

TBMによる効率的掘進システムの提案とその適用

A PROPOSAL AND APPLICATION OF EFFICIENT TUNNEL EXCAVATION SYSTEM WITH TBM

越野洋一*・山橋正文**・山田義教***・寺内 伸****・多宝 徹****

Youichi KOSHINO, Masahumi YAMAHASHI, Yoshinori YAMADA, Shin TERAUCHI and Toru TAHO

One of the greatest advantages of applying TBMs in tunnel excavation is its rapid and continuous excavation capabilities. However, the research on the past TBM application in Japan has shown that many tunnel projects have failed to take full advantages of TBMs mainly due to the unpredictability of the underground conditions and imbalances between the efficiency of TBMs and mucking systems. In order to solve the above problems, this paper proposes an excavation system which combines a TBM, a TSP(tunnel seismic prediction), a mucking system using continuous conveyor, and a pilot boring machine. By studying an actual application of the proposed system to the Hakamagoshi-Johana Pilot Tunnel Project, the paper discusses its impacts on the improvement of the excavation efficiency.

Keywords: TBMs, service tunnel, efficient tunnel excavation system, TSP(tunnel seismic prediction), continuous conveyor

1. まえがき

トンネルの長大化・大断面化に伴い、今まで小断面の水路トンネルでの採用に限られていたTBMは、道路トンネルの導坑や避難坑、大断面水路トンネル等の施工に積極的に採用され始めている。

TBMの最大の特徴は「高速掘進性」にある。しかし、我が国における過去のTBMの実績を調査すると不良地山への対処方法や掘進と後続設備とのバランスの問題から、崩落の発生による長期の掘削停止や掘進速度の低下が見られ、全体的には効率的な掘進が行われているとはいえないのが現状である。

このため、TBMの持つ高速掘進性能を最大限に発揮させることを目的として、TSP(Tunnel Seismic Prediction)による前方探査技術や連続ベルトコンベアによるずり出しシステム、さらに切羽近傍の地質状況把握や水抜き工等の施工に対応可能な先進ボーリング機を組み込んだ効率的掘進システムを考案した。このシステムは、日本道路公団東海北陸自動車道袴腰・城端トンネル避難坑工事(φ4.5 m, L=3242 m)に使用され、現在施工中である。

* 日本道路公団 新潟建設局富山工事事務所城端工事長

** 日本道路公団 新潟建設局富山工事事務所城端工事

*** (株)間組・大日本土木(株)共同企業体 袴腰・城端トンネル作業所長

**** 正会員 (株)間組 土木本部トンネル統括部

本報文では、我が国における過去のTBM施工実績から、TBMの高速掘進性を阻む要因を分析するとともに、今回採用した効率的な掘進システムの概要を紹介し、施工途中ではあるが、工事を通して得られたデータをもとに、過去のTBM施工実績と比較することにより、本システムの有効性に関して得られた知見を報告する。

2. TBMの高速掘進性を阻む要因

海外におけるTBMの施工実績をみると、最大月進が1000 mを越す例が数件報告されており、最大月進2000 m以上の実績もある¹⁾。しかし、国内においては1973年に東北新幹線第2有壁トンネルのTBM導坑掘削(φ4.5 m)において最大月進670 mが記録されているものの、後述する事例調査結果から、その平均月進をみると150 m程度と低く、TBMの高速掘進性を十分發揮しているとはいえない。この原因としては、主に次の2点が考えられる。

① 地山崩落等によるTBM掘進停止期間の影響

良好な地山では高速掘進が行われているが、崩落等によりTBMの掘進が長期にわたって停止してしまうことにより、全体的には効率の低い掘進になっている場合が多い。図-1に代表的な例を示す²⁾。良好な地山区間では月進500 m程度の高速掘進が行われているものの、断層破砕帯等において崩落が発生し、TBMによる施工が不可能になり掘進が停止してしまい、この区間の対策に8ヶ月以上を要している。

