

縮径・復元トンネル掘削機（縮径 TBM）

外径を縮小・復元し地山拘束からの脱出を容易に

VARIABLE DIAMETER TUNNEL BORING MACHINE

The TBM can be reduced and restored the diameter to escape from ground constraint

市川 政美*¹, 小林 修*², 中山 卓人*³

Masami ICHIKAWA, Osamu KOBAYASHI and Takuto NAKAYAMA

Tunnel Boring Machine (TBM) can be constructed faster than New Austrian Tunneling Method (NATM). However, there is a risk that the TBM will be restrained and it will be impossible to excavate due to the collapse of the mountain when encountering the fault zone, adhesion of rocks due to hard rock cutting. In order to release the ground which restrains the TBM, it is necessary to cut out the restrained ground by manpower. In this work, it is necessary to build support over the entire length so as to cover the direction of the TBM, and to go out to the outside of the fuselage, so it is dangerous and inefficient, and a long-time work is required for a large-diameter TBM. Taking these factors into consideration, we have developed the TBM that can be escaped from the ground constraint by adding a function to mechanically reduce the diameter of TBM.

Keywords : Tunnel Boring Machine, TBM, Mechanically reduce the diameter
トンネル掘削機, TBM, 機械式縮径

1. はじめに

わが国の山岳トンネル施工は、均質な地層が長距離にわたり続くような地山条件は少なく、断層破砕帯、湧水が多く存在するような自然条件によって過酷な作業を極めてきた。

一方近年の山岳トンネルでは長距離掘進が計画されており、またトンネルの径も大断面だけではなく導水路トンネルや送水路、パイプラインのような小断面での高速施工技術も必要とされている。

このような中でトンネル掘削の安全性向上や効率化、省力化を図るためには危険作業の機械化を図り技術の改善を踏まえて現在の TBM が開発されてきた。しかしながら、TBM は従来の山岳トンネル掘削工法と比較し、高速施工は可能であるが掘削地山の崩落や硬岩切削時の岩ズリ付着等により、マシン本体が拘束され掘削不能となるリスクが挙げられる。今回、掘進中に地山に拘束されても、TBM の径を機械的に小さくする機能を付加することで地山拘束状態から脱出することが可能となる掘削機（縮径 TBM）を開発した。従来の地山拘束状態からの解除方法と比較して、工期を最大で約 6 分の 1 に短縮可能であり、危険を伴う人力による作業を機械化することで安全性が飛躍的に向上する。

2. 開発の背景

2.1 TBM 工法の長所と短所

山岳トンネルの掘削方式は、大別すると発破方式

と機械掘削方式がある。その中で機械掘削方式には自由断面掘削（ブーム式、アーム式）、ブレイカ掘削、円形断面の TBM などがある。TBM の型式には、掘削部にシェル状のルーフのみを装備したオープン型と、本体構造を完全にシェルで覆ったシールド型に大別される。TBM は機械のメイングリッパにより推進反力を確保し、カッターヘッドを回転させながらディスクカッターを岩盤に押し付けて、岩盤を圧砕しながら掘削を行う。TBM 工法は、道路トンネル、鉄道トンネル、水路トンネルおよび大断面トンネル用の先進導坑等に用いられ、発破掘削と比較して高速掘削が要求される場合に適している。

TBM 工法の長所と短所について発破工法と比較する。

(1) 長所

- ①掘削作業を連続して行うことができるので施工速度が速く、安定した地山を長距離掘削する場合には優位性が高い。
- ②衝撃を与えずに地山掘削ができるため、岩盤への緩みがほとんど発生せず、崩落や肌落ちの危険性が少ない。
- ③振動、騒音が少ないので周辺への影響が少ない。
- ④半密閉式の機械を使用するため、安全性と作業環境が良い。
- ⑤発破工法と比較して熟練作業員への依存度は低く、切羽での直接作業が少ないため施工の安全性が高い。

(2) 短所

*1 戸田建設株式会社土木機電部

*2 戸田建設株式会社工事技術部

*3 戸田建設株式会社工事技術部 修士（工学）

Department of civil engineering machinery, TODA CORPORATION

Department of civil engineering technology, TODA CORPORATION

Department of civil engineering technology, TODA CORPORATION, M.Eng.

- ①不良地山ではマシン本体が地山に拘束され、工期・工費が増大する。その場合には、拘束解除作業に長時間と危険を伴う。
- ②機械製作費、運搬組立費、設備費が高く施工延長の短いトンネルには適用しにくい。
- ③機械設計および TBM 製作に日数がかかる。
- ④施工途中で掘削径の変更ができない。
- ⑤発破工法と比較して可能な補助工法が少ないため適用土質に制限がある。

2.2 マシン拘束による不具合対策

従来のマシン本体が拘束された場合の解除方法は、TBM 本体への地山の締め付けを解除するため、拘束されている地山を排除し拡幅の掘削を行わなければならない。施工はすべて人力作業となり、一般的には人力掘削で行う。拡幅掘削は、切羽および本体周りの安定確保のため補助工法や先受け工として注入式フォアポーリング、鏡面の安定には注入式鏡ボルト工等が必要となる。その手順は、

