て基地を設け，坑内での組み立てとした．

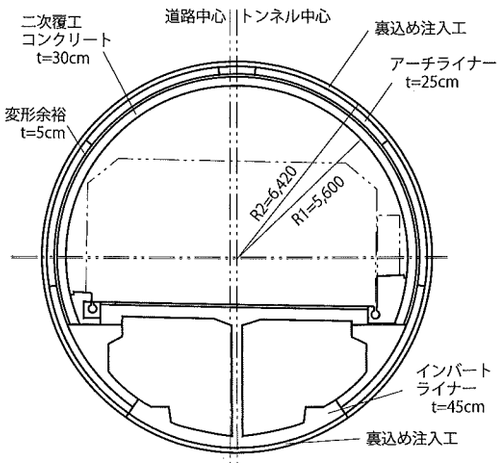


図-2　本坑標準断面図(当初)

2-2　トンネル断面

本坑標準断面図を**図-2**に示す．本坑TBMの標準支保パターンは，**表-1**に示すようにインバートライナーを全線設置し，地山等級BからCⅡまでは吹付けコンクリートとロックボルトの組み合わせ，D級はRCライナーを採用することにした．RCライナーとインバートライナーの仕様を**表-2**，

表-2　RCライナとインバートライナの仕様

コンクリートの設計基準強度	42N/mm²
アーチライナー厚	25cm
インバートライナー厚	45cm
ピース間継手	調芯ロット＋組み立てボルト
リング間継手	調芯ピン

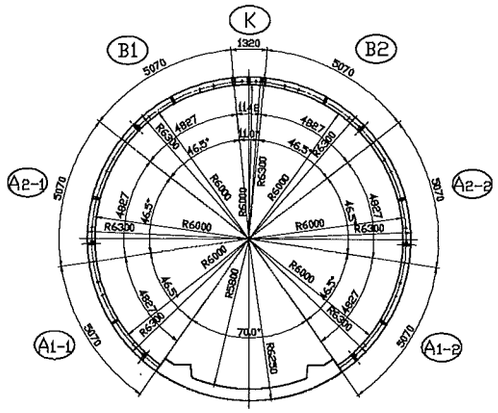
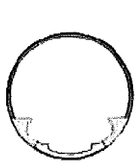
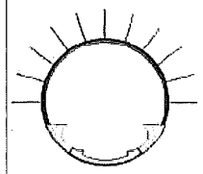
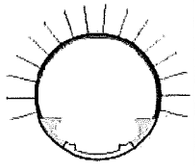
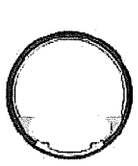


図-3　RCトンネルライナーの構造図

表-1　標準支保パターン

地山等級		B	CI	CII	DI
支保パターン					
吹付けコンクリート	吹付け厚 吹付け範囲	5 cm 180度	5 cm 210度	10cm 290度	—
ロックボルト	長さ(m)	—	3.0	3.0	—
	周方向施工間隔(m)	—	2.0	1.5	—
	延長方向施工間隔(m)	—	1.8	1.5	—
RCライナー	アーチライナー	—	—	—	厚＝ 25cm 幅＝100cm
	インバートライナー	厚＝ 45cm 幅＝100cm	厚＝ 45cm 幅＝100cm	厚＝ 45cm 幅＝100cm	厚＝ 45cm 幅＝100cm

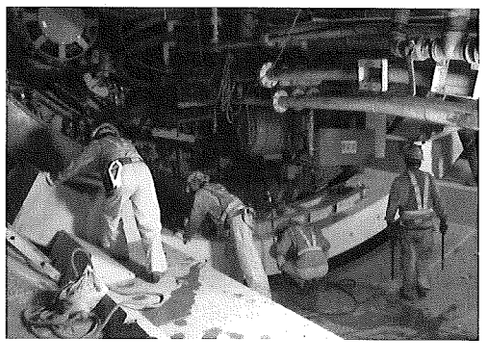
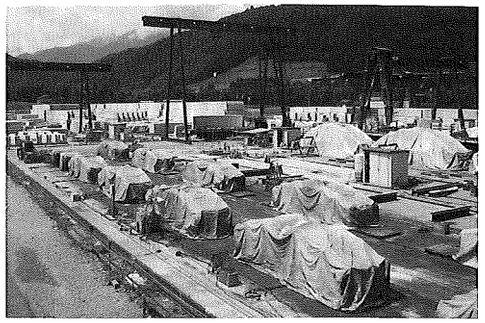


写真-1　RCライナーとインバートライナー



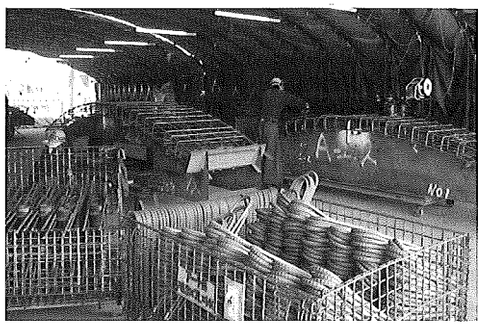
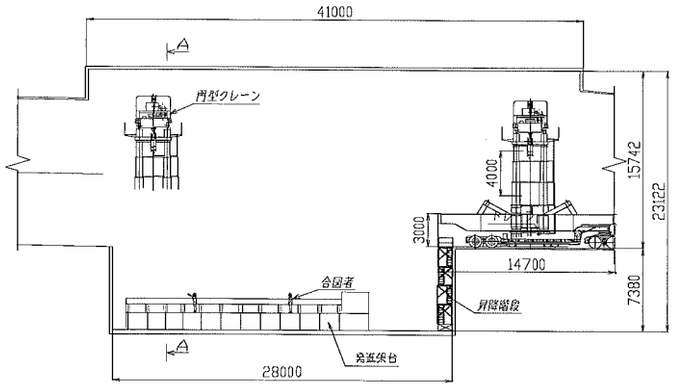


写真-2　RCライナー現地製作工場



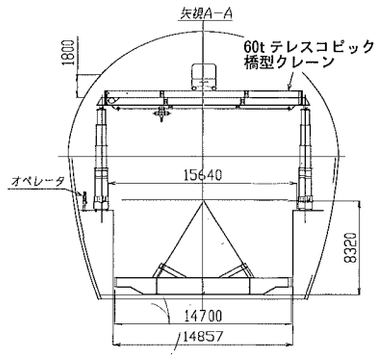


図-4　トンネル坑内のTBM組み立て基地断面図

図-3に示す[3](**写真-1**)．

RCライナーとインバートライナーは，経済性を考慮して現地生産を行った(**写真-2**)．覆工は掘削と併進して路盤下に換気ダクトを構築し，路盤完成後に巻き厚30cmのアーチコンクリートを最終段階で打設する計画であった．

3　TBMの組み立て

トンネル坑内のTBM組み立て基地断面図を**図-4**に示す．掘削断面は，約450m²となった．組み

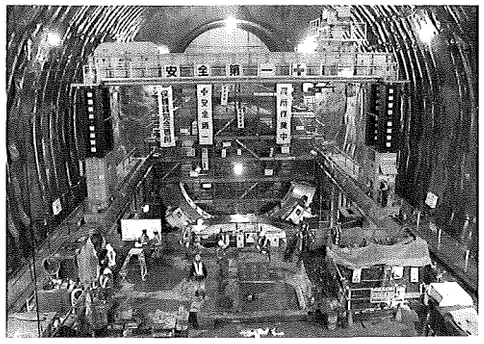


写真-3　TBM組み立て作業状況

立ては，60 t のテレスコピック橋型クレーンを主としてピット内で行い，組み立て完了後，センターホールジャッキを用いて正規の高さまでリフトアップした(**写真-3**)．

4　白川側不良地山帯の施工

4-1　TBM発進位置検討

避難坑TBMが不良地山に遭遇したことから，本坑TBMによる施工の可否，発進位置の判断が大きな課題となった．そこで本坑断面内に中央導坑を先進させ(**写真-4**)，**図-5**に示すフローに従いTBM施工の可能性検討を行った[3]．中央導坑の最大変位量を用いたFEM解析から本坑TBM掘削時の内空変位量推定値は300㎜を越え，本体の拘束が想定された．また，極限支持力もフロントグリッパ載荷荷重2,030kN/m²を下回り，TBMの姿勢制御が困難になると予想された．また，不良地山対策として検討した地盤改良工の確認試験は，注入工と先受け工とも改良効果が十分に得られない結果となった．このため，TBM発進を延期しNATM施工に切り替えた．TBM移動断面を**図-6**に示す．掘削断面積は，約166m²となった．

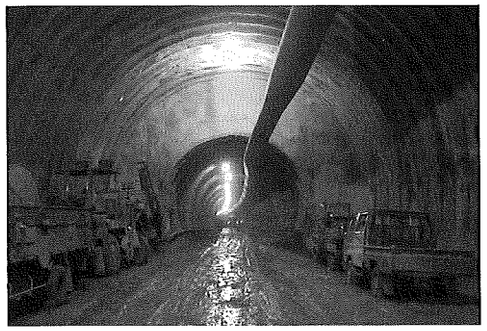


写真-4　本坑中央導坑

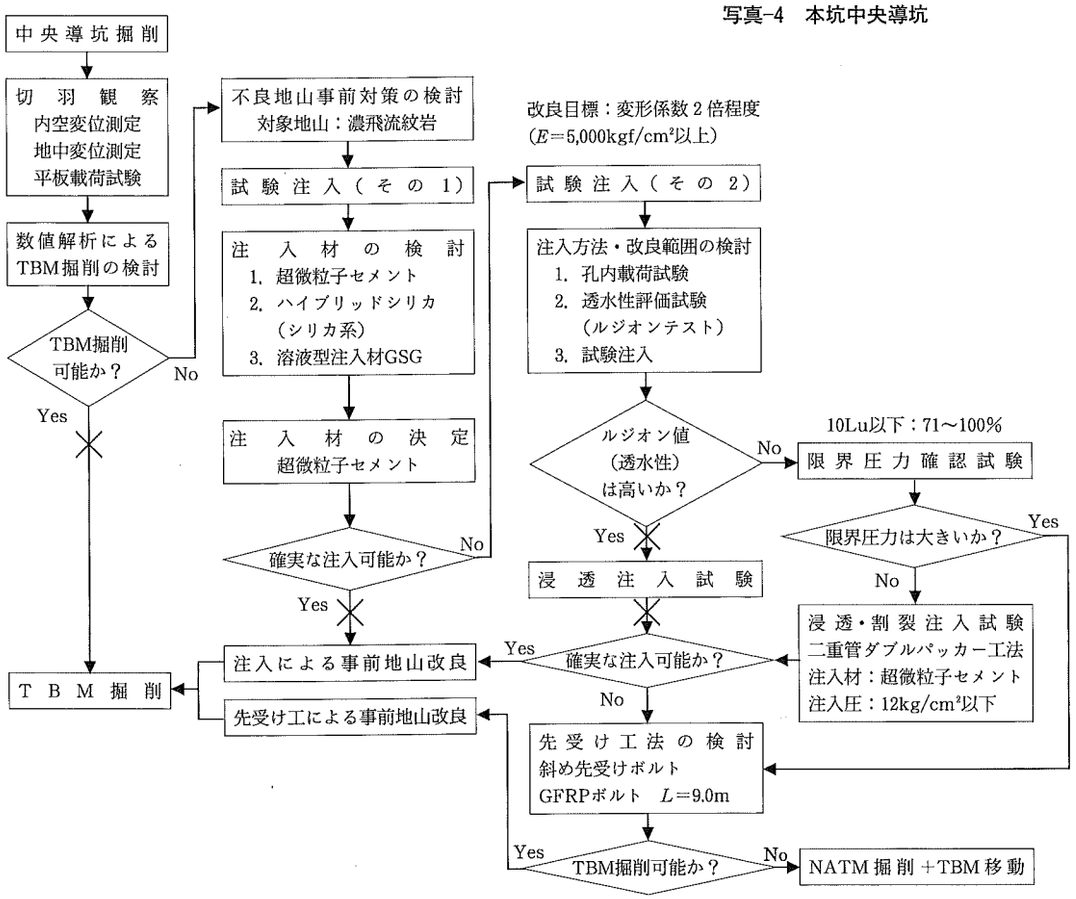


図-5　TBM発進検討フロー

4-2　粘土化帯大変位対策(大断面NATM施工)[1]

STA.400＋50～398＋30間は，森茂系断層の粘土化帯となった．土かぶりは600m以上となり，上半切羽の安定性は著しく損なわれ，天端沈下・内空変位とも増大した．切羽安定対策を種々試行したが，効果的かつ経済的に十分な結果は得られず，最終的には上半中央底設導坑を50m程度先進させ，拡幅掘削を行う方式を採用した．本坑断面設計は，先行する避難坑と作業坑の支保変位データの逆解析から推定した地山物性値を用い，FEM解析により本坑断面の支保規模と変形余裕量の検討ならびに管理基準値の設定を行った．解析結果より，内空変位量は約800㎜に達し，ベンチ掘削時に上半の吹付けコンクリート応力が耐力を超過することが予想された．そこで当区間の支保設計は，変形余裕量を500㎜とし情報化施工により適時最適な対策を実施する方式とした．**図-7**に支保パターンを示す．

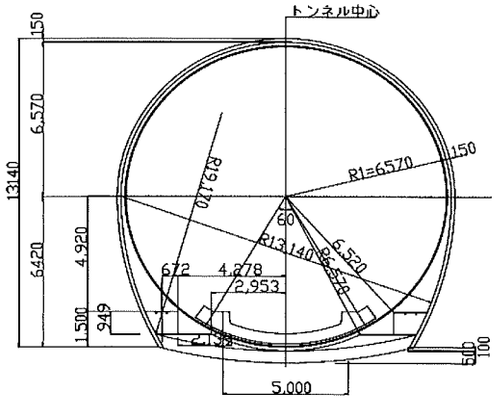


図-6　TBM移動断面

上半切羽は，中央底設導坑の効果により他の補助工法をほとんど使用せず安定した掘削ができた．施工管理は，最終変位量を中央底設導坑の変位状況と上半掘削時初期変位速度により予測し，管理基準値をFEM解析値の80％に設定して行った．各施工段階で最終予想変位量が管理基準値を越えると判断された場合は，仮インバート，増しロックボルト，増し吹付けコンクリートにより対処した(**写真-5**)．

図-8に大変位区間の内空変位と変位抑制対策工の実績を示す．粘土化帯の大断面掘削は，最終変位量が500㎜程度となったがすべて管理基準値内に収めてトラブルなく終了できた．ただし，同区間の避難坑と作業坑は後行する本坑上半切羽接近時からベンチ掘削終了までの間の応力再配分の影響を受け，支保の変状と約１mの盤膨れが生じ縫い返しを余儀なくされた(**写真-6**)

4-3　工程促進対策

不良地山区間は地質が複雑で，避難坑のみでは地質状況把握と水抜き効果が十分でなく本坑切羽でも崩落が頻繁に発生した．このため，本坑を挟むかたちで避難坑と反対側に作業坑を追加し先行させた．作業坑は，本坑に対する補助工法としての機能と同時に本坑切羽数を最大４切羽に増加させ工期促進の役割を果した(図-1)．また，トンネ

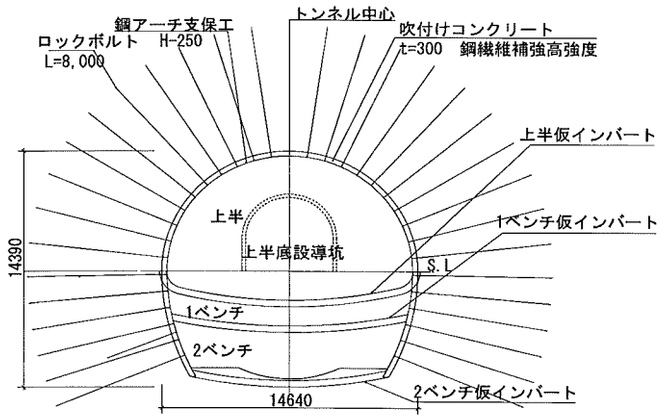


図-7　大変位区間のトンネル断面と支保パターン

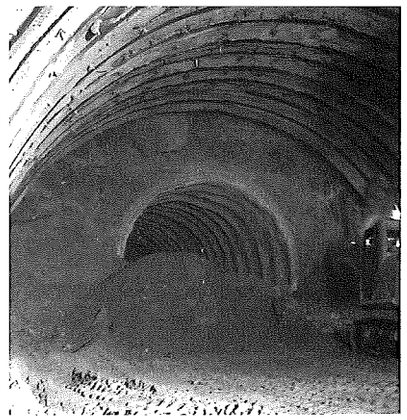


写真-5　大変位区間の施工

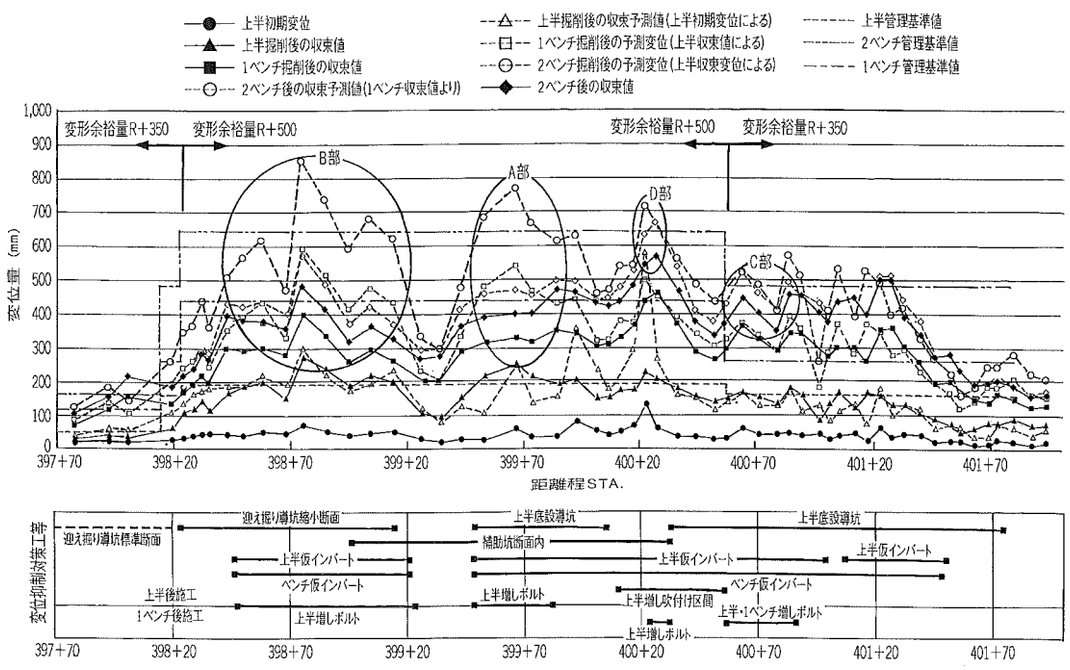


図-8　大変位区間の変位抑制対策工

写真-6　本坑切羽接近による作業坑の変状状況

ル完成後の作業坑併設区間は，換気容量の見直しを経て経済性も考慮し，路盤下構造物構築をやめ作業坑を換気坑として利用することに変更した．

5　ＴＢＭ施工

5-1　TBM発進と不良地山区間の施工

本坑TBMは，濃飛流紋岩の切羽自立性が比較的良好となったSTA.395＋00より発進することにした．TBMの移動距離は，組み立て基地から同地点まで約2,250mで，移動はTBMシールド内でインバートライナーを設置し，これに反力を取りシールド推進ジャッキで後続台車を含むTBM全体を前方に押し出し前進させた(**写真-7**)．

掘削開始地点以降の避難坑施工データでは，引き続き高圧大量湧水，断層粘土層や亀裂密集帯の存在を示していたため，作業坑を水抜き坑の位置づけで先進させ，湧水が減少したSTA.383＋58.8まで延伸した(図-1)．とくに，最初の500m間は避難坑TBMが大量湧水帯に遭遇し，湧水対策と第6回目のTBM拘束発生への対処に多大な時間を要した区間であった[2]．そこで，避難坑と作業坑を利用し弾性波トモグラフィを実施し不良地山

出現位置の把握を試みた(**図-9**)．

TBMは，2004年1月より掘削開始した．湧水は減少していたが掘削開始直後から岩盤亀裂の影響が顕著でカッタヘッド前面地山が大きなブロック状に抜け落ちる現象が連続発生した．対策として長尺鋼管先受け工(以下，「AGF」と称す)を連続打設する掘進(図-9，**写真-8**)となり，面盤外周部を除きカッタが地山に当たらない先掘れ現象が常態となった．前面空洞は，奥行きが3mから最大7mに達した(**写真-9**)．先掘れは，花崗斑岩と飛騨片麻岩の超硬岩部など一部を除きほぼTBM施工全区間で発生し，大土かぶり下での大断面TBM掘削に見られる特異な現象と考えられた[4]．75m掘進した付近でTBM掘削断面外に達する大規模切羽崩落が生じ，最初のカッタヘッド回転不能状態が発生した．その後も切羽崩落は3回発生した．最大の崩落はSTA.393＋36.4で発生し，空洞は切羽前方に6.5m，断面外に8.5mとなり崩落ずりはカッタヘッドチャンバ内にも堆積しカッタ

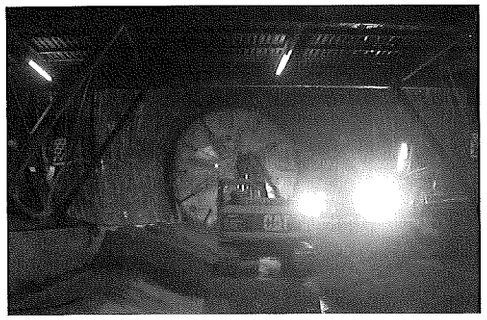


写真-7　TBM坑内移動

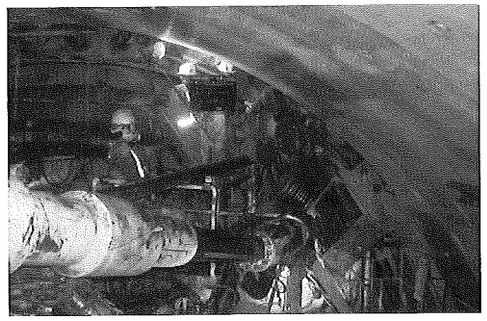


写真-8　AGFの打設状況

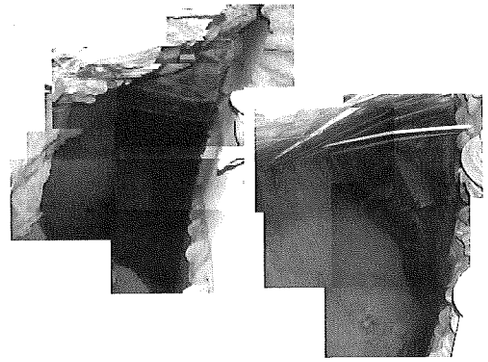


写真-9　先掘れ現象

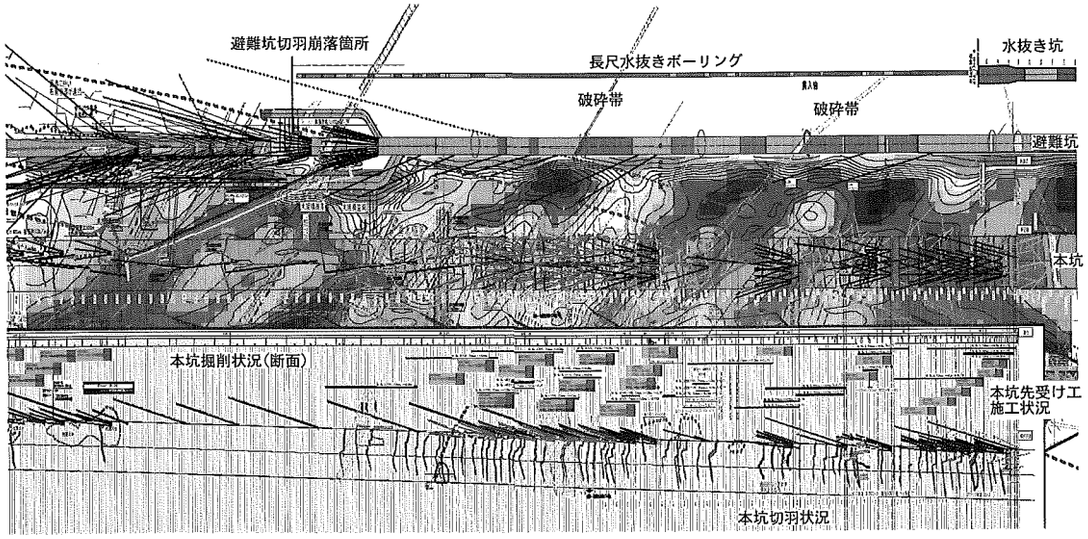


図-9　弾性波トモグラフィ結果と切羽状況，対策工

写真-10　カッタヘッドの拘束状況

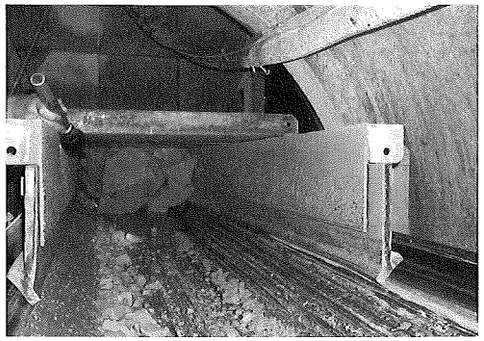


写真-11　ずりによるホッパ部の閉塞

ヘッドを拘束した．この復旧に40日を要した(**写真-10**)．分析の結果これらの崩落箇所は，弾性波トモグラフィから得られた低速度帯部分と一致していた．そこで，掘削再開後の不良地山対策はAGFの連続打設とAGFを利用した地盤改良注入を主体とする方法に切り替えた．この結果，先掘れ現象は続くものの，カッタヘッド拘束に至る崩落は生じなかった．

先掘れ現象下のTBM掘進は，カッタヘッド外周ドーム部以外ではディスクカッタによる圧砕掘削はほとんどなく，崩落岩盤を二次破砕してカッタヘッドに取り込むため，大きなずりによるベルコン損傷やホッパ閉塞が多く発生した(**写真-11**)．また，二次破砕は面盤やカッタホルダ，スクレーパを摩耗させる要因となった[4](**写真-12**)．掘進距離が200mを越えた時点で面盤の摩耗が激しい

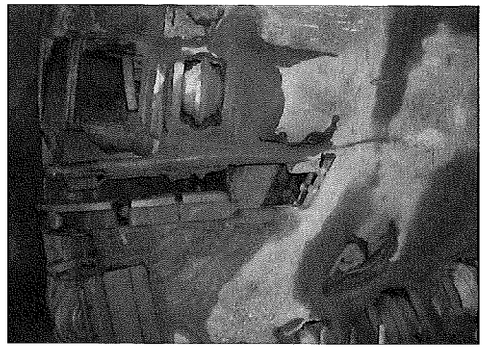


写真-12　面盤，カッタホルダ，スクレーパの摩耗状況

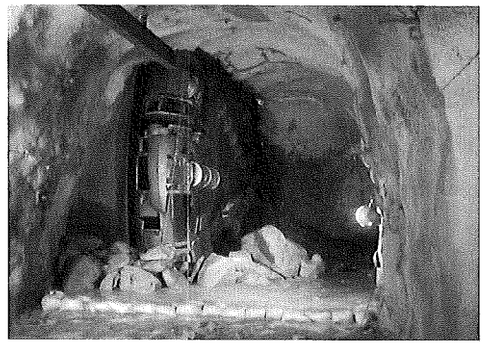


写真-13　メンテナンス坑に到達したTBM

ことから，事前に作業坑から本坑に向けメンテナンス坑(**写真-13**)を掘削し，面盤を坑内に露出させて面盤の補修・補強とカッタホルダの交換・修理を行った．同様のメンテナンスは，掘進距離766m，3,077m地点でも実施した．

5-2　STA.390＋00以降のTBM施工

STA.390＋00以降の濃飛流紋岩区間は，切羽自立性がやや改善し補助工法は不要であった．一方，山鳴りは12回確認され，うち4回は掘進中に鏡面が崩壊し一時的なカッタヘッド拘束に至った．岩盤の良化に伴いディスクカッタ・スクレーパの交換個数，ベルコン関連損傷頻度は増加し，面盤摩耗は依然として激しかったが，高速施工が可能となり，最大日進15m，最大週進69m，最大月進254mを記録した．