このような状態は、TBM掘進時に切羽前方の地質状況の把握が不完全で、断層破砕帯等の崩落性地山に無対策で突入してしまうことに起因していると考えられる。

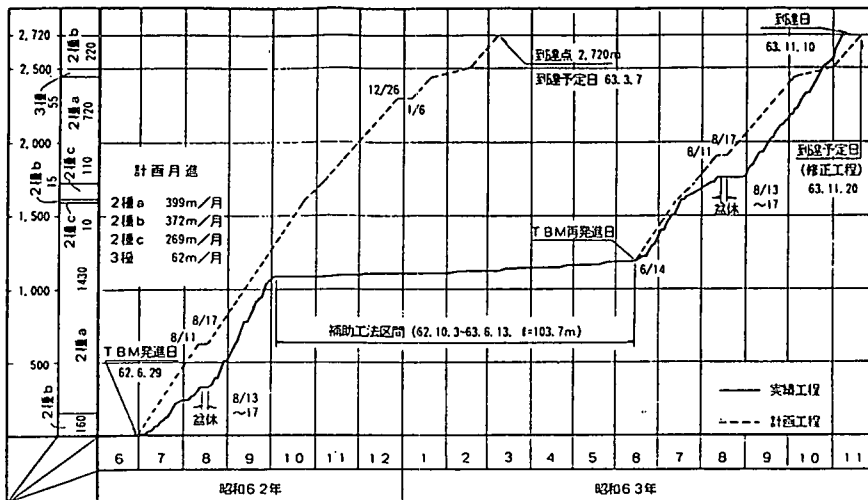


図-1 TBMによる掘削事例²⁾

② TBMの掘削能力とずり出し能力のアンバランスによる掘削効率の低下

図-2に、鋼車によるずり出し方式を採用したTBMにおける作業時間の割合を示す³⁾。これは、比較的詳細なデータが報告されている数件の施工実績をもとに整理したものである。最大日進を記録した時のずり出し時間の割合は、14～24%と高く、掘削作業に次ぐ作業時間を占めている。また、全体作業時間においては支保設置作業やトラブル対策等、さまざまな作業を含むため、ずり出し時間の割合は低くなるものの、最大では20%もある。この時間は、鋼車の入れ替えや資機材の搬入作業との輻輳等により発生したものである。この作業時間を短縮することができればTBMの掘削効率は向上し、全体的な掘進速度も上がると考えられる。特に、支保設置作業が必要ない良好な地山を順調に掘削する場合には、この効果は非常に大きい。