- ①崩壊等を防止するため、掘削後方からマシン本体を覆う地盤に、また、切羽面に地山浸透性があり固結体強度、強度発現の優れたシリカレジン等の地盤改良注入を行う。
- ②人力によりマシン周囲の拘束状態の原因となっている土砂を取り除くために横坑を設置する。
- ③人力にて横坑から順次マシン周囲の掘削を行い、支保工・矢板等でマシンを覆い、土砂を取り除く。
- ④拘束の原因となる土砂を取り除いた後、マシンの動きを確認してから支保工等を撤去し再掘進を行い、拡幅部は充填をする。



写真-1 TBM マシン周囲人力拡幅掘削状況

以上のように TBM 本体が地山に拘束されたときには掘進再開まで危険性を伴う多大な労力を要することになる。（写真-1 参照）

3. 縮径（復元）TBM

3.1 開発への取組み

前述したように拘束されると施工上の大きなトラブルとなるため、掘進中に地山に拘束されても、トンネル掘削機(TBM)の径を機械的に小さくする機能を付加することで地山拘束状態から脱出し高速掘進を確保することが可能となる縮径 TBM を開発した。

3.2 基本構造

基本構造として、長距離を掘進する TBM では掘削対象地山が変化するためシールド型 TBM とした。シールド型 TBM の構造は、前胴および後胴部での伸縮可能なスラストジャッキを装備し、グリッパで推進反力を確保し、掘進する。グリッパ反力が取れない崩落性の地山等ではシールドジャッキも装備し、セグメント類により推進反力を確保し、シールド掘進も可能とする。

TBM で施工するトンネルは様々な用途があるが、今回の縮径 TBM は拘束状態になった時に狭い機内、坑内での対応策が困難な中小口径マシン（φ3.9m）を検討した。

機械的に径を縮小する構造上の基本課題と対策を下記に示す。

3.3 縮径（復元）TBM の特徴

マシン径を縮小・復元する構造上の特長は、

- ①全体構造図を図-1 に示す。
- ②外鋼殻部を 8 分割とし、オーバーラップさせる構造で縮径・復元用ジャッキを 1 分割に 1 台装備し、100mm の縮軽量を確保した。
- ③前胴部グリッパとして縮径・復元ジャッキを 2 段ジャッキとし、2 段目にグリッパ機能を持たせた。
- ④中胴部はスラストジャッキが配置され、後胴部にはメイングリッパが装備されているため、小型の縮径・復元ジャッキを 16 台とした。
- ⑤外鋼殻と内鋼殻の土砂侵入防止構造は 2 段構造のワイヤブラシ型シールドを設備し、縮径および復元時に追随性をもたせる構造とし、ワイヤブラシ間は自動グリス注入機構とした。
- ⑥分割した外鋼殻の継ぎ目止水はオーバーラップ構造とし、縮径時、外鋼殻継ぎ目の土砂を押し出すよう端面をテーパ構造とした。
- ⑦グリッパ反力不足や覆工にセグメントが必要な場合はシールドジャッキを後胴に必要時装着できる構造とした。（エレクターは後方台車に搭載）
- ⑧前胴、中胴および後胴外鋼殻部に 8 個×3 列の土圧計を装備し、地山締め付け状況を検知する構造とした。

4. 実物大試験機

縮径（復元）TBM の実用化を図るため、実物大部分縮径（復元）TBM 試験装置の製作を行った。試験装置の技術的細目として以下を決定し製作開始した。
◇機械の構成（写真-2 参照）

φ3.5m 縮径（復元）TBM 用試験装置本体（前胴外胴部 2 枚分）、油圧機器、電気設備により構成

◇構成項目（写真-3～写真-6 参照）

- ①縮径・復元ジャッキ、外鋼殻、グリッパ等の作動（設計対抗外力 5kg/cm²）
 - ・前胴部の内鋼殻と 2 枚に分割された外鋼殻に 2 段ジャッキと中、後胴部に使用する縮径ジャッキ 2 台で構成

