

ラチス式スラストジャッキ方式による TBM 施工

TUNNELING BY TBM EQUIPPED WITH LATTICE-TYPE THRUST JACKS

高見沢 滋¹⁾・石山 正雄²⁾・中村 泰則³⁾

Shigeru TAKAMISAWA, Masao ISHIYAMA, Yasunori NAKAMURA

While many TBM tunnels are constructed in recent years, rapid excavation system, seismic prediction ahead of tunnel face and tunnel support system for weak geological features are improved actively. Many long distance tunnels by TBM cannot be excavated smoothly up to now, because rock mass in Japan is complicated and not uniform. But the construction work of Tsukui headrace has completed by using various new technology. This report describes the construction plan and results, and development of the automatic direction control system.

Key Words: TBM, lattice-type thrust jack, automatic direction control system

1. はじめに

近年、TBM の採用件数は増加し、それに伴い、高速施工化、切羽前方地質の予測、脆弱な地質に対する支保方式の開発などが活発化してきている。従来、地質が複雑で変化が激しいわが国では TBM で順調に長距離施工できた事例が少ない中、本工事は種々の新技術をおりませ、TBM 施工を完了させることができた。本内容はその施工内容及び自動方向制御システムの開発について報告するものである。

2. 工事概要

建設省宮ヶ瀬ダム津久井導水路トンネルは、延長約 5200 m、内径 4.6 m、勾配 1/1000 で、ダムから放流された水を道志川に最大 40 m³/s 導水する役割を果たす。そのうち呑口側約 4837 m を掘削径 5.4 m の TBM で施工した(工期：平成 5 年 2 月～平成 10 年 3 月)。TBM 工事の特徴は以下の通りである。(図-1 参照)

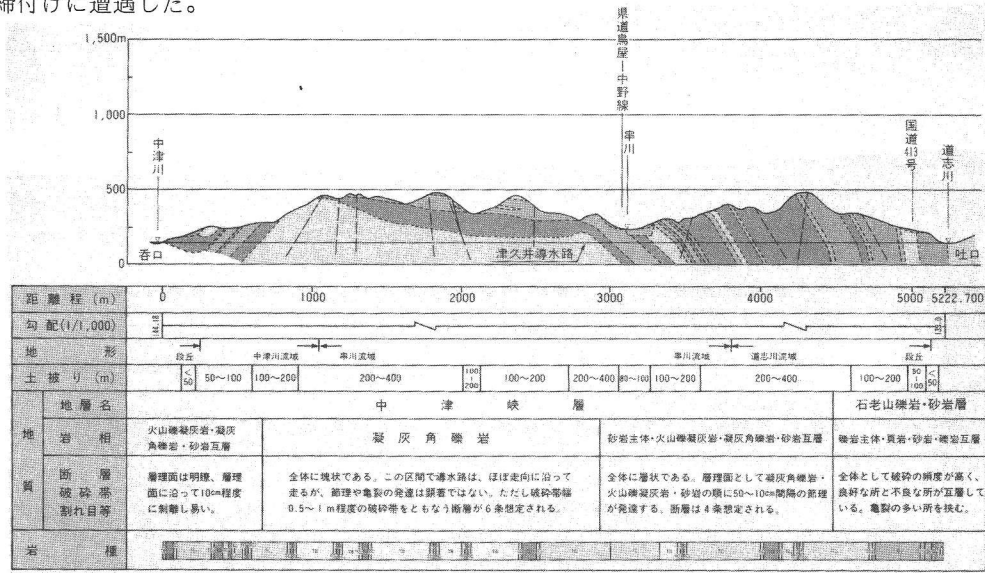
- ①当時国内最大径(φ5400mm)のフルシールドタイプの TBM を採用し、ラチス式スラストジャッキを国内で初めて導入した。
- ②二次覆工のインバート部はプレキャスト製セグメントを使用することにより、掘削と覆工の併進施工を実施した。
- ③ラチス式スラストジャッキ対応の TBM 自動方向制御システムを開発・実用化した。
- ④切羽前方岩盤状況を確認するため、弾性波による HSP 法により探査を行い、さらに必要に応じ、切羽から先進ボーリングを実施した。
- ⑤残土搬出に垂直ベルトコンベアシステムを採用した。