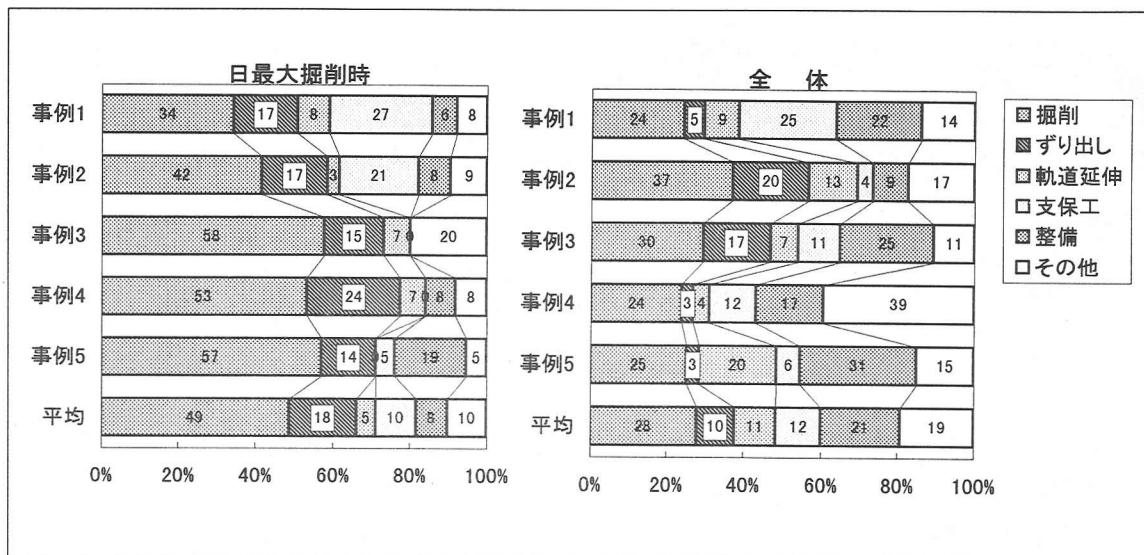


図-2 TBM施工実績における作業時間の割合

3. 効率的掘進システムの概要

3・1 工事概要

今回提案するTBMの効率的な掘進システムを使用している工事の概要を以下に示す。工事は日本道路公団発注の東海北陸自動車道袴腰・城端トンネル避難坑（その1）工事で、トンネル延長はL=3242 m、掘削径はφ 4.5 mである。地質は、第三紀岩屑累層の凝灰岩、安山岩および凝灰角礫岩が主体で、土被りは約20～220 mである。図-3に地質縦断図を示す。

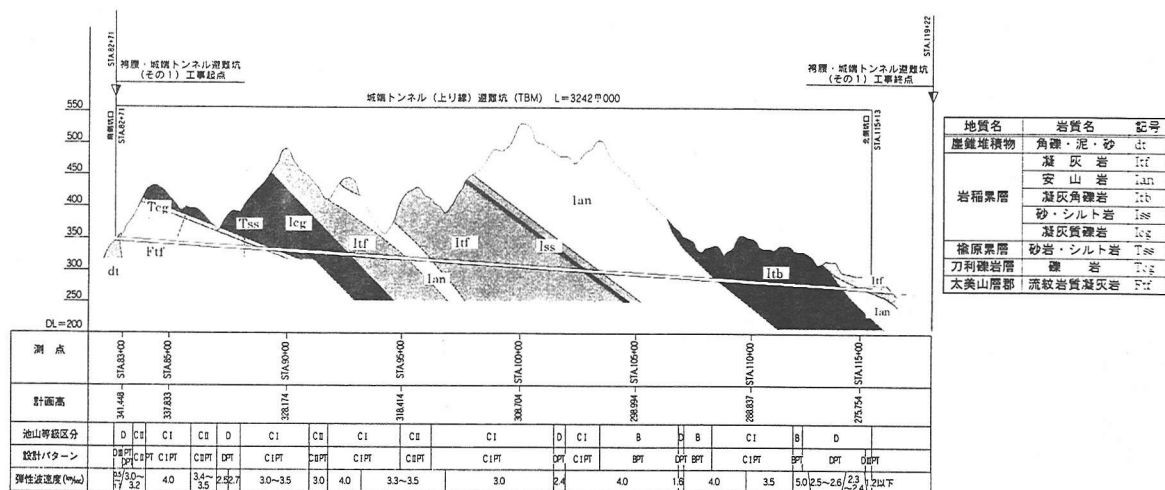


図-3 地質縦断図

3・2 効率的掘進システムの概要

事前の地質調査より地質状況は比較的良好であると判断し、TBMのタイプは高速掘進性をより発揮でき、地質の変化にも対応しやすいオープンタイプとした。TBMの本体概要図を図-4に、主要諸元を表-1に示す。

