

31. 小断面TBMの合理化施工システムの開発と実用化

佐藤工業㈱：*名村 均、北村 昭久、
佐々木 俊明

1. はじめに

水力事業の導水路トンネル工事や大断面トンネルの先進導坑に代表される小断面のトンネル工事では、在来工法に比べ安全で急速施工が可能なトンネルボーリングマシン（TBM）による施工が増加している。しかし、TBM工法は、支保・運搬・掘削の各要素においてまだ施工的に様々な問題点が存在しており、システムの合理化されているとはいえない。

問題点を解決するために、「掘削と覆工の同時施工を可能にする自動吹き付けシステム」、「複線レール方式の採用を可能とした特殊ずり鋼車と積込装置」、「TBM機械データによる地山評価」の3つの技術開発を行い、合理化施工システムを実用化した。

本報は、実用化した小断面TBMの合理化施工システムの概要と、永久覆工を施工しながら4,925mの導水路トンネルを約13ヶ月で掘削完了し、平均月進約381m/月（国内記録）の進捗を達成した新大長谷第一発電所（第1工区）導水路トンネル工事の実績を紹介するものである。

2. 工法の課題

(a) 支保関連

小断面トンネルは作業空間が狭いので掘削と覆工の同時併行作業が困難であり、例えば掘削完了後に覆工を開始せざるをえないなど、結果的に長い工期が必要となる。また、切羽を直接観察できないため、迅速な支保選定ができない。

(b) 運搬関連

小断面トンネルでは、ずりの搬出効率の高い連続ベルコン方式や複線レール方式が適用外となり、大掛かりな処理設備や資材搬入設備が別途必要な流体輸送方式や、搬出効率の悪い単線レール方式を採用せざるをえない。そのため、TBM本来の最大の利点である連続掘進が行えなくなる。

(c) 掘削関連

TBM工法本来の課題である、切羽を直接観察できず掘削中の地山状況を正確に把握できないことは、支保選定が遅れがちとなり支保材料の搬入によるタイムロスが生じることや、地山トラブルに遭遇し掘削が長期間中断しがちである。

3. 急速施工のための開発技術

上記の問題点を解決するため、以下の3つの技術を開発・採用し、掘進速度・品質の向上を図った。

3.1. 自動吹き付けシステムの開発による掘削と覆工の同時施工（問題点(a)の改善）

TBMの掘削と併行して、TBM直後で自動吹き付けシステムによる覆工を迅速に行い掘削と覆工

の同時施工を可能とした。自動吹き付けシステムは、吹き付けロボットによる吹き付け（覆工）作業の全自動化を可能としたもので、急速施工のみならず、作業環境の改善、品質の向上を果たした。

本システムは自動吹付システム、自動断面測定システム、自動吹付厚測定システム、自動測量システムからなり、TBM工法における掘削坑壁面の水洗い、掘削面断面計測、掘削坑壁面への吹付、吹付面断面計測、吹付厚算出の作業を自動で行う。（写真-1参照）

吹付ロボットはTBMの後方に架設し、掘削・覆工一体型TBM工法として実用化した。これによりTBMの掘削作業と並行して、TBMテール直後で吹付けを迅速に行い、早期に覆工を完成させることができる。写真-1

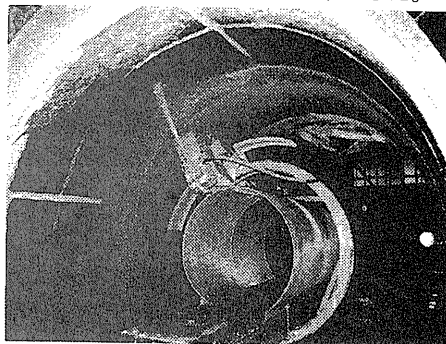


写真-1 模擬トンネルに於ける吹付け状況

吹付作業の自動化により、作業員の粉塵作業や苦渋作業からの開放が可能となり、作業環境が改善され、安全性が向上する。また、高精度の吹付厚管理システムにより、目標の吹付厚さが確実に確保されるほか、吹付厚さのばらつきが減少して品質が向上する。これにより、余分な吹付材の使用を抑えることができ、コスト低減が図れる。（図-1、図-2参照）

