

# TBMによる全断面急勾配斜坑掘削

千原秀樹\* 寺田丈男\*\* 岡田 章\*\*\*  
岩本容昭\*\* 浅野 剛\*\*\*\*

## 1. はじめに

当社は、塩原発電所(東京電力㈱発注、栃木県)での斜坑パイロット掘削にTBMを用いて以来、葛野川発電所(東京電力㈱発注、山梨県)でのパイロット・リーミング斜坑TBM工法、今回報告する神流川発電所(東京電力㈱発注、群馬県)での全断面斜坑TBM工法に至る水圧管路工事を通して、TBMを用いた斜坑の掘削技術を開発して来た。ここでは、斜坑掘削の特徴と全断面斜坑TBM工法の施工システムおよび掘削管理について報告する。

神流川発電所は、長野県東部、信濃川水系南相木川最上流部に上部ダム(中央コア型ロックフィルダム、高さ136m)、群馬県南西部、利根川水系神流川最上流部に下部ダム(重力式コンクリートダム、高さ120m)を築造して、上部および下部調整池としている。その間を約6kmの水路で結び、有効落差653mを得て最大使用水量510m<sup>3</sup>/sにより最大出力282万kW(単機出力47万kW×6台)の発電を行う揚水式発電所である。

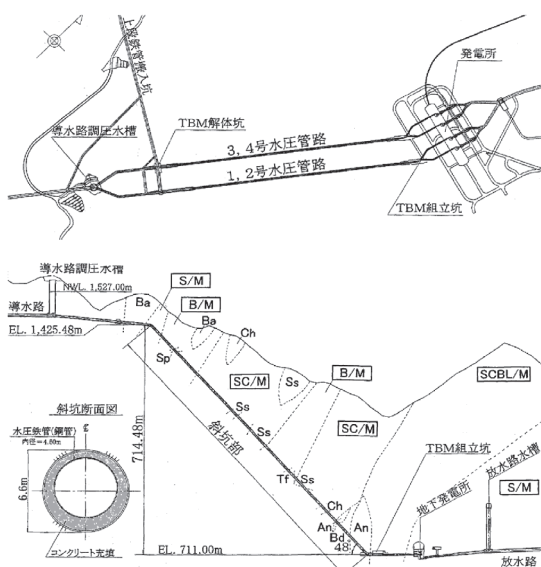


図-1 水圧管路平面図・縦断面図

このうち全断面斜坑TBM工法を適用した水圧管路斜坑は、掘削径6.6m、勾配48度、延長935mの斜坑である。

図-1に水圧管路の平面図と縦断面図を示す。

## 2. 地質概要

神流川地点の地質は、泥質岩を主体とする基質に様々な大きさの砂岩・チャート・凝灰岩および玄武岩・石灰岩などのオリストリス(外来岩塊)が海底地すべりにより混入した混在岩である。

水圧管路縦断沿いの地質および各地質区分は、図-1および表-1に示すとおりである。地層の走向は、斜坑軸と概ね直交しており、また、傾斜が60~80度の南落ちであるため、地層と斜坑軸がほぼ直交する位置関係になっている。

岩盤の強度は、大きいのが、地質性状の変化が激しく、弱層の分布状況が予測しにくい地質特性である。基質の泥岩に径で数10mにわたる規模のオリストリスが混入し、オリストリスと基質の境界部に弱層が認められる箇所もある。斜坑に出現する岩石の一軸圧縮強度は、泥岩で40MPa、砂岩で最大280MPa程度のものが確認されている。

表-1 水圧管路斜坑の地質区分

地質名		記号	
貫入岩	貫入礫岩	Bd	
	安山岩	An	
秩父中古生層	泥質岩基質 混在岩	砂岩・チャート・凝灰岩・ 玄武岩・石灰岩 岩塊混在岩 凝灰岩・玄武岩 岩塊混在岩	SCBL/M B/M
		砂岩・チャート 岩塊混在岩	SC/M
		砂岩 岩塊混在岩	S/M
	オリストリス (外来岩塊)	凝灰岩 玄武岩 砂岩 チャート 石灰岩 蛇紋岩	Tf Ba Ss Ch Lm Sp

