

20. TBM 掘削全断面鉄道トンネル高精度急速施工

清水建設(株)：○藤井 攻、茅野 浩一、小野 啓二

1. はじめに

TBM (Tunnel Boring Machine) とは機械制御により掘削を行う全断面トンネル掘削機をいい、主として山岳トンネルにおいて硬岩地山の機械化掘削のためにこれまで開発が進められてきた。TBM工法は1960年後半から日本に導入されていたが、日本の岩盤地質が不均一であるなどの理由によりその普及は伸び悩んでいた。その後、地質が複雑で変化の激しい状況を特に意識したTBM及び支保方法の開発、改良、改善が進み、TBM工法の地盤に対する適用性の拡大と信頼性の向上、ならびに急速施工性によって再び施工件数が増加し始めた。

用途別に見ると施工実績の約8割が上水道、

下水道、水力発電用導水路などの水路トンネルであり、道路・鉄道トンネルにおいてもすべて導坑掘削での実績である。

本論文で報告するトンネル建設工事は国内では初めてとなるTBM掘削による全断面の鉄道トンネル建設工事であり、主に現場で使用した機械設備の仕様を説明し、掘削の状況・掘削管理方法など説明する。

本施工では人力補助の低減、作業環境の改善を目的とし、設備の機械化、自動化の検討を行い、高精度急速施工を実施したものを報告する。

2. 工事概要

国土交通省は、昭和24年に策定された利根川改訂改修計画の一環として、関東首都圏におけ

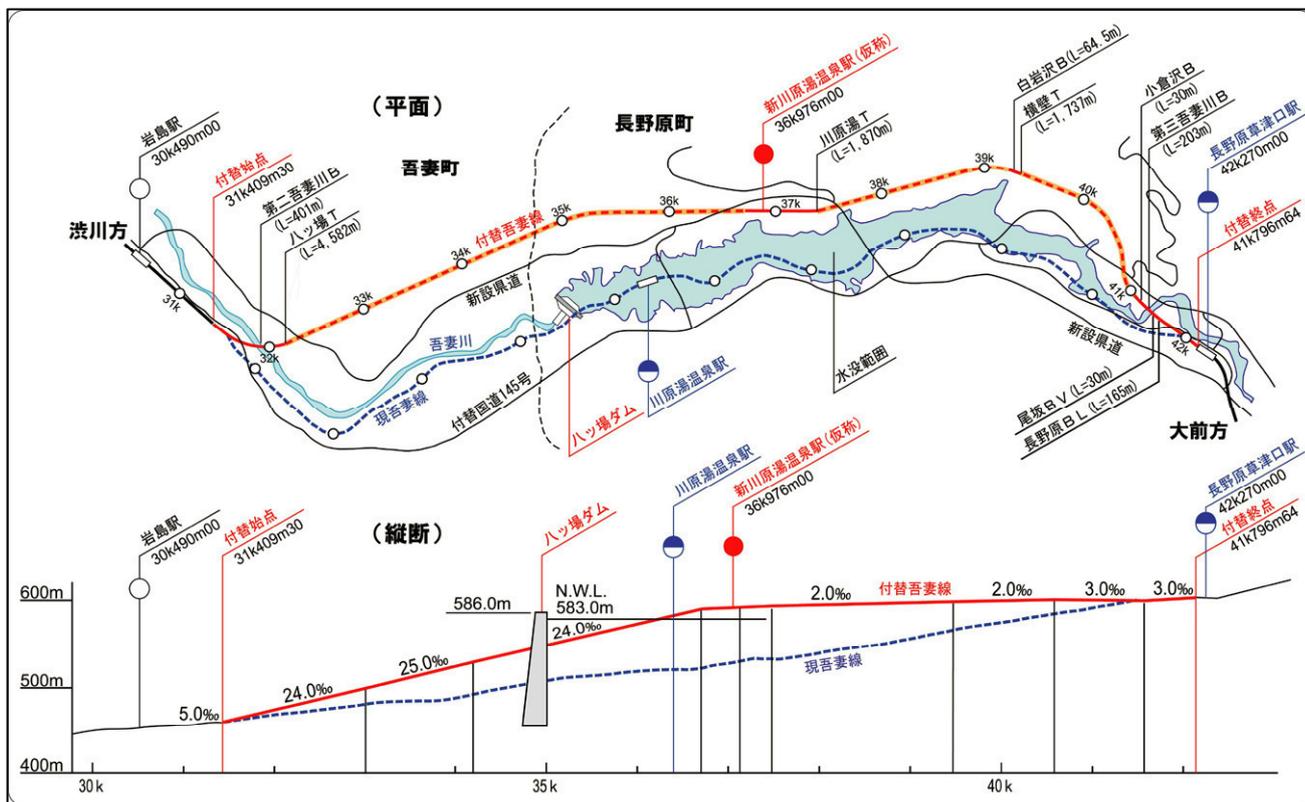


図-1 吾妻線付替工事 全体概要図

る利根川流域の洪水調整と水資源開発を目的としたダム群の建設を計画実施してきた。その一つに八ッ場ダム建設があり、これにより JR 吾妻線は川原湯温泉駅を含む約 6 k m の区間が水没することになった。そこで国土交通省による JR 吾妻線の機能補償として、岩島駅から長野原草津口駅間の約 10.4 k m の路線付替え工事に着手することになった。図-1 に吾妻線付替全体概要図を示す。

本工事はその路線付け替え工事の一部として発注された鉄道トンネル工事としては国内初めてとなる TBM 掘削による全断面の鉄道トンネル建設工事である。以下に工事概要を示す。

工事名称	吾妻線岩島・長野原間付替八ッ場T新設工事
発注者	東日本旅客鉄道株式会社 上信越工事事務所
施工者	清水・西松・間 共同企業体
工事場所	群馬県吾妻郡吾妻町・長野原町
工期	平成11年11月30日～平成18年1月18日
トンネル延長	4124m(TBM掘削)
