特集>>> 大深度地下,地下構造物

縮径トンネル掘削機の開発

トンネル掘削機外径の縮小・復元が可能な縮径 TBM

市川政美

山岳トンネルに使用されるトンネル掘削機(TBM)は、従来のNATM工法と比較して高速施工が可能である。しかし、断層帯に遭遇した際の地山崩壊や硬岩切削時による岩ズリ付着等により、掘削機胴体が拘束され、掘削不能となるリスクがある。掘削機胴体を拘束している地山を解除するためには人力により拘束地山の切り広げ作業が必要となる。この作業は掘削機軸方向を覆うよう全長にわたり支保工等を建て、胴体の外側に出て作業する必要があり、危険かつ非効率的であると共に、大口径トンネル掘削機では長期間にわたる作業が必要となる。これらを勘案し、今回、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することが可能となる掘削機(縮径 TBM)(以下「本開発機」という)を開発した。

キーワード:山岳トンネル、機械掘削方式、TBM

1. はじめに

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)、ブレーカ掘削、円 形断面の TBM などがある。

トンネル掘削は地山の崩落や大量の湧水などの自然 条件によって過酷な作業を極めてきた。トンネル掘削 の安全性の向上や効率化、省力化を図るためには危険 作業の機械化の必要性が高まっている。このような状 況の中で多種多様の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 であるが掘削対象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(本開発機)を開発したので、ここに紹介する。

2. 開発の背景

(1) TBM 工法の長所と短所

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。

(a) 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者への依存度は低 く,切羽での直接作業が少ないため施工の安全性 が高い。
- (b) 短所
- ①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。
- ②機械設計および TBM 製作に日数がかかる。
- ③施工途中での掘削径の変更ができない。
- ④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) 従来の拘束解除方法

マシン本体が拘束された場合, 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の拡幅 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, 一般的には半機械掘削の在来工法で行う。拡 幅掘削は, 片状に破砕された地山掘削となることから切 羽および本体周りの安全性, 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(一 般的にはマシン周長の上部 2/3 程度)。
- 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う。 拡幅部は充填をする。

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 $-1\sim3$)。



写真― 1 TBM マシン周囲人力拡幅掘削状況



写真一2 支保工建込状況



写真一3 拡幅掘削完了状況

3. 本開発機

(1) 本開発機の開発への取組み

従来のマシンの拘束を解除する作業は、長期間にわたる作業となるため工期やコストを圧迫することになる。これらを解決するためにマシン胴体を縮径させることで容易に拘束を解除することが可能な掘削機(本開発機)を開発した。拘束解除に必要な期間は、従来工法では1回あたりで約3ヵ月程度を要するが、本開発機を用いることにより約0.5ヵ月で解除可能となる。また、全ての作業をマシン内部で行うため安全性が飛躍的に向上する。通常、TBMでのトンネル掘削は5~10kmと長距離施工となるので、掘削対象地質にもよるが拘束の頻度は高く(1回/2km程度と予測)、本開発機を用いることによりコストの縮減にも繋がる。

(2) 本開発機の特長

TBM で施工するトンネルは様々な用途があるが、今回の本開発機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(ϕ 3.9 m)を検討した。

マシン径を縮小・復元する構造上の特長は、

- ①本開発機の本体は内胴と外胴の二重構造で構成されている。更に外胴は分割された鋼殻で構成され、各鋼殻に縮径・復元ジャッキを装備することで所定の縮径量を確保する(図一1)。
- ②機内から縮径・復元ジャッキを操作することで全ての鋼殻が連動して作動する。
- ③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、100 mmの縮径を確保した(図─2)。
- ④掘進速度を砂岩部(一軸圧縮強度 100 ~ 150 Mpa)で 15~40 mm/min, 泥岩部(一軸圧縮強度 40~80 Mpa)で 50 ~ 60 mm/min 確保するために, カッターモー



図-1 本開発機前胴部構造概要



図-2 外鋼殻部と縮径・復元ジャッキ位置

ター $(150 \, \mathrm{kW})$ を 5 台装備し、トルクを確保した。 ⑤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 $(32 \, \mathrm{t} \times 90 \, \mathrm{st} \times 8 \, \mathrm{at} : \phi \, 120)$ とし、2 段

目にグリッパ機能を持たせた(図-3)。

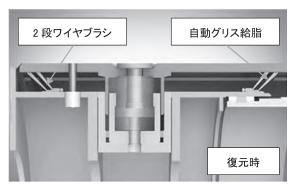
- ⑥中胴部はスラストジャッキが配置され、後胴部にはメイングリッパが装備されているため、小型の縮径・復元ジャッキを16台とした(図-4)。
- ⑦外鋼殻と内鋼殻の土砂侵入防止構造は2段構造のワイヤブラシ型シールとし、縮径および復元時に追随性をもたせる構造とした(図-5)。
- ⑧分割した外鋼殻の継ぎ目止水はオーバーラップ構造とし、縮径時、外鋼殻継ぎ目の土砂を押し出すよう端面をテーパー構造とした(図-6)。