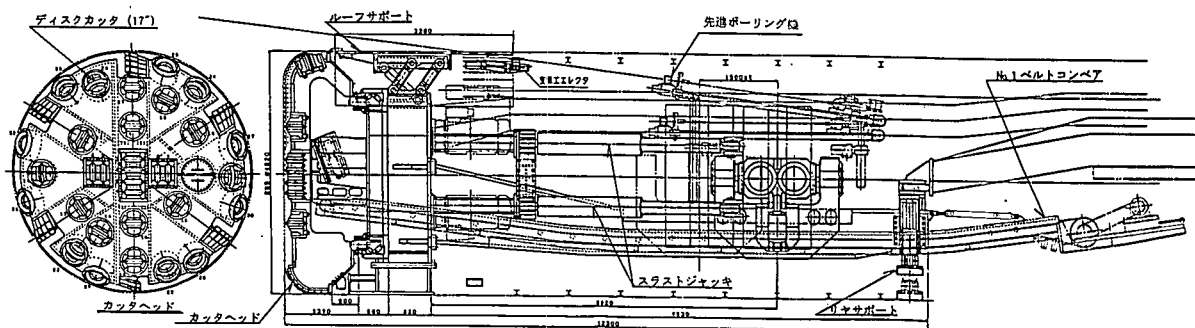


図-4 TBM本体概要図

表-1 TBM主要諸元

項 目	仕 様
TBM形式	オープンタイプ
掘 削 径	φ4500mm
本 体 長 さ	12.3m
全 長	83.3m
装備総重量	275 t
電動機総出力	約1150kW
推進ジャッキストローク	1500mm
推 進 力	820tf
カッタ径	17inch
カッタ数 (ツイン)	4 個
(シングル)	24個
カッタヘッドトルク	115~97t-m
カッタヘッド回転数	7.5rpm(可変式)
グリッパ押付力	1660tf

前述した問題点を解決し効率的な掘進を実現するために、以下のシステムを採用した。

- ① 地質の変化を事前に把握するために、TSPによる前方探査を全線で実施する。
- ② さらに、切羽近傍の詳細な地質状況を把握し、必要に応じて水抜きや先受け工等の対策工を実施するために、先進ボーリング機をTBMに搭載する。
- ③ TBMの掘削能力に支障を与えない連続的なずり出しを可能にするため、連続ベルトコンベアによるずり出し方式を採用する。

(1) TSPによる前方探査技術

図-5に、TSPによる前方探査技術の概念図を示す。TSP探査技術は弾性波反射法的一种で、トンネル側壁に受振孔1孔と発振孔を20~30孔設け、発振孔にて順次発破を行い、これによって生じた反射波を受振孔に設置した高感度の地震計によって受振する。こうして得られた反射波を解析することによって、切羽前方100~150mの地山状況を把握することができるシステムである。

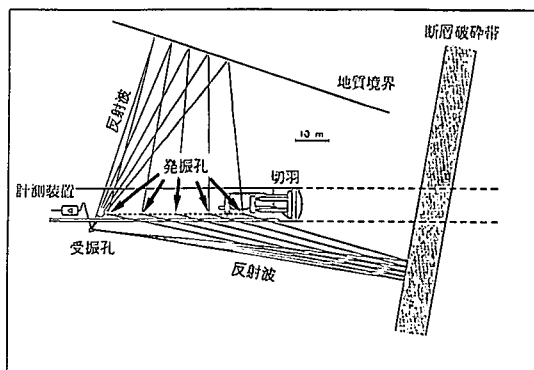


図-5 TSP探査技術の概念図

従来のレーリー波等による探査技術で

は、切羽前方30~40m程度の地山状況しか捉えられないため、TBMの掘進速度を考慮すると絶えず掘進を停止して探査を行わなければならないことになる。これに対しTSP探査は探査距離が長いので、週に半日程度、TBMの掘進に影響することなく実施することができる。

本工事では、TSP探査を100~150m毎に全線にわたって実施している。これにより、事前に断層破砕帯等の位置や規模の把握ができ、崩落が発生する前に適切な支保工や対策工を施すことができる。

(2) 先進ボーリング機による詳細地質調査および水抜き工の施工

TSP探査でTBMの掘進を妨げるような大規模な不良地質が予想された場合には、さらに詳細な地質状況を把握し、水抜きや先受け工等の対策工を実施する必要がある。そのために、先進ボーリング機(φ42mmロータリー式)をTBMのルーフサポート後方に搭載する(図-4参照)。

(3) 連続ベルトコンベアによる効率的なずり出しシステム

TBMの掘削能力に合ったずり搬出能力を確保するために、従来のずり鋼車に代えて、連続ベルトコンベアによるずり出しシステムを採用している。図-6にシステム概念図を、表-2に主要諸元を示す。