作業坑掘削が終了した以降の区間では換気設備の見直しにより，本坑内換気ダクトは**図-10**に示すような形状に変更した．ダクト施工は，TBM掘進と併進しプレキャストダクトライナーをイン

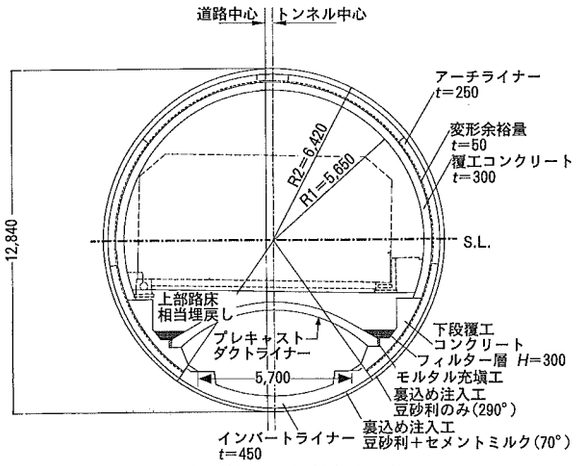


図-10　変更後の換気ダクト構造

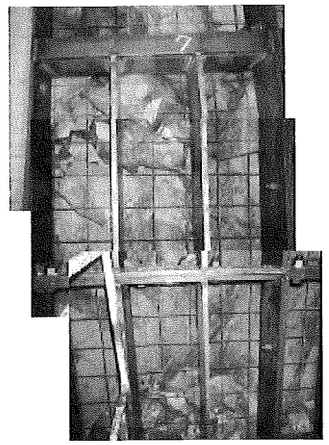


写真-14　坑壁崩壊状況

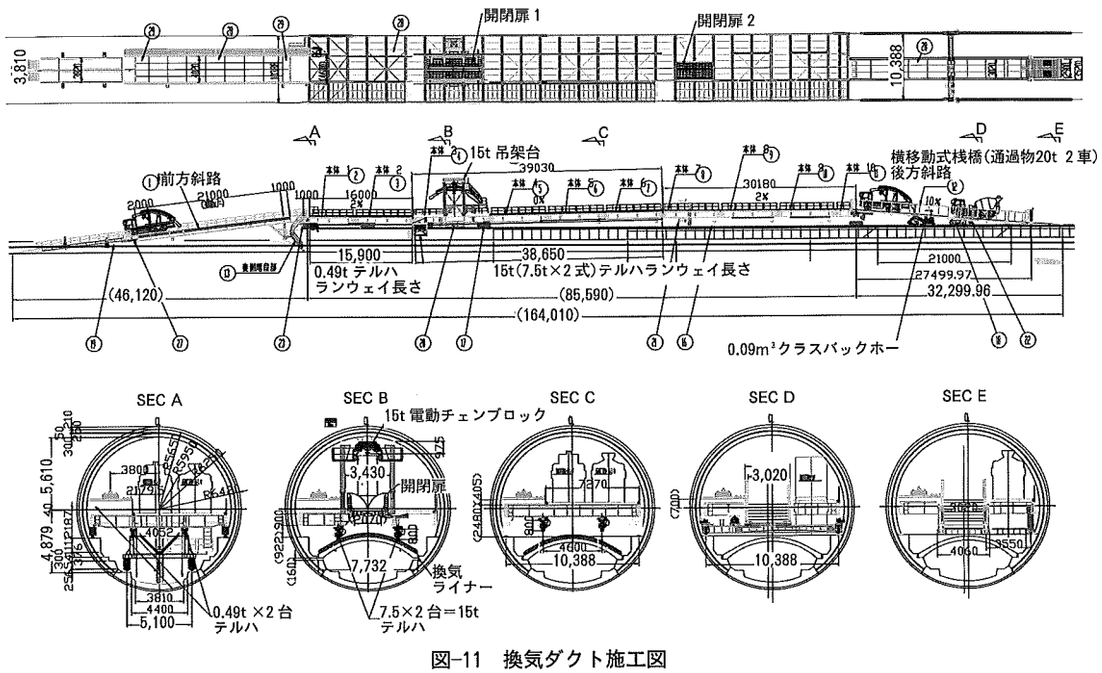


図-11　換気ダクト施工図

バートライナー上に設置して埋め戻し路盤を形成する方式とした(**図-11**)．

STA.377＋80.11では，吹付けコンクリートとロックボルトによる支保パターン適用の試験施工として坑壁観察が可能なスキンプレートのない鋼製ライナーを建て込んだ．結果は，坑壁の崩壊が見られ(**写真-14**)，危険と判断しトンネルライナー使用を継続することにした．

STA.377付近からの花崗斑岩区間は，切羽自立性が良好で鏡面中央までカッタ痕が見られる状況となりNATM支保への移行が行われた．しかし，18m間掘進したところで左肩部より岩塊崩落が発生し，また当該区間では切羽前面および天端部は安定していたにもかかわらず，SL付近側壁部が亀裂の開口により不安定な状態が続いたため，再度Dパターンに戻した．この亀裂による側壁の崩落領域は，初期応力測定結果を用いたFEM解析により求めた破壊ひずみ分布領域と一致するもの

で，先掘れ現象と同様に大土かぶり下での大断面TBM掘進特有の現象と思われた．NATM支保は，本坑TBM掘進全体で当区間のみとなった．

STA.367付近からの飛騨片麻岩区間は，前半は切羽自立性が良好であり超硬岩に相当する部分も見られディスクカッタ切り込み量の減少から掘進速度は低下した．後半は地山が軟化に加えSTA.355付近から硬質岩盤と破砕帯が混在する複雑な地山であった．貫通想定地点は，避難坑TBMが拘束・圧壊した位置にあたり，地山確認と切羽安定化を目的に河合側から断面中央に調査導坑を施工した．なお，本坑貫通後のTBM解体は坑内作業となるため，覆工工程短縮のため作業箇所区間に対し二次覆工省略型トンネルライナーを適用した(**写真-15**，詳細は本特集「シングルシェルへの挑戦」参照)．河合側からの調査導坑区間は粘土脈を伴う亀裂密集帯および破砕帯であり，TBMによる切り拡げ掘削は導坑が存在するにもかかわらず地山の自立性が悪く切羽崩落が頻発し，貫通点４m手前でTBMを拘束する天端崩落が発生し本坑TBMの掘削は終了した．TBM掘削延長は4,286mである．TBMの全体進行実績を**図-12**に示す．

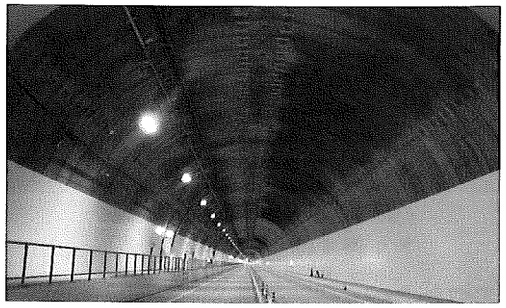


写真-15　二次覆工省略型RCライナ施工区間

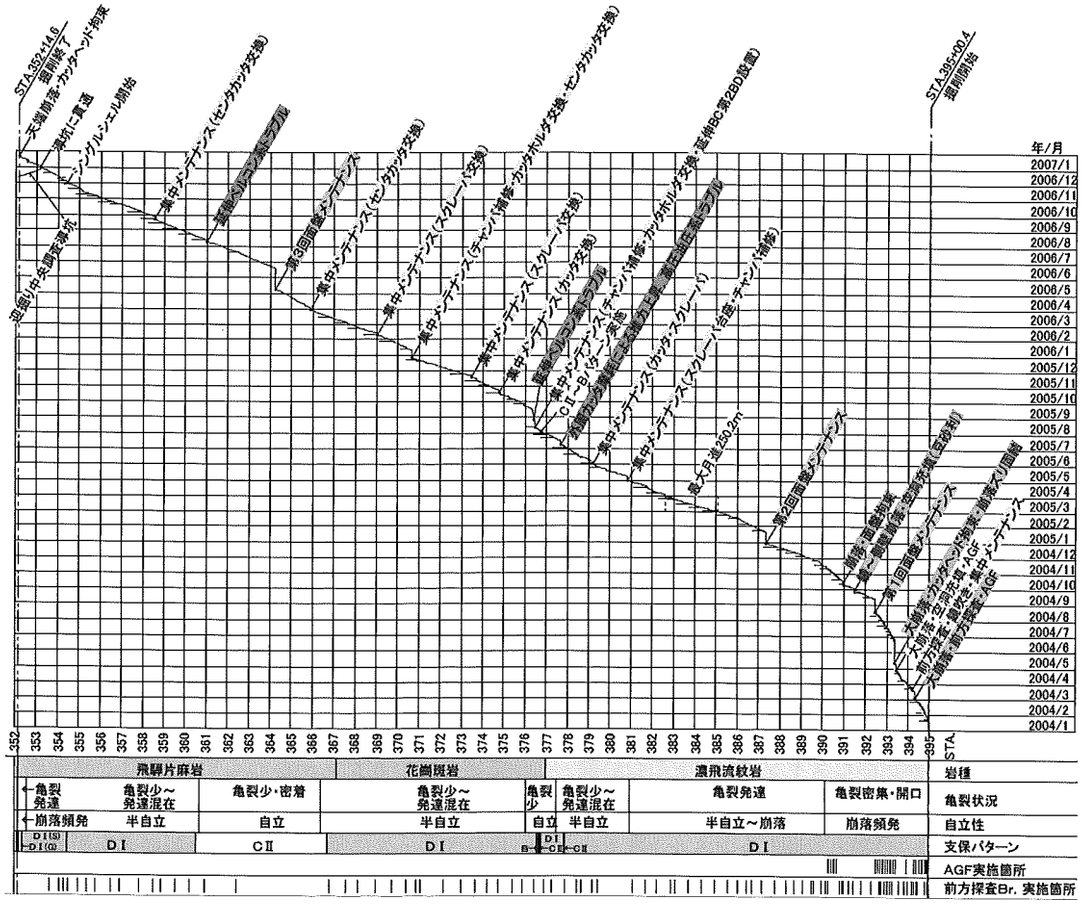


図-12　TBM区間進行実績

6　河合側迎え掘り

6-1　坑口部の設計

河合側坑口部は，当初，TBM到達坑の役割が支配的であり，かつ隣接する保トンネルの間にはパーキングエリアが設置され，坑内にオフランプが設置されるためテーパ区間の５段階拡幅断面とする必要があり，最大断面積288.1m²の大断面となった(**図-13**，**写真-16**)．

6-2　河合側の施工

坑口部の施工は，地質確認を兼ね上半部に調査導坑136mを掘削しこれを切り拡げる方式とした．

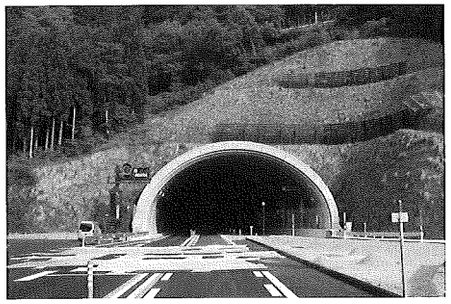


写真-16　河合側坑口部完成写真

白川側からの掘削が不良地山帯や高圧大量湧水帯の影響で工程が遅延したため，2002年５月より清見側他工区工事が終了し，本線を工事用道路として河合側からの通年施工が可能となったことから，早期貫通を目的にNATMによる本坑迎え掘りを行うこととした．河合側迎え掘りは，爆破工法主体に２％の突込み施工となり最終掘削延長は3,475mである．同区間の換気システムは，白川側作業坑区間と同様に経済性を比較して換気坑併設方式へ変更した(図-1)．

7　TBM施工区間の非常駐車帯

TBM施工区間の非常駐車帯は，TBM掘削完了

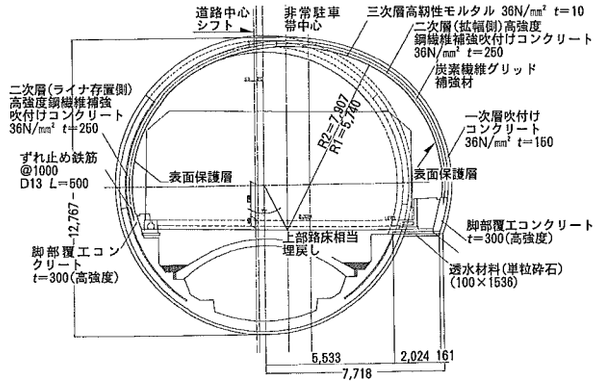


図-14　非常駐車帯吹付けコンクリートの多層構造

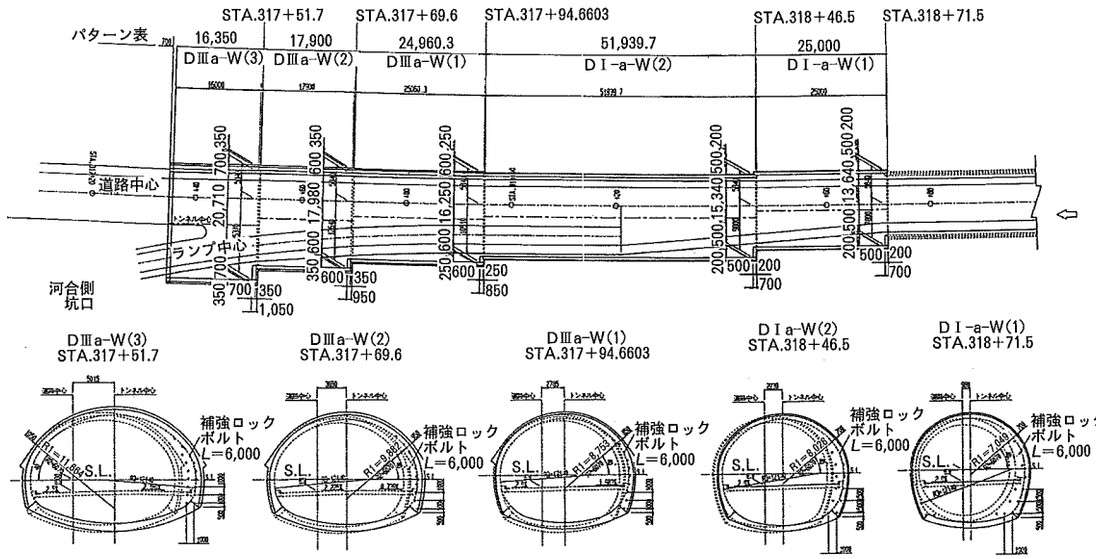


図-13　河合側坑口部拡幅断面区間

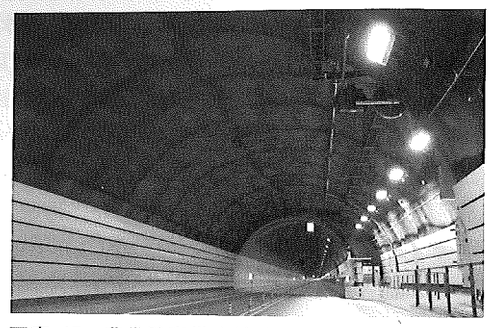


写真-17　非常駐車帯吹付けコンクリート多層構造部

後にRCライナーを一部撤去して切り拡げを行うかたちで施工した．こうした条件下において工程促進と合理的な非常駐車帯部施工を目的とし，吹付けコンクリートの多層構造による覆工(シングルシェル)を種々の検討・試験施工を経て16か所の非常駐車帯とその他3か所の拡幅部に適用した．**図-14，写真-17**に非常駐車断面を示す(詳細は本特集「シングルシェルへの挑戦」参照)

8　本坑施工経過のまとめ

(1)　粘土化帯大変位区間では，TBM施工は不可能であったが，TBM移動断面166m²を数値解析をもとにした設計，情報化施工，上半底設中央導坑を用いた補助工法の組み合わせにより突破した．

(2)　上記区間では，先進するトンネルでのデータを用いた解析により変形予測を行い適切な変形余裕量を設計に見込むことにより，TBM通過断面不足による縫い返しを行うことなく施工できた．

(3)　本坑TBMは，避難坑と作業坑による地質確認と水抜き効果により大きな地質的トラブルはなく約4.3kmの掘削を完了できた．

(4)　本坑TBM区間では，地圧と岩盤亀裂の影響で先掘れ現象が発生した．掘削断面外に拡がる空洞発生はAGFに注入効果を持たせた補助工法により抑制できた．

(5)　先掘れによる崩落岩塊は，硬質かつSiO_2成分を多量に含むため，ベルコンの損傷，カッタ・スクレーパの消耗増加，面盤摩耗を生じ，掘進速度低下を招いた．

(6)　本坑TBMの支保は，吹付けコンクリートやロックボルトによる支保が岩盤亀裂と地圧の影響から安全上適用が難しく一部区間を除き現場製作のトンネルライナーが必要であった．

(7)　耐火性と止水性，耐久性を考慮した覆工省略型トンネルライナーと非常駐車帯の合理的施工を考慮した吹付けコンクリート多層構造による覆工を国内の山岳工法で初めて採用した．

(8)　本坑TBMの掘進記録は，最大月進254m，最大日進15m，掘削開始から貫通までのすべてを含む平均月進は120mであった．最初の不良地山区間を除くと平均月進145mとなった．

9　おわりに

飛騨トンネルは土かぶり1,000mを越える長大トンネルであり，国内の山岳道路トンネルとして本坑掘削に初めて掘削径12.84mのTBMを採用した．不良地山と高圧大量湧水の存在によりTBM掘進距離は約4.3kmとなったが，NATM施工区間も含めこれまでにない数々の問題に直面しながらも種々の新技術を適用しながら克服し，2007年1月13日，無事貫通を迎えることができた．困難な条件下での大断面TBM施工ではあったが，ここで得られた成果が今後の技術の展開に寄与できれば幸甚である．

参考文献

1) 寺田光太郎・川北眞嗣・小林伸次・松原利之：不良地山・高圧大量湧水との闘い(不良地山編)，東海北陸自動車道　飛騨トンネル，トンネルと地下，Vol.35，No.8，pp.17-25，2004.8.

2) 寺田光太郎・川北眞嗣・小林伸次・築地功：不良地山・高圧大量湧水との闘い(大量湧水編)，東海北陸自動車道飛騨トンネル，トンネルと地下，Vol.35，No.9，pp.15-25，2004.9.

3) 森山守・寺田光太郎・小林伸次：世界最大級(φ12.84m)のTBMで地下1,000mを掘削(設計編)，東海北陸自動車道　飛騨トンネル本坑，トンネルと地下Vol.38，No.10，pp.15-25，2007.10.

4) 森山守・寺田光太郎・小林伸次：世界最大級(φ12.84m)のTBMで地下1,000mを掘削(施工編)，東海北陸自動車道　飛騨トンネル本坑，トンネルと地下，Vol.38，No.12，pp.15-24，2007.12.

高圧大量湧水への挑戦

(元)日本道路公団中部支社清見工事事務所飛騨工事長(第2代)
中日本高速道路(株)名古屋支社建設事業部企画統括チームリーダー
川北眞嗣

(元)飛島建設(株)・鉄建建設(株)飛騨トンネル避難坑工事共同企業体所長(第5代)
飛島建設(株)中日本支社旗護山トンネル作業所工事課長
築地功

1　はじめに

白川側坑口付近に分布する白川花崗岩は亀裂が密着した堅硬な地山であり，先進坑TBM(φ4.5m)は順調に掘削を開始した．しかし，濃飛流紋岩との境界付近から熱水変質作用による粘土化が顕著になり，さらに森茂断層と想定される区間は断層作用により地山強度が極端に低下していた．この区間ではNATMに切り替えて突破したが，変位の増大，支保の変状に悩まされ，1,700mの掘削に約4年の月日を費やした．

その後，トンネル延長2,700m地点(STA.80＋0)にてTBMを再発進させたが，発進直後から湧水量は徐々に増大していき，発進から600m付近(STA.74＋36)では亀裂の発達した濃飛流紋岩に遭遇し，大量湧水帯の存在が確認された．この大量湧水帯により切羽が崩落し，TBMのカッタ回転不能によるTBM停止に至り，掘削再開までに4か月を要した．その後，約1kmにわたって大量湧水の中のTBM掘削が続いた．

また，白川側からのトンネル延長が5,800m付近(STA.49＋50)から堅岩が中心の比較的安定した飛騨片麻岩が出現した．しかし，この飛騨片麻岩にも熱水変質を受けた軟弱層を断続的に狭在しており，1,000m程度の土かぶりによる非常に高い地圧や水圧の影響によりTBMが拘束され，TBM上部を切り拡げしながらの掘削となった．とくにトンネル延長7,300m(STA.34＋54)位置で遭遇した粘土層はその背面に6MPaを超える高圧湧水帯を抱えており，最終的にはTBM本体を破壊するに至った．

今回はこうした高圧湧水帯，とくにSTA.74＋36付近(濃飛流紋岩)とSTA.34＋54付近(飛騨片麻岩)においてTBMが拘束に至った経緯とその後の対策を中心に報告する．

2　濃飛流紋岩における大量湧水

2-1　長尺ボーリングによる大量湧水帯の確認

STA.77＋40の位置から森茂断層背面の地質，湧水状況把握のために実施したシールドリバースによる長尺ボーリングではSTA.75＋0付近のコア状況は20～40㎜程度に破砕されており，亀裂面が完全に開口していた．また，10cm程度の粘土層も確認されていたが，シールドリバース工法の

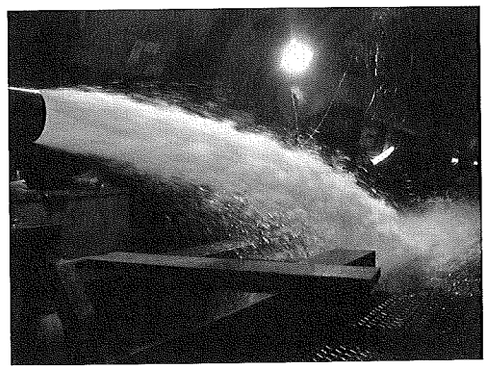


写真-1　長尺ボーリング湧水状況

性質上，10cm以下の薄く狭在している粘土層はコアとして採取されていない可能性が高く，この付近には粘土層を含んだ不良地山帯がかなり厚く存在することが想定された．これらの粘土層を遮水層として5.5MPaを超える高圧の大量湧水帯の存在が確認された．ボーリングからの湧水量も最終的には12 t/minに達した．実際，ボーリング湧水量急増位置にTBMが接近するに従い，亀裂面の開口，さらに湧水量の漸増傾向が加速していった．そこで，TBM搭載の削岩機により前方探査ボーリングを追加し，地質状況，湧水状況の把握に努めた．粘土化した部分を中心とした破砕帯に対して多数の水抜きボーリングを追加し，切羽前方の水圧の低減を図りながらTBMを慎重に進めていった．

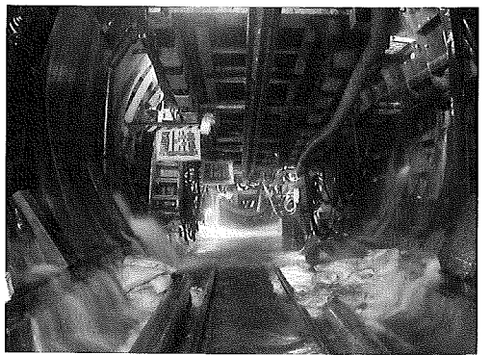


写真-2　削岩機台車付近湧水状況

2-2　大量湧水に伴う切羽崩落状況

こうして大量湧水が想定される位置では慎重にTBM掘削を続けていたが，平成15年４月，STA.74＋36付近では大規模な崩落によりTBMカッタヘッドの回転が不能な状態となった．崩落状況は当初は小規模であったが，徐々に拡大していった．崩落の拡大とともに湧水量も急増していき，TBMカッタヘッドへの流入量は５t/minに達した．薬液注入も実施したが流出が激しく，地山改良が困難な状況になった．さらに，崩落した岩塊がTBMカッタヘッド前面に押しかかりカッタヘッドの回転を不能にした．

2-3　水抜き坑による大量湧水帯の突破

STA.74＋36付近における崩落に対しては，崩落部に流入する大量の湧水を減水しなければ薬液

写真-3　カッタヘッド内湧水状況

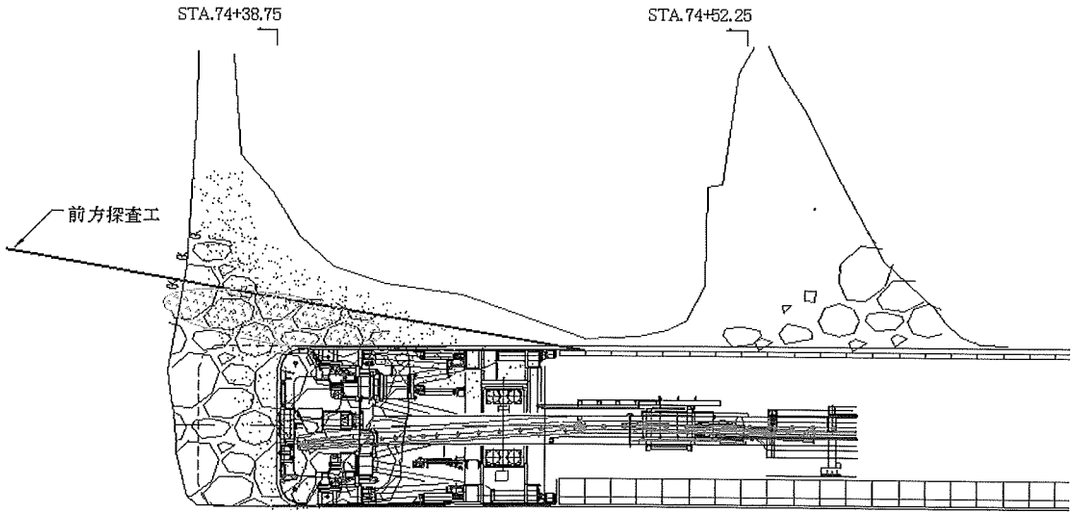


図-1　大量湧水を伴う切羽の崩落

注入効果が期待できず，TBMを掘進することは困難であると判断した．そこで，TBMの左右に矢板工法による水抜き坑を掘削し，崩落部に流れ込む湧水を後方にかわす対策をとった．トンネル進行方向右側の水抜き坑はレッグドリルによる発破掘削を効率的に行い，小型のボーリングマシンによるTBM方向への削孔が可能な最小掘削断面の約５m²とした．一方，左側の水抜き坑はシールドリバースによる長尺ボーリングの施工基地として利用するために掘削断面積約８m²とした．それぞれの先進坑との離隔は水抜き効果を高めるために相互の影響が少ない範囲で極力近づけるものとして側壁間を５mとした．

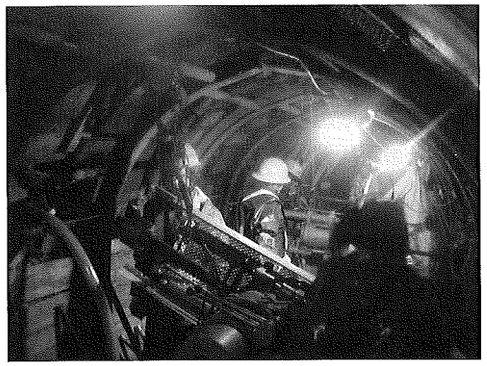


写真-4　水抜き坑内水抜き削孔状況

この左右の水抜き坑によりTBM前方崩落部に流入する湧水量は半減してきたが，なお，薬液注入が困難な状況を脱することはできなかった．そこで，右側の水抜き坑にはロータリー式の小型のボーリングマシンを３台，左側にはシールドリバースマシン，ロータリーパーカッションなどの大型のボーリングマシンを搬入して水抜きボーリングを行った．両坑で実施した水抜きボーリングは合計60本程度に及び，総延長は500mに達した．TBMおよび水抜き坑周辺の湧水量は40 t/minに達した．

こうした水抜き効果によりカッタヘッドへの流入量は当初の1/5の１t/min程度に低減した．しかし，注入材(シリカレジン)の硬化時間が長い場合にはこの程度の湧水量でも流出してしまう．湧水の温度が崩落当初は15℃程度あったが，累積排水量の増大に伴い湧水温度は徐々に低下し，最終的には11℃にまで下がった．湧水温度の低下とともに注入材のライズタイムは延伸する．そこで，硬化時間の短い注入材に切り替えるとともに加温設備を坑内に持ち込み，注入材の温度管理を厳重に行い，注入材の硬化を促進した．その結果，崩