\*東京支社機械部 \*\*東京支社土木部 \*\*\*東京支社土木技術部 \*\*\*\*技術研究所

### 3. 斜坑掘削技術の変遷と全断面掘削のメリット

一般に斜坑掘削は、安全管理の制約から上下作業が不可能である。また、切羽後方で後普請として支保を追加施工することが非常に困難であり、掘削に伴って十分な支保を選定し施工する必要がある。そのため水平坑掘削と比較して施工速度が遅くなる。

従来、斜坑掘削では、ズリ出し用の導坑を下方から掘削し、上方から切上げを行って来た。ここでは、これを2工程掘削と称する。また、クライマーに代表される従来の発破による斜坑掘削は、常に安全面に課題を残すものであった。そのため、より安全性の高い機械掘削であるレーズボーラーやTBMへと発展して来たが、依然2工程掘削あることに変わりはなかった。東京電力㈱の水圧管路を例に取り斜坑掘削技術の変遷を表-2に示す。

水圧管路斜坑工事に関して、機械化による効率性および安全性向上を目指し、塩原発電所の導坑掘削においてTBMが採用された。導坑の掘削径は2.3mであり、切り下がり拡幅は掘削断面寸法7.5m×7.8mを発破工法で実施した。次地点の葛野川発電所では、掘削径2.7mの導坑掘削用TBMに加え、拡幅掘削においても掘削径7.0mの切り下がりTBMを採用した。

機械化による合理化と安全確保を図るとともに、発破掘削に比べ、地山を痛める影響が少ないため、埋設する水圧鉄管の岩盤負担設計も有利に行われた。しかし、機械化によるメリットは大きいものの、2工程方式では導坑掘削から拡幅掘削への段取り替えに安全・工程面に合理化の余地が残された。

これらの経験を踏まえ、神流川発電所では、下部から全断面で切り上がる「全断面斜坑TBM工法」を用いることとした。これにより、1工程での斜坑掘削となることから従来の2工程方式と比較して施工速度が約1.5倍の急速施工が可能となり、中間作業坑も省略できることから、大幅な建設費の削減が見込まれた。

この全断面斜坑用のTBMは、国内初の試みであり、世界的にも斜坑用としては最大径に属するものとなる。

### 4. 施工システムの開発

TBMによる掘削は、道路トンネルなど水平坑では比較的多い実績を有しているが、斜坑への適用実績はまだ少ない現状にある。特に本地点では、切り上がり1工程方式の急速施工を実現するために、TBM(本体・後続設備含む)の滑落防止機構や人員・資機材搬

表-2 水圧管路斜坑掘削技術の変遷

項目 \ 地点	今市	塩原	葛野川	神流川							
初号機運開	昭和63年7月 (1988年7月)	平成6年6月 (1994年6月)	平成11年12月 (1999年12月)	平成17年7月 予定 (2005年7月)							
掘削内径・延長	φ6.7m×765m	φ7.5m×462m	φ7.0m×771m	φ6.6m×961m							
掘削工法	導坑 クライマー工法 [発破] (2.2m×2.2m)	切り上がりTBM工法 (φ2.3m)	切り上がりTBM工法 (φ2.7m)	切り上がり全断面TBM工法 (φ6.6m)							
	拡幅 NATM [発破] (馬蹄形 B=6.7m, h=7.0m)	NATM工法 [発破] (馬蹄形 B=7.5m, h=7.8m)	切り下がりTBM工法 (φ7.0m)								
掘削速度	導坑 73m/月 (最大91m/月)	平均25m/月 (地質不良により低下)	115m/月 (最大166m/月)	70m/月 (全断面)							
	平均30m/月		平均52m/月								
施工方法	導坑 53m/月 (最大79m/月)	68m/月 (最大104m/月)	94m/月 (最大173m/月)								
導坑①		切り上げ②		導坑①		切り上げ②		導坑①		切り上げ②	
クライマー		レグドリル		パイロットTBM		ガントリージャンボ		パイロットTBM		リーミングTBM	
レグドリル		クライマー		ドリフト				全断面TBM			