連続ベルトコンベアシステムは、TBM後続台車と坑外のストレージ（カセット部）が1本のベルトコンベアで結ばれている。坑外のストレージにストックされたベルトは、TBMが進行することにより順次坑内へ延伸され坑内全線に設置される。1カセットのベルト長は300mとし、TBMが150m進行する毎にベルトを接続し、ストレージ内ストックする。これによりトンネル全線が1本のベルトで結ばれ、ずりは切羽から坑外まで連続的に搬出されることになる。

このシステムにより、ずり鋼車待ち等のロスタイムはなくなり、効率的な掘進が可能となる。なお、ベルトの接続は、掘進中はレーシングで仮接続し、TSP探査等の作業に合わせて加硫接着作業を行うことで、掘削サイクルへの影響はほとんどない。

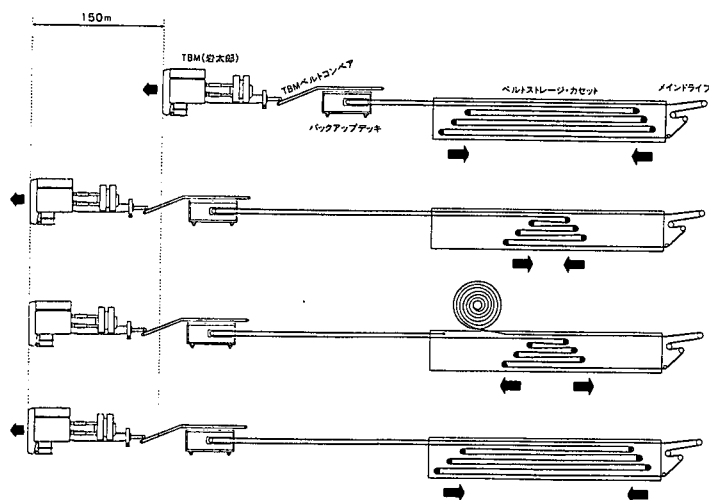


図-6 連続ベルトコンベアシステム概念図

表-2 連続ベルトコンベア主要諸元

項目	仕様
1. システム全長	3,242m
2. ベルト容量	336t/h
3. ベルト幅	610mm
4. ベルト速度	168m/分
5. 駆動モータ	142kW
6. カセット容量	300m
7. トラフィングローラー	
径	φ 100mm
ローラ角度	27°
取付けピッチ	1.5m
8. リターンローラー	
径	φ 100mm
取付けピッチ	3.0m

4. システムの効果

TBMは平成8年9月末現在、約2500m掘進し鋭意施工中である。これまでの掘進データをもとに、今回採用した効率掘進システムの効果について考察を加える。

図-7に、我が国の過去のTBM施工実績と今回のTBM施工における最大月進および平均月進を示す。なお、ここで用いたTBMの実績は、我が国における100件以上の施工データを既存資料等⁴⁾から調査し、まとめたものである。過去の実績については、TBM径や施工延長、地質状況等、さまざまな条件下での施工であるためかなりばらつきはあるが、最大月進は平均で306.2m、平均月進は平均で153.3mとなっている。これに対し、本トンネルにおける施工データでは、最大月進547.5mを記録し、平均月進でも約250mとなっており、効率掘進システムは十分に効果があるものと判断できる。

図-8に、本工事における現在までの平均的な作業時間割合と最大日進時（36m/日）の作業時間割合を示す。平均作業時間割合においては、週1回程度のベルト接続作業時間がずり出し時間として2%程度しめるが、TBMの掘進には大きな影響を与えておらず、掘削作業効率率は37%とずり鋼車使用事例に比較して高率となっている。また、最大日進時の作業効率も61%と、図-2の事例に比較しかなりの高率を示している。このことから、効率掘進システムの効果、特に連続ベルトコンベアシステムの効果が十分に発揮できていると思われる。