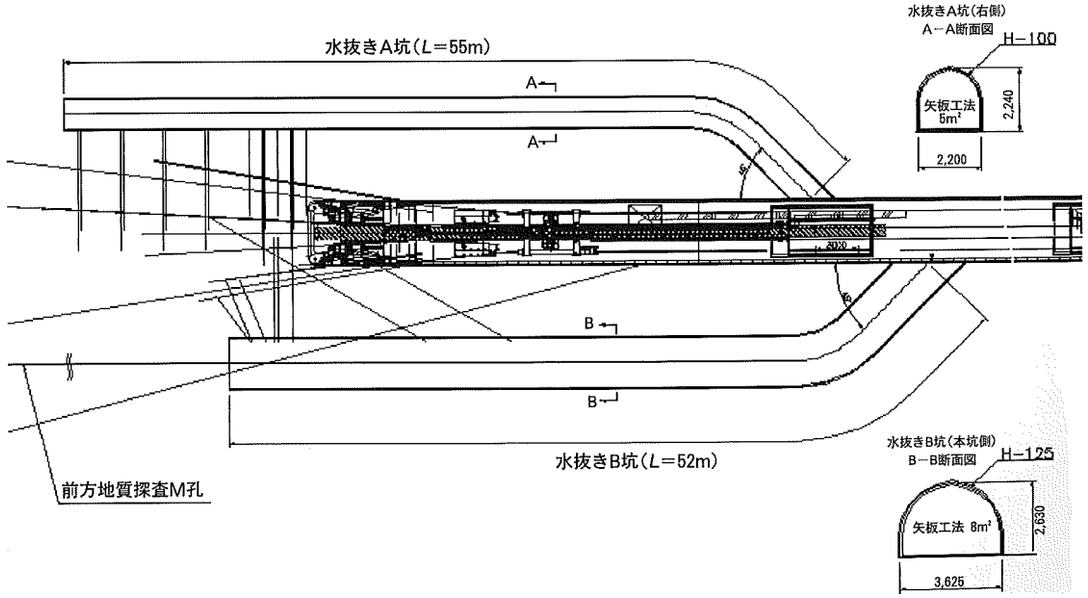


図-2　水抜き坑平面図(STA.74＋36)

落箇所の改良が可能となり，この大量湧水帯をTBM停止から4か月ぶりにTBMにより突破することができた．

3　飛騨片麻岩における高圧湧水

3-1　土かぶり1,000m下における2回のTBM拘束と脱出

白川側からの掘削延長5,800m付近(STA.49＋50)から飛騨片麻岩帯に入った．この地質は岩片の一軸強度が200MPaと堅硬でおおむね亀裂間隔も大きい．TBMの支保パターンもアーチ部無支保のBパターンを部分的に採用できた．

しかし，この飛騨片麻岩にも断層運動や熱水変質の影響と想定される軟弱層を狭在していた．平成17年4月，掘削延長6,500m付近において厚さ1m程度の粘土層に遭遇した．土かぶりも1,000m近くになっていた．この粘土層はトンネルにかなり鋭角に交差しており，切羽左からの粘土層の出現と同時にTBM掘削時のマシンデータから得られる推定岩盤強度の急激な低下が見られた．そこで，メイングリッパによる反力不足を想定して支保パターンをシールドジャッキに対応可能なスチールライナーに変更するとともに滑材を注入しながら掘削を進めた．しかし，前胴の拘束により掘進時の推力が上昇し，掘進不能になった．ただちにTBM上部切り拡げ掘削に移行した．当初は矢板工法による切り拡げ掘削を行っていたが，前胴まで掘削開放した時点で鋼アーチ支保の変状や矢板の破損が発生したため，鋼アーチ支保工と吹付けモルタルによる補強を行い，TBM解放に至ることができた．

このTBM拘束を踏まえてTBM搭載の削岩機による前方探査ボーリング時には，削孔エネルギーの変化や湧水状況などを把握しながらこれまで以上に慎重に掘削を進めていった．しかし，この位置から200m程度掘進した平成17年6月，亀裂の多い破砕層に入り，突発的な湧水とともに切羽が崩落，TBMカッタヘッドの回転が不能になった．湧水は切羽崩落当初は0.8 t/min程度であったが，崩落の拡大とともに2.0 t/minに増大した．ここでもTBM上部を切り拡げて，カッタヘッド周辺に堆積した岩塊を取り除くことにした．切り拡げと併行してTBM後方から削岩機とロータリーパーカッションによる水抜きボーリングを計16本(L＝624m)施工して切羽前方の水位低下を図った．

これらの水抜きボーリングの総排水量は最大時で11.0 t/minを超えたが，切り拡げ完了までの2週間で約1.0 t/minまで水量が低下し，TBMの脱出に成功した．

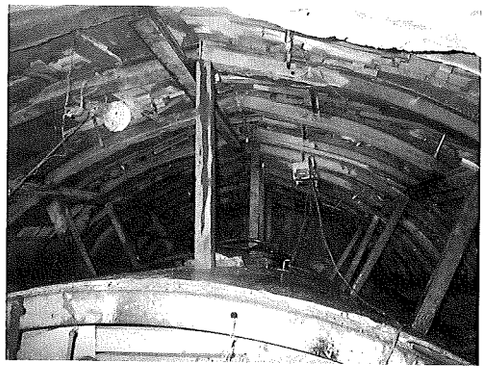


写真-6　切り拡げ後の増し支保補強状況

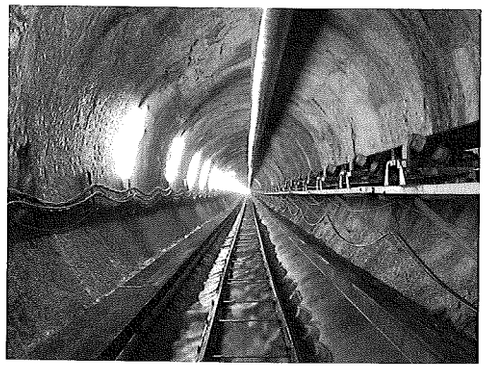


写真-5　飛騨片麻岩無支保区間

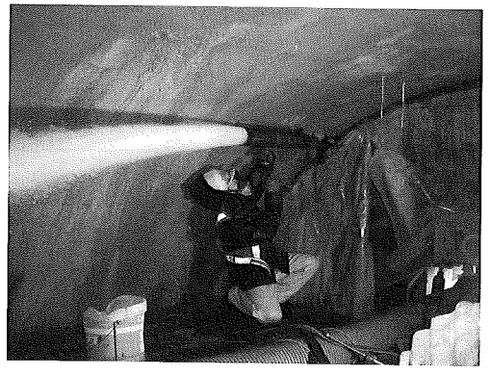


写真-7　削岩機による排水状況

3-2　高圧流動化粘土層との遭遇

上記の2回のTBM拘束と切り拡げによる脱出をくり返した後，再びTBMによる掘削を継続し，平成17年9月時点で，既に河合側坑口から3,100mまでNATM掘削が進んでいた迎え掘り切羽までの残延長が450m(白川側掘削延長7,300m地点)に迫った．ここで，TBMは再々度の拘束を受けた．拘束に至らしめた粘土層は事前の前方探査ボーリングにより厚さ2〜3 mとかなり厚く，削岩機による削孔が困難であったが，湧水はほとんどなかった．粘土層の内空側への変位によるTBM拘束を警戒して，事前に掘削径を通常よりもさらに50㎜(半径)増大させてTBM胴体と掘削壁面とのクリアランスを拡大して掘削を進めた．掘削にあたっては，掘進，盛り替え時の反力不足の可能性があるため，シールドジャッキの荷重を受けることが可能なスチールライナーに変更した．

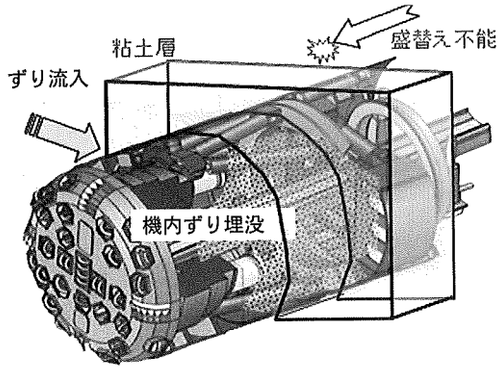


図-3　TBM拘束イメージ図

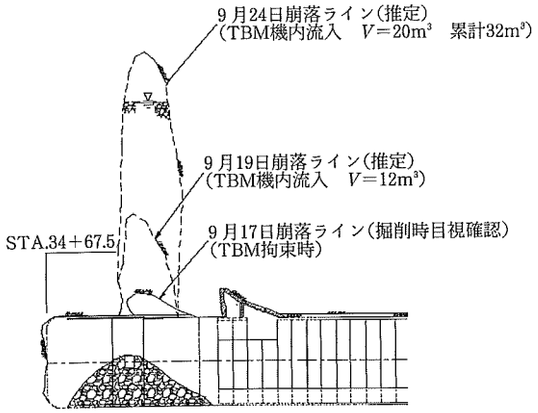


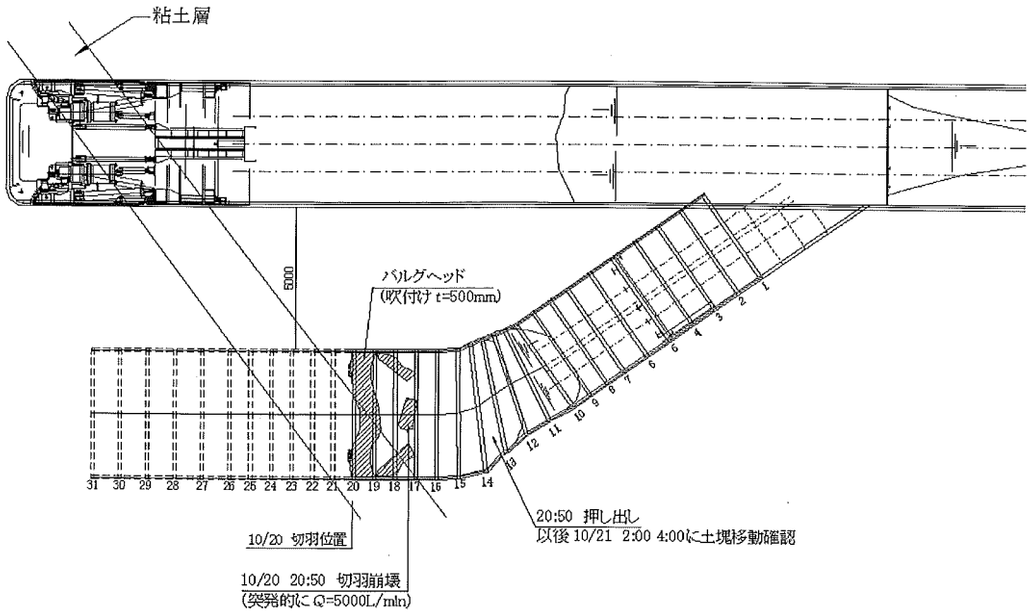
図-4　TBM崩落拡大想定図

粘土層の切羽での掘削時は湧水がほとんどなく，ある程度の自立性を有しており小規模な崩落のみでTBM前胴部は通過できた．しかし，後胴盛り替え時に中胴部分が締め付けられ，TBM拘束に至った．後胴盛り替えの反力補強としてインバートやスチールライナーの補強，背面モルタル充填を実施したが，拘束を解除することはできなかった．また，TBM拘束解除を目的としてTBM上部の切り拡げ掘削を開始したが，鏡面の押し出し，削岩機のロッドの押し返しなどの現象が発生したため，バルクヘッドコンクリートを構築して切り拡げを中断した．この粘土層は浸水崩壊度がきわめて高く，小規模な崩落をきっかけに呼び込んだ少量の湧水が粘土層を塑性流動化した．さらに後の調査で判明したことだが，この位置から約20m先には6 MPaを超える高圧湧水帯が存在していたため，徐々に増加する湧水が崩落を助長してTBMに作用している荷重を増大させた．この荷重により厚さ40㎜の鉄板でできている中胴胴体部が徐々に変形し，土砂が流入し始めて，中胴に設置している点検窓を破壊した．その後，TBM内への土砂流入が継続し，TBM拘束から1週間後にはほぼ完全に土砂によりTBM内が埋没した．この時点でTBM胴体部の変形，駆動部の破壊，電装関係の故障などは致命的であった．

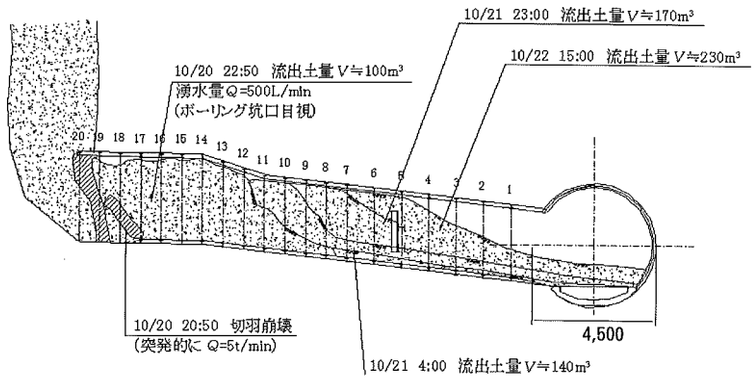
3-3　迂回坑の崩落

引き続き高圧湧水帯付近の地質調査，水抜きボーリングの基地として，また，将来的にはTBM本体を迂回して避難坑本線として使用する目的でTBM本体後方左側から迂回坑を掘削開始した．粘土層の想定位置付近では削岩機により粘土層の位置および含水状態を確認しながらの掘削になった．13m程度掘削した時点でTBMを拘束した粘土層に遭遇した．掘削直後は湧水もなく自立性がある程度確保できる切羽であったが，徐々に鏡面の亀裂開口が進行し，湧水も漸増していった．

その時点で厚さ30cmの鏡吹付けを実施したが，この鏡吹付けを押し割って切羽が崩落し，崩落土



(1) 平面図



(2) 縦断図

図-5 迂回坑崩落概要図

写真-8 迂回坑切羽崩壊

写真-9 迂回坑埋没

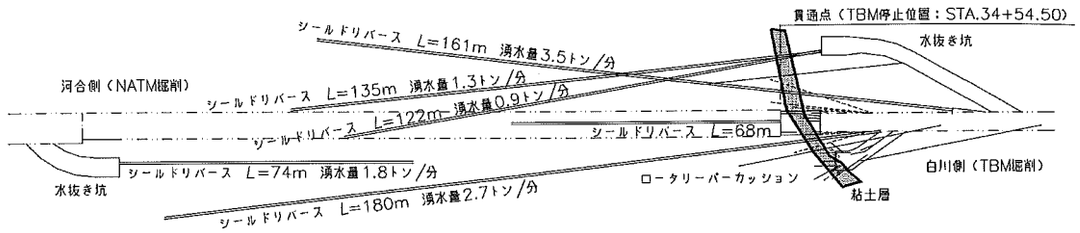


図-6 貫通点付近水抜きボーリング施工位置図

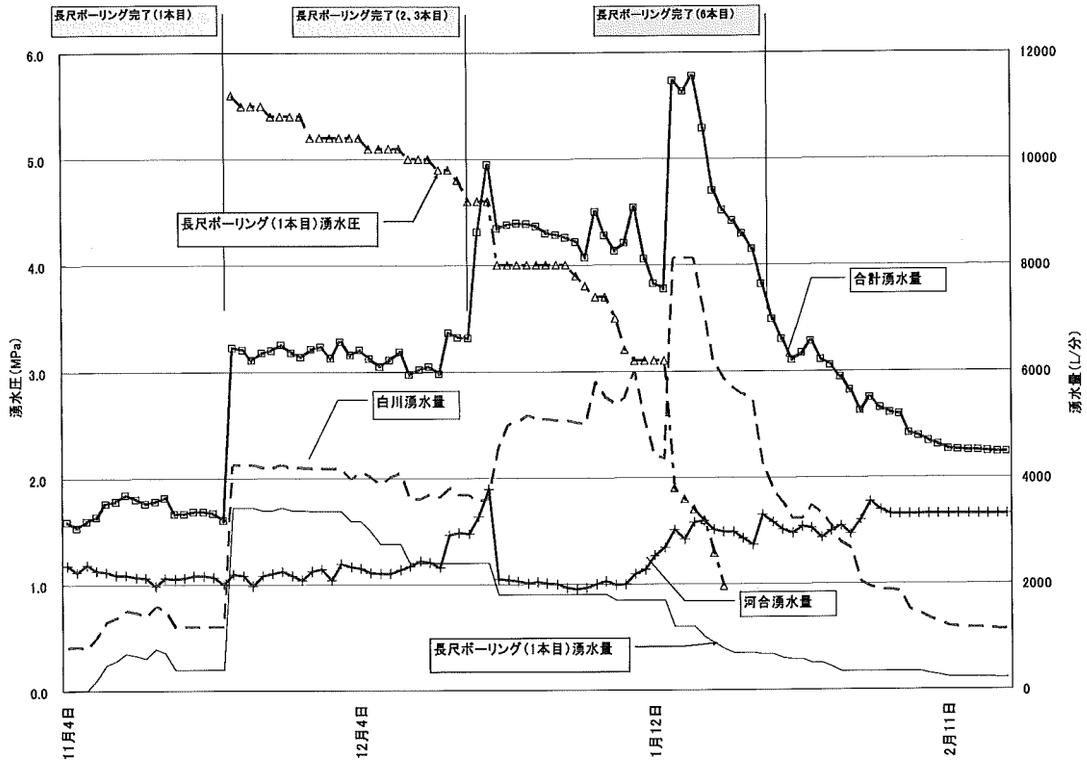


図-7 湧水量推移グラフ

砂により迂回坑全体および避難坑の一部が埋没する事態に至った．流出した土砂は後続台車まで巻き込む恐れがあったため，後続台車を切り離し50m後退して，その後の対策の施工ヤード確保をした．粘土層背面の状況を把握するため，迂回坑よりもさらに後方の右側から長尺ボーリングを削孔開始した．

この長尺ボーリングで切羽前方20mより奥に6MPaに及ぶ高圧湧水帯の存在が判明した．この湧水帯は何層かの粘土層により分割されており，未掘削区間周辺の水圧を低減するためには広範囲に長尺ボーリングを追加する必要が生じたため右側に新たに水抜き坑を掘削した．この水抜き坑は粘土層の手前で終了し，長尺ボーリングの作業基地とした．下り勾配の河合側からも長尺ボーリングを実施して，計6本の長尺ボーリングにより，高圧湧水帯の湧水圧が1MPa以下への減少が確認されたことから，河合側の強制排水管の増設や非常時の発電装置の設置などの排水設備の増強をし，河合側からNATMにより掘削して平成18年3月に貫通することができた．

3-4 TBM損傷状況

流動化した粘土層の沈静化と湧水圧の低下が確認できたため，貫通に先立ってTBM内の土砂撤

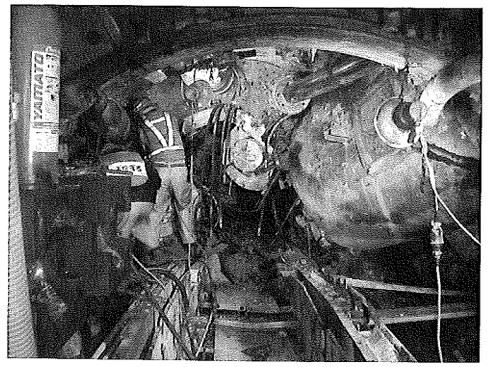


写真-10　TBM破壊状況

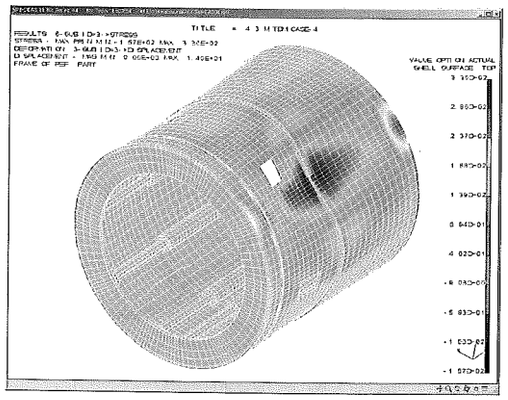


図-8　TBM破壊逆解析シミュレーション

去および解体作業に入った．TBM内は駆動機械，ベルコンの隅々まで土砂が流入して作業場所は狭小であり，土砂の再流出時の退避方法などの安全を確保しながらの慎重な作業となった．土砂撤去を進めるに従い，TBM前胴部と中胴部(ともにt＝40㎜)が1.5m程度内部に突出していることが明らかになった．スラストジャッキやカッタモータなども著しい変形をしており，破断しているものもあった．そこで，解体作業を継続するにあたって，H形鋼により突出部を支えるとともに，このH形鋼に応力計を設置してゆるみの増大による荷重増加に備えた．河合側切羽がTBMに10m程度に迫ったときに補強H形鋼の応力が急増したため，H形鋼を追加補強するとともに，TBM胴体や残存しているスラストジャッキなどにも応力計を設置して貫通を迎えた．

今回のTBM変形に対して，どの程度の荷重が載荷していたのか想定するための解析を実施した．解析は3次元モデルで胴体が降伏してスラストジャッキが破断するまでの荷重状態を算定した．変形形状から右上から卓越的な荷重が載荷されていると仮定した．

算定結果では4.3MPaの集中的な荷重がかかった場合に実際の現象と同様な挙動を示すことがわかった．これだけ大きな荷重はゆるみ荷重では説明できず，前方に存在する6 MPaの湧水帯による影響を直接，あるいは間接的に受けたものと考える．

4　土かぶり1,000mの世界で起こったこと

堅硬な岩盤では，大きな土かぶりのトンネルを掘るにあたっては「トンネルは地山が支える」というトンネル掘削の基本原理を持ち出すまでもなく，地山自体の支保機能によりその地山が持っている「真の土圧(≒γh)」を意識することなく，設計・施工することができる．断層や変質帯といった著しく強度が低下した不良地山に遭遇した場合のみ，真の土圧を実感する．飛騨トンネルでは不良地山に遭遇するつど，この巨大な圧力に悩まされた．

しかし，飛騨トンネルではもう一つ大きな圧力との闘いがあった．水圧である．大きな土かぶりのトンネルでは$\gamma_w \cdot h_w$(γ_w(水の密度)＝1.0 t/m³，h_w＝地下水高さ)の水圧が確実に存在するし，飛騨トンネルのように対象の山にとって初めてのトンネルでは「初期水圧」として土かぶりの大きさにほぼ等しい水圧が存在している．多くの場合，切羽の接近に伴い湧水が漸増し，それに従って水圧が低減していくため，切羽近傍でこの水圧を受けることは少ないが，長尺ボーリングなどでは初期水圧に近い値を確認することができる．飛騨トンネルの施工でも4 km離れた2か所で土かぶりの6～8割に相当する6 MPa近い水圧が長尺ボーリングにより確認されている．いずれの場合も，遮水層となっていた湧水の少ない不良地山を抜けた後に遭遇しており，トンネル十訓の一つ「埃立たぬに水ないものか」を思わずにはおれなかった．

こうした土かぶりの大きなトンネルを施工するにあたって，飛騨トンネルで得られた教訓をまとめる．

① 粘土層の奥には高圧湧水帯の可能性がある．
② 初期水圧は土かぶりに近い水深の圧力に相当する．
③ 水圧・水流を受けた粘土層は時間とともに強度低下する．

5　ま　と　め

飛騨トンネル先進坑は，その重要な役割として本坑掘削前に地質状況を把握して，地下水位を低下させておくことがあった．約10年に及ぶ施工中には幾多の不良地山や大量湧水の遭遇により，TBM停止や切り拡げをくり返しながらの掘削となった．平成15年4月には突発的な大量湧水に遭遇して，左右に水抜き坑を施工し，4か月の期間を要して掘進を再開することができた．また，平成17年9月には貫通まで450mあまりを残しTBM本体が拘束，破壊され，迂回坑が埋没するに至った．これらの現象に直接，間接的に影響している6 MPa程度の高圧湧水帯に対して，長尺ボーリングの追加により帯水層，遮水層の位置を精度よく把握し，効率的なボーリングを実施した．かつてないほどの高圧大量湧水下でのこうした対応について今後の大土かぶりトンネルにおける施工方法検討の一助となると考える．

最後に地質，地形的に非常に困難な条件の中，次々と発生するトラブルに対して最新，最高の技術で大きな事故もなく克服できたことは大いなる喜びである．これもひとえに飛騨トンネル施工技術検討委員会の委員をはじめとして，関係各位の方々のご指導，ご助言のお陰であり，深く感謝する次第である．

参　考　文　献

1) 山田隆昭・川北眞嗣・勘定茂・築地功：飛騨トンネルにおける高圧大量湧水帯の施工，トンネル工学研究発表会，2003.11.
2) 寺田光太郎・川北眞嗣・小林伸次・築地功：不良地山・高圧湧水との闘い(大量湧水編)，東海北陸自動車道　飛騨トンネル，トンネルと地下，Vol.35，No.9，pp.15-25，2004.9.
3) 森山守・勘定茂・松原利之・築地功・松元和伸：飛騨トンネル先進坑における6 MPaの高圧湧水帯の対応，第18回トンネル工学研究発表会，2006.11.
4) 森山守・寺田光太郎・松原利之・築地功：土かぶり1,000m，6 MPaを超える高圧湧水下で貫通，東海北陸自動車道　飛騨トンネル先進坑，トンネルと地下，Vol.38，No.2，pp.17-24，2007.2.
5) 大島洋志：わかりやすい土木地質学，土木工学社，2000.11.

