

TBMによる安曇発電所水殿川導水路トンネルの掘削 TBM EXCAVATION OF MIDONOGAWA HEADRACE TUNNEL AT AZUNI POWER STATION

谷中 保男*・志村 厚**・江川顕一郎***
Yasuo YANAKA, Atsushi SHIMURA and Kenichiro EGAWA

This paper describes the results of excavation of Midonogawa Headrace Tunnel using a tunnel boring machine (TBM).

During the excavation, several fractured zones were encountered, and one of them caused the collapse of a tunnel wall with much spring water, completely burying the TBM.

From then on, certain TBM control parameters were adopted for prediction of geology before heading. As another method, Rayleigh wave scanning was carried out experimentally.

Keywords:tunnel boring machine(TBM), fractured zone in tunnel, prediction of geology before heading, Rayleigh wave scanning

1. はじめに

水殿川導水路工事は、水資源の有効活用をはかるために東京電力(株)により施工中のものであり、奈川渡ダムより標高の高い水殿川中流部に取水ダムを設け、導水路トンネルにより流域変更をし、奈川渡貯水池へ注入することにより、安曇発電所の落差を利用して年間約1,200万kwhの発生電力量の増加をはかるものである。(図-1)

導水路トンネルの地質は中・古生代の堅硬な岩盤であるため、掘削にはオープン型のトンネルボーリングマシン(以下TBMと略)を採用した。

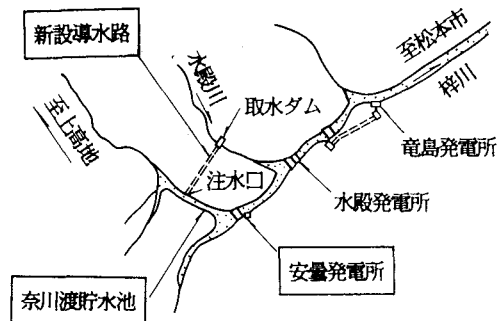


図-1 位置図

- * 東京電力(株) 松本電力所 土木建築課長
** " 葛野川水力建設準備事務所 主任
*** " 工務部 部長

本トンネルは平成元年5月から掘削を開始し、平成2年12月に貫通した。トンネル全長は3,035m(内TBM掘削区間3,016m)であり、当初の地質調査結果に反し、予想以上の破砕帯に遭遇した。本報告では、上記破砕帯への対応と対策工、TBMの管理方法について述べることにしたい。

2. 導水路トンネル周辺の地質

導水路トンネル周辺の地質は、主として梓川層群とよばれる中・古生代のチャート、粘板岩、砂岩により構成されている。地層の一般的走向は北東-南西であり、その方向に軸をもつ緩やかな褶曲構造を形成していると考えられる。

チャートは灰白色、灰色、黒色を呈し、岩質は非常に堅固である。層状構造をもつものは、数cm~10cmの厚さの層理面で板状に割れやすい。

粘板岩は灰黒色、黒色を呈し堅固であるが、ややへき開が発達し薄く割れやすい。チャートと粘板岩の境界近くでは、粘板岩は珪質化し塊状硬質な岩相を呈し、チャートに移行する。

砂岩はチャート、粘板岩中に数cm~数mの厚さの薄層として分布する。主に灰白色で、岩質は塊状硬質である。

上記岩種の圧縮強度、弾性波速度は表-1に示すとおりであり、いずれも堅硬な岩質である。

これらの堅硬な岩盤の中に、幅30cm以上の破砕帯が調査時、掘削時を含めて26本確認され、これらの破砕帯は地層とほぼ平行に粘土化し、砂礫状になっている部分が多い。さらに破砕帯より発生したシーム等により、岩盤が脆弱化した影響域もみられた。(図-2)

表-1 岩種別弾性波速度・圧縮強度一覧

| 岩種 | 岩級区分 | 地山の弾性波速度 V1(km/s) | 岩石試験の弾性波速度 V2(km/s) | 一軸圧縮強度 σ_c (kg/cm ²) |
|------|------|-------------------|---------------------|---|
| チャート | CM | 4.8 | 5.7 | 820 |
| | CH | 4.6 | 5.5 | 1,970 |
| 粘板岩 | CM | 4.9 | 5.1 | 360 |
| | CH | 4.2 | 5.1 | 820 |
| 砂岩 | CM | 4.5 | 5.2 | 1,180 |
| | CH | 4.6 | 5.4 | 1,840 |