▲特 徴

- ①吹付ロボット本体は、旋回リングと吹付ノズルから構成され、TBMのズリ排出用のベルトコンベヤフレームに取付けられたレールに搭載されており、TBM本体から独立して自走できる。
- ②吹付ロボットは、レール上を自由に移動でき、TBMの掘進速度にかかわらず、吹付ロボットの制御が可能であり、TBMによるトンネル掘削作業と並行した吹付作業が可能である。
- ③吹付ロボットは、吹付仕上がり面の出来栄を良好にする制御システムを有しており、円滑な吹付け面仕上げが可能である。
- ④吹付ロボットは、レーザー測定機による自動断面測定システムと吹付厚自動管理システムを有しており、掘削作業を中断することなく、掘削の余掘り量、吹付けの余吹き量や吹付厚さデータが自動計測され、高精度の管理がパソコンで可能となる。

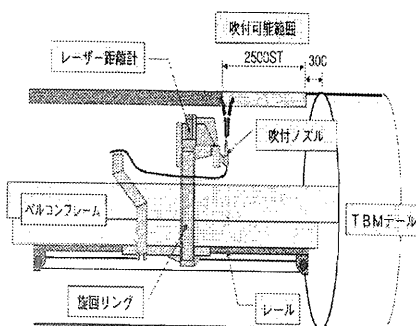


図-1 自動吹付けロボット

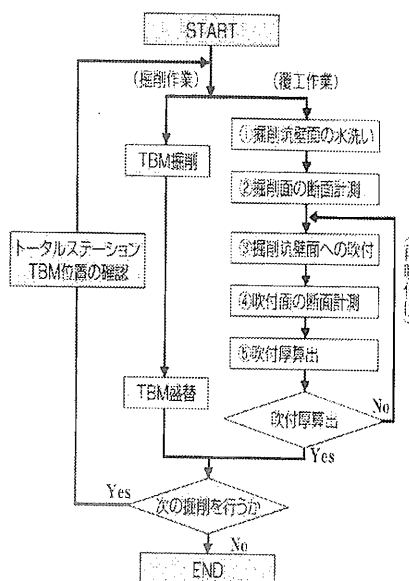
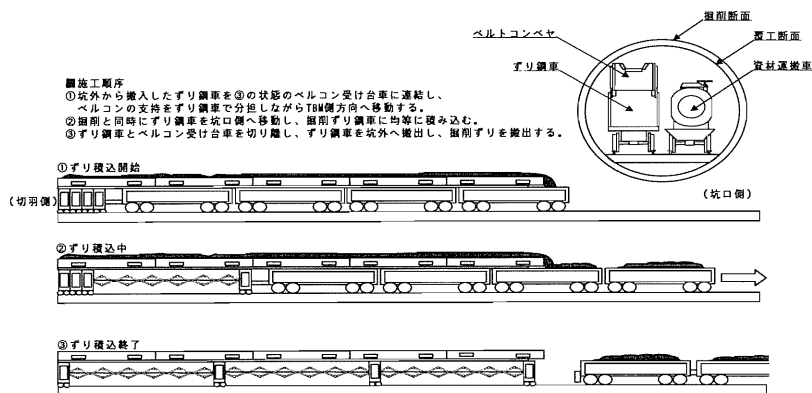


図-2 システムフロー図

3.2. 複線レール方式の採用を可能とした特殊ずり鋼車と積込装置（問題点(b)の改善）

小断面トンネルの狭い空間において軌条設備を複線化しTBMの高速掘進に対応するために、上部に支持ローラーを装備しベルトコン受け機能を有した小断面用特殊ずり鋼車と、伸縮方式（パンタグラフ方式）のベルトコン受け台車によってベルトコンベアを支持（固定の支柱なしで仮受け）する方式を考案した。

この方式の採用により、これまで必要とされていた固定式の支柱や、トンネル天端にアンカーを設置してベルトコンベアを吊持するの必要がなくなり、小断面トンネルの狭い作業空間においても複線軌条方式の採用を可能とした。軌条設備の複線化により、ずり搬出効率が飛躍的に向上するとともに、ずり搬出を妨げることなく迅速な資材搬入も可能となり、さらに先進ボーリングやTSPなどの前方探査も比較的容易に行えるようになった。図一3に掘削ずりの搬出作業の順序図を示し、その手順を以下に述べる。