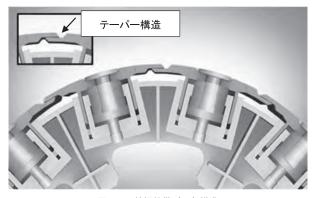
図一3 前胴部2段ジャッキ(グリッパ)位置



図―4 中胴部、後胴部縮径・復元ジャッキ配置



図─5 外鋼殻と内鋼殻の土砂侵入防止構造



図―6 外鋼殻継ぎ目部構造



図-7 後胴部メイングリッパジャッキ

⑨メイングリッパジャッキは後胴部に7200 kN × 200 st のジャッキを2台装備した(図-7)。

また、TBMの姿勢を制御する方向制御ジャッキ(1000 $kN \times 80$ st \times 4 s) を装備した。

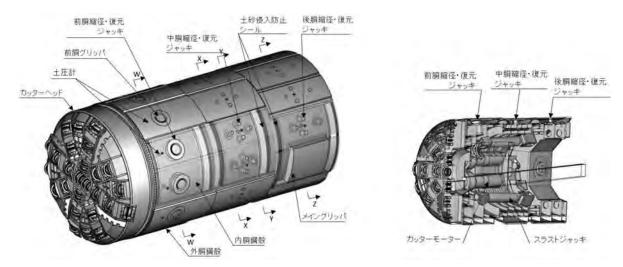


図-8 本開発機全体概要図

⑩前胴外鋼殻部に8個,中胴外殻部に8個の土圧計を 装備し,地山締付け状況を検知する構造とした。

(3) 本開発機の拘束状態解除方法

崩落性地山により本開発機が拘束された場合の拘束 状態解除方法の一例を紹介する。

- ①切羽が崩落性地山に接近してきたときにマシン外殻に 設備した複数の土圧計変位経過を監視する(図-9)。
- ②坑内のボーリングマシンで切羽前方の地山状況を調査する (図— **10**)。
- ③掘削機後方からマシン全体を覆う地盤に地盤改良注入を行い、地山の崩壊等を防止する(図―11)。
- ④マシン胴体を縮径させ、地山の拘束を解除する。
- ⑤マシンを縮径したまま掘進する。1回の地盤改良よりも崩落性地山の距離が長い場合は、再度地盤改良を行う。マシンを進めるための反力がメイングリッパで取れない場合は、シールドジャッキを装備し、セグメント覆工を利用して反力を確保して掘進する。
- ⑥マシン外殻に設備した土圧計の変位を監視しながら 拘束状態が発生しない位置で縮径した胴体を復元 し、掘進する(図—12)。

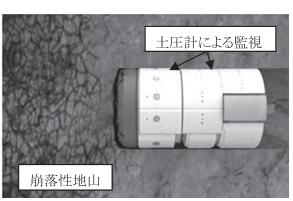
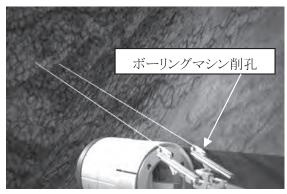


図-9 崩落性地山遭遇概要図



図―10 ボーリング地山調査概要図

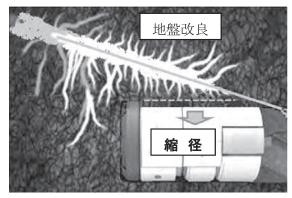


図-11 地盤改良概要図

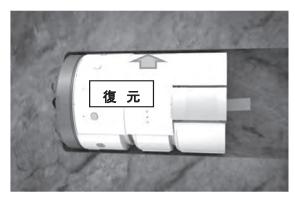


図-12 本開発機復元図

4. おわりに

本開発機縮径 TBM は外胴の鋼殻に装備した土圧計の推移を監視し、地山の締め付け状態を検知しながら掘進する。締め付け状態を検知した時点でマシンが拘束される前に縮径・復元をしながら安定した掘進を行うことが可能なトンネル掘削機である。優位点の一つとして縮径した状態でも掘進できることで掘削を止めるリスクが少なくなる。また、全ての作業をマシン内部で行うため安全性が飛躍的に向上する。TBM は、山岳トンネル工法と比較して4~5倍の高速施工が可能だが、拘束による掘進停止という多大なリスクのある工法であった。そこで、本開発機を使用することにより工期を順守し安全に山岳トンネルを構築することが可能となると考える。

今後、技術開発が進み多種多様な用途で小中口径か

ら大口径,また超長距離の山岳トンネルが構築されていくであろう。本稿がこれからの TBM 工法の一助になれば幸いである。

J C M A

《参考文献》

- 1) 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, p.355-360, 2016 年制定
- 2) TBM ハンドブック、日本トンネル技術協会、p.39-54、2000年2月



[筆者紹介] 市川 政美 (いちかわ まさみ) 戸田建設㈱ 本社土木工事統轄部 土木機電部 土木機電部長