入設備の性能を向上させる必要があった。

また、TBM掘削を順調に進めるために、地山不良箇所を事前に検知し補強できればよい。斜坑掘削においては、崩落が発生すると、TBM自重に崩落荷重が加わり、滑落防止設備の性能が不足する危険性がある。また、地山変形が大きくてTBMが拘束されると、斜坑であるがためその解放が困難になる恐れがある。これら大断面化および長距離化による問題点を解決するために以下の技術開発を行った。

#### 4.1 TBM設備

斜坑掘削工事における作業の安全確保、シールド掘進の必要性、滑落防止機構への適用性を考慮し、全周を円筒外殻で覆ったフルシールド型を選定し、万一崩落が発生した場合にも対応できる十分なトルクと推力を装備した。

図-2にTBM本体構造および後続設備を含めたTBM全体構造を、表-3にTBMの主要諸元を、写真-1にTBM全体状況を示す。

カッターヘッド形状は、ドーム型とし地山の安定性向上を期待するとともに開口率を調整できる構造として地山性状に応じてズリの取り込み量の制御を図った。

TBM本体は、カッターヘッドおよびフロントグ

表-3 TBM主要諸元

項目	形状・寸法
型式	全地質対応型切り上がりTBM(フルシールド型)
機体長	10.3m(全長50.3m)
本体重量	450t(後続台車含む全重量600t)
モーター出力	160kW×10台
カッターヘッドトルク	721t・m(常用:361t・m)
カッターヘッド回転数	0.4, 2.1, 4.3, 5.2 rpm(4段切換)
カッター径・個数	17インチ×44個
フロントグリッパー押付力	2,500t
メイングリッパー押付力	5,400t
スラストジャッキ推力	2,180t(ラチスタブ:全16本)
シールドジャッキ推力	3,280t(全26本)

リップを装備した前胴部とメイングリッパーを装備した後胴部とから成り、前胴と後胴を連結するスラストジャッキをラチスタブとすることにより、機体内空間の確保および方向制御機能の向上を図った。後胴テール内全周にシールドジャッキを装備し、滑落防止のための反力を得ると共に地質不良部でメイングリッパーによる反力確保が困難な場合にセグメントを反力として掘進できる構造とした。

後続台車については4輛編成とし、運転操作室・油圧設備・受変電設備・制御設備などを装備した。TBM作業領域を仕切り、飛来落下を防止するために最後尾の台車に開閉可能な遮蔽板を設けた。

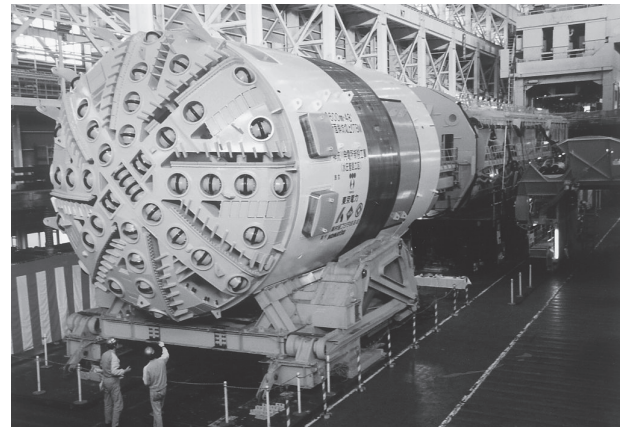


写真-1 TBM全体状況

#### 4.2 前方探査システム

TBMの大断面化により地山崩落のリスクが高まること、当地点の地質特性より性状変化の激しい地山を掘進することから事前に切羽前方の地質性状を予測し、崩落の危険性を察知するための前方探査がTBM掘進を進める上で重要であった。

弱層位置探査精度の向上および湧水の検知を目的としてTBMに装備している削岩機を用いた削孔検層システムを開発し、掘進30m毎に斜坑全線にわたり前方探査を行うこととした。