掘削外形	φ6820mm
掘削方式	TBMによる全断面機械掘削

3. 機械設備

本工事で使用する機械設備の構成はトンネル掘削を進める TBM、吹き付け・ロックボルト施工を行う TWS、掘削したズリを坑外まで搬出するための延伸ベルコン、換気設備、給水設備等などから構成されている。以下、主な設備について説明する。

(1) TBM掘削機

地山は全般に固結度も高く掘削時に坑壁からの抜け落ちや緩みの増大等の可能性が小さく良好な地山と考えられることから TBM は「オープン型」を考案した。TBM の外観を図-1 に示す。

しかし、ルーフサポートのないオープン型の TBM の場合、切羽近傍での支保が可能で地山の緩みを即時改良し最小限に抑える事ができる反面、肌落ちや小崩落に対する防護がなく、危険を伴う。そこで、必要最小限の長さのルーフサポートを取付けることで、駆動装置などの主要機器の保護と崩落に対する作業の安全が図れ、かつ

オープン型のメリットである切羽近傍での地山補強を可能とした。



写真-1 TBM 外観

TBM の各名称を図-2 に示す。

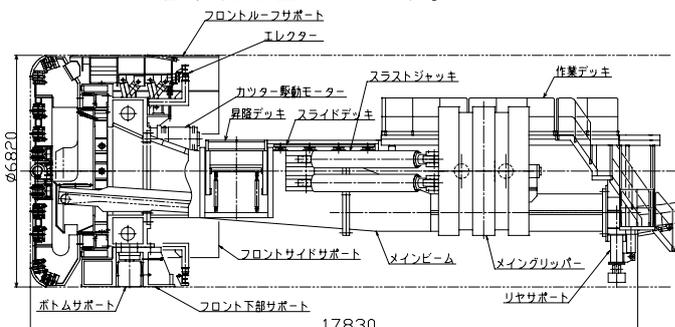


図-2 TBM各部名称

カッターヘッドはカッター間隔を小さくしカッターを密に配置できるようにドーム形状とし、最外周のゲージカッターは交換頻度を低減する為、カッターの同一軌跡上に 2 個のカッターを配置する「2 パス」とした。

カッターは 17 インチシングルカッターを 38 個、センター部 8 個とゲージカッター 2 個を取り付けられるようにした。

カッターリングの形状は磨耗交換時までで一定した刃先幅（貫入幅）を保つことができる平型カッターとした。

カッターリングの材質としては実績と経済性から SNCM（ニッケル・クロム・モリブデン鋼）を使用した。

カッターサイズについては、通常、比較的硬質で均一な岩盤ではカッター荷重を大きくしてカッター貫入量を大きくしたほうが効率のよい

掘削が出来る。カッターの最大荷重は内部のベアリングサイズなどによって決定されるため、出来るだけ大型のカッターを装備することが望ましいが、カッター交換時の作業性や掘削径に対するカッターヘッド面盤上の取付けスペース、岩盤の圧砕に必要なカッターピッチなどを考慮し、今回は17インチカッターとした。カッターの交換方法はカッターヘッド内部から交換可能な「内取付け方式」とし、不良地山部でも安全に作業ができ、面盤からの出代を最小限にして面盤の山留め効果が期待できるようにした。