図一3 掘削ずりの搬出作業順序図

3.3. TBM機械データによる地山評価（問題点(a)(c)の改善）

掘削中のTBM機械データの活用により切羽の地山評価を行う技術を開発した。これは、TBMの機械データから掘削エネルギー値を算出し、地山判定の1指標とするもので、切羽の地山状況のリアルタイムでの把握と迅速な支保パターンを選定を可能とした。

■特徴

- ① TBM工法ではカッターヘッドで切羽全体を掘削するため、掘削時にマシンにかかる抵抗値は岩石の強度のみならず亀裂等の情報もすべて含まれていると考えられる。そのため、マシンデータを用いて算出される掘削体積比エネルギーの値は岩盤全体の特性を示す指標として用いることができる。
- ② TBM掘削の急速施工に対応できるように、パソコン画面によるリアルタイムの表示が可能であり、掘削切羽が見えないTBM掘削において切羽の地山情報が即座に得られ、安全で確実な施工が可能となる。
- ③ 試験区間において得られたデータを、さまざまな統計手法を用いて解析することで、それ以降の掘削における岩盤等級や支保パターンを決定する際における基準とすることが可能となり、より確実で安全なTBM掘削によるトンネル施工を可能とする。
- ④ 本工法における掘削体積比エネルギーの値は、TBMの掘削時に得られるマシンデータを用いて以下の式によって算出する。(図一4参照)

$$E = \{ (F - F_0) \times L + 2\pi \times (T - T_0) \times N \} / V$$

$$N = n \times L / v$$

ただし、

E:掘削体積比エネルギー (tf/m³)

F:スラスト推力 (tf)

F₀:スラスト推力の初期値 (tf)

T:カッタトルク (tfm)

T₀:カッタトルクの初期値 (tfm)

N:カッタヘッドの回転数

n:1分あたりの回転数 (rpm)

v:スラスト速度 (m/min)

V:掘削体積 (m³)

L:1ストロークあたりの掘進長(mm)

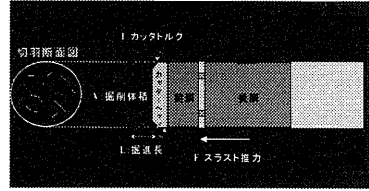


図-4 TBM掘進データの概要

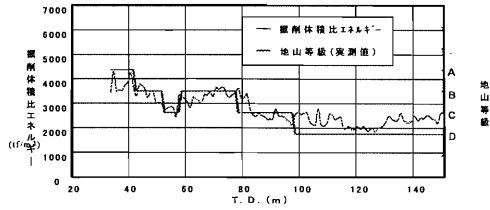


図-5 掘削体積比エネルギーと地山等級の比較の例

4. 新大長谷第一発電所 (第1工区) 導水路

トンネル工事施工実績

4.1. 工事概要

新大長谷第一発電所は、富山県南方の婦負郡八尾町地内に計画され、神通川水系井田川 (大長谷川) に新設の取水設備を設置し、最大流量 6.0m³/s、有効落差 152mを得て、最大出力 7,500kwの発電を目指して計画された。本工事はそのうちの導水路トンネルを施工したものであり、図-6に示すように、総延長は 5,281mであり、1号~4号トンネルより構成され、発進横坑及び中間横坑の2本の横坑より開始した。下流側の3号、4号トンネルは土被りが浅く地質が脆弱であるため在来工法で施工し、導水路トンネルの大部分である1号、2号トンネル (合計 4,925m) については、本報で紹介した各種システムを導入した掘削外径 2.8mの全地質対応型の掘削覆工一体型TBM工法により掘削した。

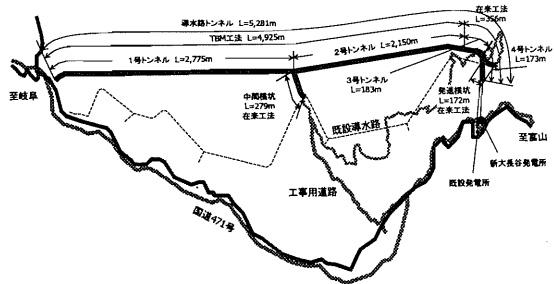


図-6 トンネルルート図

4.2. 地形地質概要

地質縦断図を図-7に示す。

計画地点一帯は飛騨山脈の西縁に接する飛騨高地の北端部に位置しており、周辺の地形としては標高差 600~1,000mの急峻な山地からなっていた。計画地の地質は、飛騨変成岩と船津花崗岩類を基盤岩とし、北陸層群最下部の徹原累層が不整合に