削孔検層では、岩盤の硬軟が削岩機出力エネルギーに反映されることに着目し、削孔速度、打撃圧、

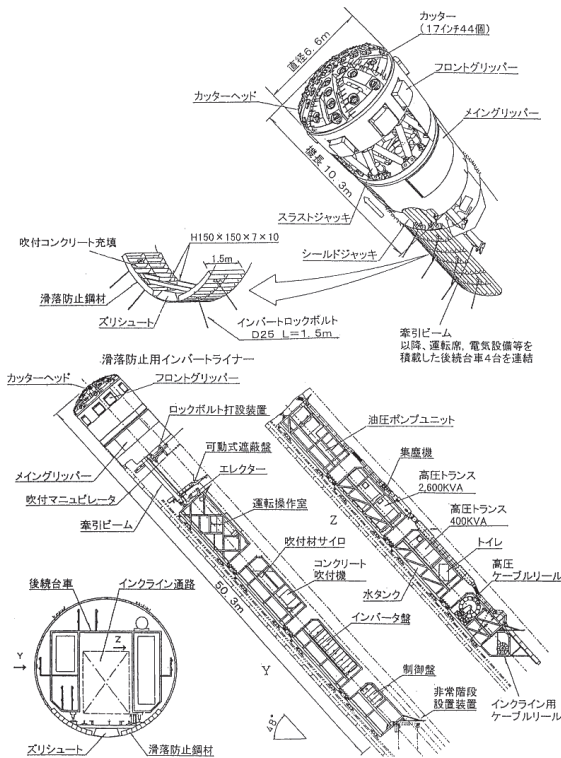


図-2 TBM本体・全体構造

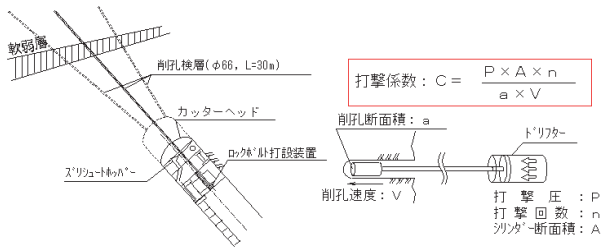


図-3 削孔検層システムの概要

打撃回数などのデータをリアルタイムに収録し、それらからエネルギーに換算した「打撃係数」の距離分布を求める。これに削孔時のスライムや湧水状況の情報を加え、切羽前方の地山性状を推定するものである。前方に弱層があると判定した場合には、削孔検層を追加して弱層の3次元的な配置を把握するとともに、ボアホールテレビシステム (FACE) を用いて、孔壁観察を行い、弱層の走向・傾斜や詳細な地質性状を把握することとした。

削孔検層システムの概要を図-3に示す。

#### 4.3 滑落防止機構と安全設備

斜坑に特有な設備として、非常時の滑落防止設備がある。葛野川発電所までの導坑掘削では、円筒の鋼板をロックボルトと裏込め注入によって、坑壁に固定し、反力アンカー部を設けた。この位置から坑軸方向に反力鋼材を組み上げ、その先端でTBMのシールドジャッキと接触させて滑落防止を行った。しかし、反力鋼材の設置に多くの労力・時間を要していたため、本工法では大断面化に伴う鋼材重量増加により、滑落防止性能の低下と更なる施工性の悪化が懸念された。

一方、葛野川発電所導坑掘削までの計測結果から、吹付コンクリートと滑落防止鋼材の付着力が大きいことが明らかになった。これを参考にして、より合理的な滑落防止設備として、図-3に併記したインバートセグメント方式を考案した。即ち、掘削直後に滑落防止鋼材枠を吹付コンクリートとロックボルトでインバート部の岩盤に定着し、岩盤とのせん断抵抗により滑落荷重を支持する設備である。この支持機構は室内模型実験および実施工時のシールドジャッキを用いた載荷実験によりその実用性を確認した。

また、セグメントから吹付コンクリート・ロックボルトまでの各種支保作業を迅速・安全に実施するために可動式遮蔽板を開発した。これは後続台車牽引ビームをガイドとして前後にスライドする作業足場であり、下部への落石防止設備の機能も兼ねている。さら

に支保作業時の小崩落に対する安全性を確保するため、シールドジャッキ1本毎に防護板を設けたムーバブルフードを装備し、独立して稼働させることで、地質確認や支保作業を行えるよう配慮した。

#### 4.4 斜坑用インクライン設備

従来の斜坑工事では資機材および人員輸送にはウインチ・ワイヤー牽引方式のインクラインを使用していた。長大斜坑ではワイヤー重量がインクラインより重くなり、インクラインの浮き上がり防止対策が必要となること、また、ワイヤーシーブが大型化し、インクラインがTBM本体直下まで進入できず、別の荷受設備が必要となるなどの問題があった。そのため、ピンラック・ピニオンギア方式の電動自走式インクラインを開発した。