カッターフェイスは掘削ズリを効率よく取り込める様に出来るだけ大きくとることが望ましいが、不良地山での切羽崩落を防ぐ山留めとしての機能を考慮し、面盤型とした。スリット幅はカッターピッチから想定される礫径から200mm程度とした。フェイススクレーパ部の開口は粘土質等に対応できるように2種類の開口率を選択できるようにし、開口率はスリット調整板を取付けた状態で13%、スリット調整板なしで18%とした。

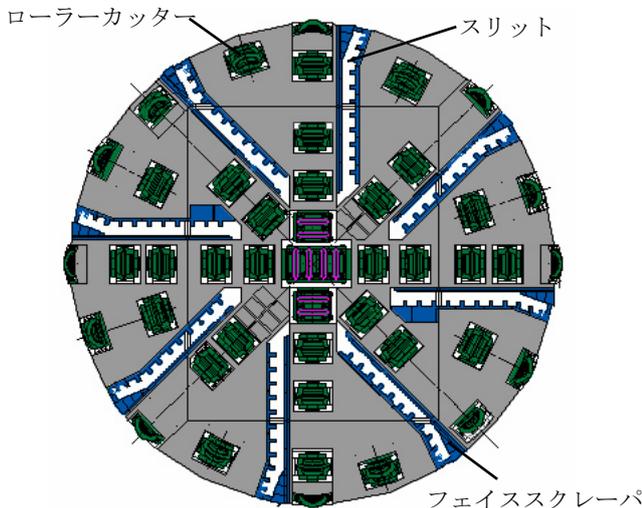


図-3 カッターフェイス

カッター支持方式はセンター部に空間が確保され、排土装置が設置でき、カッターヘッドへのアクセスが可能な周辺支持方式とした。カッターヘッド支持に使用される軸受けは負荷能力の高い3ローラ型軸受けを採用した。図-3にカ

ッターフェイスを示す。

カッターヘッドの駆動方式はインバータ制御による電動モータ駆動とし、カッタートルクはカッターによる破砕掘削トルク、カッターヘッドの摩擦抵抗、掘削ズリの掻き上げトルクなどから決定した。カッター回転数は純掘削速度と密接な関係にあり、カッター貫入量が一定であれば回転数が高いほど、純掘削速度は向上するが、カッターのベアリング、シールの寿命、ズリ搬出量などから円周速度の限界があり、今回は0~6回転までの可変速とした。

スラストジャッキ推力は掘削に必要な推力（カッター許容荷重）、本体部摩擦抵抗、後続台車の牽引抵抗などを考慮して決定した。

推進反力となるメイングリッパーの推力は所要掘削推力に余裕をもたせ、かつ、トンネル壁を傷めない様グリッパシューの接地面積を大きく取り、低接地圧化を図った。

表-1 にTBMの仕様を示す。

表-1 TBM仕様

形 式	オープン型	
掘 削 径	φ6.82m	
全 長	約92.8m	
重 量	約5500kN	
総 出 力	約2300KW	
カッター		
取付方式	内側取付方式	
カッタ径	17インチ	
取付個数	48個	
カッター駆動装置		
電動機	315KW×6台	
トルク	3071/6142kN・m	
回転数	0~6rpm	
推進装置		
総推力	12142kN	
ストローク	1800mm	
伸長速度	MAX 100mm/min	
メイングリッパー		
グリッパー力	35280kN	
張り出し量	250mm	
接地圧	3.46Mpa	