わかりやすい土木地質学
大島洋志 監修　B5判　209頁　本体価格 2,500円　〒340円
本書は，平成11年3月号より17回にわたって「トンネルと地下」に連載した「トンネル技術者のための応用地質学入門」をベースに，加筆および整理してまとめたものである．本書では，最新のトンネル技術，地質学，ならびに，地質調査法などを挙げ，学生から実務者まで広範に満足させる内容となっている．
株式会社 土木工学社　〒162-0832 東京都新宿区岩戸町16 メイジャー神楽坂
電話　(03)3267-2888（代）　振替00110-8-190072

トンネル ジャーナル

TUNNEL JOURNAL・TUNNEL JOURNAL・TUNNEL JOURNAL・TUNNEL JOURNAL

古川地下調節池整備事業に着手

東京都は，古川地下調節池整備事業について，9月10日付で国土交通省から事業認可を取得したことにより，同事業に着手した．都では，6月20日に古川流域の水害を解消するため，古川の都市計画変更を行い，洪水の一部を貯留する「古川地下調節池」を渋谷川・古川の地下に整備することにしていた．

事業規模は，地下トンネルが内径直径7.5m，延長約3.3kmで，貯留量約135,000m³．取水施設は港区白金五丁目地内に1か所設け，排水施設1か所を港区三田一丁目地内に設ける計画としている．

古川は，港区内の天現寺橋より東へ流れ，古川橋で北上し，再度一之橋で東に流れ東京湾に注ぐ，流路延長約4.4km，流域面積22.84km²の二級河川となっている．

横浜環状北西線 都市計画素案(案)を公表

横浜市は，横浜環状北西線の都市計画素案(案)を取りまとめ，9月17日公表した．

同案は，全長7.1kmのうち，4.1kmをトンネル構造とする計画．

9月末より縦覧を開始しており，12年度の完成を目指す北線の事業効果の発現のためにも，早期の完成が期待されている．

賤機山トンネルで安全祈願祭

中部地整静岡国道が整備する国道1号静清バイパス賤機山トンネル二期線の工事着手にあたり，9月12日，安全祈願祭が現地で行われた．同トンネルは，延長537mのNATMトンネル．

静清バイパスは，静岡市清水区興津東町から同市駿河区丸子二軒家に至る延長24.2kmの主要幹線道路で，平成9年3月に全線暫定供用している．しかし，供用後も慢性的な交通渋滞や交通事故が発生しており，これらの解消を図るために現在4車線化整備を進めている．

三良坂トンネル貫通

中国地整三次河川国道が整備する中国横断自動車道尾道松江線の三良坂トンネルの貫通式が9月16日現地で行われた．

同トンネルは延長571m，車道幅員7mで，昨年11月に掘削を始めた．

白土トンネル貫通

東日本高速道路が整備する東北横断自動車道釜石秋田線白土トンネル工事で9月18日貫通式が行われた．

同トンネルは延長1,857mで，平成18年3月に着工しており，平成21年3月完成予定．

九州横断道延岡線で 初のトンネル貫通

九州地整熊本河川国道が整備する九州横断自動車道延岡線の(仮称)大平トンネル(436m)と(仮称)河内トンネル(141m)が貫通し，9月27日，河内トンネル坑内にて貫通式が行われた．

九州横断自動車道延岡線は，熊本県上益城郡御船町と宮崎県延岡市を結ぶ延長95kmの国土開発幹線自動車道．このうち平成15年度から新直轄方式で事業を進めてた嘉島～山都間23kmにおいて，同道初のトンネルが開通したもの．同路線にはほかに，田代第一，第二トンネル，高木トンネル，鶴山谷トンネルの4トンネルが計画されている．

嘉島-山都間の完成により山都町～熊本市間の所要時間が約20分短縮され，全線開通時には熊本市～延岡市間が1時間半程度短縮されると試算されている．

松ヶ鼻トンネル貫通

福井県が整備する帆山王子保停車場線松ヶ鼻トンネル(仮称)で9月29日，貫通式が行われた．

同トンネルは総幅員11.25m，271.0mで，井県越前市向新保町と越前市下平吹町を結ぶ同県道の改良事業1,700mの一部として施工された．改良区間の供用は平成22年度を予定している．

関門トンネルの 大規模リフレッシュ工事

西日本高速道路は，関門トンネルにおいて，大規模なリフレッシュ工事を開始した．今年度は10月15日から12月13日までの60日間，通行止めを行い，天井板の取り替え工事などを行う．

関門トンネルは関門海峡下を貫く海底トンネルとして，昭和33年3月に供用を開始し，今年開通50年を迎えた．この間，利用交通量の大幅な増加，通行車両の大型化および海水の漏水により車道部床版，天井板および諸設備に劣化が生じ，開通後20年を過ぎた昭和54年，昭和63年～平成元年，平成10年～平成11年に通行止めを伴う補修を行っている．

今年度から平成22年度にかけては，車道床版および天井板の取り替えなどを行うための大規模なリフレッシュ工事を計画的に行うものとしており，今回工事では，60日間の通行止めにより天井板(約2,200m)および内装板(約900m²)を取り替え，視環境を改善し快適な走行空間を確保するとともに，天井板の耐久性を確保する．また，コンクリート剥落対策により，コンクリート表面部の耐久性を確保するものとしている．

飛驒トンネル開通記念特集

シングルシェルへの挑戦

(元)中日本高速道路(株)名古屋支社清見事務所飛驒工事長(第3代)
中日本高速道路(株)金沢支社金沢保全・サービスセンター工務担当課長
森山 守
大成建設(株)土木本部土木設計部トンネル地下設計室課長
大塚 勇
(前)大成建設(株)土木本部土木設計部陸上第二設計室課長
大成建設(株)国際支店アルジェリア東西高速道路建設(東工事)工事課長
小原伸高

1 はじめに

飛驒トンネルは，地域社会から1日も早い開通が望まれていたため，貫通から1年余の平成20年春の開通を目指した．

トンネルは，長大トンネルで非常駐車帯が多いことから，非常駐車帯の拡幅，覆工コンクリートの打設に時間を要すると考えられた．そこで，工期短縮のため，複数の箇所で同時施工が可能である吹付けコンクリート覆工を非常駐車帯に適用した．また，避難坑，換気坑でも吹付けコンクリート覆工を採用した．

さらに，TBMの一部区間で，覆工コンクリートを省略し，RCライナーのみのシングルシェル構造を採用し，工期短縮を図った．

本稿は，本坑非常駐車帯での吹付けコンクリート覆工，TBM区間でのRCライナーについて報告する．

2 非常駐車帯部における吹付けコンクリートの多層構造による覆工の検討

2-1 吹付け覆工の検討

飛驒トンネルの本坑では，TBMによる掘削が完了した後，非常駐車帯区間のライナーを一部撤去してNATMで拡幅掘削を行った(図-1)．

吹付けコンクリートの多層構造による覆工(以下「吹付け覆工」と称す)は，支保機能と覆工機能を必ずしも明確には分離しない．一次層の吹付けコンクリートと二次層の吹付けコンクリートとの間は，従来施工のようなシートによるせん断力の伝達を阻害する部材を使用しないため，二次層の吹付けコンクリート層は一次層の吹付けコンクリートの拘束により，乾燥収縮のひび割れが発生する可能性が高い．そのため，今回の吹付け覆工に近いシングルシェルライニングの実績が多いヨーロッパでは，繊維補強吹付けコンクリートを使用することで有害なひび割れを抑制し，トンネル構造全体の安全性を高め，耐久性の向上を図っている．

今回対象とする箇所は，変位の大きな地山ではなく比較的変位も小さく短期間で収束するような

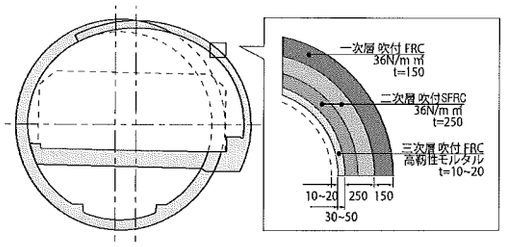


図-1 吹付け覆工各層の構成

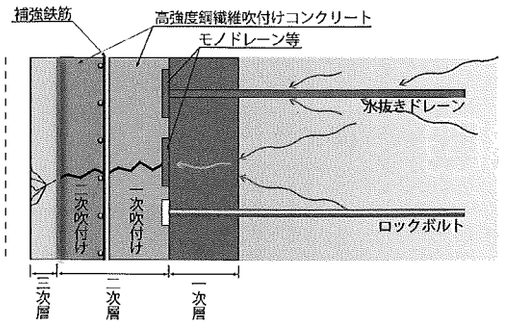


図-2　吹付け覆工構造概要図

地山であり，また，トンネル中央部の非常駐車帯箇所のみを対象とし，厳しい凍結融解を受ける可能性が少なく，湧水も少ないことを確認している．吹付け覆工に用いる吹付けコンクリートは，第二東名・名神の大断面トンネルで技術開発・向上がなされ避難坑などで多くの実績を有し品質的にも問題がない高強度繊維補強吹付けコンクリートを用いることによって，従来のトンネル覆工と同等以上の機能性・耐久性を確保するものである．

2-2　吹付け覆工の概要

図-1, 2に吹付け覆工の構成と概要図を示す．

吹付け覆工の区間は将来の補修厚を考慮して，50㎜の余裕を建築限界からとることとし，現状覆工厚が300㎜の箇所については，現状仕様案の300㎜から50㎜低減し，250㎜として検討した．

トンネル掘削後支保工を施工し湧水処理を施した後，鋼繊維補強吹付けコンクリートによる二次層を構築し，表面被覆として高靭性モルタルによる三次層[1]の表面をコテ仕上げにより仕上げる．構造としては従来の支保を一次層，吹付けコンクリート覆工を二次層，保護層を三次層とした．

2-2-1　一次層の要求性能

一次層の吹付けコンクリートは，支保工と覆工の機能を同時に負担させる必要があるため，下記のような性能が要求された．

① 岩盤の付着が十分にとれる．
② 吹付けコンクリートの軸圧縮力が十分に発揮される．
③ 発生するひび割れを分散し，有害な幅のひび割れ発生を抑制する．

耐久性については，地山と二次層に挟まれていることから劣化環境が少ないためシリカフュームなどは混入しないものとするが，繊維を混和し，発生するひび割れを分散し，有害な幅のひび割れ発生を抑制する目的で非鋼繊維による繊維補強コンクリートとした．

2-2-2　二次層の要求性能

二次層の吹付けコンクリートは覆工の機能を持たせる必要があり，次のような性能が要求された．

① 二次層に相当する各層間の付着が十分にとれる．
② 吹付けコンクリートの軸圧縮力が十分に発揮される．
③ 長期耐久性に優れている．
④ 曲げ，せん断荷重に対して抵抗ができ，ひび割れが生じても靭性が高く構造系の安定性が保持される．

以上のことを考慮し，使用する吹付けコンクリートについてはひび割れ抵抗性を向上させるための繊維補強配合が不可欠であると考えた．混入させる繊維は，高い靭性力を確保するために鋼繊維を使用するものとした．

また，吹付けコンクリートの品質が大きな課題であるため，コンクリートの密実性を高め耐久性を向上させることを目的にシリカフュームを混入するものとした．

2-2-3　三次層の要求性能

三次層に用いる材料は下記機能が要求された．

① 全面を被覆し，外環境から一次層を保護する(耐久性)．
② 二次層に発生したクラックなどを補修する．
③ 凹凸の最終仕上げ面となる(景観)．
④ 遮水機能がある(防水性)．
⑤ 物理的・化学的作用に対して材料自体の劣化が少なく，繊維補強の機能が長期間保持できるように保護する機能が必要である(中性化防止)．
⑥ 二次層吹付けコンクリートの劣化によるはく落などを防止する(はく落防止機能)．

以上の性能を有する材料として，複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料(HPFRCC；高靭性モルタル)を用いた．

2-2-4　炭素繊維グリッドによる補強

吹付け覆工では，補強およびひび割れ拘束を考慮して，鋼繊維による補強のほかに，二次層の一次吹付けと二次吹付けの間に炭素繊維グリッドを設け，コンクリートの一体化を図った．炭素繊維グリッドは以下の点で有利である．

① 運搬が容易で重機も不要，施工スペースにも制約を受けない．
② 鉄筋と同様の補強効果がある．
③ 耐薬品性に優れ，サビの発生がない．

2-3　検討課題と対策

上記の要求性能を満足するため，以下に示す項目について検討を実施し，仕様を決定した．

- 耐荷性能の検討：覆工が持つ構造物全体としての安全率向上という役割を考慮し，当初設計と同等以上の耐力を有する構造として仕様を決定した(後述)．
- 吹付けコンクリートの耐久性検討：吹付けコンクリートは打込みコンクリートと比較して非常に早期に強度を発現するが，初期の収縮量も大きい．また，湧水処理が不十分な場合，その部分の品質低下や付着力の低下が発生する．そこで凍結融解抵抗性や中性化抵抗性，乾燥収縮に関して試験を行い，打込みコンクリートとの比較を行った．
- 供用時の景観に関する検討：車両の交通環境に与える影響を考慮し，事前施工などの結果から，三次層の平滑性・平坦性に管理基準値を設定し，施工を行った(**写真-1**)．
- 耐火性の検討：二次層および三次層について，RABT加熱曲線に従う加熱実験データや既往の文献にもとづき耐火性の評価を実施した．
- 止水性の検討：前述したように二次層の吹付けコンクリートは収縮量が大きく，ひび割れが生じた場合，止水性に問題が生じる．そこで三次層について比較材料とともに透水試験を実施し，その効果を確認した．

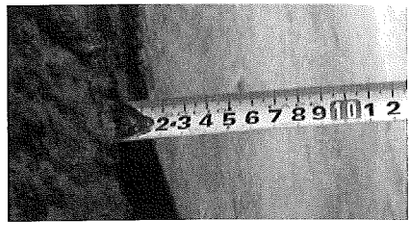


写真-1　三次層仕上げ状況

2-4　耐荷性能の検討[2)]

吹付け覆工は通常の打込みコンクリートによる覆工と同等の性能を有する必要があり，力学的には，従来の支保工・覆工と同等以上の耐力を有する必要がある．

吹付け覆工においては表面被覆の三次層を付加し，かつ将来の補修代厚を確保するため，二次層の厚さが減少する(**表-1**)．

そこで減少した二次層厚さを補うために，一次層および二次層の吹付けコンクリートの設計強度を36N/㎟とした．さらに，二次層には鋼繊維を混入してSFRC構造とすることにより，曲げ耐力の向上を図った．**図-3**に当初設計仕様と吹付け覆工の耐力カーブの比較を示す[3)~6)]．この図より構造全体としては当初設計仕様の支保工・覆工と同等以上の耐力を有することがわかる．ここで，当

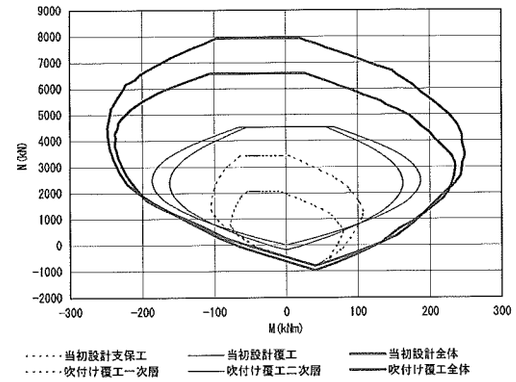


図-3　当初設計仕様と吹付け覆工の耐力比較

表-1　当初設計仕様との比較

	一次層(支保工)				二次層(覆工)		三次層
	吹付け		鋼製支保工				
	設計強度 (N/㎟)	厚さ (㎜)	仕様	ピッチ (m)	設計強度 (N/㎟)	厚さ (㎜)	厚さ (㎜)
当初設計仕様	18	150	H150	1.0	30	300	—
吹付け覆工	38	150	H150	1.0	36(SFRC)	250	10~20

初設計の支保工と覆工は防水シートにより縁切りされているため，図-4に示すような重ね梁としての挙動を示すものと考えられる．吹付け覆工の一次層と二次層は一体化させるが，安全側の検討として当初設計と同様に重ね梁として検討した．一次層(支保工)と二次層(覆工)それぞれ単独の耐力を求め，それを足し合わせて構造全体の耐力とした．なお，三次層については構造部材として評価していない．

2-5　二次層吹付けコンクリート仕様の妥当性検証

非常駐車帯の二次層は，当初の覆工設計仕様(設計基準強度30N/㎟，厚さ300㎜の無筋コンクリート)に対し，設計基準強度を36N/㎟とし鋼繊維による補強を行いSFRC構造として，厚さを250㎜に低減した．本検討では，二次層単独での仕様の妥当性を検証するために，終局限界状態として通常は一次層(支保)で受け持たれる緩み土圧が二次層(覆工)に作用した場合を想定し，二次層を梁，地盤をばねとする骨組構造解析により二次層に発生する断面力を算出し，安全性照査を行った．

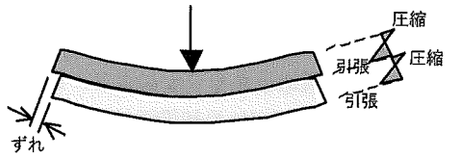


図-4　重ね梁モデル図

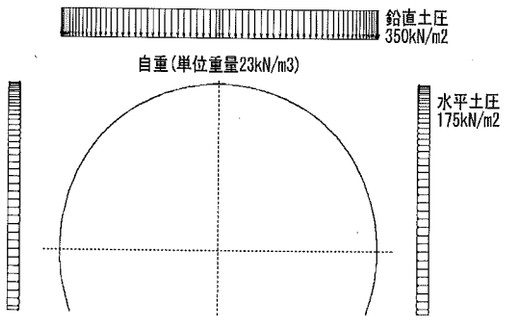


図-5　荷重図

地盤反力係数は，示方書[6]の算定式により決定した．地盤の変形係数はＤＩパターンの標準値とした[7]．

本検討において考慮する荷重は二次層吹付けコンクリートの自重と緩み土圧とする．緩み土圧は，標準断面におけるRCライナー設計時の土圧にトンネル幅の比を乗じて算定した．標準断面におけるRCライナー設計時の鉛直土圧は300kN/m²(緩み高さ：TBM直径程度)であり，非常駐車帯断面では350kN/m²となる．側圧係数は0.5とする．荷重図を図-5に示す．

図-6に二次層に作用する梁要素の断面力図を，

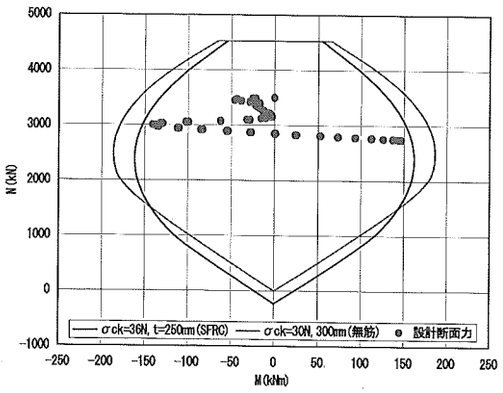


図-7　安全性照査結果

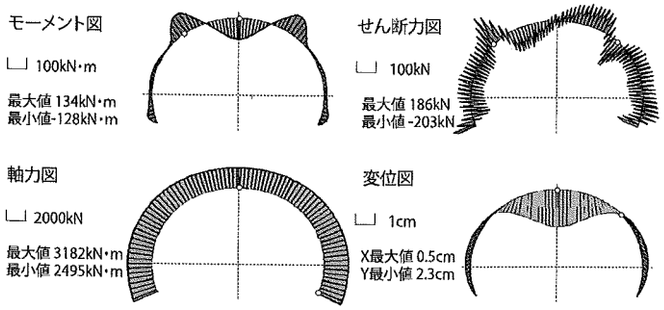


図-6　断面力図

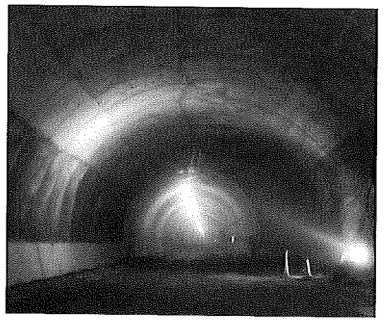


写真-2　吹付け覆工完了状況

図-7には全梁要素の断面力をプロットして*M*–*N*カーブと比較した照査結果を示す．また図-7には参考として当初設計仕様の耐力カーブも同時に示した．天端および肩部において曲げモーメントが大きくなるが，断面力はすべて耐力内に収まる結果となった．

3　TBM区間におけるシングルシェル覆工

飛騨トンネル本坑の約4.3kmの掘削は直径12.84mのTBMにて行った．TBM区間は支保にRCライナーを用い，覆工はNATMと同様に厚さ30cmの無筋コンクリートで計画した．しかしながら，TBM解体ヤード区間での覆工施工は大幅な工期延伸に直結するため，支保のRCライナーに覆工の機能を持たせたシングルシェル構造を採用した[8]．大断面トンネルにおけるシングルシェルは，国内の山岳工法トンネルでは初の試みである．

3-1　シングルシェルRCライナーの仕様設定

表-2に支保とシングルシェルのRCライナーの仕様を示す．

鉄筋のかぶりについては，次章で述べる耐火性能から内空側を大きく確保することとし，鉄筋中心で75㎜とした(支保のRCライナーでは，鉄筋中心で50㎜)．ライナー厚は，緩み土圧に対する必要耐荷性能を満足するために300㎜とし，コンクリートの設計基準強度を42N/㎟から45N/㎟にした．１リングを形成するライナー間の継手(いわゆるセグメント継手)は，ボルトボックスと継手板を短ボルトで締結する，シールド工法におけるセグメントで一般に用いられている形式とした．また，インバートライナーの形状が一定であるため，ライナーの組み方はいわゆるいも組みとした．また，シングルシェルで防水シートがないため，シールド工法におけるセグメントで一般に用いられている水膨張シール材により止水性を確保することとした．図-8にシングルシェルRCライナー配置図を示す．

表-2　RCライナーの仕様

		支保 RCライナー	シングルシェル RCライナー
コンクリート	設計基準強度	42N/㎟	45N/㎟
	厚さ	250㎜	300㎜
鉄筋	材料	SD345	SD345
	かぶり (中心位置)	50㎜	50㎜(地山側) 75㎜(内空側)
	配筋	D16×７本 複鉄筋	D16×７本 複鉄筋

3-2　構造解析

本検討ではRCライナーを梁，地盤をばねでモデル化する梁ばねモデルによる構造解析を実施し，RCライナーの応力度照査を行った．考慮する荷重は完成時の荷重状態を考慮し，自重，自重反力，

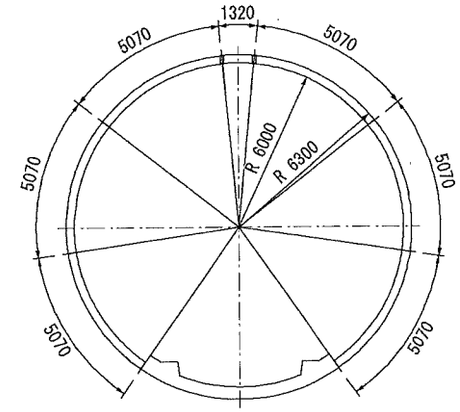


図-8　RCライナー配置図

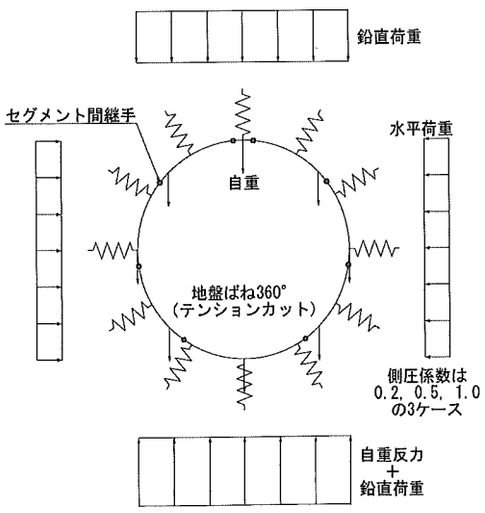


図-9　検討モデル

表-3 検討ケース

ケース	セグメント継手部	側圧係数
1	剛(継手なし)	0.2
2	回転ばね	
3	剛(継手なし)	0.5
4	回転ばね	
5	剛(継手なし)	1.0
6	回転ばね	

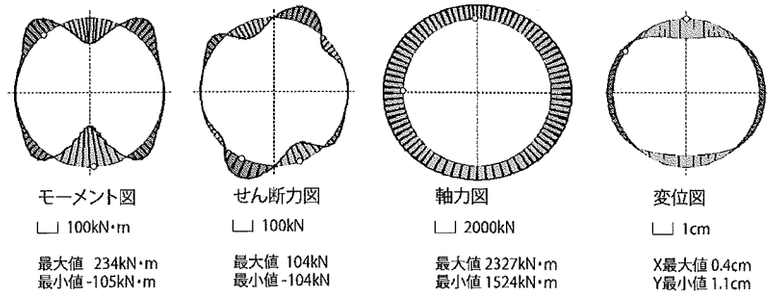
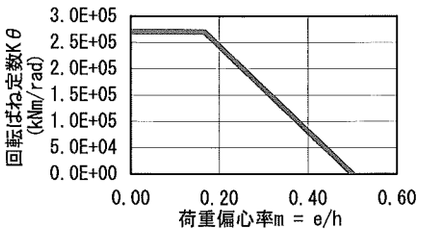


図-11 ライナー間継手の回転ばね定数



e = M/N (M：曲げモーメント、N：軸力)
h：有効高 (=部材高)

図-10 ケース1断面力図

緩み土圧による鉛直荷重および水平荷重とした．山岳トンネルの掘削では切羽到達時点である程度の初期応力が解放されている．さらに，本トンネルの場合は無支保の状態でTBMの機体長分(約7.8m)以上の掘削が行われることや，比較的ルーズな豆砂利による裏込め充填が機体通過後に行われることから，ライナーに作用する地山の荷重は初期応力から相当に低下すると考えられた．以上の考察からRCライナーに作用する荷重は掘削解放力ではなく緩み土圧とした．緩み土圧は，緩み高さをTBM径の13m程度と設定し，鉛直荷重で300kN/m²とした．側圧係数については$K=0.2$，0.5，1.0の3ケースを検討した．検討モデルを**図-9**に示す．

検討ケースを**表-3**に示す．安全側を考えライナー間継手を剛構造としたケースと回転ばねにしたケースの両方のモデルで検討した．

図-10に示すように回転ばね定数は荷重偏心率に依存する値として設定するため，軸力が卓越する(荷重偏心率が小さい)ときは，ばね定数が大きくなり，曲げモーメントが卓越する(荷重偏心率が大きい)ときはピン構造に近くなる．

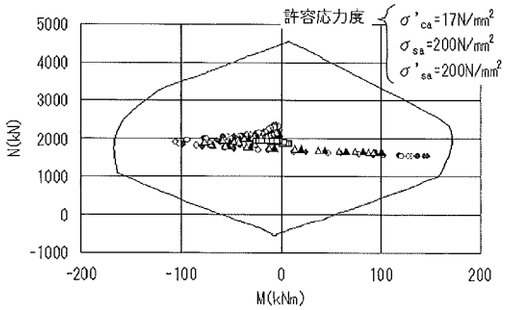


図-12 曲げモーメント・軸力照査結果

地盤反力係数は示方書[6]の算出式により決定した．変形係数は裏込め材の影響を考慮した換算変形係数を用いた．ここで，裏込め材の変形係数は緩い砂質土相当とし，地盤の変形係数はDⅠパターンの標準値とした[7]．

3-3 構造解析・応力度照査結果

図-11にケース1の断面力図を示す．全ケースの曲げモーメントおよび軸力に対する照査結果を**図-12**に示す．

曲げモーメントおよび軸力に対する照査は許容応力度M-Nカーブに断面力をプロットすることにより行った．各ケースを比較すると側圧係数0.2のケースがもっとも厳しくなり，ライナー間継手については剛(継手なし)としたケースで断面力が大きくなる．いずれのケースも許容応力度照査を満足した．せん断力に対する照査は最大せん断応力(τ_m)と補正したコンクリートの許容せん断応力度(τ_a)を比較[9]したが，全ケースで許容応力度照査を満足した．

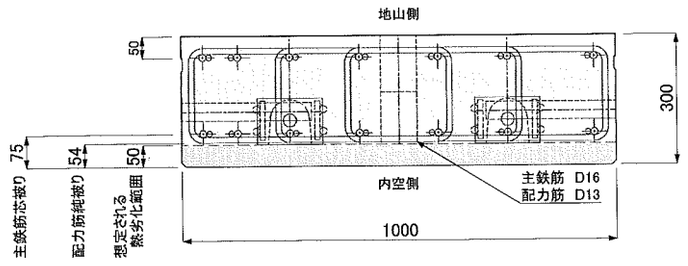


図-13 爆裂抑制型RCライナー断面図

3-4 耐火性能

覆工の機能のうち，耐火性については，コンクリートに有機短繊維(ポリプロピレン繊維)を混入させることで火災時の爆裂抑制を図ることとし，爆裂抑制型RCライナーを国内で初めて適用した．

3-5 耐火構造の選定

一般に都市部の道路シールドトンネルで使用されるセグメントは，トンネルの立地条件から火災事故がトンネル内および地表部に重大な影響を及ぼす可能性があるため，耐火構造が要求されると考えられる．しかし，飛騨トンネルはこれとは異なり，岩盤中のいわゆる山岳工法トンネルであることを考えれば，地山によるトンネル構造の自立性(構造安定性)が期待でき，火災時も爆裂による覆工の大きな損傷がない限りは，トンネル断面はある程度保持され，トンネルの崩壊には至りにくいものと考えられる．したがって，国内の道路シールドトンネルで実績のある，セグメントの内面に耐火被覆を設置する耐火構造[10]と同等の性能までは必要ないものと考えられ，有機繊維混入コンクリートによる爆裂抑制型RCライナーを用いることにより覆工と同等の耐火性を確保できると考えた．火災時の要求性能は，トンネル内での大規模火災を想定して，火災想定時間温度曲線をRABT曲線(60分加熱)としたときに，覆工コンクリートに爆裂が生じないこととした．爆裂抑制型RCライナーの断面図を**図-13**に示す．

3-6 耐火性能の確認試験

有機繊維混入により爆裂を抑制するために必要な混入量を確認するために，RCライナーと同配合のコンクリート試験体(800㎜×800㎜×300㎜)を用いたRABT曲線による加熱を行う耐火実験を行った．また，継手部のボルトボックス充填モルタルの耐火性能や継手部の止水材(水膨張ゴムシール材)が火災時に熱劣化しないことを確認するために，継手部を模擬した試験体も製作し，同時に耐火実験を行った．

4 おわりに

飛騨トンネルは10.7kmという長大トンネルであり，社会的な要請により，急速施工を余儀なくされてきたが，吹付け覆工およびシングルシェル構造の覆工を適用することにより大幅な工期短縮が実現できた．各工法を適用するにあたっては施工箇所ごとの特異条件を整理したうえで，長期的な安全性を確保できることを十分検討したうえで，採用した．

当工事において採用された覆工構造は今後のトンネル構造の考え方に一石を投じることになると自負する．今後の吹付け覆工およびシングルシェル覆工の他工事への展開にあたって，設計・施工的な検討を深めていくうえで当工事の実績が一助になればと考える．

最後になりますが，今回の覆工構造の採用にあたりまして飛騨トンネル施工技術検討会の委員をはじめとする関係各位の方々のご指導，ご助言をいただきましたことを深く感謝する次第であります．

参考文献

1) (社)土木学会：複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料設計・施工指針(案)，2007.
2) 板垣賢・森山守・小林伸次・領家邦泰・大塚勇：飛騨トンネル非常駐車帯における吹付け多層覆工構造の設計，土木学会第63回年次学術講演会(投稿中)．
3) (社)土木学会：コンクリート標準示方書［構造性能照査編］，2002.
4) 日本鉄道建設公団：併進工法設計施工指針(案)山岳トンネル編，1994.
5) (社)土木学会：鋼繊維補強鉄筋コンクリート柱部材の設計指針(案)，1999.
6) (社)日本道路協会：道路橋示方書，Ⅰ共通編・Ⅳ下部構造編，2002.

