

# 28. TBM用新システムによる合理的施工

日本道路公団：源島 良一、

(株)奥村組：\*中山 隆義、伊藤 健二

## 1. はじめに

近年、TBM工法は、トンネルの高速施工とコスト縮減を目的として急速に採用事例が増加している。TBM工法の特徴の一つは、他の掘削工法と比べて施工速度が著しく速いことである。しかし、崩壊性地山に遭遇した場合に、崩落した岩塊の処理や支保作業に多大の時間を要し、高速性と安全性を阻害するという問題があった。

今回採用した新支保システムは、鋼製簡易ライナー（ロックライナー：以下ライナーと称す）をTBMのサポート内でエレクタにより組立て、サポート直後でジャッキにより拡張することを特徴としている。このことにより、岩塊の崩落を抑え地山のゆるみ拡大を防止することができる。

また、支保作業において、機械化、単純化を図ると共に、サポート内作業および他サイクルとの並行作業の比重を高めることで、作業時間の短縮や省力化、安全性の向上につながり、TBMの合理的施工を可能としている。本稿は、新支保システムの概要、およびこのシステムを掘削径 5.0m のTBMによる導坑掘削工事に適用した結果について述べる。

## 2. 従来支保方式の問題点と課題

崩壊性地山におけるTBM工法の支保は、リング支保工を組立後、矢板を支保工と地山の間に挿入する方法や、吹付け・ロックボルトにより岩塊の崩落や、地山の緩みの拡大を防止しているのが一般的である。しかし、この方法では、① 大きな岩塊や大量の岩片の崩落時は岩塊の処理や支保の構築に長時間を要すると共に、危険な作業を伴う② また、シールド型TBMでセグメントを組み立てる方式も行われているが、セグメントのコストが高いという問題がある。

## 3. 新支保システムの概要

### 3.1 ライナーの支保機能と構造および施工

前述の従来支保の長、短所を考慮し、支保に求める機能を次のように考えた。

- ① 崩壊性地山に対する支保機能を有すること。
- ② 組立直後より面に近い構造で地山を支持し、坑壁近傍の岩塊の崩落、肌落ちを防止できること。さらに、ゆるみ領域が地山の深部にまで拡大するのを防止できること。
- ③ 速やかに安全に施工できること。
- ④ TBMの進行を阻害せず、サポート内でエレクタを用いて安全、かつ、容易に組み立て可能であること。
- ⑤ 経済的であること。
- ⑥ 必要に応じて吹付けコンクリートやロックボルトとの併用により、支保の増強ができる構造とすること。

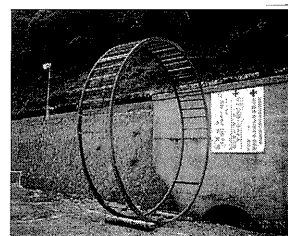


写真-1 ライナー姿図

これらについて検討した結果、ライナーは、写真-1に示すように、リング支保（溝型鋼）間に金網を貼り、継ぎ材として山形鋼を取付けた構造とした。

ライナーの施工方法は、① TBMのサポート内でエレクタにより組立てる（組立方式の詳細は後述）、② 掘進に伴いライナーが坑壁に出ると同時に油圧ジャッキにより拡張し、坑壁に密着させる、③ ライナーの拡張部にスペーサを取付けて固定する、ことにした。

これは、サポート内で組立作業を行うことで、安全性の向上と掘進作業との並行作業化を図ると共に、ライナーの拡張により地山に内圧を加え、崩落と地山のゆるみ拡大を防止することを目的としている。

### 3.2 ライナー設計の考え方

ライナーの設計は、シールドトンネルで用いられているセグメントの設計の考え方に準じ、岩盤用に荷重設定や応力度の照査方法を修正した。ライナーが受ける荷重は、従来の矢板とリング支保の荷重条件を参考に、以下のとおりとした。

#### ① 主桁が受ける荷重

崩壊性地山の力学的特性は多種多様であるが、無支保状態では天盤の崩壊が次々と起こる地質でゆるみ土圧が主体であることを想定し、Terzaghi の支保工に作用する地圧の考え方に従い、ゆるみ高さを  $0.6D$  ( $D$ : トンネル掘削径  $5\text{m} \times 0.6 = 3\text{m}$ ) とし、この土圧が分布荷重として作用するものとした。