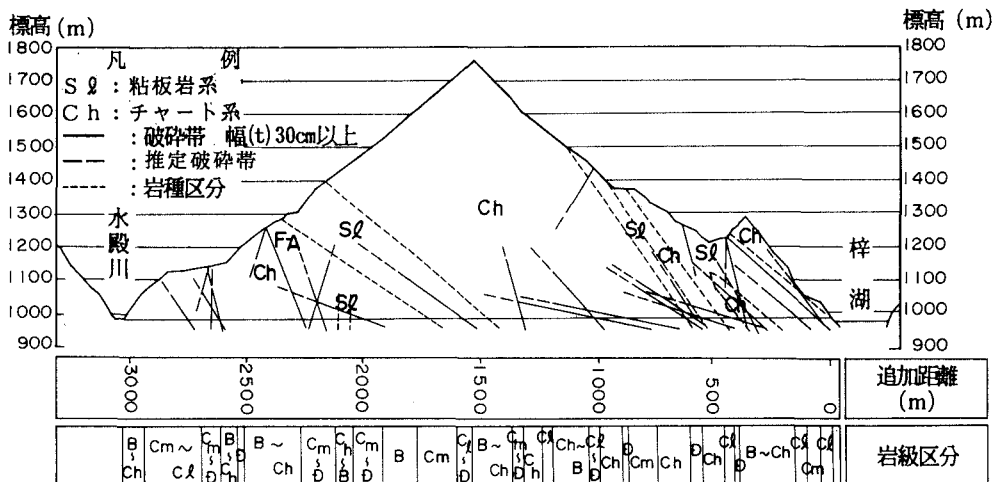


図-2 導水路トンネル地質縦断図

3. TBMの仕様・実績

導水路トンネル周辺の地質は前述のように硬質な岩盤であるため、掘削にあたっては硬岩部において高速掘進が可能なTBMを採用した。

本地点で使用したTBMの主な特徴としては以下のとおりである。

- ・硬岩の掘削性、高速掘進性が良好で方向制御に優れ、解体搬出の容易なオープン型を採用
- ・岩盤破碎のための高スラスト荷重に対応するため、カッタ取付が強固となるよう、カッタヘッド全面からカッタを取り付けるタイプを選定。
- ・一時的な不良地山に対応し易く、切羽に近い部分で支保作業が可能なように、機械本体部の作業スペースを拡大。
- ・レーザー光線によるTBMの現在位置測量、方向予測を行う測量、方向監視システム、ならびに掘削データをリアルタイムで分析する掘削管理システムを開発し、TBM掘進総合管理システムとして施工管理に用いた。

TBMの主な仕様は表-2に示すとおりである。

TBMの掘削実績は表-3に示すとおりであり、破碎帯対策工で要した日数を除くと、運転日あたりの平均月進は計画で254m、実績で249mであり、ほぼ計画どおりの値が得られている。また、最大月進として310.3m、任意月最大月進368.6mの実績が得られたことは、大規模な破碎帯に遭遇せず、順調に掘進した場合のTBMの高速掘進の可能性を実証したものである。

表-2 TBMの諸元

| | |
|--------|--------------------------|
| 構造 | : オープンタイプ (外周シールド無) |
| 使用カッター | : 12インチ (全21ヶ内センターカッタ4ヶ) |
| 取付方法 | : カッターヘッド前面取付型 |
| 掘削径 | : φ2,600mm |
| 本体長 | : 10,630m (メインベーム後端まで) |
| 本体全長 | : 75,400m (シャトルカッター先端まで) |
| 総重量 | : 約70t (本体) |
| 総出力 | : 約430KW |
| ストローク | : 1.2m |

表-3 掘進総括表

| 項目 | 歴日当り | 作業日当り | 運転日当り |
|--------|------------------------|-------|-------|
| 日数 | 573日 | 468日 | 302日 |
| 平均月進 | 158m | 161m | 249m |
| 最大日進 | 31.4m | | |
| 最大月進 | 310.3m | | |
| 任意最大月進 | 368.6m (元年6月19日~7月18日) | | |

