

## 23. 縮径トンネル掘削機（縮径 TBM）

### 一 トンネル掘削機外径の縮小・復元が可能な縮径 TBM 一

戸田建設株式会社

○ 市川 政美  
和田 洋一

#### 1. はじめに

山岳トンネル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

従来の山岳トンネル掘削工法と比較し、高速施工が可能なTBMの欠点として、掘削地山の崩壊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。

##### 2.1 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、本体上部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、一般的には山岳トンネル在来工法で行う。拡幅掘削は、片状に破碎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、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～写真-3)

#### 3. 縮径TBMの開発

##### 3.1 縮径TBM

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(縮径TBM)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(当社試算)を要していたが、縮径TBM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5km～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)、縮径TBMを用いることによりコストの縮減にも繋がる。



写真-1 人力拡幅掘削状況



写真-2 支保工建込状況



写真-3 拡幅掘削完了状況

### 3.2 縮径TBMの特長

マシン径を縮小・復元する構造上の特長は、

- (1)縮径TBM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-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、100mmの縮径量を確保した。(図-2)
- (4)掘進速度を砂岩部(一軸圧縮強度 100~150Mpa)で 15~40mm/min, 泥岩部(一軸圧縮強度 40~80Mpa)で 50~60mm/min 確保するために、カッターモーター(150kw)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 (32t×90st×8本:φ120)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)

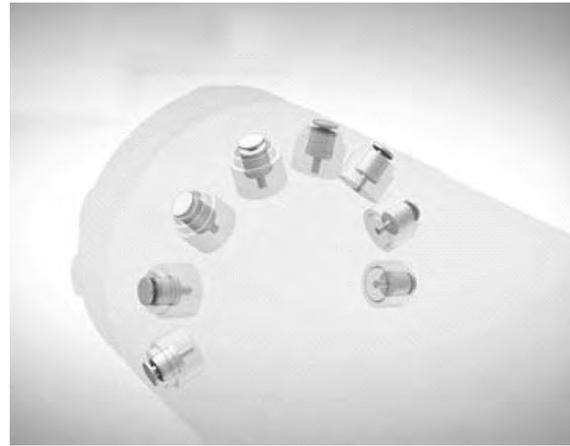


図-3 前胴部2段ジャッキ(グリッパ)位置



図-4 中胴部, 後胴部縮径・復元ジャッキ配置

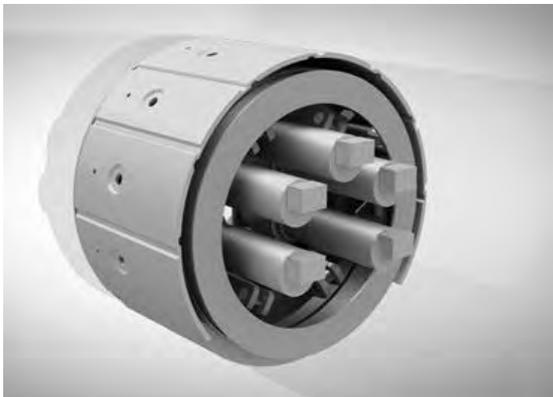


図-1 縮径TBM前胴部構造概要

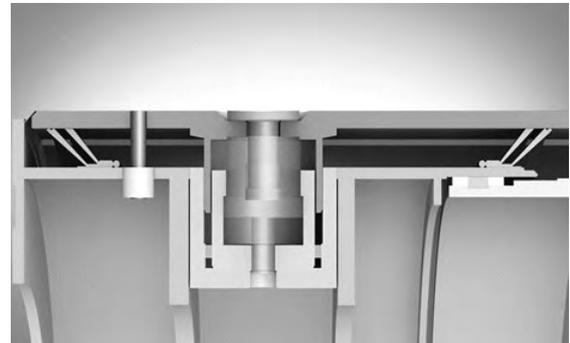


図-5 外鋼殻と内鋼殻の土砂侵入防止構造

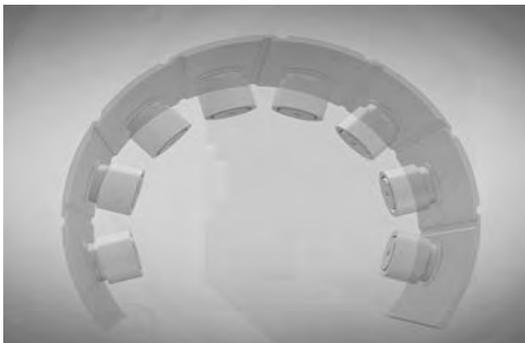


図-2 外鋼殻部と縮径・復元ジャッキ位置



図-6 外鋼殻継ぎ目部構造

- (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構造とした。(図-6)
- (9)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。(図-7)(エレクターは後方台車に搭載)
- (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。