#### ② 金網が受ける荷重

最大  $0.5\text{m}^3$  の岩塊が集中荷重として作用するとした。また、 $0.6D$  のゆるみ土圧が分布荷重として作用するとした。

主桁および金網は、実大の強度試験を実施し、十分な耐荷力を有していることを確認した。

### 3.3 ジャッキ拡張による内圧効果

掘進に伴いライナーがサポートから坑壁に出ると同時に低圧の油圧ジャッキ ( $100\text{kN}/\text{台} \times 4\text{台}$ ) により拡張し、坑壁にライナーを密着させる。この際、図-1 に示すように、ライナーにはジャッキ圧力により軸力  $N$  が作用し、結果的に地山には下式に示す内圧  $p$  が働く。

$$P = N/r = 200 / 2.5 = 80 \text{ (kN/m}^2\text{)} ; \text{ (掘削径 } 5.0\text{m、ライナー幅 } 1.0\text{m の場合)}$$

ここに、 $p$ : 地山押付け力による内圧 ( $\text{kN/m}^2$ )

$N$ : ライナー1.0m あたりの軸力 ( $\text{kN/m}$ ) (=200)

$r$ : トンネル半径 ( $\text{m}$ ) (=2.5)

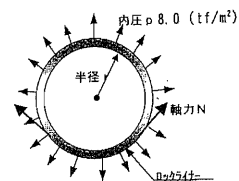


図-1 発生軸力と内圧の関係

これは厚さ  $3.0\text{m}$  ( $=80.0\text{kN/m}^2 / 26.0\text{kN/m}^3$ ) の地山を押し付ける (押し上げる) ことができる値に相当する。

なお、ライナーの構造は  $1.0\text{m}$  幅あたり 2 本の主桁を継ぎ材と金網で連結しており、地山全体を主桁で押し付けているわけではないが、例えば、図-2 に示すように、坑壁より地山側深部  $0.5\text{m}$  付近では地山を 2 本の主桁で押し付けていると考えても良く、その前面については、金網が地山を押し付けていることになる。

### 3.4 ライナーの旋回組立方式

ライナーは、搬送上の制約から 1 リングを 4 ピースとしており、その組立は、① 1 ピースずつ、組立位置の下部へ搬送後、エレクタで第 1 ピースを把持し、 $90$  度

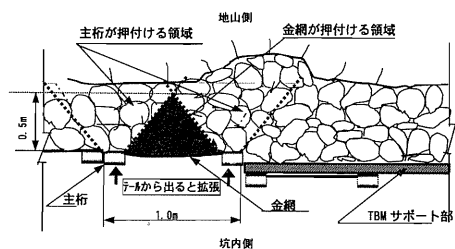


図-2 主桁による押し付け領域

旋回する、② 第1ピースを把持したまま第2ピースをボルトで締結する、③ さらにエレクタを旋回させ、順次第3、4ピースを組立ててリングを完成させる、旋回組立方式を採用した。このことにより、高所作業無しで安全かつ効率的な組立作業が可能となった。図-3に組立方法を示す。