4. TBMによる破碎帯部の掘削

TBMによるトンネル掘削中において前述のとおり、大小あわせて26本の破碎帯に遭遇し、掘削が阻害された。

本報告では、このうち大量の湧水が発生し流出した破碎帯部の砂礫によってTBMが埋没したTD2、265m付近の破碎帯への対応と対策工について述べる。

この付近については後の切羽観察とボーリング調査から、トンネル方向に直交する破碎帯F-Aとトンネル方向に30°斜交し切羽に向い右側に流れている破碎帯F-Bが交差していた。

F-Aは走向傾斜は若干異なるものの、当初の地質調査から想定されたものであったが、F-Bは地表からの調査では把握できないものであった。(図-3)

坑壁は、F-Aに接近した平成2年4月30日以降、天端ならびに右斜め上方より小崩落が発生したが支保工、吹付等により対処した。

5月7日の現地確認により、右斜め上方から大崩落(約60m³)が生じ、砂礫によってTBMが埋没していた。(図-4)

切羽周辺からの湧水量は約 $1 \text{ m}^3 / \text{min}$ であった。また、TBMは前進、後進とも不可能であり、カッターヘッドが回らない状態であった。

原因としては、TBMの掘進によって比較的軟弱なF-Bの上盤側に下盤側から近づき、F-Aに到達すると同時にこれらが安定を失って崩落ならびに空洞が生じたものと推定された。

対策工としては、安全性、施工性、経済性を考慮した結果、導坑掘削・ボーリング充填工を採用した。これは、TBM本体内の砂礫を排除した後、メイングリッパー後方から右岸に側壁導坑を掘削し、ボーリングによる水抜きならびに薬剤注入を実施しながら空洞部の充填と岩盤補強を実施し、TBM切羽に到達した後、TBM前面の屑を除去する。その後、側壁導坑をコンクリートで填充し、TBMのグリッパー反力を確認した後、TBM掘進を再開するものである。