7）日本道路公団：トンネル数値解析マニュアル，試験研究所技術資料，第358号，1998.
8）板垣賢・森山守・小林伸次・領家邦泰・大塚勇：大断面TBMトンネルにおけるシングルシェル覆工におけるシングルシェル覆工の設計，土木学会第62回年次学術講演会3-138，pp.275-276，2007.
9）(社)土木学会：トンネル標準示方書［シールド工法編］・同解説，1996.
10）西岡巌・由利一・小原伸高：道路シールドトンネルにおける耐火工の施工計画および施工実績，土木学会第61回年次学術講演会，6-604，pp.127-128，2006.
11）森山守・小原伸高・六郷恵哲：大断面TBMにおける二次覆工機能を有した耐火ライナーについて，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.1，pp.453-458，2007.

P.A.ドミニコ，F.W.シュワルツ著

地下水の科学 各B5判 全3巻

地下水の科学研究会　大西　有三　監訳

第Ⅰ巻　地下水の物理と化学	価格4,281円	〒340円
第Ⅱ巻　地下水環境学	価格4,485円	〒340円
第Ⅲ巻　地下水と地質	価格3,873円	〒340円

本書は様々な環境問題を地下水理学の立場から本格的に取り扱うため，水の物理学・化学的性質，地球の状況，水資源としての地下水の状況，地下水の水理学的特性とその調査方法など多岐にわたっており，地質学者，水理地質の実務者，地球化学者ならびに流体力学に関心のある地球物理学者，または，地質学を学ぶ学生など広範に満足させる内容となっている．

＜第Ⅰ巻　主要目次＞
■序論■岩石における空隙の起源と透水性■地下水の動き■岩石の弾性的な性質と流れの方程式■水理試験（モデル，方法と応用）■溶質と粒子の輸送■汚染物質の水理地質学入門

＜第Ⅱ巻　主要目次＞
■地下水の化学■化学反応■物質輸送の数学理論■地下水による物質輸送（水質編）■地下水による物質輸送（地質編）■物質の輸送のモデル■輸送プロセスとパラメータ同定■水質浄化の対策

＜第Ⅲ巻　主要目次＞
■水資源■堆積盆水環境における地下水■地殻における地下水■地下水流動における熱輸送

株式会社 土木工学社　〒162-0832 東京都新宿区岩戸町16メイジャー神楽坂
電話　(03)3267-2888（代）　振替00110-8-190072

飛驒トンネル開通記念特集

安全・安心のためのトンネルの設備技術

(元)中日本高速道路(株)名古屋支社清見工場事務所施設工事長
(株)高速道路総合技術研究所施設研究室長
東　晋一郎

(元)中日本高速道路(株)名古屋支社清見工場事務所施設工事班
中日本高速道路(株)名古屋支社施設チーム
森吉應之

(元)中日本高速道路(株)名古屋支社清見工場事務所施設工事班
中日本高速道路(株)名古屋支社施設整備チーム
川村康史

1　はじめに

東海北陸自動車道最後の未開通区間である飛驒清見ICから白川郷IC間が平成20年7月5日15時に開通した．今回の供用区間は，全線暫定対面通行で延長24.9kmのうち20.7kmがトンネルであり，残り4.2kmのうち1.1kmが橋梁である．その構造物比率は90%弱と高く，さらに隣接する側道が全くない典型的な山岳道路である(図-1)．

飛驒トンネルの特徴は，①延長が10.7kmと非常に長い，②比較的長期にわたり暫定対面通行となることが予想される，③TBMで全線を掘削することが計画，④白川郷，飛驒高山といった中部地区有数の観光地を両側に抱えるトンネル，などである．設備的な特徴としては，これらに対応し，①選択排気縦流換気方式を採用，②モデルベース

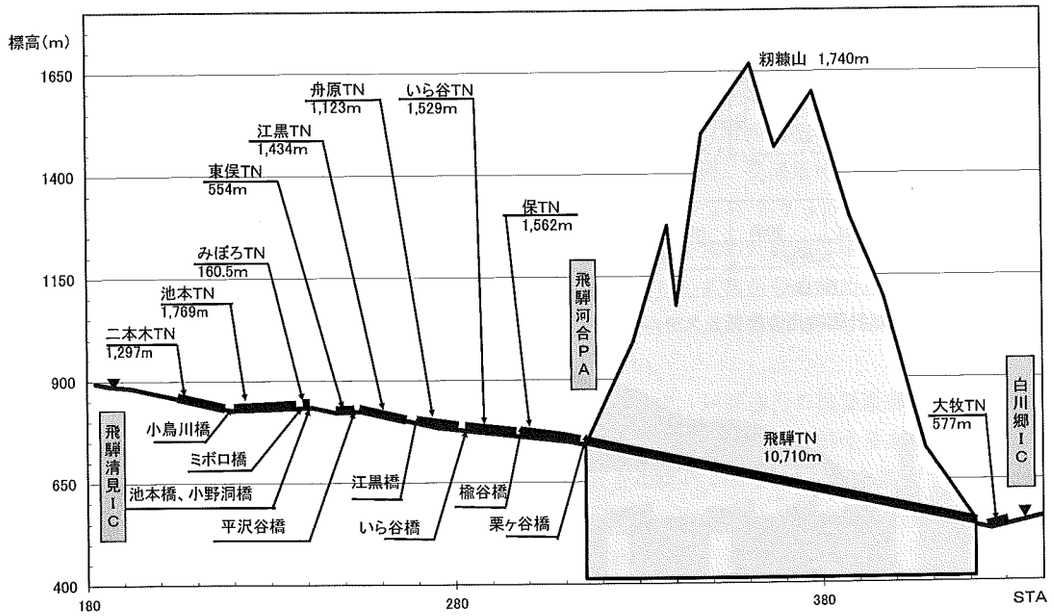


図-1　飛驒清見IC～白川郷IC間概要図

予測換気制御システム(以下「MPVC」と呼ぶ)を導入，③火災時の低風速化制御を導入，④漫然運転防止のための種々の対策を実施，などである．

本稿は，上記の特徴のほか新たに導入した取り組みについて紹介するものである．

2　換　気　計　画

2-1　1996年基本設計

飛騨トンネルのような長大トンネルでは，立坑を利用した送排気システムに加えて電気集塵機を併用したシステムが一般的であった．飛騨トンネルにおいても当初は，電気集塵機付き立坑送排気方式で計画されていた．図-2に1996年時点の換気システム概要図を示す．

この計画において，立坑を施工するには1,000m近い土かぶりがあるために，費用的な問題があり，工期的にも冬季の積雪期に作業が不可能であることから非常に長くなることが想定された．

また，電気集塵機は，暫定時で3か所，一方通行時には全線が上り勾配になるため，9か所の設置が想定された．電気集塵機の箇所数が増えることは，換気動力費の増大を意味する．

さらに，対面通行トンネルでは，通常自動車排出ガス濃度のピークは，トンネル中央部にあるが，観光特性の強いこの区間においては，週末や休日の朝夕に著しい交通の不均衡が生じ，自動車排出ガスの濃度のピークが時間によって移動することが想定された．このような状況下では，換気区間の長い集中排気方式や換気方向を固定した集塵機付き立坑送排気方式では，長時間トンネル内環境が改善されないことが想定された．

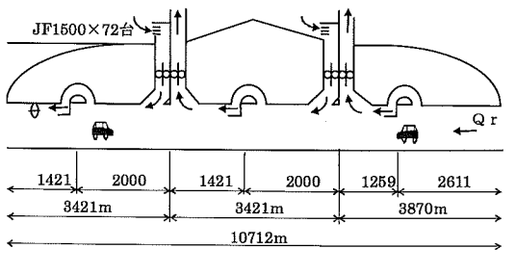


図-2　1996年計画時点の換気システム

2-2　TBM施工決定

1998年に飛騨トンネルは全線にわたってTBMで掘削されることが決定した．同時にTBM掘削の特徴である床版下の空間を換気用のダクトとして利用する換気計画の立案がなされた．その再検討のなかで前節の問題点を克服するためにトンネル内に複数の排気口を設け任意の排気口1か所からトンネル内の自動車排出ガスを集中排気する選択排気縦流換気方式の採用が検討された．図-3に選択排気縦流換気方式の運用イメージを示す．結果として飛騨トンネル内には5か所の排気口が設けられ，図-3に示すとおり白川郷IC向きの交通量が多い場合は，白川側坑口付近の排気口を開きジェットファンで車道内の圧力バランスをとり，両坑口近傍に設置した排風機によりトンネル外に排出する換気方式である．

換気システムの基本計画立案後，飛騨トンネルの掘削は難渋を極め，すべてTBMでの掘削を計画していたが，飛騨清見IC側坑口(以降「河合坑口」と呼ぶ)から約3.4kmおよび白川郷IC側坑口(以降「白川坑口」と呼ぶ)約3kmはNATMで掘削された．TBM断面では断面の下半分を換気用のダクトとして利用しているが，NATM断面では，新たな換気用のダクトが必要となった．幸いなことに白川側には，本坑に並行する作業用トンネルが存在し，これを換気用のダクトとして使用することができたが，河合側は，換気用のダクトとして専用に掘削をした．結果，飛騨トンネルは，図-4に示すとおりの形状となり，当初計画どおりトンネル下半部を換気ダクトとして使用したのは，中央部の4km余りである．

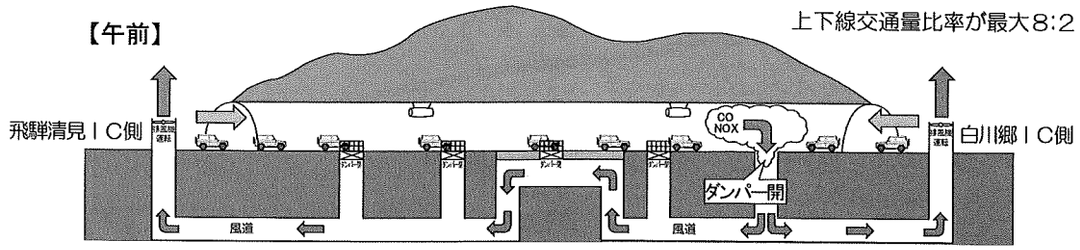


図-3　選択縦流換気方式の運用イメージ

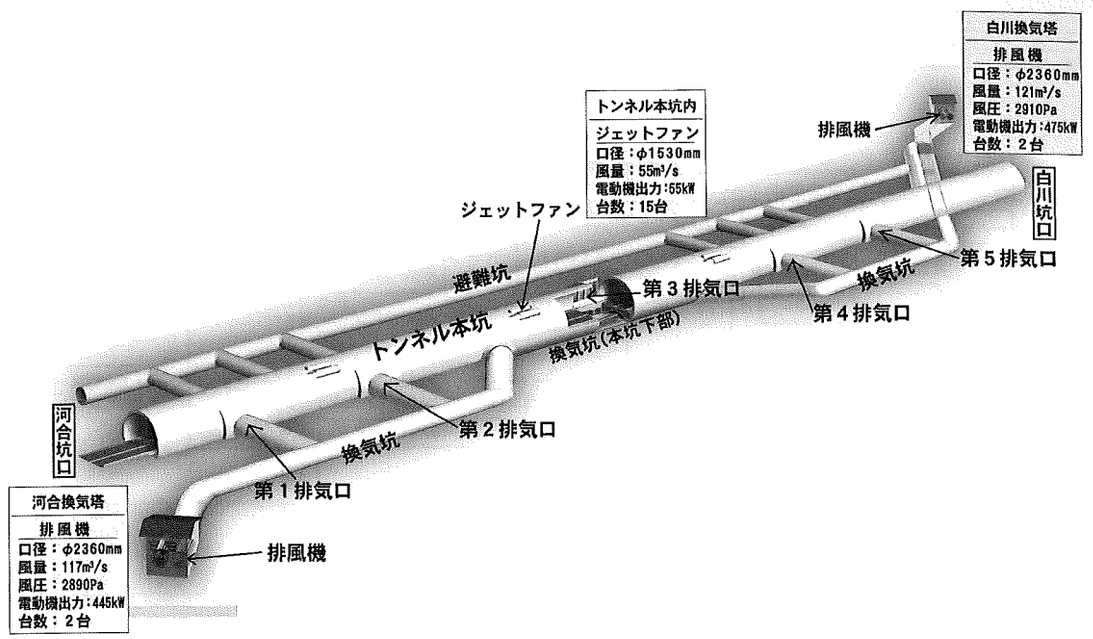


図-4　飛騨トンネル鳥瞰図

3　通常時換気制御システム

今回飛騨トンネルでは，モデルベース予測換気システム(Model-based Predictive Ventilation Control System，以下「MPVC」と呼ぶ)を採用した．この換気制御システムは，実運用レベルでは，首都圏連絡中央自動車道八王子城跡トンネルに続き2例目の採用となる．対面通行トンネル，選択排気縦流換気方式では初めての採用となる．実績の浅いシステムであるがMPVCを採用したのは以下の理由によるものである．

① 飛騨トンネルの選択排気縦流換気方式は，もっとも複雑な換気システムの一つである．さらに換気区間延長も長いため排気口の選択といった長周期での換気計画を誤るとトンネル内環境が長時間にわたり回復しない可能性がある．

② 延長が長いトンネルであるために換気制御ソフトのチューニング，つまり壁面損失係数などのトンネル特異値の調整に数年かかることが予測される．その間に無駄な電気料金を支払うことになり，さらに得られた解が最適解ではない可能性がある．

③ 排気口を決定した後も排気口から風道へ効率よくトンネル内空気を送り込むため，トンネル内風速，交通量比，つまり交通換気力に応じ，ジェットファン(以下「JF」とする)の逆転を含めた最適な組み合わせを選ぶ必要があり，あらかじめ決められた換気機の組み合わせによる単純なノッチ制御では制御できない．

④ 従来，対面通行の換気設備の動力費は非常に高く，動力費用を抑える必要がある．

以上の条件の中，MPVCを採用することによりこれらの問題点に対応することが可能であることがわかった．

次に，MPVCの概略を説明する．図-5にMPVCの制御フローを示す．

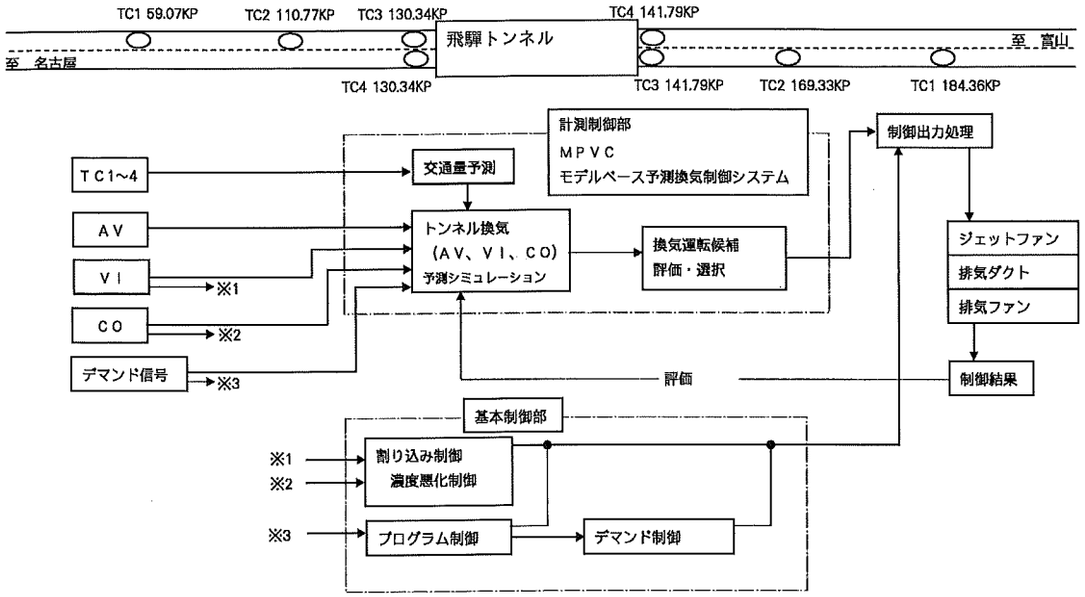


図-5 MPVC換気システムフロー

① 交通量計測装置からトンネル内交通量を予測する(交通量シミュレーション).

② 制御時点で運転している換気機の状況から移行可能なすべての換気機組み合わせを作成する.

③ 次に,予測した交通量のもとですべての換気機組み合わせ運転後のトンネル内風速値,煤煙透過率,CO濃度分布を予測する(換気シミュレーション).

④ すべての結果から管理目標値を満足し,消費電力のもっとも少ない組み合わせを選定する.

⑤ 最後に交通量シミュレーションおよび換気シミュレーションの結果を実測値と比較し,パラメータのチューニングを行う(交通リコンシレーション,換気リコンシレーション).

換気シミュレーションは,1,000通り以上の換気機組み合わせすべてをシミュレートしたとしても換気制御周期内に完了することがわかった.さらに,換気リコンシレーションを行うことによりパラメータの自動調整が可能となるため早期に予測精度の向上と動力費の削減が可能になると考えられる.

4 火災時換気運用

飛騨トンネルは,車両火災に遭遇されたお客様の避難環境確保のために煙の拡散を抑える低風速化制御を導入している.低風速化とは,お客様の避難速度以下に煙の拡散速度を抑えることを目標とし,さらにお客様の避難完了後早期に水噴霧設備の放水を開始する際には車道内風速を0 m/sにする換気制御を言う.

低風速化は,火点付近以外のJFを全台換気方向と逆に運転し急激に車道内風速を落としていくが,風速を0 m/s近傍に収束させるには,JFを順次停止させる必要がある.このタイミングが,遅れると車道内風速は0 m/sを大きく超え逆風が吹き0 m/sに収束することが難しい状況になる.このようなハンチングを起こさずに早期に風速を0 m/s付近に収束させるために初期制御後にブレーキをかけるような制御をかけることとした(図-6).この制御を実施するためには通常のフィードバック制御では不可能であり,想定できるさまざまなケースでシミュレーションを行い,あらかじめ火災時の昇圧抑制制御としてプログラムしておくこととした.このことにより,火災時には低風速化

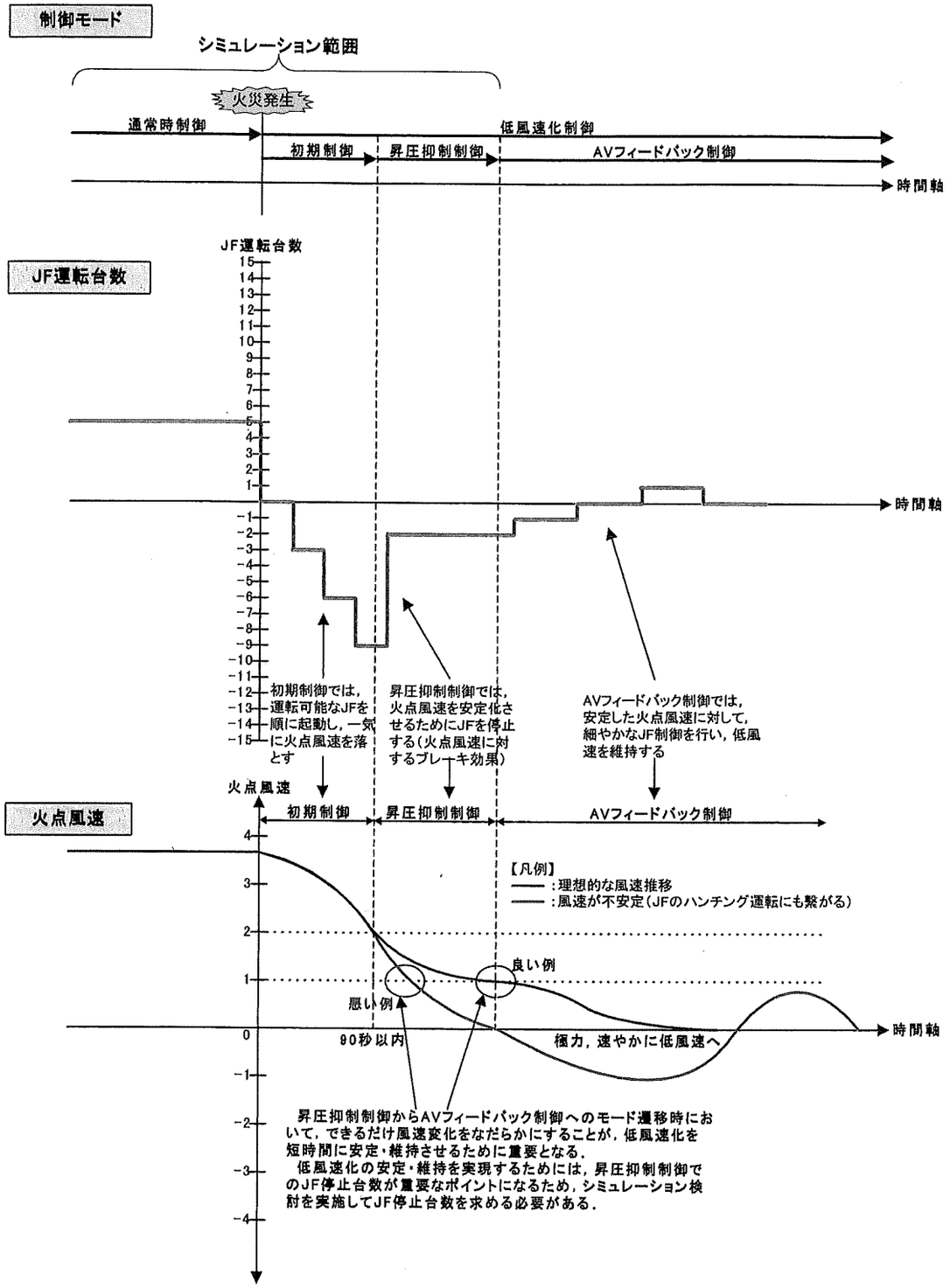


図-6 火災時制御

制御→昇圧抑制制御→風速0m維持フィードバック制御の順に移行する．

5　漫然運転防止対策

飛騨トンネルは，10.7kmにわたり単調な風景がくり返されるため，漫然運転，さらには居眠り運転による事故が想定される．しかしながら，段差などの強い刺激は，運転手のみならず同乗者，バス利用の快適性が損なわれることが考えられる．そこで，従来の実施事例に加え新たな取り組みを行った．

①　トンネル壁面への残距離表示，市町村境表示(**写真-1**)

壁面に大きく残距離を表示しトンネル内の位置を表示することにより出口を強く意識させた．

②　アクセント照明の設置(**写真-2**)

トンネル内3か所に通常の照明に加え色をつけた照明を設置．加えてマスコミにより，紹介されたため，お客様が広く知ることになり，実際のインパクト以上の役割を果たしていると考えられる．

写真-1　トンネル壁面距離表示

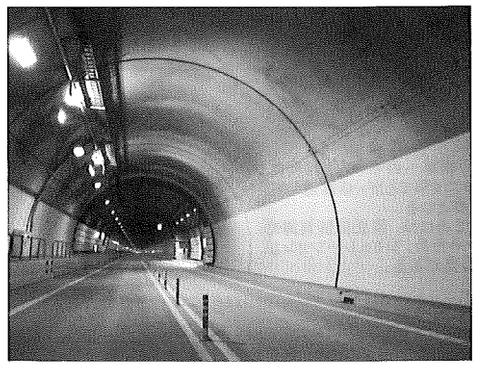


写真-2　アクセント照明

写真-3　移動文字サイン表示

③　移動文字サイン表示(**写真-3**)

トンネルの信号機付近に設置された信号機停止位置表示板に非常時以外の通常時にトンネル出口までの残距離をスクロールしながら表示させた．これは，単調なトンネル内風景では，視界中央部分の変化が少なく停止しているかのように錯覚するのに対し，故意にその部分に動く情報を入れることにより単調な視線移動に変化を持たせることを狙ったものである．

6　その他新技術・特徴的工事

6-1　IP伝送を使用したCCTVシステム

延長が長い飛騨トンネルに設置されるCCTVカメラは，110台となり従来から採用されていたPFM伝送方式ではカメラからカメラの制御装置までの光ケーブル芯線数は，カメラ台数分の110本となり，カメラの画像を集約している電気室近傍でケーブル切断事故が起こった場合にはすべての映像が消える欠点があった．それに対し，光ケーブルでループを形成したうえにCCTVカメラを接続した今回のIPループ型伝送方式は，ループ状に接続されているためにケーブルの切断事故が起きても通常と反対ルートでカメラの制御装置までの通信が確保される．また，将来的にCCTVカメラの増設をはじめとする各種センサーの増設も容易

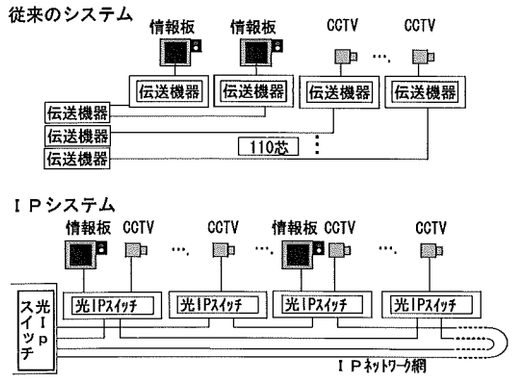


図-7　CCTVシステム

表-1　飛騨トンネル照明条件比較

項　目	基準値	千鳥配列		片側配列	
		上り線	下り線	上り線	下り線
平均路面輝度 (cd/m²)	3.2	3.2		3.24	
壁面輝度比 (路面：壁面)	1：1.5	1.54	1.56	1.51	1.75
輝度均斉度 (総合)	0.4以上	0.61	0.61	0.79	0.78
輝度均斉度 (車線軸)	0.6以上	0.80	0.77	0.88	0.97

となる．今回は，配置設備数が多く信頼性が求められるトンネル内情報盤をCCTVネットワークに乗せることとした(**図-7**)．

6-2　照明設備

高速道路上のトンネルにおける照明配列は千鳥配列が主流であるが，今回比較検討を行った結果当該区間のうち，飛騨トンネル，大牧トンネルにおいては，照明の片側配列を採用した(写真-1)．

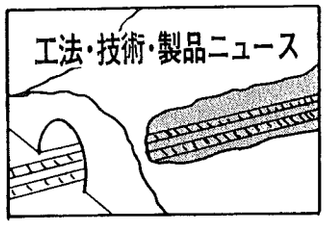
千鳥配列・片側配列での比較については，イニシャル，ランニングとも，千鳥配列に比べ片側配列が安価になった．照明条件については，片側配列のほうが，平均路面輝度，総合・車線軸均斉度が有利であり，各車線ともに千鳥配列に比べ良好なトンネル内視環境が確保できることが確認できた(**表-1**)．要因としては，①灯具取り付け高さが，従来からの一般的高さよりも高くできたこと，②東海環状道での片側配列灯具の実績をもとにした光学特性の改良，③枠なし灯具採用による照明率改善，④内装板による好影響によるものであると考える．