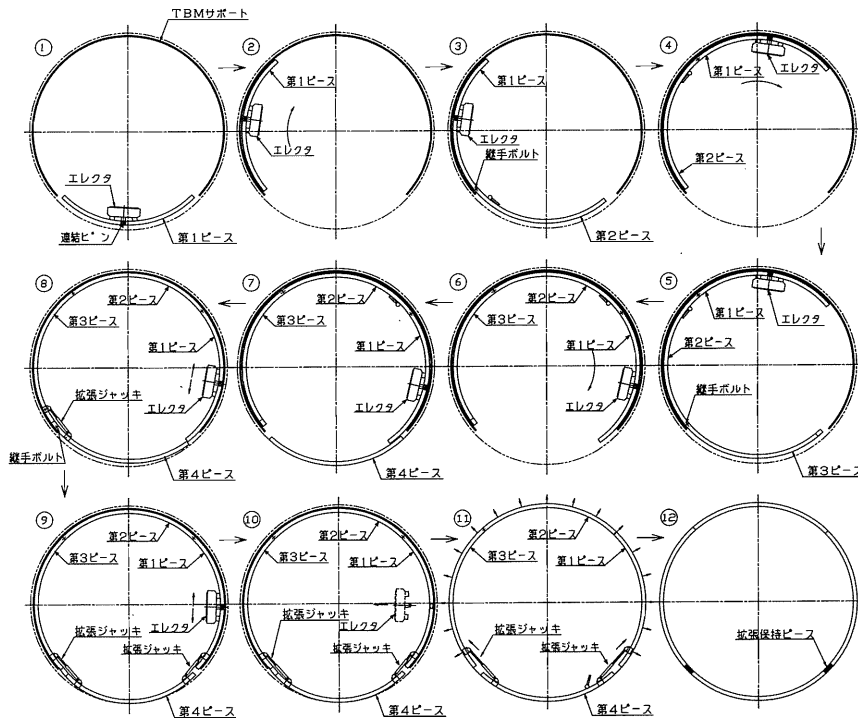


図-3 ライナーの旋回組立方法

#### 4. 導坑掘削工事への適用

##### 4.1 工事概要

新支保システムを適用した導坑トンネル掘削工事の概要を以下に示す。

工事名：第二東名高速道路金谷トンネル東工事

発注者：日本道路公団 静岡建設局

施工場所：静岡県榛原郡金谷町（図-4参照）

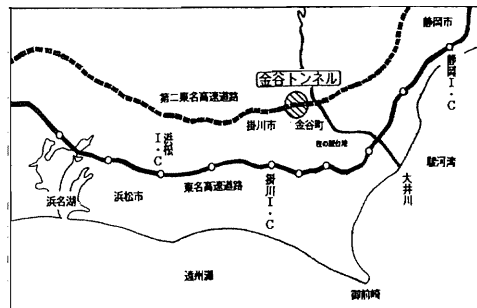
工期：平成9年3月25日～平成15年1月15日

工事内容：TBM掘削による道路トンネルの先進

導坑掘削工事（掘削径：5.0m、施工延長：4,167m） 図-4 金谷トンネル位置図

地質概要：地質は、東側約2kmは、砂岩、頁岩及びその互層からなる古第三紀漸新世の瀬戸川層群で断層破砕帯が断続的に出現し、層理が発達した崩壊性の地山が大半を占めている。

一方、西側は、新第三紀中新世の倉真層群の礫岩、砂岩、泥岩が分布し、比較的良く締まった地層とされていたが、層境付近は固結度の低い泥岩層が主体で崩壊しやすい構造となっていた。3,000m付近より、比較的安定した松葉累層の地質となったが、砂岩層では、多量の湧水に遭遇した。



計画時の地質縦断を図-5に、標準断面を図-6に示す。

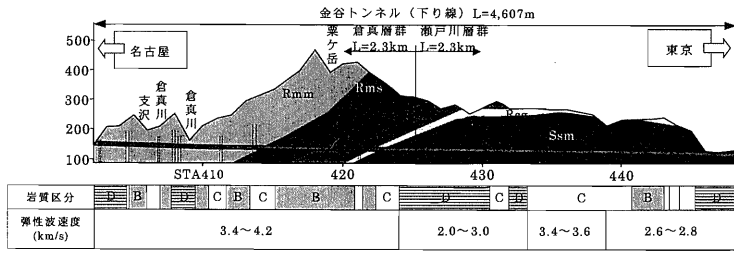


図-5 地質縦断図 (計画時の地質及び岩級区分)

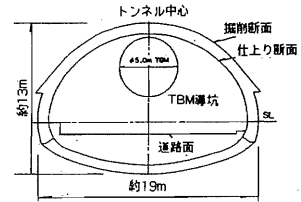


図-6 標準断面図

#### 4.2 支保計画とライナー採用の経緯

図-7に当初計画の支保パターンを示す。しかし、TBMの発進坑掘削時に、岩塊の崩落が激しく、湧水も発生した。ポーリング等地質調査結果から導坑の施工においても、同様の岩塊等の崩落と湧水の発生の可能性が高く、崩落岩塊の処理による施工速度の低下やモルタル吹付けの施工困難が予想された。そのため、崩落と湧水対策として、D1-Tパターンの支保を変更してライナーを採用した。シールド型TBM用のライナーを図-8に示す。