後続台車は門型構造とし、作業員通路とメンテナンス空間、およびバッテリーロコの運行確

保を図った。トンネル掘削断面と後続台車の位置関係を図-4に示す。

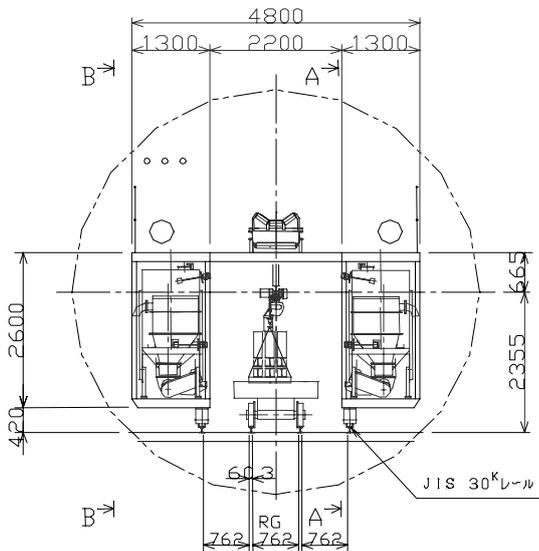


図-4 掘削断面と後続台車の位置関係
次に後続台車の諸元を表-2に示す。

表-2 後続台車諸元

No.1 台車 (左)	No.1 台車 (右)
吹付けプラント	吹付けプラント
No. 2 台車	No. 2 台車
泥水タンク	運転席
No. 3 台車	No. 3 台車
休憩室	インバータ制御盤
No. 4 台車	No. 4 台車
油圧ポンプユニット	起動器盤
No. 5 台車	No. 5 台車
集塵機用水タンク 集塵機	トランス 集塵機
No. 6 台車	No. 6 台車
コンプレッサー	動力ケーブル
No. 7 台車	No. 7 台車
計装ケーブル	ニーブレス組立台車
No. 8 台車	No. 8 台車
長尺風管カプセル	アトバソングテルピース

その他、本機にはサイドサポートに載荷試験

ジャッキを左右1基ずつ装備した。これにより掘削時を除いて、常時ジャッキの押し付け力による地山変位量を測定し、岩盤評価するための「岩盤載荷試験」を行い、地山評価に役立てた。

(2) TWS (トンネルワークステーション)

TBMの本体から後続台車でトンネル掘削に必要な機械を集約し、施工の急速化を図れるような設備を搭載した。図-5に示す。

① 前方マンケージユニット

ルーフサポート直後の天端120度範囲の吹付け作業を行う為のマニピレータ部、作業員が乗り込み足場とするケージ部、リング支保工を組み立てる把持装置部から構成されている。

② 前方穿孔機ユニット

上半120度範囲のロックボルト打設、及びフォアポーリング穿孔に使用する。

③ 後方穿孔機ユニット

後方での下半ロックボルトの打設、及び前方でのフォアポーリング穿孔を行う。このユニットは唯一作業床の前方から後方まで移動可能な台車であり、上半ロックボルト打設時には前方まで移動し、2台のドリフタでロックボルトの打設が可能となっている。また、このユニットには切羽前方探査装置を装備しており、切羽前方地山を穿孔し、その穿孔速度や打撃圧力等のデータをパソコンに取り込み掘削エネルギー、破壊エネルギーなどを算出しそのデータから地山の硬、軟や破碎帯等脆弱地山の有無を予知、判定できるようにした。

④ 後方マンケージユニット

後方でのロックボルト打設時の足場として装備した。

⑤ 吹付けロボット

今回、急速施工を目的とし新規開発したもので、この吹付けロボットはTBMメインビーム上の作業床に設置された走行用レール上を走行し、吹付け位置まで移動した後、本体を90度回転させて吹付けノズルをガイドリングに沿って移動させ、トンネル内全周を吹付けするものである。

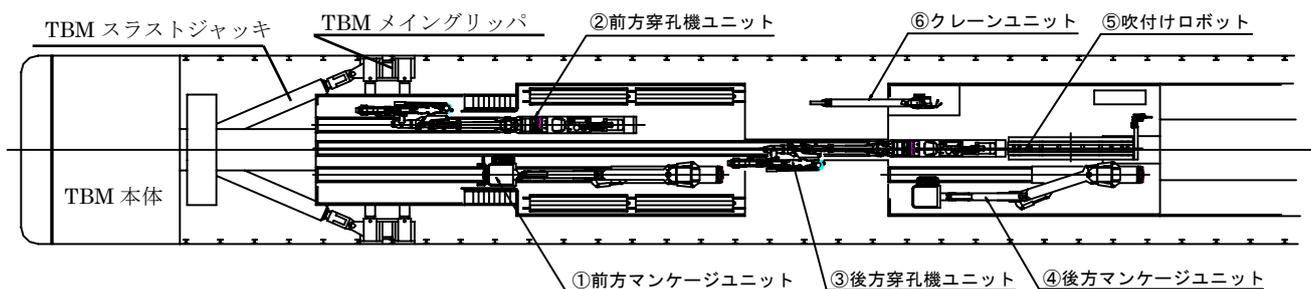


図-5 TWS (トンネルワークステーション)

このロボットの特徴を以下に示す。

- TBM 掘削断面内周面 (360 度) への吹付けが可能である。
- 特別な足場を用意する必要もなく、ガイドリングの旋回中心と掘削断面の中心を一致させることで、吹付け面とノズルの距離を一定に保ち定量的で均一な品質の吹付けコンクリートによる支保を実施することが可能となる。
- 吹付けロボットを使うことで人力補助の低減が可能となる。

支保作業をしていないときにはガイドリングを架台よりも上方に収納した状態にして格納しておくので、その他覆工作業のための作業スペースの確保、見通しの確保が可能となる。