図-1 位置図

3. 地質概要

地質縦断面図を図一2に示す。TBM 掘削区間の地質は、新第三紀中新世の丹沢山地愛川層群に属し、呑口から 3400 mまでは火山礫凝灰岩・凝灰角礫岩が主体で、以降は礫岩・凝灰岩が主体をなした。弾性波速度 $V_p = 4 \sim 5 \text{ km/s}$ (堅岩部)、一軸圧縮強度 $q_u = 500 \sim 2000 \text{ kgf/cm}^2$ 、土被りは 50~400 mであり、亀裂が発達した破碎帯(粘土少量咬む)が数カ所確認され、呑口から 3800 m(以降 TD.3800 mと略す)付近の破碎帯では TBM 本体が締付けに遭遇した。



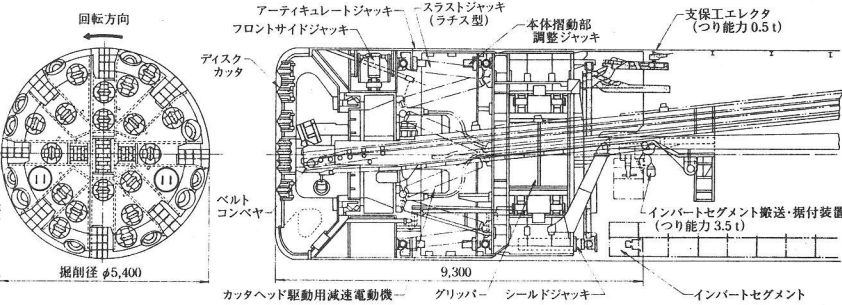
図一2 地質縦断面図

4. TBM の概要

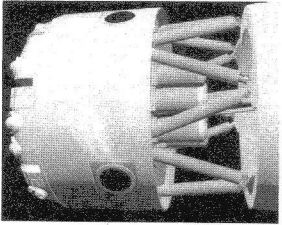
TBM の概要を表一1、図一3、図一4に示す。本機は前胴部と後胴部からなる構造で、その間にスラストジャッキが配置されている。同ジャッキは機体外殻に沿ってハの字状に傾斜配置(ラチス配置)されており、TBM の掘進機能、方向制御機能、掘削中のカッターヘッドの回転により生じるトルク反力を受ける機能を合わせ持っている。方向制御ジャッキ、トルク反力ジャッキを別々に備える必要があった従来のメインビーム方式と比較して、ベルトコンベアを機内中央に配置でき、比較的広い機内空間が得られる。また、インバートセグメントから補助推進反力をとれるようシールドジャッキを2本配備している。ディスクカッターは17インチ(432 mm)の大型サイズを使用し、内側(機内側)から安全に交換ができる構造としている。

表一1 TBM 諸元

掘削径	φ 5400 mm
機長	9300 mm
重量	本体 240t
総出力	約 1400kw
ディスクカッター	φ 17 1/4 × 37 個
カッター回転数	6.3rpm
トルク	139tm
スラストジャッキ	155tf × 1600st × 6組 (12本)
グリッパ	左右各 1000t (掘削量各 200mm)
フロントサイトジャッキ	100tf × 135st × 4本
シールドジャッキ	150tf × 1150st × 2本