対策工の施工は平成2年5月～6月の2ヶ月で完了し、無事掘進を再開した。

なお、充填の注入剤については、目的に応じて表-4のとおり選定し使用した。

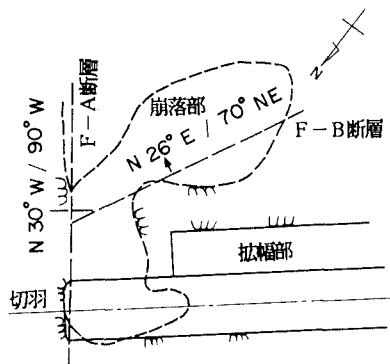


図-3 概略地質構造

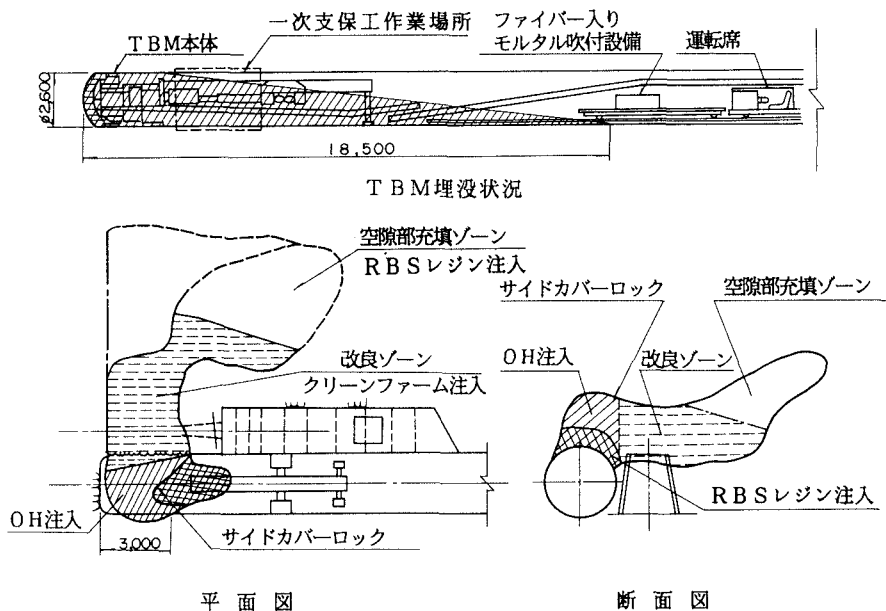


図-4 TD. 2265m崩落対策図

表-4 注入ゾーン別注入材一覧

| 注入ゾーン | 注入材 | PH | ゲルタイム 秒 | 一軸圧縮強度 Kg/cm ² | 注入形式 |
|-----------|---|-------|------------|------------------------------|--------------|
| サイドカバーロック | ウレタン系 ・親水性一液形 (O.H) ・二液混合形 (RSBレジジン) | 7 | 20~30 | 2~40 | 1ショット |
| | | 7 | 10~20 | 5~40 | 1.5ショット |
| 改良ゾーン | シリカゾル系 ・シリカゾル懸濁形 (クリーンフォーム) ・シリカゾル溶液形 (クリーンロック) | 7~8.5 | 3~5 | 20~40 | 2ショット 二重管 |
| 空隙部充填ゾーン | ウレタン系 ・二液混合形 (RSBレジジン) | 7 | 10~20 | 5~40 | 1ショット |

5. TBM管理と前方予知

前述のとおり、TD2、265mでは事前の地質調査結果から想定できない破砕帯の出現により対策工を実施したことから、2ヶ月の工程の遅れを生じた。

これより、TD2、265mまでの掘削実績をもとに、破砕帯等の軟弱層の前方予知として次の管理値を設定するとともに、対策フローを作成し、以後の管理を行った。(図-5)

- ・TBMスラスト力 100t以下
- ・カッター電流値 100A以下
- ・地質 チャート・粘板岩の互層、石英脈あり
- ・湧水量 2ℓ/min以上

以後のTD2、628m、TD2、635m付近に出現した破砕帯については、事前に主としてスラスト力の低下がみられたため、先進調査ボーリングによって前方の状況を把握すると共に、薬液注入による固化を実施して破砕帯を切り抜けることができた。管理値の一例を図-6に示す。

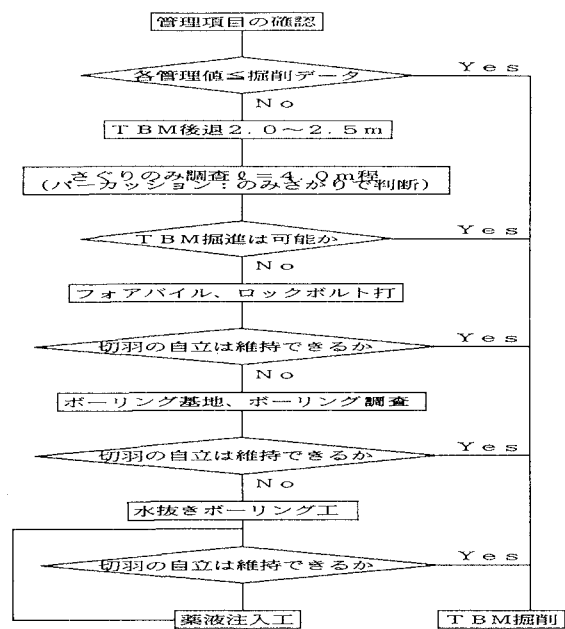


図-5 対策フロー

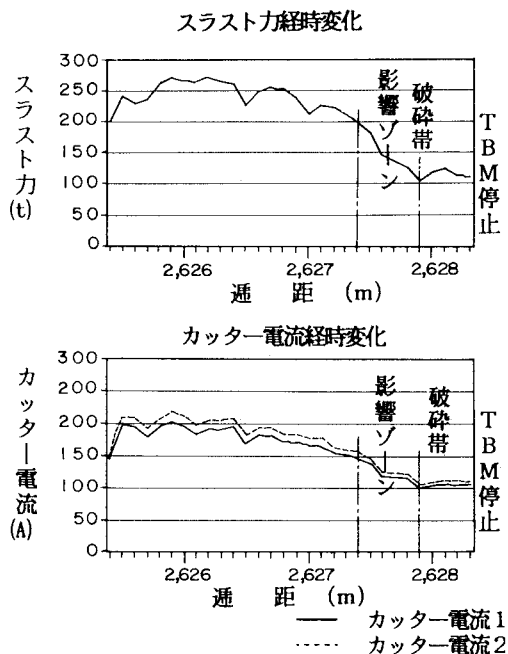


図-6 TD2、628m TBM管理値変化

このように事前調査で把握できない破砕帯については、切羽からの先進ボーリング調査が確実と考えられるが、多額の費用ならびに工期を必要とするため、比較的容易に実施できる「レーリー波探査」による前方予知を試験的に試みた。