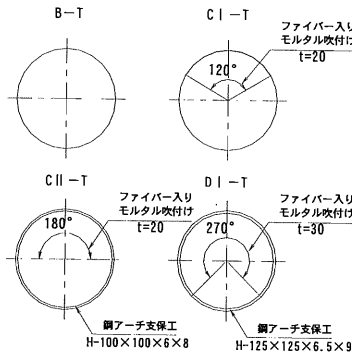


図-7 計画支保パターン

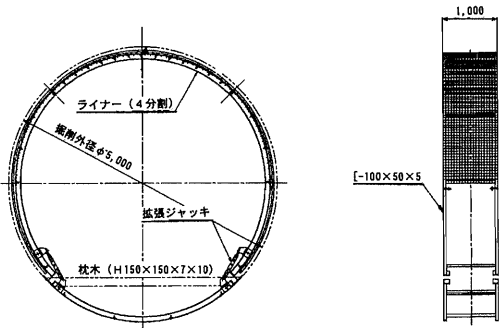


図-8 シールド型TBM用ライナー

ライナーは、4分割とし、エレクタとの接続治具の設置や油圧ジャッキによる拡張構造の採用(サポート内で組立てるときの施工余裕となる)など、旋回組立方式でスムーズに組立可能な構造とした。また、リング状に組立てたライナーに油圧ジャッキ(油圧ユニットをTBMに搭載し、レバー操作で作動)を取付けて、サポート(後胴のテール)内面まで一次拡張し、掘削終了後の後胴盛替えにより、ライナーがサポートから出ると同時に二次・三次拡張を行うことにした。このことにより、シールド型TBMのグリッパ反力が確保できれば(シールドジャッキを使用しない時)掘進と支保工組立の同時施工が可能であり、施工速度のアップを図ることができる。

#### 4.3 シールド型TBMの仕様

使用したシールド型TBMを写真-2に、TBMの主要仕様を表-1に示す。

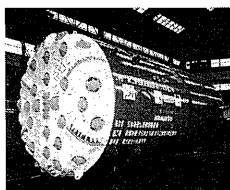


写真-2 シールド型TBM

表-1 シールド型TBMの主要仕様

掘削径	φ5.0m	カットヘッド回転速度	0.8~9.5rpm
本体機長	9.0m	カットヘッドトルク	最大2,254kNm
全長	65m	総推力	9,408kN
重量	本体:241t 台車:114t	グリッパ押付力	19,992kN
総出力	1,300kW	後続台車	5両
カットヘッド出力	150kW×6台	ベルトコネクタ	600mm幅×2条

現場での施工に先立ち、工場においてライナーの組立試験を行い、エレクタの作動状況、各種資機材との取り合い、治具の要否、拡張作業の課題等を確認し、必要に応じて改良を行った。組立試験の状況を写真-3に示す。

#### 4.4 施工結果

実施工においては、崩落性地山が連続する箇所が多く多量の湧水も発生したことから、ライナーを長区間使用した。ライナーの施工は、計画どおり安全かつ効率的に実施できた。このことにより、坑壁の崩壊を防止でき、施工速度の確保とゆるみの防止につながったと考える。施工状況を写真-4～9に示す。

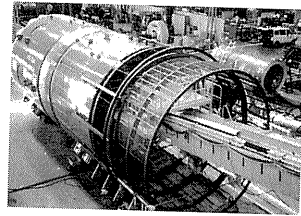


写真-3 ライナー組立試験

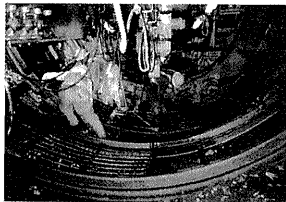


写真-4 ライナー搬入

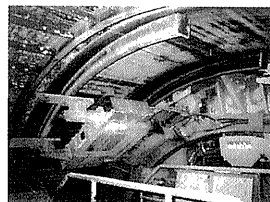


写真-5 ライナー把持・旋回



写真-6 ジャッキ取付 (1次拡張)

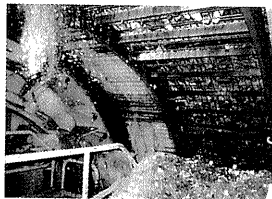


写真-7 後胴盛替 (2次拡張)



写真-8 最終拡張 (三次拡張)



写真-9 スペーサ溶接固定

ライナーの幅は基本的に1.0mとし、比較的崩落の少ない箇所ではコスト低減と進行の向上を目的として幅1.2mも使用した。

ライナーに作用する荷重や変位量は計測管理を行い、支保機能と耐荷力を確認し、円形の支保としての有効性を実証した。局部的に想定以上の荷重が作用した箇所は、吹付け等による補強を実施することで、過度の変形や鋼材の座屈等には至らなかった。(写真-10 参照)