図一3 TBM 構造図

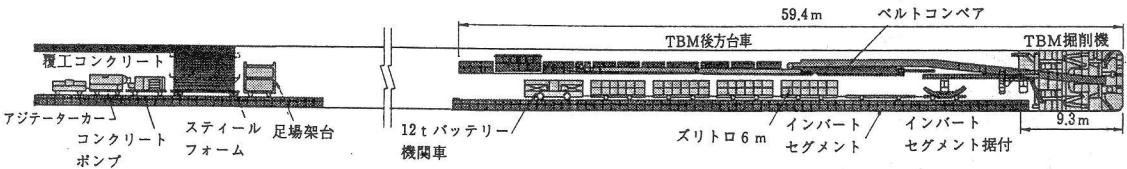


図一4 ラチス式スラストジャッキ

5. 覆工併進施工

従来このクラスの断面で覆工併進はむずかしいとされていた。本工事では工期短縮をはかるため、インバート部にプレキャスト製セグメントを使用することで、覆工併進を可能とした。これにより、二次覆工施工時、軌条の盛替えが不要となり、残土搬出用ズリトロ等はアーチコンクリート打設用スチールフォーム内部を通過することにより、覆工作業と同時作業が可能となった。スチールフォーム通過時、軌条設備が単線の中央部交互通行となるため、バッテリーロコの待避時間ロスが生じたが、掘進のサイクルタイムに影響を与える程ではなかった。また、速やかに安定した走行軌条が確保でき、鋼製支保工の足付け、TBM の補助反力確保にも有効であった。（図－5、図－6 参照）

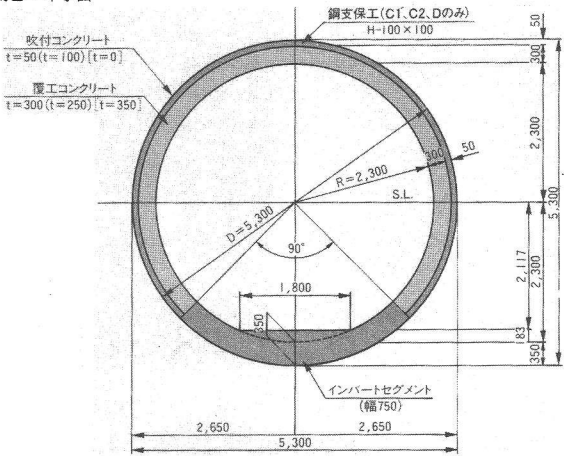
掘削実績は全区間の平均で 212 m/月、最大で 401 m/月、最大日進 30 m/日を記録する一方、覆工も約 1000 m 工法から 12 m スパンで平均 250 m/月を記録した。覆工併進に伴う掘進速度の低下はほとんどなく、工期短縮には大いに役立った。



図－5 施工内容

6. 支保パターン及び TBM 機械データ

TBM 掘削区間における支保パターン及び機械データを表－2 に示す。支保パターンの選定は、TBM 機械データ、岩の物性値(簡易測定器による)を参考にし、シールドテール部での地山状況から判断した。概して、B、C 1 パターンは B 級岩盤に、C 1' パターンは CH～CM 級岩盤に、C 2 パターンは C L 級岩盤に、D パターンは D 級岩盤に対応しており、D a～d パターンは破砕帯区間に採用されている。



図－6 断面図

表－2 支保パターン・TBM 機械データ

支保パターン	鋼製支保工	コンクリート吹付他	平均掘進速度	平均総推力	平均カット電流	延長
B	無普請	無普請	2.56 cm/分	693 tf	913 A	139.6 m
C 1	無普請	無普請	3.14 cm/分	666 tf	932 A	304.5 m
C 1'	H-100(@1500)	肌落部に矢板	3.30 cm/分	584 tf	865 A	4189.8 m
C 2	H-100(@1500)	t = 5 0	4.15 cm/分	300 tf	711 A	114.75m
D	H-100(@1200)	t = 1 0 0	3.60 cm/分	290 tf	661 A	71.25m
D a～d	H-150(@750～連続)～	(t = 1 0 0)	2.05 cm/分	413 tf	707 A	16.1 m

(C 1'は、当初設計になかったが、建設省と協議の上、新設した)

コンクリート吹付は、特に天端部の場合、ベルトコンベア上部から至近距離の吹付となり、粉塵による周辺機械の損耗、リバウンド処理の手間が大きく、本工事に適用には多大の労力を要した。一方、C 1'が全区間の 87%を占めたが、肌落ちによる安全性が確保されるとともに、吹付による時間的ロスも避けられ、本工事の施工方式に最もマッチしたパターンであった。

7. 破碎帯遭遇、脱出

7-1 施工経緯

TD.3800 m付近からテール部の崩落が徐々に大きくなり、総推力も増加傾向になった。そして、TD.3830 m掘進中、TBM 前胴が機体締め付けに遭い、総推力 1000tf かけてもほとんど進まなくなった。ディスクカッター(外周部)交換後再開するが、カッターヘッドが回転不能となった。坑壁とマシンの間に崩落ズリが充満し、さらに切羽前方部が崩落進行し、カッターヘッド全面にも及んだためである。