7　おわりに

飛騨トンネルの施設施工に関してもっとも大きな問題は工期であった．工事車両が全線通行可能になったのが平成19年の初夏(当然未舗装であった)，河合坑口で受電しトンネル内電気室，白川坑口側電気室に電気を送ったのが平成19年12月，すべての本体坑工事が終了し，舗装と施設工事に飛騨トンネルすべてが渡されたのが平成20年1月であった．例年に比べると雪が少なかったとはいうものの，積雪深は優に1mを超え，現場での最低気温もマイナス20度近くまで下がる中，夜間，休日にも作業を行い，非常に多くの業者が，順序良く自分の持ち時間を守り，設備の据え付け，配線を実施していった．ほぼ予定どおり，平成20年5月からは最後の試験調整に入ることができた．試験調整のスケジュール作りは，非常に長い時間をかけて準備をしたおかげで最短の時間で十分な確認を行うことができたと考えている．

最新技術を使った設備の紹介はたやすいが，こういったノウハウ，ソフト的な技術こそ継承が必要であるが，伝えていくことは非常に難しい．本稿を読んだ人が，もし，非常に短い工期で工事を完成させる必要があれば，是非お声をかけていただきたい．いいスタッフを紹介できると思っている．

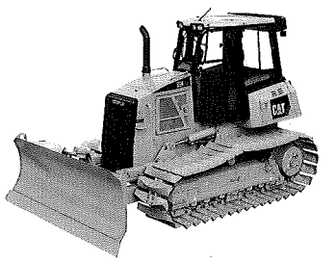
続　きみの庭にも温泉が出る
その後の温泉開発と建設の考え方
石井康夫・俣野恭寛 共著　新書判 217頁　本体定価 1,200円（〒210円）
株式会社 土木工学社　〒162-0832 東京都新宿区岩戸町16メイジャー神楽坂
電話　(03) 3267-2888 (代)　振替 00110-8-190072



中型ブルドーザ２機種を新発売

キャタピラージャパンは，中型ブルドーザ２機種を新発売した．新発売の２機種は，CAT D6K(運転質量13.5t/湿地車，写真)，CAT D6N(同17.4t/湿地車)．

容量・強度を高めた新型ブレードを採用し生産性を向上させたほか，足回りの磨耗寿命を延長する「ローリングブッシュ・トラック」を採用，ランニングコストの低減とメンテナンス性の向上を果たした．



土砂の締め固めなどに活躍するコンパクタ２機種を新発売

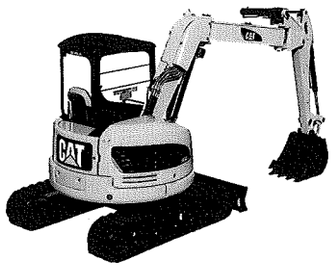
キャタピラージャパンは，CAT 815F$_2$ ソイルコンパクタ(運転質量20.8t，写真)およびCAT 816F$_2$ランドフィルコンパクタ(運転質量23.0t)を発売した．

815F$_2$は大型土木工事現場における土砂の締め固め用，816F$_2$は廃棄物の最終処分場における廃棄物の破砕・減容・転圧用の機械．

両機は環境対応型エンジンを搭載し，815F$_2$はホイールチップの変更によりけん引力や締固め性能を向上したほか，後方監視カメラの標準装備により安全性を高めた．また816F$_2$はアクスルガードの標準装備に加え，ラジエータの冷却性能アップなどにより信頼性を向上させた．

ミニ油圧ショベル超小旋回機

キャタピラージャパンは，都市土木工事などに有用な５ｔクラスのミニ油圧ショベル超小旋回機を発売した．発売するCAT 305C SR「REGA」(バケット容量0.22m^3，機械質量5.25t)は，オフロード法に適合するエンジンを搭載するとともに，建設機械の車両情報を遠隔管理可能な「プロダクトリンクジャパン・ベーシック」や専用キーで盗難を防止する「マシンセキュリティシステム」をオプション設定した．



さくさくJAWS工法

戸田建設は，小口径の分割エレメントで本体構造を先行構築する非開削トンネル技術において，補助工法なしで地下水に対応できる新工法「さくさくJAWS(ジョーズ：Joint All Water Shutting)工法」を開発し，実物大供試体を用いた地上での施工性確認試験により実用化に目途をつけた．

近年，継手付き鋼殻の分割エレメントを用いた非開削工法が実用化され，アンダーパス工事などに適用されているが，地下水位以下での従来の施工法では，補助工法として地盤改良などによる止水対策を別途行う必要があった．

補助工法なしで地下水に対応する方法としては密閉式推進工法の適用が有効となるため，同工法はこれを採用．施工ガイドを兼用する推力伝達部材に密閉式掘削機を固定して分割エレメントを間接けん引する方式を新たに考案するなどして，密閉式の問題点を克服した．また，施工時にも止水性を有する２種類の継手構造を開発し，施工条件などに応じて適宜選択する．母材と同程度の応力伝達性能を発揮できるため，分割エレメント鋼殻の本体利用による経済性を確保する．

多様断面に適合可能な掘削機構を持つシールド掘進機

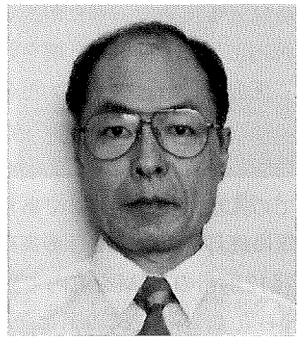
鹿島建設と川崎重工業は，多様な断面に対応でき，硬質地盤や地中障害物切削に威力を発揮するシールドトンネル掘削のためのアポロカッタ工法を開発した．

同工法は，矩形をはじめとする任意の断面を掘削することができ，円形にも適用可能．カッタ機構に高性能なカッタ位置制御機構を有しており，精度の高い掘削断面を確保する．また，カッタが高速で回転するために硬質な地盤にも適用でき，土丹・改良土，さらに松杭などの地中障害物切削への適用性を持つ．

具体的な掘削工法は，密閉型シールド掘進機先端部のメイン回転ドラム(公転ドラム)上に揺動フレームを介して回転式カッタヘッドを設置し，カッタヘッドが高速で回転(自転)しながら，公転ドラムによって公転を行うことで掘削する．

同工法は東急電鉄東横線地下化工事へ鉄道複線断面の掘削に適用が予定されており，2012年度の供用に向けて，来年の４月から掘進を開始する予定．

飛驒トンネルの施工を終えて



鈴　木　幾　雄
(元)日本道路公団名古屋建設局清見工事事務所所長
(第３代)
パシフィックコンサルタンツ(株)首都圏統括本部事業企画部技術顧問

平成20年７月，飛驒トンネルの開通によって東海北陸自動車道が全通した．私がJH清見工事事務所で仕事をしたのは平成７年７月～10年６月までのちょうど３年間であったが，それから10年が過ぎたことになる．今思うとこの10年はJH関係者にとって変化の激しい時代であった．

まず第一に，JHが分割民営化されて高速道路建設の枠組みも随分変わった．民営化の過程はJH関係者にとって苦悩に満ちたものであったが，ちょうどそのころ飛驒トンネルの工事も難航を極め，工事関係者にとって苦難の日々が続いていた．私自身はといえば，この間にJHを退職して一線を退き，残念ながら気力，体力ともに確実に衰えたという感がある．これらの事情を重ね合わせてこの10年を振り返ると，なかなか困難な時代であったとの思いが深く，一昔前の古き良き時代が殊更に感慨深く思い出される．

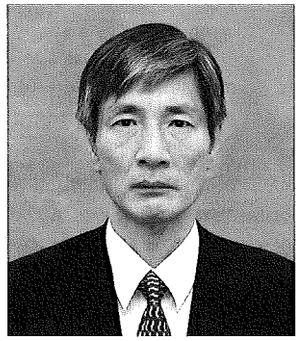
私が赴任した当時，「飛驒トンネル」は「天生(あもう)トンネル」と呼ばれていた．籾糠山直下を貫くトンネルだから，本来なら籾糠山トンネルと呼ぶところだが，工事前のトンネルの名称としては不吉な響きを持っている．トンネルの近傍には天生湿原や天生峠があるが，天生峠は泉鏡花の「高野聖」の舞台になったところでもある．また，この地方にまつわる興味深い民話なども数々あり，由緒ある名前であるうえ，語感も良いことから，私自身「天生トンネル」には未だに愛着を持っている．

さて，飛驒トンネルは平成８年に避難坑工事発注，その１年後に本坑工事発注となるが，私が赴任した平成７年当時の最大の課題は，どんな工法を採用するかということだった．当時第二東名のトンネルでは直径５mのTBMが標準工法として採用されようとしており，飛驒トンネルの避難坑をTBM工法とするのに異論はなかった．問題は本坑工事であったが，経済性，施工の確実性などを比較検討して最終的に大断面TBM工法を採用することになった．

開通を迎えた今となってみると，かなりの難工事だったこともあって，当時の選択は果たして正しかったのであろうかという疑念もおのずから湧いてくる．しかしこの疑問は，例えば結婚に対する疑問と似ているのではないか．生涯の伴侶として選択した当初の決断が間違っていたのではないかという疑問である．女性の心は移ろいやすく計り難い．山の神もまた然りである．未来のことをすべて正確に予測するのは困難であり，そもそも籾糠山はどんなトンネル工法に対しても牙をむいたに違いない．

10年にも及ぶ工事期間中に，さまざまな困難を克服して数多くの技術的知見が蓄積されたことと

思う．これらの貴重な技術は，今後どのように継承され，どのように活用されるのであろうか．かつて膨大な事業量をこなしていたJHは常に新技術に挑戦し，新工法を開発してトンネル技術の発展を支えてきた．今，JHは分割し民営化されて，トンネル技術者も３社に分散した．それに加えて，トンネル建設の需要も激減した．JHがこれまで培ってきたトンネル技術をNEXCO総研が引き継ぎ，来るべき外環建設時にその実力を遺憾なく発揮されるよう期待している．



山　田　隆　昭
(元)日本道路公団名古屋建設局清見工事事務所所長
(第４代)
(株)ネクスコ東日本エンジニアリング常務取締役

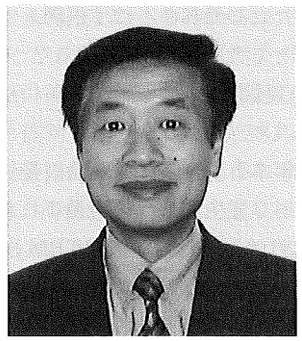
平成10年６月16日，清見工事事務所長の内示をいただき，ついに飛騨トンネルの掘削に直接携われることへ胸のときめきを押さえきれないとき，事務所から順調に進んでいたはずの避難坑TBMが急に止まったという連絡が入った．これを皮切りに自然との闘いが始まり，結局，私が赴任していた５年間はノックアウトの連続であった．

苦労した濃飛流紋岩は，火砕流が固結した凝灰岩の一種であり，岩片は堅いが固結度が低いとすぐに崩壊し，恵那山トンネルでも大苦戦した地質であった．坑口の花崗岩から濃飛流紋岩へ変わろうというときに，水とともに切羽が崩壊し避難坑TBMへ流れ込んできたのであった．土かぶりが300mを超えると切羽崩壊に加えTBMが拘束されるようになり，600mになると切り拡げをして再発進しようとしても全く動かない状態でNATMへ切り替えざるを得なくなった．不良地山においては土かぶりの影響をつくづく感じた次第である．土圧以上に正直なのは水圧である．土かぶりの増加に伴い水抜きボーリング孔から高圧水が噴出してくるようになり，水圧低下には先進の水抜き坑を掘るしかすべがなくなってしまった．吹付けコンクリートが付くはずもなく，矢板工法である．私も入社当時は矢板工法であったが，ご無沙汰である．狭い坑内で大雨の中，H形鋼を建てて矢板を送っていく坑夫さんの苦労は並大抵のものではなかったであろう．結局，避難坑1.7km区間は不良地山の応力解放による大変位と切羽崩壊および亀裂性地山での大出水のくり返しであり，平均月進35mで４年の歳月を費やしてしまった．

本坑は直径12.84mのTBMを坑内で巨大なドームをつくり組み立て，平成12年９月に発進式を行った．避難坑が苦戦を強いられていたが，もうすぐ地山が良くなると信じており，全断面で掘削はできないが中央導坑をNATMで堀りTBMでリーミングする計画を立てていたのである．しかし，避難坑の地山は悪くなるばかりでこの計画は無に消えたのである．私の夢でもあった大断面TBMの掘削も同時に消えてしまった．本坑はNATMでの掘削となったが，避難坑と同様に大変位と切羽崩落に悩まされ，上半底設導坑の施工を余儀なくされた．また，避難坑だけでは完全な水抜きとならず，本坑を挟むように水抜きの作業坑を掘削することになった．この作業坑は大きな効果を上げた．水抜きだけでなく作業坑から本坑の切羽を立ち上げ，工程短縮に大きく寄与したのである．

こうして思い出すと，自然の力の偉大さに感服する．1,000m上空と地下では全く違う．大土かぶりトンネルは，自然の原理に逆らわず，水圧がなくなるまで水を抜くこと，地山強度が小さい場合は断面分割も考えること，長大トンネルになるときは作業坑を設けることが重要だと痛感している．地質屋さんには探査に頼らず地道に地表地質踏査を行ってもらいたいし，土かぶりを考慮した地山評価をお願いしたい．

最後に，本当に苦労され作業にあたっていただいた方々，技術的支援をしていただいた足立委員長はじめ技術検討委員会の委員の皆様に感謝申し上げるとともに，この飛騨トンネルが地域の発展につながることを祈念している次第である．



寺　田　光太郎
(元)中日本高速道路(株)名古屋支社清見工事事務所所長(第５代)
中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋(株)羽島道路事務所所長

東海北陸自動車道の飛騨トンネルの施工に携わったのは，2003年７月の真夏の時期であった．着任早々先進坑の切羽に赴いたとき，TBMは拘束されており，坑夫さん達はまるで滝の中で作業をしている状態で，作業員の方はみなウエットスーツを着込んで作業している姿には頭が下がる思いであった．大変な現場に着任した思いが過った．それから完成まで約５年間を要するとまでは，この時点では知る由もなかった．

トンネルの貫通から開通までの思いを振り返ってみたい．

兵どもの夢の跡

開通まであと三十数日に迫ったある日，完成した飛騨トンネルを河合から白川に向けて走ってみた．当日は入梅宣言が出された日でしとしとと雨が降りしきるなか，トンネルの坑口に入った瞬間パッと急に明るくなり，まるで何かドームの中に入り込んだようだった．

トンネル内は既にコンクリート舗装ができあがり路面の白さと，内装版を照明が照らし出される明るさであった．

車を進めていくと火災検知器，水噴霧，テレビカメラなどの道路を守るための安全設備が既に整備されている．トンネル内にはお客様が安全に安心して走行していただくために，これらの設備が適切に機能するかをテスト中であった．

さらに車を進めるとここでトンネルが変状したところかな？　ここはTBMが貫通したところとで貫通式典を執り行った場所かな……．当時の苦労を思い出しながら車窓を眺めていると，当時のことがまるで走馬灯のように思い出されてくる．個人的であるが，この現場を最後に開通とともに会社を卒業していくことを思い浮かべながら，眺めて走っているとなんとなく目頭が熱くなって，梅雨時のようになんとなく湿っぽくなってきた．

開通してしまえば約11kmを約10分足らずであっという間に通過してしまう．しかし，工事に携わった人々にはまさに「兵どもの夢の跡」の心境であった．あっ！　ステション295付近だ．この位置は着任間もないころに小泉総理を案内した思い出の場所であった．またここから全断面TBMが満を持して船出した位置でもあった．

心暖まるエール

平成16年夏ごろにようやくTBMが稼働したものの順調とは言いがたく，まさに一進一退をくり返していた時期でもあった．本当にこのTBMで掘れるか？　何事も初めて経験であり現場の雰囲気は不安と焦燥感が漂っていた．

このような閉塞感に苛まれていた時期にトンネル技術者の大家でありNATMの導入時の功労者でもある桑原章次氏から「トンネルと地下」の巻頭言に『常に新しい技術をもとめて』と称して，飛騨の山中でTBMで悪戦苦闘している様子であるが，「このプロジェクトに参画している技術者は日夜技術改革に奮戦していることであろう．このプロジェクトが完成した暁には，必ずや今までより数段アップした技術やノウハウが生まれるものと信じている」と，将来の技術革新に向かって

の「マッハの壁」であるとの心強いエールを送っていただいた．

自問自答

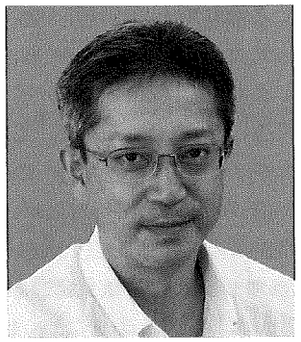
飛騨トンネルにチャレンジして約10年の歳月を要しての完成であった．施工を振り返って，当初は全線にわたってほぼTBMで掘進する計画であった．しかしTBMの施工実績としては先進坑が全体の約65%，本坑にいたっては約40%の実績である．

飛騨トンネルに，世界最大級のTBMを採用したことが本当に妥当だったのか？　また日本の複雑な地質・地形に2車線の全断面TBMが適用できるか？　常日頃自問自答をしていた．

しかし，苦節苦難をしてトンネルを完成したことを一般の方々に知っていただくために『秘境を貫く・飛騨トンネルの物語』をとりまとめるにあたり，関係者にヒアリング取材した時，いつも切羽の最前線でTBMと一身一体となって日夜をともにしていただいたKさんに「飛騨トンネルの二期線を掘るとしたらNATMで掘る？　TBMで掘る？」との質問に彼はすかさず，「所長，ぜひTBMで掘らしてください……」

また，長年本トンネルの施工検討委員会でご指導を賜った足立先生からは「所長これだけの実績を残せば成功だ，そして今後はTBMとNATMのハイブリット工法として生かされていく」

この二つの心強い言葉を最後に飛騨トンネルの施工報告を閉じることにします．



松　原　利　之

(元)飛島建設(株)・鉄建建設(株)飛騨トンネル工事共同企業体所長(第4代)
飛島建設(株)土木事業本部土木技術部トンネル技術グループ部長

平成20年7月5日，飛騨トンネルを含む飛騨清見IC～白川郷IC間が供用開始の日を迎えた．施工当時，矢継ぎ早に迫られる課題とその善後策に翻弄され，貫通・開通を期待しながらも，その情景を想像することさえできなかったことを思うと感慨深いものがある．

施工中，予定工程が大幅に超過するなかで未だ長い残延長を残し，危急の対応を迫られる場面が数多くあった．施工中に顕在化した事象は，往々にして背景に存在する大きな自然の力の一表現でしかない場合が多いのではないか．直面しているトラブルの規模やその先の地質情報が見えないなかで，有効な対策が見当たらず，試行錯誤で解決策を見出さなければならないことが，技術的にも精神的にも大きな圧力になっていたように思う．こうしたなかで結果的に見て，先進坑の施工の成否を左右した，大きな選択の場面が3度あったと思う．

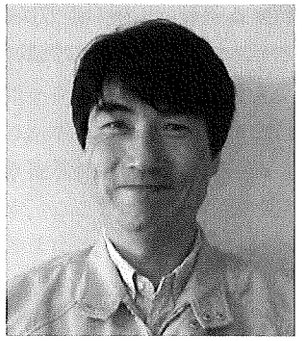
1度目は，進行2,000m地点でTBMからNATMへの変更を行ったこと．NATMによる掘削は，森茂断層下での予想以上の地山劣化もあり，結果的に700mの延長に約2年を費やした．当時予定の進行が捗らないことに対して，非常なジレンマがあったことは事実であるが，仮にTBMでの施工を続行した場合，拘束と脱出をくり返しながらの施工は安全面でも，労務管理の面からも厳しい状況に置かれたものと想像できる．工法変更時点ではまだ確信できなかったTBMの地質性状に対する適応性の限界についても明らかになったものと思う．

2度目は，3,000m地点での大量湧水帯に遭遇した際の対策工決定のとき．当時TBM前面切羽が大きく崩壊し，切羽に10 t/minを超える湧水が集中していた．このとき，両側に水抜き坑を掘り，さらに水抜き坑から長短さまざまなボーリングを施工することで，切羽に集中した湧水をかわし崩落部の改良注入を可能とした．これら対策工の即決は工費・工期の面からみても重い判断であったと思うが，そのかいあって4か月という，トラブルの規模に比して短い期間でこの区間を切り抜けることができた．またこの時同時に，濁水処理設備を先進坑だけで1,200 t/hの処理能力に増強したことで，その後の排水量の漸増に対し，躊躇なく掘削できる体制となった．このときの一連の施工経験がその後の湧水対策工の指標になっている．

3度目は，河合方からの迎え掘りの採用である．河合方からは，途中の中断を経て計3,400m強の掘削を行った．TBMが掘進不能に至った白川方TD7,400m地点に達した時点では，河合方からの掘削がTBMの300m地点にきていたことで，飛騨トンネル全体工程に対する影響を最小限に抑えることができた．もし迎え掘りがなかったら，貫通は少なくとも3年遅れることになった．工事全体から見てもこの判断が飛騨トンネルの雌雄を決した感がある．

飛騨トンネルが難局に立つごとに発注者，施工業者を交え，真摯に技術論を展開しながら工法決定を行ってきた．とくにNEXCO中日本技術陣，施工技術検討委員会委員各位の大局的な視野に立った英断に敬意を表する．

飛騨トンネル河合方の施工基地であった河合PAに「均霑(きんてん)の道，飛騨に至る」と記した記念碑が置かれている．あまねく平等に恩恵のいきわたる「道」がようやく飛騨の地に通じた，当地の人々の感慨と喜びが表れている．大都会の，高度な効率性を求めた結果の，複雑に輻輳した構造物ではない，ただ一筋に走る道に，そこはかとない機能美を感じる．



小　林　伸　次

(元)大成建設(株)・西松建設(株)・佐藤工業(株)飛騨トンネル工事共同企業体所長(第2代)
大成建設(株)土木本部土木技術部トンネル技術室次長

平成11年4月に飛騨トンネル本坑工事に従事し，平成20年3月の竣工まで常に新たな課題に対応する日々であった．本坑の施工を振り返って見ると，TBMの坑内組み立てのための約450m²に及ぶ基地の掘削，先進する避難坑工事の情報により本坑TBMの発進位置の度重なる変更，複雑に絡み合う断層起因による熱水変質を受けた脆弱地山でのTBM移動断面の掘削，600m近い大土かぶり下での森茂断層帯の大変位区間の掘削，大量湧水区間の作業坑の先進掘削，早期貫通に向けての迎え掘削の実施，そして，本坑大断面TBMの掘削と作業所職員全員が比類ない施工に日々挑戦する工事であった．

当初の本坑工事の施工は，TBM組み立て用の組み立て基地を坑内に掘削，平成11年末よりTBM組み立てを開始し，平成12年9月TBM発進式を行った．当初TBMで施工を予定していた地質は，先進する避難坑の施工状況から前方にTBM掘削に適さない不良地山存在が確認されたため，在来掘削工法であるNATMに切り替え，TBM発進を断念した．その後，避難坑工事からの情報により，その2工事が発注され，予定されたTBM発進位置までの掘削を行ったが，再度先進する避難坑工事の施工状況より，発進位置を良好地山まで変更した．地山状況の変更に伴い早期貫通のため，河合側からの本格的な迎え掘削も開始した．

その2工事では，不良地山および大量湧水帯を突破するため，本坑から将来換気坑となる作業坑を本坑と併進することとなった．先進する避難坑と作業坑の水抜き効果および，断層破砕帯と思われる脆弱帯が抜けたことにより，STA.395＋00より全断面TBMを開始することとなった．発進位

置が決まり早期TBM発進のため，作業坑より本坑に切羽を追加し最大５切羽掘削を行い平成16年１月にTBMを発進し，その３工事が開始された．

TBM掘削を開始した当初は，切羽の自立性がきわめて悪く切羽崩落によるカッタヘッドの回転不能が度々発生した．１日1,500m³以上掘削可能なマシンの中に作業員が何人も入りバケツリレーでカッタヘッド内に堆積した土砂を人力で撤去しなければならず，最新機械を使用しながら苦しい作業を作業員に強いることとなってしまった．また，切羽崩落はマシンへの過大な負荷がかかり，作業坑よりTBM前面に出て大規模メンテナンスを２回行った．平成17年７月その４工事発注時，早期貫通に向けTBM掘削と河合側掘削の延長が決められたが，平成17年９月貫通予定点より約200m白川側で避難坑TBMが拘束され水圧，地圧により破壊された．このことにより，河合側掘削を避難坑TBMの拘束された付近まで延長し，地山確認を行うこととなった．また，当該不良地山をTBM掘削するため調査導坑を掘削し地山確認を行うこととした．

平成17年12月31日にTBMが調査導坑に到達し平成18年１月13日に貫通式を迎えた．その後TBMによる切り拡げ掘削を行っていたところ，河合側到達4.5m手前で湧水とともに地山崩壊が発生し，TBM掘削不能となってしまい河合側より地山補強を行い，トンネル掘削が完了した．最後まで計画どおりに進めさせてはもらえない山であった．

山岳トンネルで積極的に発生する危険を防止するには危険要素である地山全体をガードし作業員が地山と接しない環境を作ることができれば山岳トンネルの安全性は飛躍的に向上する．今回のTBM掘削延長約4.3kmは一部，試験施工区間の20m程度を除きすべてRCライナーを用いる方法での掘削となりこの区間は上記の環境を作業員に提供できた．大土かぶりでの新規トンネル掘削工事は，まさに闇夜の中を手探りで進んでいるようなもので先行する避難坑工事の苦労は大変なもので無事貫通させ本坑掘削に多大な貢献をされたことに深い敬意を表します．

本誌に掲載された「東海北陸自動車道　飛騨トンネル」に関する文献

寺田光太郎・川北眞嗣・小林伸次・松原利之：不良地山・高圧大量湧水との闘い(不良地山編)，東海北陸自動車道　飛騨トンネル，Vol.35，No.8，pp.17–25，2004.8.

寺田光太郎・川北眞嗣・小林伸次・築地功：不良地山・高圧大量湧水との闘い(大量湧水編)，東海北陸自動車道　飛騨トンネル，Vol.35，No.9，pp.15–25，2004.9.

森山守・寺田光太郎・松原利之・築地功：土かぶり1,000m 6MPaを超える高圧湧水下で貫通，東海北陸自動車道　飛騨トンネル先進坑，Vol.38，No.2，pp.17–24，2007.2.

森山守・寺田光太郎・小林伸二：世界最大級(φ12.84m)のTBMで地下1,000mを掘削(設計編)，東海北陸自動車道　飛騨トンネル本坑，Vol.38，No.10，pp.15–25，2007.10.

森山守・寺田光太郎・小林伸二：世界最大級(φ12.84m)のTBMで地下1,000mを掘削(施工編)，東海北陸自動車道　飛騨トンネル本坑，Vol.38，No.12，pp.15–24，2007.12.

森山守・寺田光太郎：繊維補強型RCライナーの継手部耐火性能評価，Vol.39，No.6，pp.43–53，2008.6.