また、グリップ反力が取れない箇所では、ライナーの下部ピースにかえてインバートライナーを設置し、補助シールドジャッキを使用した。(写真-11 参照)。

ライナーは、湧水量に関係なくサポート内で組立が可能で、組立直後より面状に荷重を負担できるため、湧水箇所においても問題なく施工を行うことができた。(写真-12 参照)

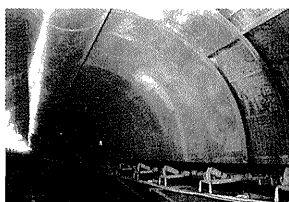


写真-10 吹付け補強状況

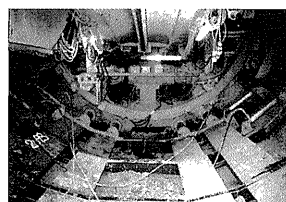


写真-11 インバートライナー

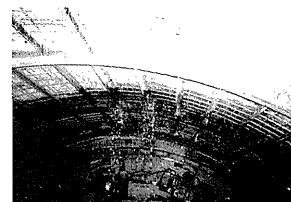


写真-12 湧水箇所の施工状況

図-9にライナー施工区間の平均サイクルタイムを示す。支保作業に要した時間は9%で、一般的な値(40~60%)に比べ少なくなっている。これは、シールド型TBMに本工法を適用した結果、ライナーがサポート(後胴テール)内で安全に効率的に組立てられ、ほとんどの場合に掘進との同時施工が可能であったためである。この結果、連続した崩落性地山や湧水箇所においても、支保作業のためにTBMを長時間停止することなく、稼働率34%(掘削27%+盛替7%)を確保できた。

全区間4,167mの平均月進は245mとなった。また、ライナー組立用の旋回組立方式を他の支保パターン(モルタル吹付けとリング支保工の組合せ)におけるリング支保工の組立にも適用した結果、支保工組立時間の短縮等により、最大月進682m(掘削径3m以上のシールド型TBMの最高月進記録)を記録した。施工完了後のライナー設置状況を写真-13に示す。



写真-13 ライナー施工完了状況

## 5. 本システムの課題と今後の展開

ライナーは、対象工事の施工条件(トンネルの用途、覆工方式、掘削径、TBMの型式)や地質による荷重条件等により構造や各部材の設計を行うが、条件に応じてライナーの幅をさらに変化させその適用範囲を拡げることが可能と考える。

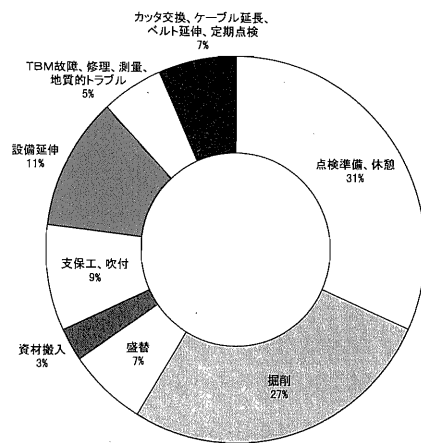


図-9 ライナー施工区間のサイクルタイム

(実績: 1.0m、1.2m、さらに0.5m、1.5m等のサイズの追加も考慮)

また、今回の現場では、金網の取付け範囲を上半180度としたが、場合によっては270度程度にすることが必要である。

## 6. おわりに

本システムをシールド型TBMによる導坑掘削工事に適用した結果、不良地山でもTBMを長時間停止することなく安定した進行が得られた。また、TBMのサポート内で早期かつ短時間で支保構築が可能となり、支保作業の作業性・安全性を向上させることができた。

昨今の社会経済情勢の大きな変化を背景に、効率的な社会資本整備がより強く求められる中、TBM工事は、今後、需要の増大とともに、ますます高速施工による工期短縮、施工コストの縮減が強く要請されると考えられる。しかし、我が国の厳しい地質条件においては、良好な地山が連続することは珍しく、この要請に応えるためには、不良地山でいかに安定した進行を確保するかが大きなポイントとなる。本システムは、これらの問題解決に一つの方向性を見いだしたと考えられる。

最後に、本システムの適用に当たり、ご指導をいただいた関係者の皆様に深く謝意を表します。

<参考文献>

- ・トンネル技術協会：第44回施工体験発表会概要集、第二東名最長のトンネルをTBMで高速施工、1999.11
- ・土木学会論文集：TBM用ロックライナー(簡易ライナー)の開発と実用化、No.679、VI-51、2001.6