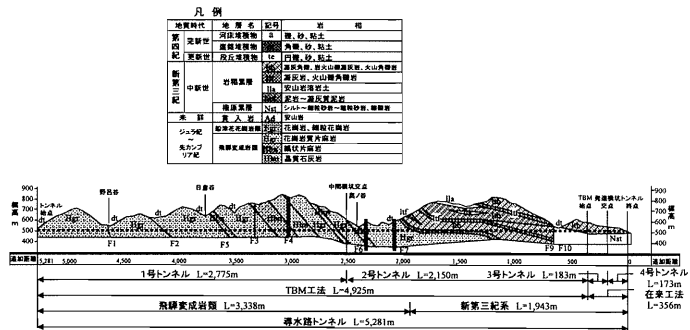


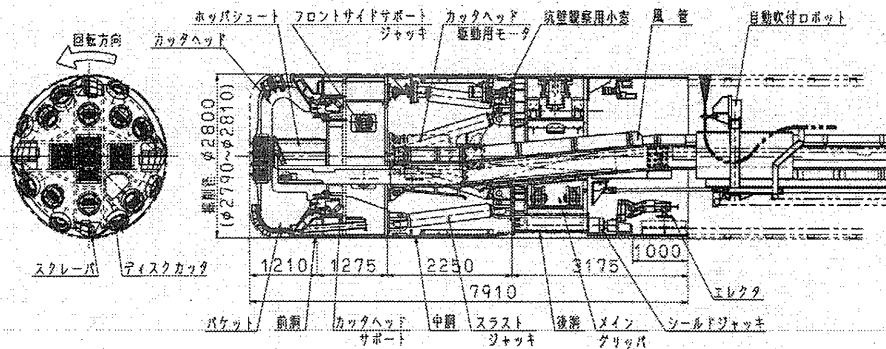
図-7 地質概要図

基盤岩を覆い、また、^{下伏}楡原累層は北陸層群の岩稲累層に整合関係で覆われていた。導水路経過地の地質は、上流側は晶質石灰岩を伴う片麻岩及び花崗岩等の硬岩を主体とした飛騨変成岩類であり、下流側には軟岩及び中硬岩である新第三系の凝灰岩や凝灰角礫岩が分布していた。

4.3. TBMの概要

小断面トンネルにおける従来型TBM工法の課題や地点条件等を考慮し設計・製作した当工事に採用したTBMの概要を以下に述べる。TBM本体構造の概要を図一8に示す。

- (1) 幅広い地質に対応するため、機体が全面シールドに覆われているダブルシールド形式とし、前胴部、中胴部、後胴部の接合点が屈曲可能な構造とした。また、通常の地質ではメイングリッパにより地山から反力を得るスラストジャッキによるスラスト推進とし、グリッパ反力が得られない不良地山の場合には、後方のセグメント等から反力を得るシールドジャッキによる推進機能を付加した。
- (2) 吹き付けによる覆工は永久覆工とし、覆工作业は掘削と同時に施工が可能な自動吹き付けシステムを搭載した。
- (3) ずり搬出に影響せず支保・覆工材料などの運搬が効率的かつ迅速に行えるように、また、先進ボーリングやTSP探査などの切羽前方探査が十分に行えるように、軌条設備は完全複線化した。
- (4) ターゲット自動追尾型の自動測量システムを採用した。
- (5) TBMの機械データをリアルタイムに収集・分析し掘削中においても切羽面の地山状況を把握でき、かつ、正確な支保判定が確実にできるようにTBM機械データ（掘削体積比エネルギー値）による地山評価システムを導入した。



図一8 TBMの本体構造

4.4. 工事実績

4.4.1. 実施工程

図一9に本工事における実施工程を示す。TBM工事は、平成11年5月中旬より初期発進を始め、度重なる多量湧水（最大坑内湧水量8t/分）、底盤部に堆積する多量のヘドロ、特殊地山による3度のTBM拘束、突発湧水による天端崩落、連続的な地山崩落などに見舞われたが、平成12年7月上旬には無事貫通を迎えることができた。