連載講座

山岳トンネル先進ボーリング入門(３)

—ボーリング機器とその性能(２)—

山岳トンネル先進ボーリング連載講座小委員会

前号では，掘進工法から穿孔機までを紹介しましたが，今回の後編では，ボーリングツールス(ロッド，ビットなど)から特殊な掘進工法，原位置試験までを紹介します．

ボーリングツールスはアメリカ規格(DCDMA)が基本となっていますが，わが国で開発されたものも多くあり，多種多様と言ってもよいでしょう．

ツールスは単なる掘進のための材料と思いがちですが，ボーリングの工法や穿孔機に応じて適・不適があり，さらには材質やその加工精度の良否などにより掘進能率に著しい影響を与えることにもなります．ここでは，一般的に使用するボーリングツールスについて紹介いたします．

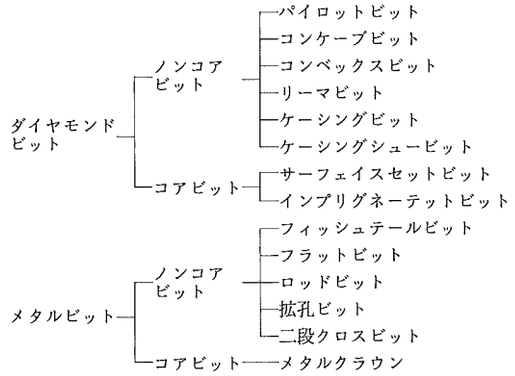


図-17　ビットの分類

⑤ ビ　ッ　ト

ビットは掘削ツールスの最先端に取り付けられ直接地盤を掘削するものです．ビットの刃先には，硬岩や中硬岩掘削用としてダイヤモンド(工業用ダイヤモンド：天然産出)を植え付けたもの，軟岩や土質調査用には超硬チップ(メタル)を植え付け，硬質合金で溶着したものなどがあります(図-17参照)．

5-1　ダイヤモンドビット

ダイヤモンドビットは，諸物質中でもっとも硬いダイヤモンドを刃先としたビットで岩石掘削に適しています．当初はブラックダイヤモンドの手植えでしたが，現在はボルツ(工業用ダイヤモンド)の機械植え付けがほとんどです．ボルツは，ブラックダイヤモンドに比較して粘りは劣りますが硬さはむしろ優れており，そのうえ比較的多量に産出することから価格はブラックダイヤモンドより安く入手でき，南アフリカ・西アフリカ・ブラジルなどが主たる産出国です．ダイヤモンドの硬度は諸物質中最高で，石英の10倍，タングステンカーバイトの６倍，靭度においては石英の６倍，タングステンカーバイトの４倍も示すため岩石を切削する最高の材料といえます[1]．

5-1-1　ダイヤモンドビットの種類

ダイヤモンドビットの中でもっとも多く使用されているのは，コアビットでその中でもサーフェイスビット(略して，「サーフェイス」と呼ぶ)とインプリグネーテットビット(略して，「インプリ」と呼ぶ)です[1](図-18参照)．サーフェイスの特徴は表面にダイヤモンドを植え込んであるため，摩耗したらリセットができます．リセットとは摩耗して角が丸くなったダイヤモンドをすべてビット

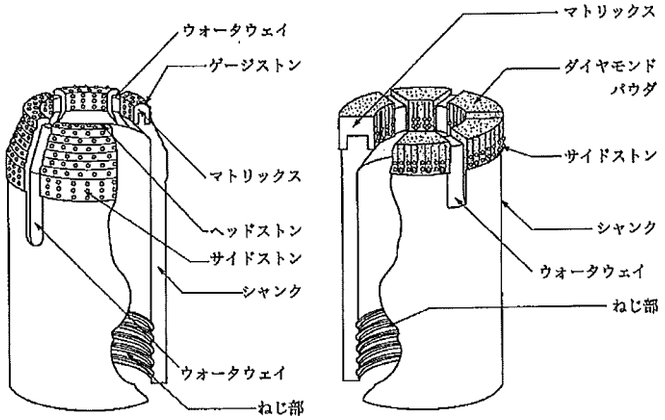


図-18　ダイヤモンドビットの各部名称

の台座(シャンク)からはずして，角のある面を表面に向けて植え替えることを言います．それでもすべてのダイヤモンドを植え替えられるわけではなく，その時点で処分しなければならないものもあり，その分に新しいダイヤモンドを補充します．この処分するダイヤモンド量の割合を損耗率と言っています．

インプリの特徴はダイヤモンド粉末がマトリックス中に散布されているため，ダイヤモンドの摩耗とともにマトリックスも摩耗するため，常に新しい切刃が得られますが全損していくためサーフェイスのようにリセットはできません．そのかわり，サーフェイスと比較して価格も安くなっています．

5-1-2　マトリックス

サーフェイスもインプリもダイヤモンドを把握している重要な役目をなしているものにマトリックスがあります．このマトリックスとはダイヤモンドを強固に把握する部分で，粉末冶金法で作られる耐摩耗性合金です．その成分はタングステン・銅・ニッケル・コバルトなどであり，対象とする岩石に対し，耐摩耗性の大きいこと，靭性のあること，セットしたダイヤモンドを十分把握するなどの使命があります．マトリックスの硬さは，ロックウェルCスケール(HRC)で10～15度くらいであり，切削する岩質に応じてもっとも適した硬度のものを選択する必要があります[1]．ダイヤモンドビットは，軟岩より硬岩のほうがよく切れ，軟岩ではスライム(錐粉)もやわらかいためにマトリックスを削ってくれないため，切れ味が悪くなるわけです．

5-2　メタルビット

メタルビットはビットの台座(シャンク)にメタル(超硬合金)を植え込んだものの総称で，一般に軟岩・砂礫層・軟弱地盤の掘削に使用されています．

5-2-1　メタルビットの成分

超硬合金の化学成分はタングステン・炭素・コバルトで，これらの原料は数μm以下の微細な粉末であり，主成分のタングステンはあらかじめ炭素と混合加熱し，水素ガス中において高温度で炭化させます．これを粉末にしたのちにコバルト粉末を加え，よく混ぜ合わせて1,350～1,480°Cの高温で焼結して作ったものです．超硬合金の硬さや抗折力などの特性はコバルトの含有量と炭化タングステンの粒度に大きく左右され，コバルトの含有量が増せば抗折力は上昇しますが，硬さは低下します．逆にコバルトの含有量が減少すると硬さは上昇しますが抗折力は低下することになります．また，炭化タングステンの粒度が大きくなれば抗折力は上昇するが硬さは低下することになり，粒度が小さくなれば硬度が上昇し抗折力は低下することになります．超硬合金の選択はビットの種類・掘削地質に応じ超硬合金に衝撃がかかるか，耐摩耗性が強く要求されるかによって異なることになります．チップの形状および寸法は種々製作されていますが，一般的なメタルクラウンには，5×5×8または，6×6×9の寸法のものが使用されています[1]．

5-2-2　メタルビットの種類

メタルビットは，ダイヤモンドビットと同様にコアビットとノンコアビットに大別されます[1]．

(1)　コアビット(メタルクラウン)

コアビットは，コア採取の目的で使用されるものでブランククラウン(シャンク)にメタル(超硬合金)を植え付けたもので土質から軟岩の調査には不可欠のものです．ダイヤモンドビットと同様

にストレート型・ベベルウォール型さらにはダブルコアチューブ用などのさまざまな種類があります(写真-4参照)．

(2)　ノンコアビット

回転切削によるボーリングはコアの採取をできることが大きな特徴の一つですが，一般にコアの採取が困難な地層やボーリングの目的がコアを必要としない水抜き孔・発破孔・通気孔・ガス採取孔などの場合には強いて時間と費用をかけてコアボーリングをする必要がなく，一般にノンコアビットで迅速に掘進することが多くあります(写真-5参照)．ノンコアの場合はコアバーレルを使用しないので，ビットはボーリングロッドに直接取り付けて使用するため，接続ネジはボーリングロッドと同一寸法のネジになっているものが多くあります．ノンコアビットの代表的なものについて以下に紹介します．

①　フィッシュテールビット

主として軟質地層・砂利層の掘削に使用するビットで魚の尾のような形をしているので魚尾形ビットとも呼ばれ，刃先には超硬チップを植え付け，硬質合金で溶着しています[1](図-19参照)．

②　フラットビット

主として軟質地層・軟岩の掘削に使用するビットで，形状は先端が平らで，刃先に超硬メタルを植え付けています[1](図-20参照)．

③　ロッドビット

発破孔やグラウト注入孔などの掘削に使用するビットで，形状は肉厚円筒状でロッドに

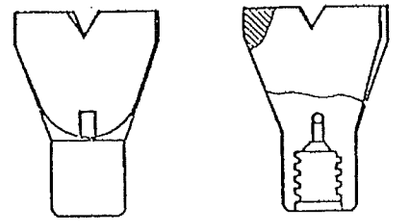


図-19　フィッシュテールビット

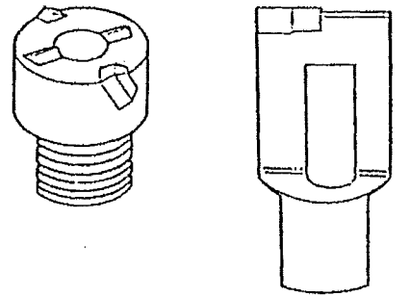


図-20　ロッドビット(左)とフラットビット(右)

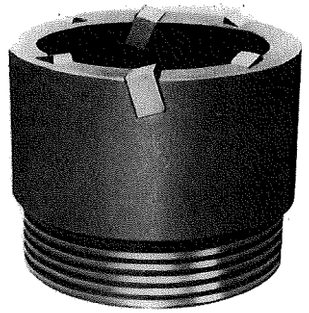


写真-4　コアビット(メタル)

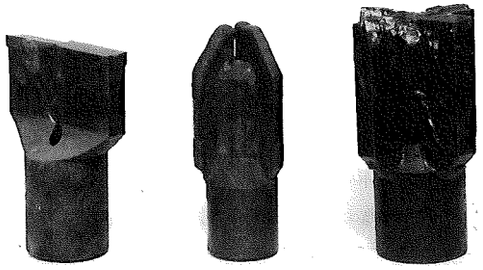


写真-5　ノンコアビット(メタル)

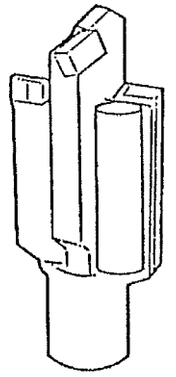


図-21　拡径ビット

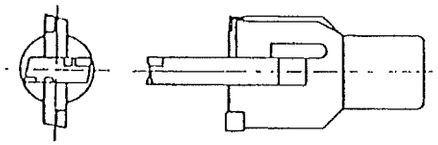


図-22　2段クロスビット

接続して使用します．刃先には超硬チップを植え付けてあり，チップのセット外径はボーリングロッドの外径よりやや大きくしてあります[1](図-20参照)．

④　拡孔ビット

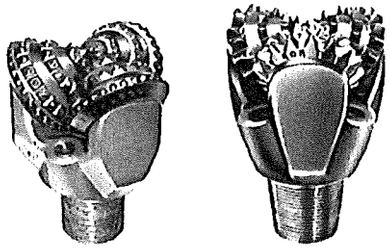
拡孔ビットは掘進された孔を拡径するビットで，形状はビットの先端にガイドがついており，切削面には超硬チップが植え付けてあります[1](図-21参照)．

⑤　二段クロスビット

主として，軟質地層・砂礫層・軟岩などの掘削に使用されるビットで径の異なるフラットビットを互い違いに組み合わせた形状をしており，先端のビットで掘った孔が案内になり次に大形ビットで拡孔するので振動が少なくて掘進能率がよい利点があります[1](図-22参照)．

5-3　トリコンビット

トリコンビットは，1/3個のレッグにコーンを組み立てることにより1個のビットとし，最後にネジ加工して完成させるもので，各レッグにはコーン形のカッタを取り付け，このカッタの外周に互いに干渉しないように配列された歯が切ってあります．軟岩用の歯形と超硬チップを圧入した硬岩用とがあり，カッタの内面はローラ・ボールおよび軸受けで回転(自転)できるようになっており，ローラおよび軸受けはラジアル荷重を，ボールはラジアルおよびスラスト荷重を受け止めるようになっています．コーンは個々に自転するのと同時にビット全体の公転と合わせて岩石を全断面掘削する機構になっています．歯形タイプ(ツースタイプ)の刃先には硬質合金を溶着して耐摩耗性をもたせてあり，歯形は対象岩石により歯の粗さや形の異なったものがあります．硬岩用のチップインサート型もツースタイプと同様に対象岩石によりチップ形状の変えたものがあります[1](**写真-6**参照)．



	圧縮強度(kgf/cm²)	使用タイプ
軟　岩	500以下	歯形
中硬岩	500～1,000	歯形，チップインサート型
硬　岩	1,000以上	チップインサート型

写真-6　トリコンビット

⑥　ボーリングロッド

ボーリングロッドは，ボーリングマシンの回転と給進力をビットに伝えると同時にビットに流体を供給し，ビットの冷却やスライム(錐粉，カッテングスとも言う)を地上に運ぶための送水管の役目をなしています．ボーリングロッドの一般的な長さは3mとされていますが，深い孔の掘削には何百本も継いで使用するため，孔中では孔壁に接触して叩かれたり，くの字形に曲がったまま回転するなどが考えられることから，引張り・圧縮・捩り・曲げ・衝撃などの荷重が加わり，さらには疲労・摩耗・腐食などの現象が起こることになります．これらの環境中で使用されるためボーリングロッドの材質は良質な引き抜き鋼管(シームレス管)が使用されているわけです．

〈引き抜き鋼管と電縫鋼管〉

鋼管には鋼板を丸めて長さ方向に溶接して作成した(シーム管または電縫管)継ぎ目のあるものと，スチールが溶けた状態から直接引き抜いて作成したもの(シームレス管)があり，ボーリングで使用するのは継ぎ目がなく強度の高い引き抜き鋼管(シームレス管)です．

6-1　ボーリングロッドの種類

ボーリングロッドには，構造的な分類としてパラレルロッド，アプセットロッド，フラッシュジョイントロッドに大別されます[1]．

6-1-1　パラレルロッド

ロッド全体が同一な肉厚のロッドであり，もっとも標準的なロッドで鋼管の両端にメスネジを加工しカップリングで接続して使用する形式です(**図-23**参照)．

6-1-2　アプセットロッド

ロッドでもっとも強度の弱い両端部のネジ部を肉厚にしたロッドで，チュービングロッドとも呼ばれ大深度掘削(石油，地熱，温泉など)で使用されているのがこのタイプです(**図-24**参照)．

6-1-3　フラッシュジョイントロッド

この方式は，カップリングを使用せず鋼管の一方にメスネジの加工を行い，反対側にオスネジを加工し，鋼管のみで接続して使用するものです．WLロッドや水平ボーリング専用のシールドパイプはこの構造のもので，内径が同一径でストレートになります(**図-25**参照)．

6-2　ボーリングロッドの材料

ボーリングロッドの材質は，ロッドの使用条件から特殊な材質のものが使用され，引張り強さ・降伏点・伸びなどにおいて高度のものが要求されています．ボーリングロッド材は，JIS規格により規定されており，JIS G 3465試錐用継目無鋼管(シームレス管)またはそれと同等以上のものとされており，種類および機械的性質はJISで**表-2**のように規定されています．

表-2　ロッドに使用する材料の機械的性質

種類の記号	引張試験		
	引張り強さ (N/mm²)	降伏点または耐力 (N/mm²)	伸び(%) 11号，12号 試験片
STM－C540	540以上	—	18以上
STM－C640	640以上	—	16以上
STM－R590	590以上	375以上	18以上
STM－R690	690以上	440以上	16以上
STM－R780	780以上	520以上	15以上
STM－R830	830以上	590以上	10以上

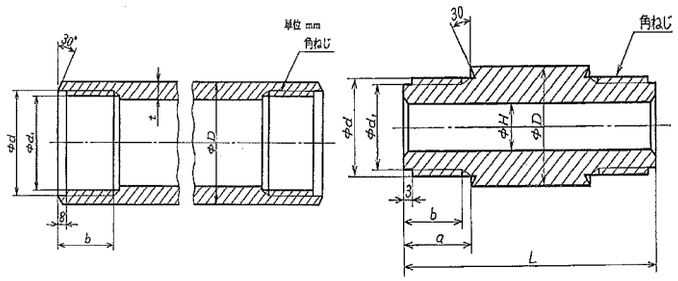


図-23　パラレルロッドとロッドカップリング

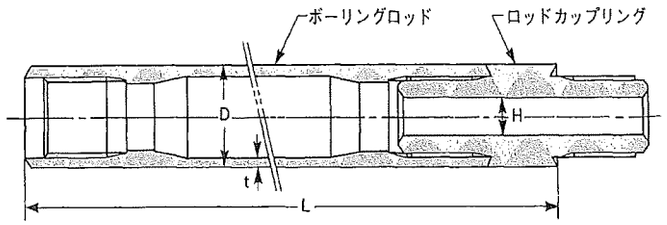


図-24　アプセッドロッド

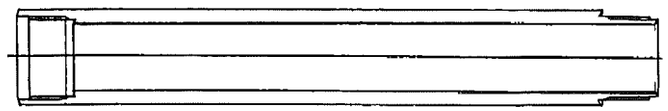


図-25　フラッシュジョイントロッド

6-3　ロッドの切断事故

ボーリング作業の中で発生する事故の大部分は，ボーリングロッドが抑留(いわゆるジャミング：喰い締め)され，それを回復させようとしてロッドの強度より高いトルクで穿孔機に回転を与え切断に至るものです．したがって，事故を起こさないためには，オペレータがロッドの強度からその管理まで熟知していなければなりません．

ボーリング孔内の状況は，掘進に伴う軌跡の形状，地圧の強弱，岩質の硬軟，孔壁の自立状況など複雑に変動し，ボーリングロッドに引張応力，捩り応力，回転曲げ応力などをくり返し受けることになります．

金属材料はくり返し応力を受けたとき破壊しない応力の限界があり，これを疲労限界と言い，金属材料はこの疲労限界に達すると金属組織内の結晶粒にすべりが起こり引き続いて割れ目が発生し，疲労損傷の進行が止まらなくなります．その結果，貝殻破面を残し完全に破壊切断されるという現象が起きます．これが金属の疲労破壊と言われている現象です．ロッドの切断事故はその形状からWLロッドやシールドパイプで代表されるパラレルロッドがもっともネジ部が弱く，とくにメスネジの付根で発生することが多くみられます．ロッドのネジ部の状況を確認す

る方法には，磁粉探傷試験や片持ち回転曲げ疲労試験などで疲労損傷度を計測する方法はあるものの，実際にそのような管理をするのは不可能と言っても過言ではありません．したがって，オペレータがロッドネジ部の強度に対する知識を十分に持つことが大切であり，切断事故を防止するためには延べ穿孔時間や掘進給圧などの管理をいかに行うかにかかってくるわけです[2]．

⑦ ケーシングツールス

7-1　ケーシングチューブ

ケーシングチューブは，軟弱地盤および亀裂・崩落地層の掘削において崩壊による事故防止・逸水・湧水・ガス噴出などの障害防止のための孔壁を保護するためのパイプです．また，円滑な掘削を図りロッドの損耗を防ぐためにも多く用いられています．

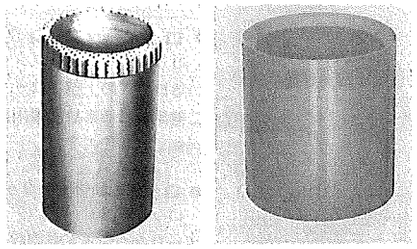
ケーシングチューブを使用する場合，まずケーシングをどのように使用するかを計画しなければなりません．ボーリングの手順として，はじめに大きい孔を掘り，逸水・崩壊などが起きるたびにケーシングを挿入し，孔壁を維持し，さらにケーシングの中にビットを通してボーリングすることをくり返して目的の深度まで掘進を行うので，ボーリングの孔径は深度が増すごとに順次小さくなっていきます．そのためにケーシングチューブの肉厚は可能な範囲で薄くしているわけです．ケーシングチューブにはボーリングした孔に挿入して使用するものと多少肉厚にしてケーシングチューブの先端にビット(メタルクラウン，ダイヤモンドビット)を付け，孔壁を保護しながら掘進するものとがあります(後者をケーシングロッドという)．ケーシングチューブの接続方法は，カップリングを使用して接続するフラッシュカップルド方式(両端ともメスネジ)と片側にオスネジ，反対側にメスネジを加工して接続するフラッシュジョイント方式とがあります[1]．

7-2　ケーシングシュー

ケーシングシューは，ケーシングチューブの先端摩耗防止用器具で先端にノコチューブ(硬合金)を溶着したもの，メタルを植え付けたものおよびダイヤモンドを植え込んだものなどがあります．セット内径はケーシングチューブ内径と同一寸法になっており，この寸法規格にはJIS規格とDCDMA規格とがあります．ネジ寸法は，ケーシングチューブと同一でシャンク外径および内径はケーシングチューブと同じ寸法です[1](**写真-7**参照)．

7-3　ケーシングビット

ケーシングビットは，崩落地層を直接ケーシングで追い切りや追孔する場合に使用するビットでケーシングシューと同様メタルを植え付けたものおよびダイヤモンドを植え込んだものとがあります．セット内径は内径・外径とも，径で1㎜程度大きくなっています[1](**写真-8**参照)．



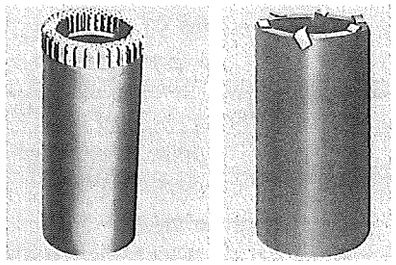
JIS規格

呼び径	43	53	63	73	83	97	112	127	142
外径(㎜)	44	54	64	74	84	98	113	128	143
内径(㎜)	37	47	57	67	77	90	105	118	133

DCDMA規格

呼び径	RW	EW	AW	BW	NW	HW
外径(㎜)	37.7	47.6	59.5	75.3	91.8	117.4
内径(㎜)	30.1	38.1	48.4	60.3	76.2	101.6

写真-7　ケーシングシューとその規格



DCDMA規格

呼び径	RW	EW	AW	BW	NW	HW
セットビット外径(㎜)	37.7	47.6	59.5	75.3	91.8	117.4
セットビット内径(㎜)	25.4	35.6	45.2	56.2	72.1	95.9

写真-8　ケーシングビットとその規格

⑧ 特殊なボーリング

ここでは特殊なボーリングとして，第1回の8-1で若干紹介されている新しく開発され，今後の先進ボーリングを大きく変化させる可能性の高い掘進工法を紹介いたします．

8-1　WLによるコントロールボーリング

山岳トンネルの地質調査は，屈折法による地震探査や電気探査で路線全体の地質概要を把握し，伝播速度や比抵抗値に異常や疑問の持たれた箇所に鉛直ボーリングや傾斜ボーリングを採用するのが一般的であり，その後トンネルの施工に合わせて坑内から弾性波探査(HSP，TSPなど)や先進ボーリングの実施にいたります．

数年前まではトンネル着工前に施工基面付近を事前にボーリングで調査することは不可能でしたが，これを可能にしたのが「WLによるコントロールボーリング」です(**図-26**参照)．

当工法はノルウェー工科大学と地質調査会社であるDEVICO社によって開発された工法であり，開発の目的はノルウェーの特徴的な地形であるフィヨルド下にトンネルを施工する場合の調査でありました．

当工法はDEVICO社の代理店となった日鉱探開(株)が地下備蓄タンクの調査で多用していたのを知り，鉄道トンネルの調査に採用したものです．

基本はWL工法であり，比較的土かぶりが小さい(100～150m程度)位置を選定し，地上から傾斜ボーリングで発進し，調査対象となる区間で水平に方向修正して掘進する非常に効率的な調査方法といえます．

山岳トンネルでの採用事例として，九州新幹線最長となる筑紫トンネルで2回実施し成果を上げています．現在の方向制御システムから土砂地山など反力の求めにくい地質での制御は無理ですが，一般的な山岳トンネルの条件であれば十分に活用が可能であります．

8-2　外管追従によるコントロールボーリング

当工法は，8-1節と同様に地上から方向を制御しながら先進ボーリングを行い，トンネル近傍の地下水を排水することで地下水位の低下を目的と

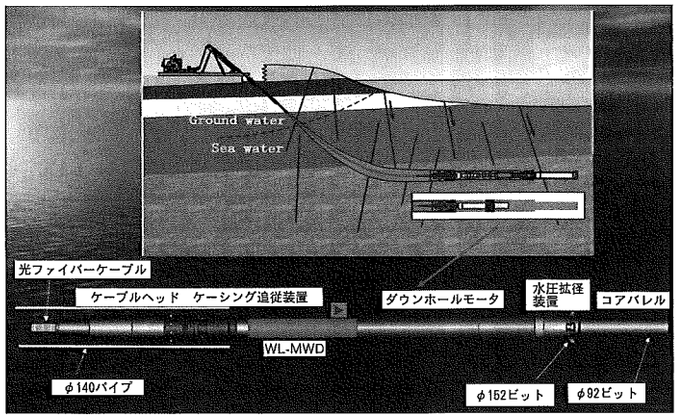


図-26　WLによるコントロールボーリング

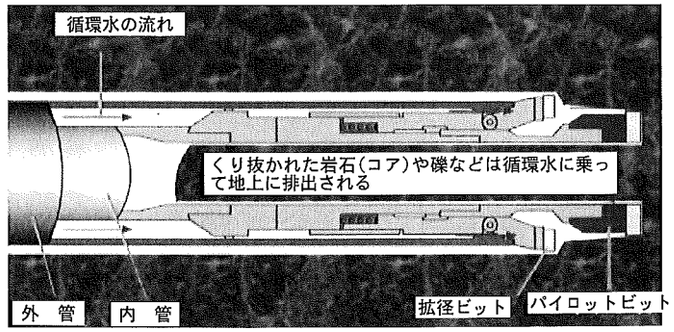


図-27　外管追従によるコントロールボーリング

して開発((旧)日本鉄道建設公団)されたものです．したがって，当初はノンコアで可能なかぎり長尺のボーリングを行うものとし，かつ方向制御によりトンネル縦断位置を維持しながら掘進するものとしました．先端駆動式を採用することで，ボーリングロッドおよびケーシングパイプは非回転としたものです．掘進方式は先端駆動式のダウンホールモーターであり，孔壁崩壊に対応することを目的としてケーシングパイプを掘進と同時に牽引していくシステムです．したがって，抵抗なくケーシングパイプを牽引するために，先端ビットは拡径型となっています．

当システムの開発とその実施場所として堆積岩で構成される長大トンネルを選定しました．当トンネルは掘削中に多量湧水の危険性が懸念され，トンネルの未掘削区間を先行して地下水位の低下を目的に実施したものです(図-27参照)．

この詳細は，8-1節と併せて施工事例で紹介いたします．

⑨ 原位置試験

先進ボーリングは，急速施工や長尺を目的とすることから開発，改良が重ねられ，多くの場合ボーリングロッドなどのツールスが特殊サイズとなっています．そのため既存の原位置試験器が適合しないことから孔内載荷試験や湧水圧試験をやむを得ず行う場合は，その原位置試験に適合する口径で事前に掘進してから実施しなければならないのが現状です．

多くの場合は，コアから地質情報を得るとともに湧水量測定と湧水圧測定にとどまっています．WL工法やPS-WL工法で湧水量を測定するには，インナーチューブによって先端が閉塞状態にあるためインナーチューブの回収時にのみ湧水量の測定が可能となります．それに対してシールドリバース工法の場合は，リバース用の送水ポンプを停止した後に内管から排水されている量がその時点の湧水量となります．したがって，掘進中でも内管からの排水量から送水ポンプの送水量を減ずれば湧水量となり，リアルタイムで湧水の増減が判断できることになるわけです．

9-1　湧水量測定

トンネル掘削の中で地山の持つ地下水情報は，施工上重要なものの一つであり，湧水箇所を正確に把握しなければなりません．そのため湧水量を正確に把握しようとする場合は，三角ノッチ付きの貯水タンクの設置が必要となります．しかし，狭い坑内に貯水タンクなどの設置はできることなら避けたく，シールドリバース工法ではシールドパイプの径が限定されていることから，内管からの飛水距離で把握するのが便利な測定方法となっています(図-28参照)．

パイプを延長した線から飛水の水面までの距離が30cmになるまでの延長線の長さをAとし，湧水量qは，以下の式で求められます．

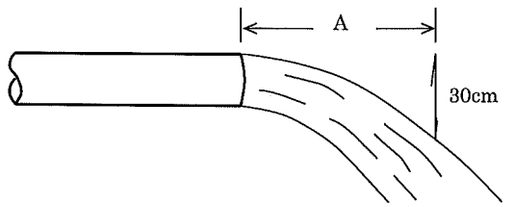


図-28　管尻からの湧水飛距離

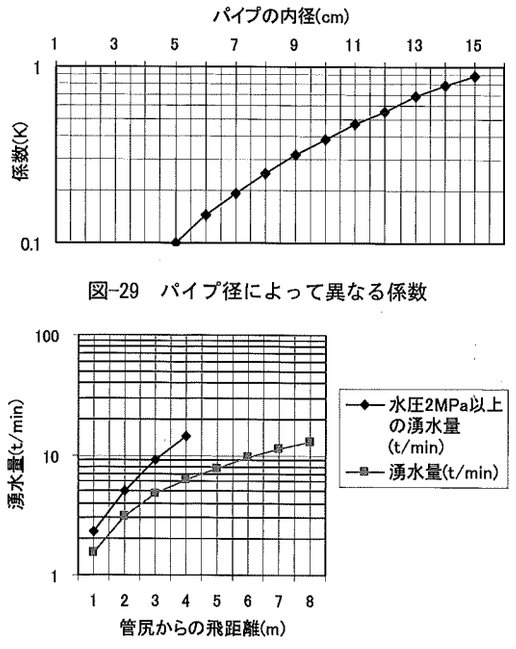


図-29　パイプ径によって異なる係数

図-30　Φ115㎜飛距離と湧水量の関係

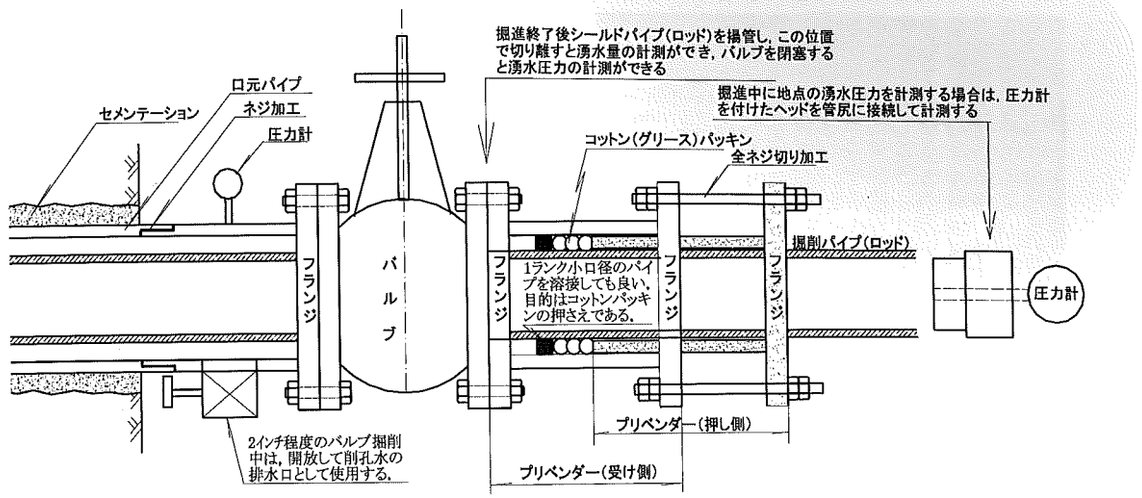


図-31　湧水圧力測定方法

$$q=\frac{0.02093CD^2A}{\sqrt{30}}\times K \qquad (1)$$

q ＝湧水量(ℓ/sec)
D ＝パイプの内径(cm)
C ＝係数(＝1)
A ＝飛距離(cm)

パイプの内径によって異なる係数Kを図-29に示します．例としてシールドパイプTR130(内径115㎜)の飛距離と湧水量の関係を図-30に示します．

9-2　湧水圧測定

水平ボーリングで湧水圧測定を行うには，口元パイプが固定されていることが原則となります．

シールドリバース工法の場合，口元管にプリベンダーが取り付けられ内管後部以外はすべて閉塞された状態にあります．したがって，掘削中でも送水ポンプを停止し，内管後部に圧力計の付いたプラグを設置することで随時，その深度が示す水圧を測定することが可能となります．

ボーリング終了後も口元管に圧力計を設置し，スリースバルブを取り付けることで随時圧力の変化を把握することができ，トンネル施工時の重要な情報源となります．

シールドリバース工法を例に記載しましたが，図-31に示すように口元管とプリベンダーを準備すればどのような工法を採用しても計測可能です．

⑩ あとがき

ボーリング機器とその性能について2回にわたって紹介しました．穿孔機やボーリングツールスでは，今後トンネル調査に転用の可能性も含めて，鉛直ボーリングで使用しているものも紹介しました．

公共工事への投資が控えられている今日このごろ，トンネル工事のなかで大掛かりな調査ボーリングは敬遠されがちでありますが，結果的に切羽前方の地質や地下水の状況把握が可能であれば安全かつコストダウンにも十分に寄与できるものと考えられます．

それでは，合理的にトンネルを施工するには，どの位置で，どの方向に，どれだけの調査を行えばどのような情報を得られ，その結果トンネル工事にどれだけの効果をもたらすかについて，次回の施工計画編で紹介します．

参考文献

1) 鉱研工業(株)編：ボーリングの基礎(改訂版)，2004.4.
2) 福井康夫・北原秀介：トンネル工事に伴うシールド工法による水平ボーリング，地質と調査，土木春秋社，pp.23-29，1987.4.