開発したインクラインは、電動サーボモーターで駆動するピニオンギアが滑落防止鋼材上の枕木に設置したピンラックレールとかみ合い軌条を走行するものである。図-4にインクライン設備の概要・主要諸元を示す。

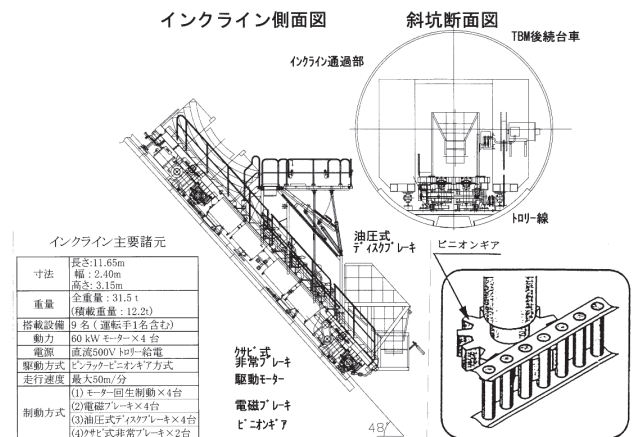


図-4 インクライン設備

### 5. 掘進管理

#### 5.1 掘進管理フロー

掘進管理は、図-5に示すフローに従って行った。掘進前に行う前方探査(前述の削孔検層システム)では、パーカッション式削岩機の削孔エネルギーに相当する打撃係数を算定し、周辺の水平坑での予備試験結果から打撃係数が1,200以下となった場合にはCL級岩盤が出現する可能性が高いと判断した。さらに削孔時のスライムによる岩種確認ならびに湧水の有無および量の想定も削孔検層結果に従って行った。

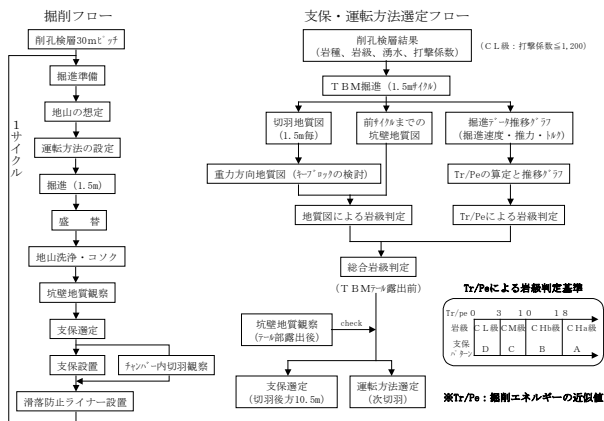


図-5 掘削管理フロー

地質観察については、当地点TBMのカッターヘッド開口率が最大20%と大きいこと、滑落防止鋼材設置等のため掘削が1.5m毎に停止することを利用して、支保実施直前の坑壁地質観察に先行し、カッターヘッド開口部からの切羽観察を全切羽面ごとに実施した。

またTBMの機械データとして、掘進速度・推力・トルクを自動記録しているが、TBMの掘削エネルギーの近似値に相当する「トルク(Tr)/貫入量(Pe)」が地質性状との相関が高いことに着目し、支保および運転方法は、前方探査結果、切羽および坑壁の地質観察結果、TBMの機械データである「トルク/貫入量」を総合して選定した。ここで貫入量(Pe)とはカッターヘッド1回転当たりの切り込み量であり、単位は[mm/回転]となる。

「トルク/貫入量」は、掘進初期の実績から3以下をCL級、10以下をCM級、10超過をCH級岩盤として分類した。

### 5.2 「トルク/貫入量」の地山評価への導入

図-6に示すように各カッターディスクに押付力Fiおよび回転力Piが作用して地山を掘削する場合、掘削で消費されるカッターヘッド1回転あたりの仕事量Wは次式のようになる。

$$W = 2\pi \sum (Li \cdot Pi) + Pe \cdot \sum fi \dots \dots \dots (1)$$

ここに Li : カッターヘッド中心から個々のカッターまでの距離[m]