カッター回転は起動時正転・反転の幾度にも及ぶ繰り返しによりようやく最初の 1 回転が可能になり、以降の回転は問題なく、ほとんど無負荷で回転できた。推進は休まず継続的に続けることで総推力は 500tf に下がり(1 m 掘進後)、前胴の締め付けの危機を脱した。

後胴部は破碎帯崩落部を通過時、テール部より多量の崩落(破碎された凝灰岩及び粘土 16 m^3)が生じ、従来の支保方式では対応不能となった。崩落が際限なく続くのを抑さえ、作業員が安全に支保工建て込みができ、多量の崩落岩石に耐えられるよう、H-150×150 支保工を連続的に設置した。作業は支保工 1 基分、後胴を前進・支保工設置(テール外にて)の繰り返しで行った。(図-7 参照)

グリッパーは設置面積が大きいため、若干のスリップは生じたが、グリッピング機能は損なわれなかった一方、フロントサイドジャッキはグリッピング不能に陥り、シールドジャッキの使用(セグメントを反力)によりようやく後胴の引き寄せが可能となった。

以上約 16 m の破碎帯通過に 20 日を要したが、無事乗り切ることができた。破碎帯は走行 N 50 W 傾斜 80 N~80 S で厚さ 30~50 cm の断層粘土からなっており、その南側 2~5 m ゾーンもかなり劣化していた。崩落はこのゾーンが天端に位置した時、大きく生じた。この破碎帯前後における崩落量は合計 60 m^3 に及んだ。

後に、崩落した空洞部は L W で充填し、二次覆工は $f'ck=500 \text{ kgf/cm}^2$ の高強度コンクリートを打設し、支保能力の向上をはかった。

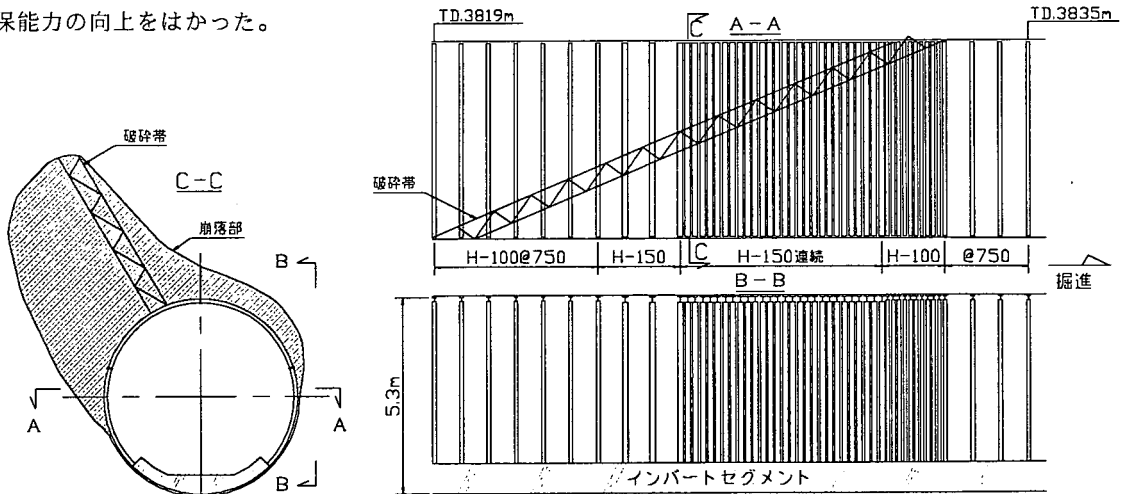


図-7 破碎帯通過部

7-2 破碎帯通過に関する考察

① TBM 本体

カッタートルクは切羽崩壊が起きた場合、その抵抗により起動時大きな負荷がかかる。電気式の場合、モーターが段階的に起動されていくため、この時点で負荷が大きいと、モーターが全部起動する前に過負荷でストップし、回転不能になる。近年はインバーター方式、ポールチェンジ方式等が採用されており、この種のトラブルは生じにくくなっている。