吹付け機の設置状況を写真-2 に示す。



写真-2 吹付けロボット

吹付け範囲を図-4 に示す。

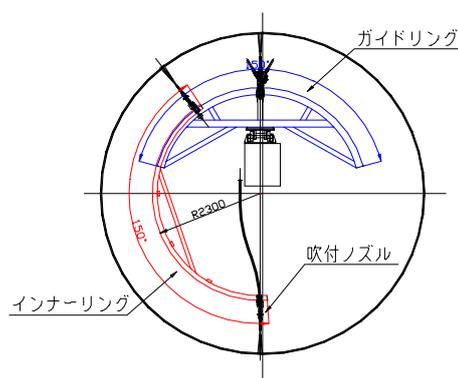


図-4 吹付け範囲図

インナーリングはガイドリング内を通過し反対側にも移動できるので、全周の吹付けが可能となる。

⑥ クレーンユニット

バッテリーロコで搬入された鋼製支保工およびロックボルト、モルタルなどの資材を TBM 作業床上に引き上げる為に使用する。

3. 掘削管理

本論文では人力補助の低減、作業環境の改善を目的とし、設備の機械化、自動化の検討を行い、高精度急速施工を施工するために掘削機械の検討したが、掘削するトンネルの掘削精度が最も重要である。TBMが計画線上を正確に掘進するためには、地質の影響等により変化する掘進姿勢と掘進方向の差異 (TBMの挙動特性) を考慮し、適正な姿勢で掘進する必要がある。

TBMが岩盤を掘進中、機械の特性、測定の誤差等で偏位、偏角の差異が生じた場合、無理のない掘進軌跡になるようにリアルタイムに本体の方向制御を行わなければならない。

また掘進中は、地質の変化、機械の特性等により計画線から離脱する事がある。操作室に姿勢監視および制御装置が配置されており、リアルタイムに方向・姿勢制御ができるようなシステムを検討した。

TBM掘進時の掘削精度を確保するためには、TBMを常に制御し、計画された線形を保つようにしなければならない。また、客観的な地山評価を行うためにも以下のシステムを導入し掘削管理を行った。

今回、採用したシステムの概要図を図-9に示す。

TBM掘削の測量管理には自動追尾型のトータルステーションを使用し、マシンのピッチング、ローリング、ヨーイング、水平偏差、垂直偏差をリアルタイムに測量しTBM運転席で掘削機の位置が把握できようにし、掘進精度の確保に役立てた。同時に片番1回の手測量も同時に行い測量確認を行った。トータルステーションの設置状況を図-10に示す。

4. おわりに

本トンネルの掘削計画での蛇行許容量は水平、垂直ともに±70mmとし、20mmを超えた時点で方向修正のジャッキ操作を行うこととし、多種の情報を基に正確な掘削を行う事が出来ている。

今回はTBMの方向・姿勢制御と自動測量システムについて述べたが、これらの掘削管理は地山観察と施工データの収集、地山性状から掘進までにいたるまでのTBMの機械データを集

積し、適正な機械性能で発揮させ施工していることを付け加えておく。



図-10 トータルステーション配置状況

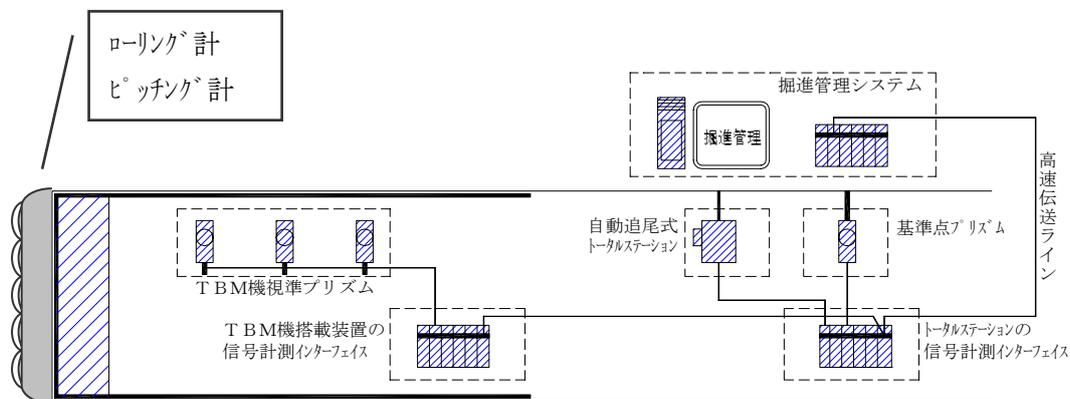


図-9 自動測量システム概要