Pi : 個々のカッターに作用する回転力[kN]

Pe : カッターヘッド1回転当たりの切り込み量[mm/回転]

Pe = V/r V : 掘進速度[mm/min]

r : 回転数[回転/min]

Fi : 個々のカッターに作用する押付力[kN]

これを単位貫入量当たりの仕事W0に換算すると

$$W0 = W/Pe = 2\pi \cdot Tr/Pe + S \dots \dots \dots (2)$$

ここに 総トルク Tr =  $\sum (Li \cdot Pi)$

総推力 S =  $\sum Fi$

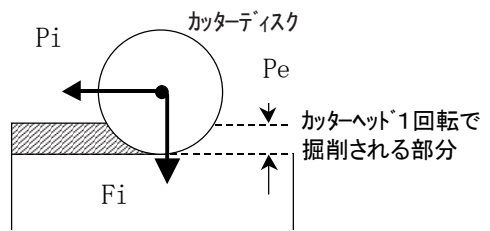
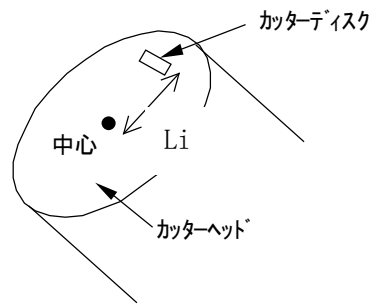


図-6 カッターディスクによる岩盤掘削状況

ここで、通常運転の場合、トルクは3,250kN・m以下、推力は13,800kN以下、掘進速度は40mm/min程度、回転数4.3rpmである。この関係から単位貫入量当たりの仕事W0を算定すると、W0のトルクによる成分は2,200,000kN・回転、推力による成分は13,800kNであり、推力による成分は全仕事量の1%以下となる。実際にはジャッキは13,800kNで押ししてもTBMと地山との摺動抵抗が4,000kN程度有り、推力による成分は更に小さいものとなる。

以上により掘削時のエネルギーは「トルク/貫入量」で近似できると考えた。

掘削終了後に岩種・硬さ・亀裂ピッチ・亀裂性状などの地質要素(地質専門家によるTBM後方の坑壁観察結果)を説明変数とし、「トルク/貫入量」を目的変数とした重相関分析を行ったが、重相関係数は0.89となっており、「トルク/貫入量」が地質性状を表す指標として有効であったことを確認した。