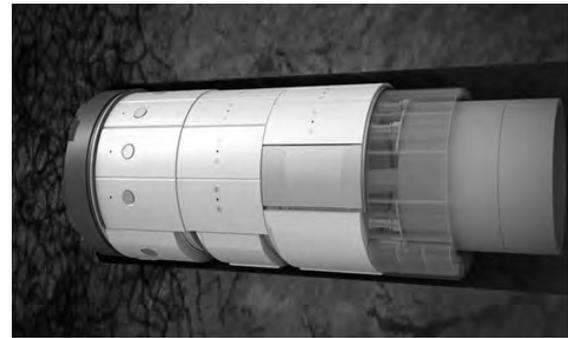


図-7 シールドジャッキ装着時概要図

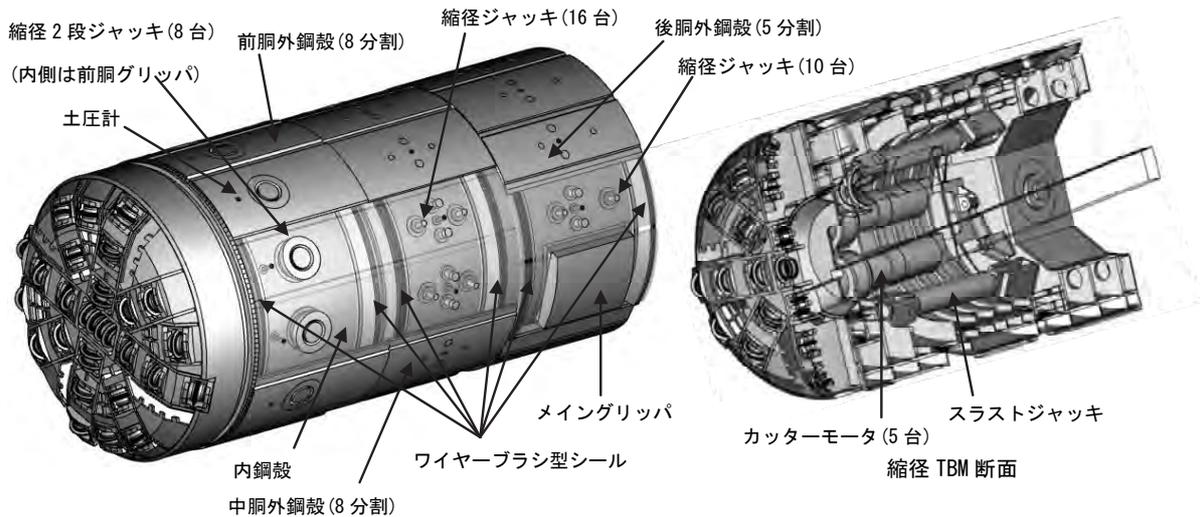


図-8 縮径TBM全体組立図

### 3.3 縮径TBMの拘束状態解除方法

崩落性地山により縮径TBM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)