5. おわりに

今回採用した効率掘進システムによる施工はまだ途中段階ではあるが、現在までに得られたデータから、このシステムがTBMの高速掘進性を発揮する上で大きな効果があることが判明した。特に連続ベルトコンベアによるずり出しシステムは、その優れた施工性や安全性の点から、今後のTBM工事において主流になるものと確信している。また、TSP探査技術も精度の良い探査結果が簡易に得られることから、TBMだけでなく通常の山岳トンネル工法においても有力な前方探査技術になると思われる。

しかし、現状では、事前に地質状況が把握できても、TBMの掘進に支障が出るほどの崩落が発生する地山であるかどうかを高い精度予測すること、さらにTBMの掘進を中断して事前に十分な対策を施すことに踏み込むのは難しい。今後は、TBMの施工を通じて得られる数多くのデータを分析することによって、地山状況の定量的な評価、特に崩落の可能性の評価について研究を進めて行く必要があると思われる。

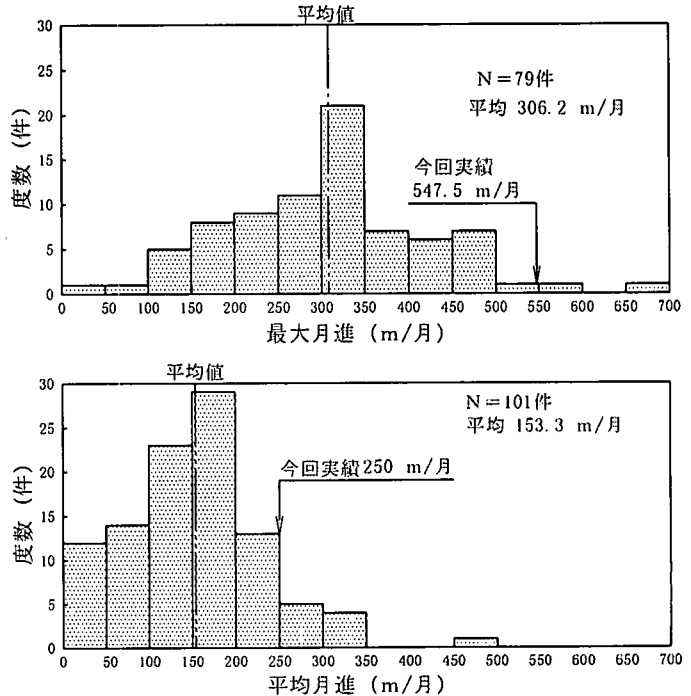


図-7 TBMの施工実績（最大および平均月進）

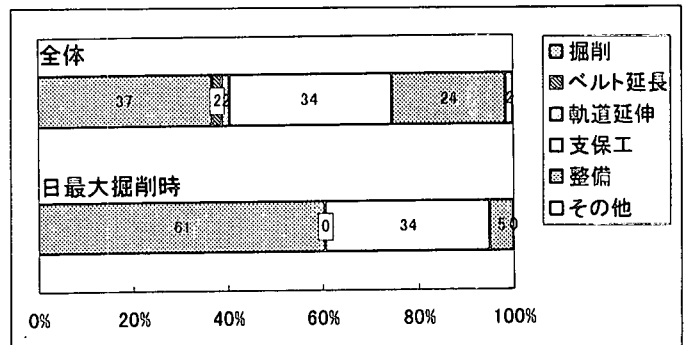


図-8 本工事における作業時間の割合

6. 参考文献

- 1) トンネルボーリングマシン入門 (2), トンネルと地下, 第26巻11号, pp.77～83, 1995.11.
- 2) 石川和男: TBMによる導水路トンネル施工の合理化, 中小水力発電技術に関する実務研修会 第2回 TBMによるトンネル工事と本道寺水力発電所の設計と施工, 1989.11.
- 3) (社)日本電力建設業協会: 昭和61,62事業年度報告(別冊2) 施工事例収集部会報告(TBM工法による施工事例調査資料編)
- 4) 例えば, (社)日本電力建設業協会: 昭和61,62事業年度報告(別冊1) 施工事例収集部会報告(TBM工法による施工事例調査資料編)