レーリー波探査は、ハンマーや電磁式起振機等によって表面から対象地盤に振動を与え、それによって発生する各種の波動のうち、レーリー波の垂直振動を2つの検出器で測定し、その時間差からレーリー波速度を求めるものであり、主に土質地盤に対し行われてきたものである。

試験は3回にわたって実施した。(TD2、528m・2、603m・2、810m)

結果については以下のとおりである。(図-7)

- ・TD2、528mにおいては、探査結果からTD2、533~2、534mおよび2、539m付近でレーリー波速度の変曲点が現れている。

掘削データによると、TD 2, 535 m付近に節理、TD 2, 536~2, 538 m付近に節理を伴うCH級とD級の岩級境が現れていることから、探査結果はこれらをとらえたものと考えられる。

・TD 2, 603 mにおいては、TD 2, 610 m・2, 614 m・2, 618 mにレーリー波速度の変曲点が現れている。

掘削データによると、これらはいずれも岩級境の粘土を伴ったシームであることが確認されている。

・TD 2, 810 mにおいては、TD 2, 822 m付近まで、ほぼ一定の速度曲線が得られており、変曲点は見られない。

掘削データも一部密実な石英脈がみられる他は均一な岩盤である。

このように、レーリー波探査では、前方の節理、シーム等の存在がある程度推定できることから、今後は変形係数等の物性を把握できるような検討が必要であろうと考えられる。

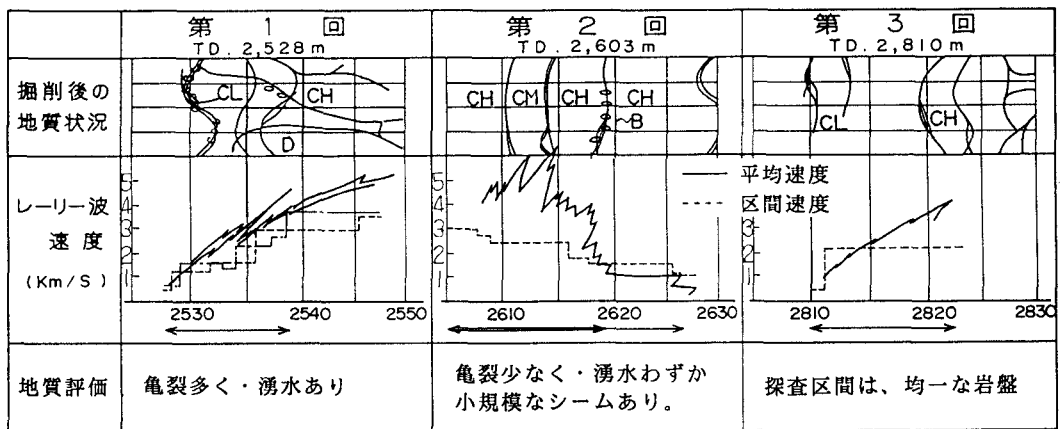


図-7 レーリー波探査結果（地質図の内、 : 湧水、 : 亀裂）

6. おわりに

本導水路のように小型の山岳トンネルについては、地表踏査ならびに表層部の弾性波探査によって地下の地質を予測・設計し、工事を実施することが多い。これは、トンネルの地質の事前予知は難しいためであり、このため掘削の進行とともに調査を行い、そこで地質の詳細や湧水の状態、破碎帯の性状が判明する。

TBMは通常かなりの高速掘進で進行するため、破碎帯や湧水部を通過してから処理せざるを得なくなり、しばしばトラブルの原因となっている。このため、地質性状が事前に判断できるよう、前方予知の技術が必要となってくる。

本工事では、TD 2, 265 mで坑壁の崩落、TBMの埋没を経験したのち、スラスト力等の管理値を設定し前方予知を行ったことから、以後の破碎帯等の軟弱層に対しては、事前の岩盤補強によって無事切抜けることができた。これらは今後とも有効な手段になりうるものと考えられる。

また、試験的に実施したレーリー波探査でもある程度の有用な結果が得られたことから、機器の改良ならびに物性把握の検討をつめばさらに精度のよい前方予知が可能になってくるものと考えられる。