トンネルワールドニュース

（社）日本トンネル技術協会
国際委員会

サンパウロ地下鉄工事でTBMが順調に掘進

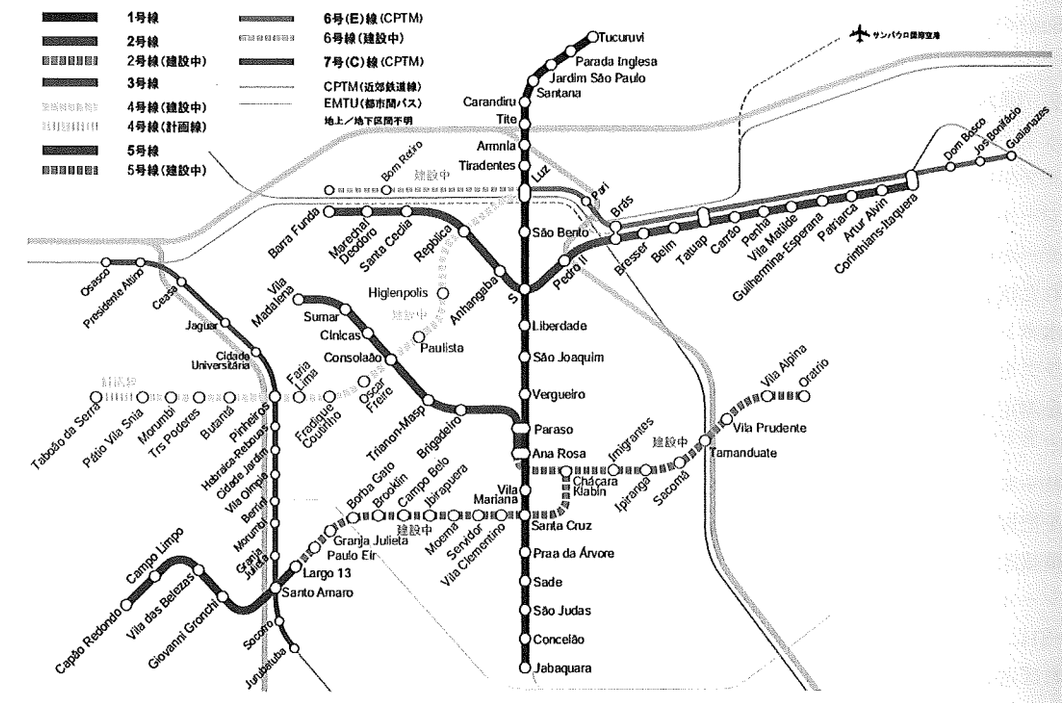
直径9.46mのEPBMによるサンパウロ地下鉄4号線のトンネル掘削では，Oscar Freire(オスカーフレイレ)駅部での長い停止の後，2008年3月に再び発進し，掘削が再開された．

Seli社の作業員は，これまで数回達成された日進記録である19リング(28.5m)まで，すばやくシールドの進行を回復させた．砂質粘土における平均日進は，10リング(15m)であった．トンネルのライニングは7+1ピースのセグメントからなり，それぞれのリングは，内径8.43m，厚さ350㎜，幅1.5mである．これまでの単線トンネルプロジェクトにおける一週間の進捗記録は，2007年11月に到達したFradique CoutinhoからOscar Freire間の掘削において，2007年9月に達成した90リング(135m)である．

Herrenknecht社製TBMは，6月初旬に，次の駅であるPaulista(パウリスタ)に到着する予定である．シールドは駅部を通過した後，さらに先に位置するHigienopolis-Mackenzie(ハイノポリス・マッケンジー)駅，Republica(レパブリカ)駅，Luz(ルース)駅に向けて掘削する．そのシールドは，Luz駅近くのJoao Teodoro(ジョアン・テオドロ)通りにおける換気坑で掘削を終了するまでの4km未満を，来年中旬ごろまでに掘削する予定である．

昨年2月に，Faria Lima(ファリア・リマ)のボックスから全長6.4kmのトンネル掘削のために発進されたこのTBMはFradique Coutinhoで初めて貫通した．このシールドは，地下鉄の東部延伸区間の大部分を掘削している．

Seli社は，Odebrecht-led JVの契約者であるConsórcio Via Amarela(CVA)のもとで，TBMによる掘削を担当している．JVは3年前に4億1,000万USドル(2005年価格)で，この契約を受けた．



路線に沿った地質は，サンパウロとResende(レゼンデ)断層流域の片麻岩に加えて，第三紀のシルトや砂から構成されている．

世界銀行は，地下鉄4号線のプロジェクトのため，サンパウロ市に対して9,500万USドルの貸付けを行うことを認めた．このローンは，5年間の猶予期間の後に，25年間で返済される．
(T&TI '08.4 担当：清田三四郎・鉄道・運輸機構)

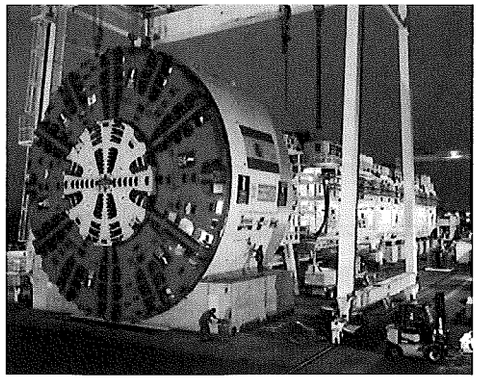
Finneトンネル建設工事が始まる

ドイツでは複線鉄道路線建設プロジェクトが進められているが，そのプロジェクトの中心的な事業が6.8kmのFinneトンネルの建設である．計画よりもやや早く4月末に，このFinneトンネル建設のための2基のTBMのうち，最初の1基の発進式が行われた．このTBMはHerrenknecht社製のものである．

建設を請け負っているWayss-Freytagled共同企業体は，今回発進した直径10.82mの可変の複合モードTBMに続いて，あまり時間をおかずにその姉妹機のTBMを発進させる予定である．当初の予定では最初のシールドは7月に，2番目のTBMは12月に発進させることになっていた．

これらのTBMは，6.8kmのトンネルのうち，4.6kmを掘削する予定であり，残りの2.2kmはNATMで建設される予定である．

トンネル沿いの地質は，高地下水圧(最高6bar)が作用する層を含んでいる．



この高地下水圧層の掘削に際しては水抜きボーリングにより水位を低下させることでこのTBMでの施工が可能になり，また，その後に続く掘進ではオープンモードで掘削することが可能であると考えられている．

しかし，粘土とシルトを介在する風化砂岩層では，初期の掘進では地下水位を低下させることができないと考えられるので，TBMは泥水シールド工法で掘進する予定である．

トンネルの覆工は，内径9.6m，幅2m長の7分割(6+1)セグメントである．二つのトンネル間には，1,000mごとにエアーロック室付きの連絡通路が設置される．

このJVは3億8,100万USドルで工事を請負った．

Finneトンネルは，エルフルトとライプチヒ/ハレを結ぶ10.5kmの複線鉄道の鍵となる重要な区間として建設が進められている．

施主のDB Netzは，2011年にこの路線を完成させるため，2006年後半に請負業者に発注した．
(T&TI '08.5 担当：平山義貴・東京都交通局)

セグメントの新技術 監修 小泉 淳
B5判 132頁 本体価格 2,000円

本書は「トンネルと地下」の連載講座として，過去10年間に開発され，実用化されたセグメントを中心に開発中のものも含めてアンケート調査を実施し，また，土木学会の年次学術講演会における発表状況も参考にして34件のセグメントを抽出し，同じフォーマットで紹介したものをもとに，新たに「セグメントの新技術」編纂委員会を作り，個々のセグメントに加筆，修正を加え，より充実した内容にまとめたものである．

社団法人 日本トンネル技術協会

会報

1. 会員の現状

	9月25日現在
正会員	1,952名
団体会員	351名
個人会員	1,601名
名誉会員	1名
計	1,953名

2. 委員会の開催状況(9月1日～30日)

①調査研究関係委員会

◎技術委員会

ずり出し調査WG：9/3(朝倉譲主査ほか4名)調査報告書を検討

都市トンネル小委員会幹事会：9/9(磯陽夫委員ほか7名)シールド工事Q&Aを検討

安全環境小委員会

災害事例調査WG：9/30(藤井進一幹事ほか10名)アンケート案を検討

効率的掘削工法特別委員会：9/2(西村和夫委員長ほか26名)作業方針を検討

同　打合せ会(早期断面閉合)：9/8(椙山孝司委員ほか7名)作業方針を検討

同　打合せ会(大変位)：9/19(楠本太委員ほか2名)作業方針を検討

同　打合せ会(中流動化コンクリート)：9/24(松岡茂委員ほか4名)作業方針を検討

同　打合せ会(早期断面閉合)：9/25(椙山孝司委員ほか7名)作業方針を検討

同　打合せ会(吹付け覆工)：9/30(領家邦泰委員ほか6名)作業方針を検討

耐震設計検討特別委員会：9/24(今田徹委員長ほか18名)作業方針を検討

同　打合せ会：9/17(今田徹委員長ほか4名)委員会資料を検討

新埋め戻し材特別委員会：9/19 (赤木寛一委員長ほか20名)調査中間報告ほか

小田急立体交差特別委員会：9/22 (小山幸則委員長ほか29名)掘進結果を検討

計　13回開催　157名出席

②運営広報関係委員会

◎総務委員会

広報小委員会

会誌WG：9/3(大島洋志主査ほか11名)10月号の会誌と3か月計画を検討

◎国際委員会

海外文献小委員会

海外ニュースWG：9/16(小島宗隆主査ほか8名)海外ニュースを翻訳

計　2回開催　21名出席

合計　15回開催　178名出席

3. 国際会議の開催予定

会議名	開催日	場所	主催者等
第35回ITA総会およびコングレス「都市と環境のための安全なトンネル工法」	2009. 5. 23～28	**ブタペスト(ハンガリー)**	Hungarian Tunnelling Association(ハンガリートンネル協会) International Tunnelling and Underground Space Association(国際トンネル協会) http://www.wtc2009.org

＊論文募集に関する詳細は事務局(担当：関)までお問い合わせください．(社)日本トンネル技術協会 TEL：03-3553-6174

4. 平成20年度催物開催現況

催物名	開催日	人数	場所
(見学会)			
名古屋市下水道現場研修会	2008. 6.19	15	愛知県
名古屋市地下鉄現場研修会	2008. 6.20	13	愛知県
交差点立体工事現場研修会	2008. 7.25	18	神奈川県
都下水道現場研修会	2008. 7.30	17	東京都
首都高速中央環状新宿線現場研修会	2008. 8.19	18	東京都
福岡市下水道現場研修会	2008. 9.12	18	福岡県
北関東自動車道トンネル現場研修会	2008. 9.19	18	栃木県
北海道道路トンネル現場研修会	2008. 9.25～26	44	北海道
北海道新幹線トンネル他現場研修会	2008.10. 9～10	32	北海道
仙台東西線 青葉山トンネル他現場研修会	2008.10.17	20	宮城県
調布駅付近連続立体交差現場研修会	2008.10.31	30	東京都
(施工体験発表会)			
第62回(山岳) 「周辺の環境条件を配慮し，新技術を駆使したトンネル工事」	2008.10.23	200	東京都
第63回(都市) 「都市部の特殊条件下でのトンネル工事」	2008.10.24	200	東京都
(講演，講習会)			
第10回トンネル技術ステップアップ研修会(シールド部門)	2008.11. 6～ 7	30	**東京都(下記参照)**
第11回トンネル技術ステップアップ研修会(山岳部門)	2008.11.20～21	30	**栃木県(105頁参照)**

第10回トンネル技術ステップアップ研修会「シールド部門」開催のご案内

本研修会は，シールド工法の計画から設計，施工，維持管理までを網羅した実践的な内容を主体とし，テキストも他に例を見ない実務的なものとしています．また演習についても，具体的にプロジェクト計画に即した検討を行う中身の濃いものとしています．研修はトンネル経験5～10年程度の新進気鋭の中堅技術者を主な対象としており，(社)土木学会のCPDプログラムにも認定されているほか，土木学会トンネル工学委員会後援事業でもあります．

本研修会の特徴は，

・経験豊富な講師陣との本音の討論会

・演習を通じての実践的事例研究

であり，

企業者の技術者には，「建設から維持管理にわたる技術全般」

コンサルタントの技術者には，「現場施工に関する知見」

施工会社の技術者には，「施工技術の習熟と計画や設計に関する知見」

メーカーの技術者には，「設計と施工に対する理解」

などに役立つプログラムとなっていますので，奮ってご参加くださいますようご案内申しあげます．

— 記 —

開催日：平成20年11月6日(木)，7日(金)

会場：弘済会館4階「梅の間」　千代田区麹町5-1　TEL：03-5276-0333

研修内容：

第1日目(11/6)

8：30　受付開始

司　会　日本シビックコンサルタント(株)取締役技師長〈事業委員会委員〉　木戸　義和

9：00　開会の挨拶　日本交通技術(株)代表取締役社長〈事業委員会委員長〉　桑原　彌介

9：10～9：20　主旨説明　京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻教授　小山　幸則

計画から維持管理までの調査のポイントと結果の判断方法
建設副産物の取扱い

9：20～10：10　調査・計画　東京地下鉄(株)鉄道本部改良建設部設計課課長補佐　荻野　竹敏

10：10～10：20　休　憩

工法選定・シールドマシン計画のポイントとトラブル事例

10：20～12：00　施　工(1)　佐藤工業(株)土木事業本部技術部技術第二課担当課長　関本　昇

12：00～12：45　昼　食

施工計画・施工管理のポイントとトラブル事例

12：45～16：45　施　工(2)　(株)間組土木事業本部技術部都市土木グループ担当部長　名倉　浩
(株)熊谷組土木事業本部シールド技術部副部長　河越　勝

16：45～17：15　演習事前説明

「トラブルの原因と対策」について徹底討論

17：30～20：00　討論会「菊の間」(夕食含む)

第2日目(11/7)

覆工設計のポイントとトンネル変状の実例・原因・対策
―トンネル変状の実例と維持管理ポイント―

9：00～11：30　設計・維持管理
パシフィックコンサルタンツ(株)交通技術本部鉄道部地下構造設計グループ課長補佐　清水　幸範
日本シビックコンサルタント(株)事業統括本部構造技術ソリューション部長　斎藤　正幸

11：30～12：15　昼　食

シールドの設計・施工計画の演習

12：15～14：45　演習(グループ検討)

14：45～16：30　演習(グループ発表)

17：00　修了証書授与，同所解散

定　　員：30名

参　加　費：会員45,000円，一般60,000円(昼食2回，夕食，教材代含む)

申し込み方法：この案内文書添付の申し込み用紙に記載のうえ，郵送またはFAXをもってお申し込み下さい．電話での申し込みは受付けませんので，ご了承願います．

〒104-0041 東京都中央区新富2-14-7　新光第一ビル
社団法人日本トンネル技術協会　ステップアップ研修会係
TEL：03-3553-6174　　FAX：03-3553-6145

支払い方法：上記お申し込みののち，郵便振替用紙通信欄に行事名と参加者名記入のうえ，下記にお振り込み願います．現金書留でも結構です．
郵便振替口座　00160-7-196331　日本トンネル技術協会

そ　の　他：①参加費の払い戻しはいたしかねますが，代理出席は差し支えありません．
②参加者の変更通知は，開催日1週間前までに願います(修了証書発行)．

＊テキストを事前に配布いたしますので，住所等は必ず記載願います．
下記申込みにかかわる個人情報につきましては，他に利用するものではありません．

第10回トンネル技術ステップアップ研修会(シールド部門)参加申し込み書

下記のとおり申し込みます．

氏名(ふりがな)		年齢	歳
最終学歴	年　卒	専攻	
会社名		所属役職	
会社住所	〒　―	電話番号	―　―
現場経験	現場箇所と担当部署を記載(ない場合は，「なし」と書いてください．)		
研修会でお聴きになりたいことや議論する課題がございましたら書いてください．			

第11回トンネル技術ステップアップ研修会
「山岳部門」開催のご案内

各社におかれましても社員に対して独自の技術研修を実施しておられるかと思いますが，トンネル技術者の技術力向上を目的とし，併せて若い技術者同士の交流の機会を提供する場として第11回トンネル技術ステップアップ研修会「山岳部門」を下記のとおり開催することといたしました．

研修はトンネル経験5～10年程度の新進気鋭の中堅技術者を主な対象とし，本研修会のために書き下ろされた教材にもとづき，執筆者が直接講義するものであります．また現場研修会も併せて開催いたしますので奮ってご参加下さいますようご案内申しあげます．

なお，本研修会は(社)土木学会のCPDプログラムに認定されているほか，土木学会トンネル工学委員会後援事業でもありますことを申し添えます．

― 記 ―

開　催　日：平成20年11月20日(木)，21日(金)

研修内容：

第1日目(11/20)　北関東自動車道トンネル現場見学会

工事概況

発注者	東日本高速道路(株)関東支社宇都宮工事事務所	
工事名	北郷トンネル工事	塩坂峠トンネル工事
施工者	鉄建・オリエンタル白石JV	大成建設(株)
概　要	明かり工事：1,086m トンネル工事：678m （上り線678m，下り線685m） 掘削方式：発破方式，機械方式 ずり出し：タイヤ工法 地　　質：チャート・頁岩	明かり工事：2,252m トンネル工事：1,051m （上り線1,025m，下り線1,051m） 掘削方式：発破方式，機械方式 ずり出し：タイヤ工法 地　　質：チャート・頁岩

12：30　JR両毛線「佐野」駅改札前集合，昼食は各自済ませて下さい．
13：00　塩坂峠トンネル現場事務所で工事概況説明
　　栃木県佐野市赤見町字道山4014　TEL：0283-26-0221
13：40　塩坂峠トンネル現場見学，ヘルメット・長靴貸与
14：30　北郷トンネル現場見学
15：20　塩坂トンネル現場事務所で質疑応答，ヘルメット・長靴返却
17：30　「チサンホテル宇都宮」着，懇親会，宿泊
　　宇都宮市駅前通り3-2-3　TEL：028-634-4311　JR宇都宮駅西口より徒歩1分

第2日目(11/21)

8：30　開会の挨拶　　日本交通技術(株)代表取締役社長〈事業委員会委員長〉　桑原　彌介
8：40　総　説　　京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻教授　朝倉　俊弘
9：00　調　査　　(財)鉄道総合技術研究所防災技術研究部部長　木谷日出男
9：50　設　計　　首都大学東京都市環境学部都市基盤環境コース教授　西村　和夫
10：40　覆工・インバート
　　飛島建設(株)土木本部環境・リニューアルグループトンネルリニューアル担当課長　川端　康夫
11：30　膨圧・崩落対策　　(株)熊谷組土木事業本部トンネル技術部課長　中北　昭浩
12：20　昼　食
13：00　補助工法　　前田建設工業(株)土木本部土木技術部トンネルグループ副部長　櫻井　孝臣
13：50　TBM　　大成建設(株)土木本部土木技術部部長　領家　邦泰
14：40　新技術の動向　　(株)高速道路総合技術研究所道路研究部トンネル研究担当部長　城間　博通
15：10　質疑応答
15：50　修了証書授与　同所解散

定　　員：30名
参 加 費：会員58,000円，一般65,000円(バス，宿泊・懇親，食事，教材代含む)
申し込み方法：この案内文書添付の申し込み用紙に記載のうえ，FAXをもってお申し込み下さい(複数の場合は申し込み書を複写願います)．電話での申し込みは受付けませんのでご了承願います．
〒104-0041　東京都中央区新富2-14-7　新光第一ビル
社団法人日本トンネル技術協会　ステップアップ研修会係
TEL：03-3553-6174　　FAX：03-3553-6145
支払い方法：上記申し込みののち，郵便振替用紙通信欄に行事名と参加者名記入のうえ，下記にお振り込み願います．現金書留でも結構です．
郵便振替口座　00160-7-196331　日本トンネル技術協会

そ の 他：①参加費の払い戻しはいたしかねますが，代理出席は差し支えありません．
②11/20の現場見学では，ヘルメットは貸与していただきますが，作業着は各自用意してください．長靴を準備しますので申し込み書に足のサイズを記入してください．
③参加者の変更通知は，開催日1週間前までに願います(修了証書発行)．

＊テキストを事前に配布いたしますので，住所等は必ず記載願います．
下記申し込みにかかわる個人情報につきましては，他に利用するものではありません．

第11回トンネル技術ステップアップ研修会(山岳部門)参加申し込み書

下記のとおり申し込みます

氏名（ふりがな）		年齢	歳	足のサイズ	cm
最終学歴	年　　卒			専　　攻	
会社名				所属役職	
会社住所	〒　—			電話番号	—　　—
現場経験	現場箇所と担当部署を記載(ない場合は，「なし」と書いてください．)				

研修会でお聴きになりたいことや議論する課題がございましたら書いてください．

12月号予告[12月1日発売予定]

- トンネル覆工における単一構造の適用に関する研究
- 小土かぶり・帯水土砂地山トンネルの各種補助工法(2)
- 東北中央自動車道　栗子トンネル西避難坑
- 阪神高速道路8号京都線　稲荷山トンネル
- 中之島線　第6工区

【連載講座】

- 山岳トンネル先進ボーリング入門(4)

＊内容等は変更になる場合がございます

編集後記

◆本年8月号の編集後記でお知らせしましたとおり，本号は「飛騨トンネル開通記念特集号」とさせていただきました．10年の歳月を要する大工事となったことで執筆者の方の思い入れが強く，こちらより依頼した約2割増しのボリュームとなってしまいました(笑)．そして，もうひとつ執筆者の方の思い入れが強いと思われた点があります．それは，所属名の表記についてです．東海北陸自動車道全線開通時には発注者は中日本高速道路(株)となっていましたので，本来はその所属で書いていただくのが一般的ですが，今回は執筆者の方が辞令をいただいたときの所属を最初に掲載し，その下に現職を掲載するようにいたしました．したがいまして，「日本道路公団」の方もおられますし，「中日本高速道路」の方もおられます．このことをみても工事期間の長さを感じることができるのではないでしょうか．

◆13頁に紹介しましたが，東海北陸自動車道全線開通を記念して中日本高速道路(株)より「秘境を貫く 飛騨トンネルの物語」が発行されました．こちらは当初，関係者の方だけに配布されていたものですが，問い合わせが多く，一般にも販売することになりました．工事の裏話なども載っていて，あまり堅苦しい編集となっておりませんので気軽に読むことができます．本号を読み終えた後にこの図書を読むとまた違う観点から飛騨トンネルを知ることができるかもしれません．

(I.Y)

★購読の申し込み，または，送付先変更などの問い合わせは(株)土木工学社までご連絡ください．
★(社)日本トンネル技術協会会員の方の住所(送付先)変更は直接(社)日本トンネル技術協会へご連絡ください．

トンネルと地下

第39巻 第11号〔通巻459号〕
ISSN 0285-631X
Tonneru to chika
平成20年10月20日　印刷
平成20年11月1日　発行

社団法人日本トンネル技術協会
会長　小森　博
〒104-0041　東京都中央区新富2丁目14番7号(新光第一ビル)
TEL：03-3553-6174
FAX：03-3553-6145
http://www.japan-tunnel.org

発行所　株式会社土木工学社
〒162-0832　東京都新宿区岩戸町16番地メイジャー神楽坂
TEL：03-3267-2888
FAX：03-3267-2807
http://www.tunnel.ne.jp

発行人　山本 育徳
編集人　山本 勝誉
印　刷　新協印刷株式会社

本誌の購読について

■購読をご希望の方は，書店または土木工学社へ直接お申し込みください．

■お申し込みの際は，誌名，購読期間，住所，所属，氏名などを明記のうえ，FAX(03-3267-2807)にてお申し込みください．後日，小社より振込用紙をお送りいたします．

購読料
1冊　1,575円(送料108円)
　　(本体価格　1,500円)
1年　15,000円(前納)
振替　00110-8-190072

本誌広告のお申し込み方法

本誌への広告掲載は小社「トンネルと地下」営業部までご連絡ください．
TEL：03-3267-2888

本誌掲載記事を無断で複写(コピー)および転載することは，著作権上での例外を除き，禁じられております．本誌から複写または転載を希望される方は，小社(03-3267-2888)までご連絡ください．