自動吹き付けシステムによる永久覆工を施工しながらのTBM掘削は、数多くの改良を重ねつつも確実にその機能を果たし、覆工一体型TBM工法の実現を果たした。

さらに、完全複線化によるずり搬出方式の採用や、その他さまざまな導入システムともあいまって、TBM区間 4,925 mの導水路トンネルを約 13 ヶ月で掘削完了し、平均月進約 381m/月（国内記録）の進捗を達成することができた。また、平成 12 年 3 月には、当工事において最大月進 701m、最大任意月進 785mの進捗を達成し、国内のトンネル工事における月進記録を更新することができた。

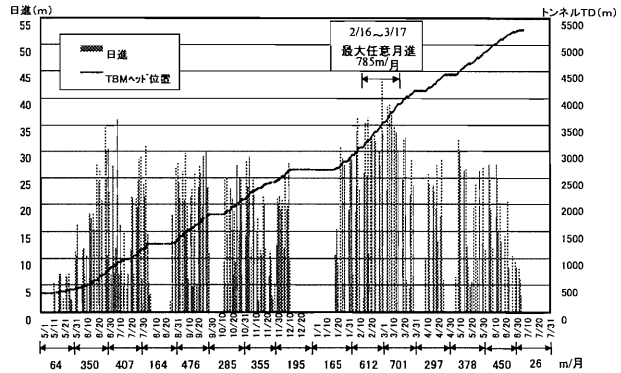


図-9 TBM掘削実績

4.4.2. 機械データによる地山評価の検証

図-10 に掘削エネルギー値と支保パターンとの関係を示す。

掘削エネルギー値は、1 ストローク掘削長（約 1,200mm）の平均値を算出し示している。支保パターンの選択は、掘削ずりの形状やTBM本体の中胴部に設けた観察用小窓とテール部での掘削坑壁面観察などによって決定している。両者の傾向はよく一致しており、掘削エネルギー値は、切羽の地山状況にある程度予測し、支保決定のための1指標とすることが可能といえる。ただし、本施工では、まだ十分な技術が確立されていない掘削体積比エネルギー値のみでの地山評価による支保判定は危険であると判断し、支保判定は従来の壁面観察を重視した方法で行い、掘削体積比エネルギー値は補助的に用いた。しかし、切羽が直接観察できないTBM掘削において地山状況をリアルタイムで把握でき、TBMの運転制御に大いに活用し、トラブル回避につながった機会も多くあった。また、掘削中に支保パターンをある程度絞り込めることは、切羽に支保材料を仮置きできない小断面トンネルの施工において迅速な支保材料の搬入が可能となり急速施工に大いに貢献した。

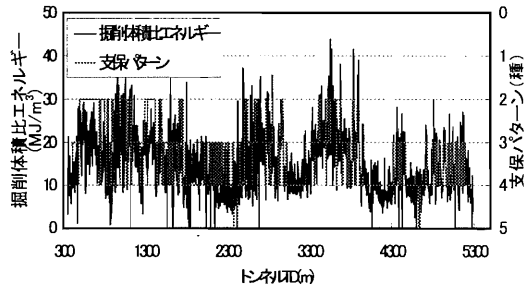


図-10 掘削エネルギー値と支保パターンとの関係

5. おわりに

現在、水力事業以外でも、第二東名高速道路や新幹線建設にみられるようにトンネルの比率は増加し、その延長も長大化している。一方、公共投資の削減により建設投資に対する効果や採算性が重要視されている。今後のトンネル建設に際してはコスト縮減や工期短縮（早期供用）の観点から高速施工や合理化施工が重要な課題となっている。

TBM工法を系統的に捉え、掘進速度を阻害する要因を分析し、3つの技術開発によって改善し、平均月進の国内最高記録を得たことは十分評価できるものと考ええる。また開発した技術の中で特に、自動吹き付けシステムは吹き付けによる覆工の品質・作業環境を著しく向上させており、このシステムは、今後山岳トンネルにおけるTBM工法において、生かされれば幸いである。