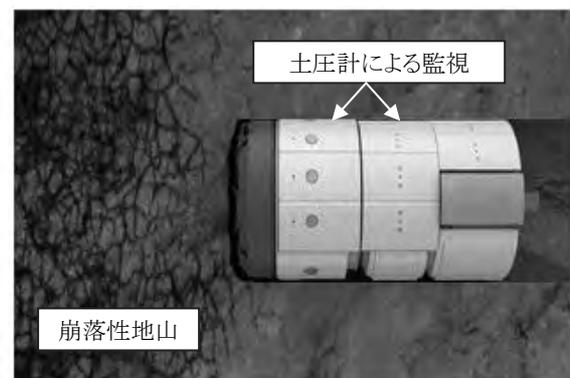


図-9 崩落性地山遭遇概要図



図-10 ボーリング地山調査概要図

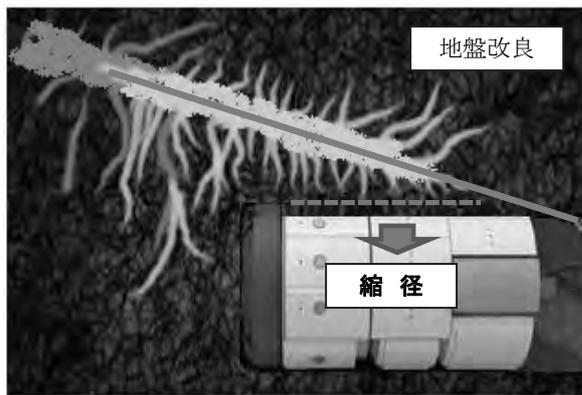


図-11 地盤改良概要図

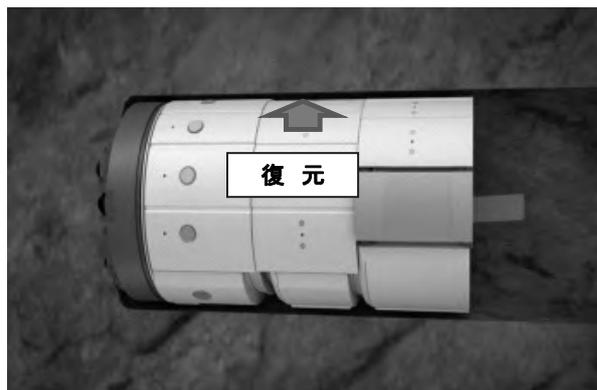


図-12 縮径TBM復元図

### 3.4 拘束原因別縮径TBMの拘束状態解除方法

マシンの拘束原因は地山状態により軽微なものから重大なものまでである。下記にそれぞれの想定した拘束状態の対応策を記す。

(1) 切削粉が地山と外殻の間に入り込んで拘束された場合

#### ・施工手順

- ① 鋼殻部を切削粉による拘束が解除される程度まで縮径する。
- ② 切削粉をエア・水等により洗い流しながら、通常のTBM掘進方法により当該区間を脱出する。

#### ・脱出後の縮径掘削部の対処方法

地山の押し出し等により拘束されたわけではなく、縮径掘削部は内空断面を確保できているので拘束区間は吹付コンクリートによる支保を行う。

(2) 幅10m程度の断層破碎帯等での崩落性地山等により、外殻が拘束された場合

#### ・施工手順

- ① 坑内より前方地質探査を実施し、前方の破碎帯区間長・地質性状等を把握する。
- ② 把握した区間長や地質性状を考慮して、坑内より拘束部およびTBM前方の破碎帯区間を地盤改良する。

③ 外殻部を縮径し、拘束を解除する。拘束部地山が安定していることをマシンに装備した土圧計等により確認する。

④ 通常の掘進方法により当該区間を脱出する。

⑤ 崩落性地山区間が長い場合は、縮径を段階的に行って、上記の①～④を数回繰り返して良好地山区間まで掘進する。

#### ・脱出後の縮径掘削部の対処方法

縮径により、内空断面が確保されていない箇所は対象区間を順次、『縫い返し：NATM工法における既存技術』により、適正断面に修正して吹付コンクリートによる支保を行う。

(3) 比較的長距離での押し出し性地山や崩壊性地山等により、初期掘削段階で外殻が拘束された場合

#### ・施工手順

- ① 坑内より前方地質探査を実施し、前方の破碎帯区間長・地質性状等を把握する。
- ② 地質性状を考慮して、坑内より外殻および面盤全面を地盤改良する。
- ③ マシン外殻を残し、面盤およびマシン駆動部等を取り外す。
- ④ 面盤を撤去した後の開放された鏡面からNATM工法により良好地山区間まで掘進する。この際、掘削断面はTBMの外径より一回り大きい断面とする。
- ⑤ 良好地山区間まで到達した段階で、安全性を確保した後、面盤およびマシン駆動部等を再設置する。
- ⑥ 外殻部を縮径して拘束を解除し、拘束部地山が安定していることを装備した土圧計により確認後、拘束状態から脱出する。
- ⑦ NATM施工区間を、開放されたマシンを移動させ、良好地山区間から、通常の掘進方法によるTBM掘削を再開する。

#### ・脱出後の縮径掘削部の対処方法

拘束された区間は縮径により、内空断面が確保されていないため、対象区間を順次、『縫い返し』により、適正断面に修正する。

### 4. まとめ

縮径TBMは外殻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。

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、縮径TBM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。