総推力に関しては、破碎帯部でシールド外周部と崩落ズリの摩擦抵抗が増す場合を考慮に入れ、十分な能力を持たせ、補助推進ジャッキ(シールドジャッキ等)を充実させる必要がある。

②支保形式

大規模な崩落が生じる個所では、シールド工法のセグメントに相当するものを採用できるようにする必要がある。現在各種ライナーが開発されているが、機能と経済性を兼ねそなえている必要がある。

8. 自動方向制御システム

ラチス式スラストジャッキ方式の TBM を日本に初導入したのを契機に、当 TBM に自動方向制御システムを開発することにした。シールド機に準じたシステムから出発し、以下の改良の末、実用化が達成された。

8-1 システム構成

本システムは、TBM 本体に設置した各センサー類からの出力をリアルタイムに自動方向制御用パソコンに取り込んで、TBM の現在の位置と姿勢を求め、TBM がトンネル計画線に沿って掘進できるように、掘削目標値の設定及び各スラストジャッキの制御量を演算し、その値をシーケンサーに送信してスラストジャッキを自動で操作することにより方向制御を行う。システム構成は、図－８に示すように、自動計測システムと方向制御システムに分けられる。

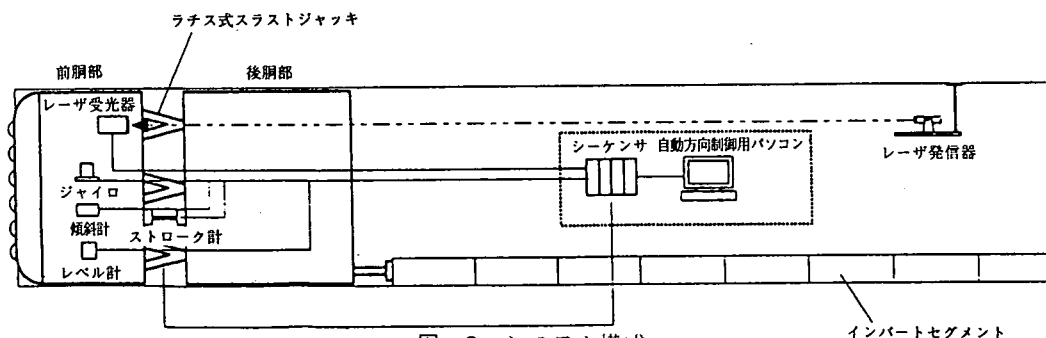
自動計測システムは以下の機器から構成される。

- ①レーザー受光器(前胴後部に設置)——前胴後部の水平位置を計測する。
 - ②ジャイロ(前胴後部に設置)——前胴の水平方向の姿勢を計測する。
 - ③レベル計(前胴後部に設置)——前胴後部の鉛直位置を計測する。
 - ④ピッチング計(前胴後部に設置)——前胴の鉛直方向の姿勢を計測する。
 - ⑤ジャッキストローク計——スラストジャッキの伸び量を計測する。
- ①と②から TBM 先端の水平座標を、③と④から鉛直座標を、⑤から延長距離をそれぞれ算出する。

方向制御システムは以下の機器から構成される。

- ②シーケンサー——パーソナルコンピュータと各センサー・スラストジャキの仲介を行う。

方向制御の考え方を図-9に示す。なお、事前にオペレーターによる手動操作での掘進時のTBM挙動データを収集し、その解析から得られたアルゴリズムを自動方向制御プログラムに取り入れた。

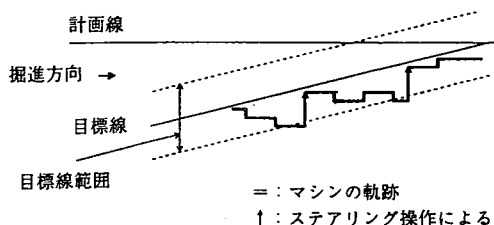


図一8 システム構成

8-2 本工事への適用結果

シールド工法による土砂掘削と違い岩盤掘削であるため、自動計測に関し、以下の問題が生じた。

- ① TBM 本体が激しく振動した。(100Hz 以上の高周波領域が支配的で約 10G)
- ② 切羽から発生する粉塵により坑内の視界が妨げられた。
- ③ 湧水の激しい区間が存在した。