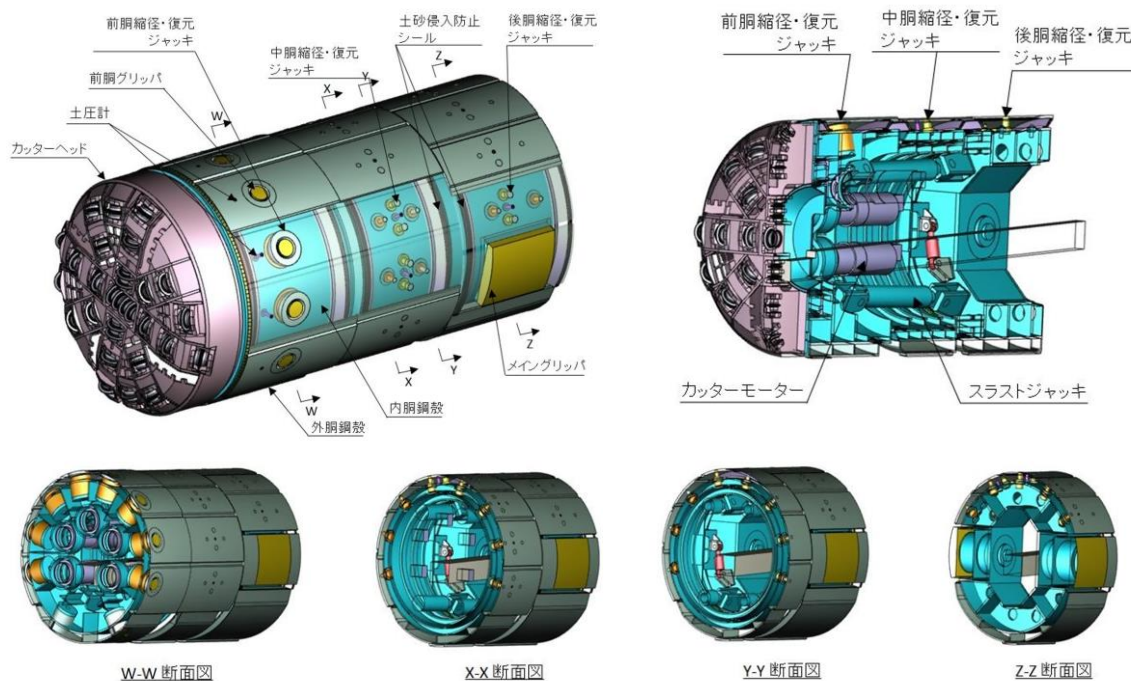


図-1 縮径 TBM 全体概要図

- ・ 2 段ジャッキの 1 段目のジャッキは縮径量 50mm で作動, 2 段目はグリッパとしてストローク 90mm の作動
- ② 分割された外鋼殻接合部の土砂防止機能として隙間なく作動させるため押し側を先行させ追従させる同調回路の採用
- ・ 接合部にはカマボコ型鋼を固定しスムーズに作動させる構造 (写真-3 参照)
- ③ 内鋼殻と外鋼殻の間の土砂侵入防止としてバネ板シールを設置し縮径時, 復元時に追従可能な構造とする
- ④ 外胴部はスラスト力を受けるため縮径・復元時に上下作動するスラスト受けを装備 (実機にはスラスト受け端部に交換可能型土圧計を配置予定)
- ⑤ 運転操作はペンダントスイッチにて行う
この実験機を用いて, 耐荷試験, 接合部の土砂噛み込み防止状況, バネ板シール動作, 2 段ジャッキ等各部の作動確認を行い, 新たな課題に対応していく。



写真-3 縮径(復元)TBM 試験装置全体



写真-4 作動試験状況 (定常時)

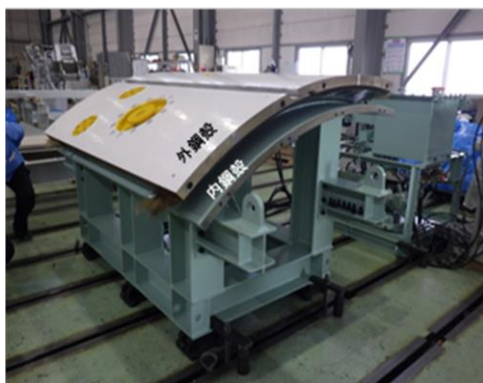


写真-2 縮径(復元)TBM 試験装置全体

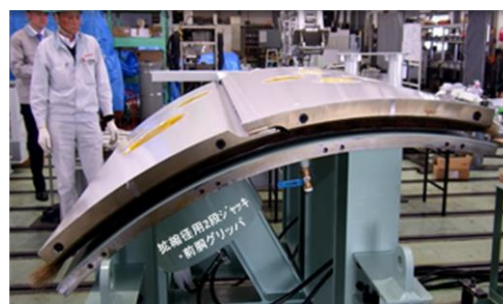


写真-5 作動試験状況 (縮径時)

5. 今後の課題

日本における山岳トンネル工法での TBM 実績は少ない。一つの課題として挙げられるのは掘削対象地盤が複雑で、全ての起こりうる事象に対応しなければならない機械を製作することは困難であり、費用も増大する。しかしながら TBM の高速掘削は魅力であるため、永続的に開発を重ね技術的發展をしていけばどのような地盤に対しても安価で機械的対応が可能な掘進機ができるであろう。

今後は、超長距離施工や途中で径が変化するような用途に対応できるような掘進機にも取り組んでいきたい。本稿がこれからの TBM を考えるに当たり、その一助になれば幸いである。

最後に、これらの開発、設計、検討にあたり TBM に深識を有する川崎重工業(株)の関係者各位にご協力をいただきました。誌面を借りて、厚くお礼を申し上げます。

参考文献

- 1) TBM ハンドブック, 日本トンネル技術協会, p39-54, 2000年2月
- 2) トンネル標準示方書[共通編]・同解説/[山岳工法編]・同解説, 土木学会, p355-360, 2016年制定