掘進管理に用いた管理図の例を図-7に示す。これより削孔検層による打撃係数・「Tr/Pe」とも堅硬な砂岩岩塊および比較的軟質な泥岩を良く捉えていると評価できる。

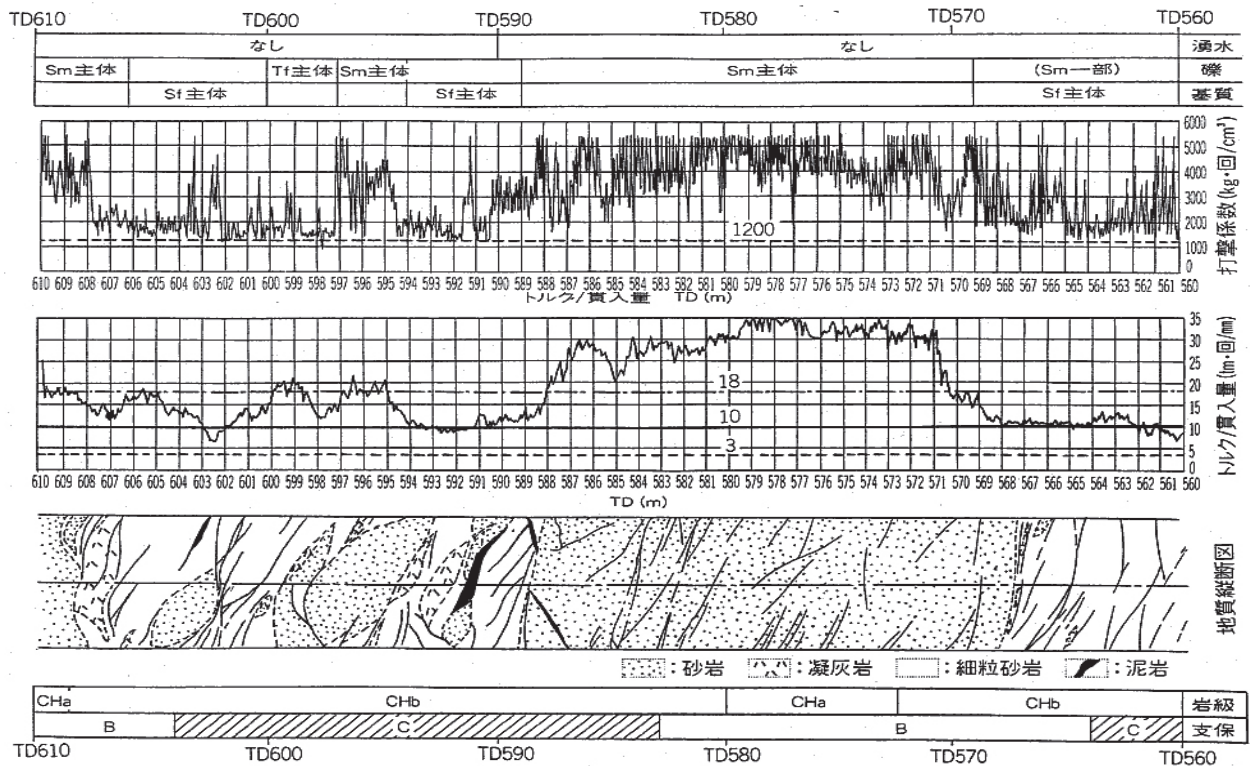


図-7 掘削管理図 (一例)

## 6. 掘進実績

掘進工程の計画と実績を図-8に示す。斜坑掘削は、平成11年11月末より開始した。翌2月末に初期掘進(62m)を完了し、段取り替えを行い、3月21日より本掘進を開始し、平成13年4月4日に計画工期内で無事故・無災害により貫通した。

本掘進開始当初は、作業員の慣れ、インクラインの電気系統の故障等により、月進60m程度と計画工程を下回る進行であった。9月には月進115.5m、10月には月進105mと100mを越える月進行を記録した。その後、鉄管設計のための平板載荷試験や弾性波速度測定等により月進行は70m程度となったが、本掘進期

間中の平均月進行は71mであり、計画目標70m/月を達成することができた。

## 7. おわりに

本工事は全断面斜坑掘削では世界最大規模であったが、斜坑掘削を良好な品質で計画どおり完了できた。また、700mを超える高低差にも拘らず到達点で、上下33mm、左右21mmの高精度で貫通できた。

本報告が今後の斜坑掘削の更なる進化の一助となれば幸いである。

最後に本工事の計画から施工にわたり、終始ご指導いただきました東京電力(株)神流川水力建設所上野第二工事事務所の皆様に謝意を表します。

### 【参考文献】

- 1) 西脇芳文、「神流川発電所の計画と調査・設計の概要」、電力土木、No. 273、pp. 20-25、1998. 1
- 2) (社) 日本トンネル技術協会、「TBMハンドブック」、2000. 2
- 3) 澁谷武弘他、「全断面斜坑TBM工法による急勾配斜坑掘削」、JTA 第58回施工体験発表会、pp. 33-40、2002. 11

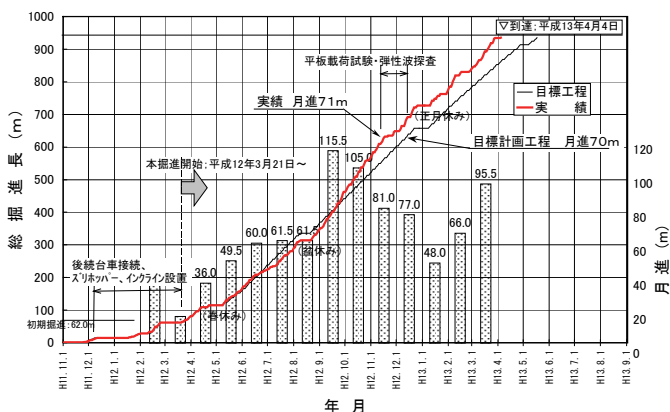


図-8 掘削工程の計画と実績