図—9 方向制御の考え方

対策として以下の項目を行った。

- ①ジャイロ、レーザー受光器、ピッチング・ローリン計に防振対策を実施した。
 - ②規制緩和に伴い高出力のレーザー発信器を使用した。
 - ③TBMに配備されている湿式集塵機(カッターヘッドから直接吸引する方式)の機構を改良した。
- 方向制御に関しては、以下の問題に対し対策を実行し、軌道に乗るようになった。
- ①従来の手動操作では生じない大きな姿勢角度が生じ、自動方向制御プログラムの適用範囲を越えた状況での作動となったため、目標線に収束しない場合があった。
→姿勢角変化の範囲を限定することにより改善された。
 - ②岩盤が極めて硬い場合(礫岩、2 cm/分の速度で800tfの総推力)、ステアリングを切ってもストローク差がつかず、場合によっては後胴の姿勢も変化し、自動制御が不能となる場合が生じた。
→掘進速度を落とすことにより、後胴の姿勢変化を押さえ、ステアリング操作頻度を増やして、所定のストローク差をつけ易くした。

8-3 実施結果

上記の対策・改良を加えた後の方向制御結果を図-10に示す。手動操作に比べ安定した高い精度が得られた(水平-10~20 mm、鉛直-15~5 mm)。自動と手動はオペレーターの自由意志で切り替わるようにしていたが、TBMの総運転時間に対する自動運転時間は図-11に示すように約80%を記録した。残り20%はレーザー光が感知不能のため手動操作したもので、実質的には100%の自動運転と言える。

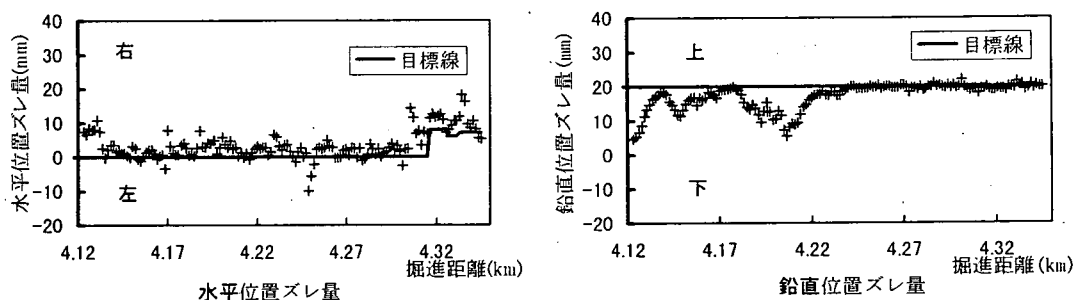


図-10 方向制御結果 (TD.4123 m ~ TD.4345 m)

9. おわりに

TBM 工法においても、シールド工法と同様に機械化・省力化・自動化をはかり、日本特有の複雑な地質にも対応していく必要がある。本工事は各種の新技術をおりませ、2年かけ、4837 mのTBM施工を完了したが、その間種々の対策を講じ、多くのデータを収集・解析できた。本内容がTBMの今後の発展に少しでも参考になれば幸いである。

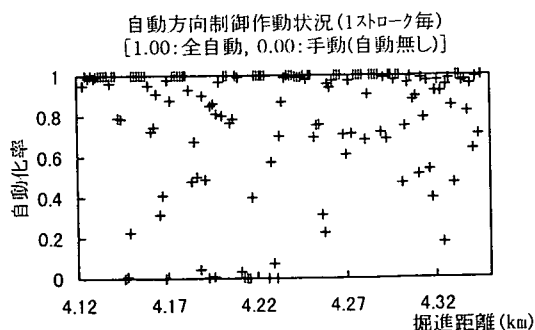


図-11 自動化率

【参考文献】

- 1)植松・高見沢・松枝・南部・福原：TBM自動方向制御システムの開発、建設の機械化 1996.4
- 2)植松・飯酒盃他：硬質岩盤中のTBM掘削特性などに関する一考察、第28回岩盤力学シンポジウム 1997.1
- 3)植松・石山・高見沢：津久井導水路のTBM施工、建設機械 1997.12