

TBM 坑の支保パターン判定方法に関する考察

清水建設（株） 正会員 木村 厚之
 清水建設（株） 正会員 木内 勉
 清水建設（株） 正会員 楠本 太

1. はじめに

TBM 工法は、無支保での高速掘進を基本としており、地山条件に恵まれればその高速掘進特性が生かせ、経済的なトンネル掘削が可能となる。このことから、長い水路トンネルや大断面トンネルの先進導坑として適用されており、新下平・新小荒発電所新設工事の導水路トンネル¹⁾では、工期短縮の要求と良好な岩盤がトンネル全長にわたって分布するのが予想されたので、TBM 工法が採用された。この工事では、月進行 800m 以上の高速掘進と掘削工期の約 1.5 ヶ月の短縮となったのと TBM 機械²⁾の特性が支保パターンとの関連で明らかとなったので報告する。

2. 工事概要と地質

TBM 坑は、新潟・山形県境に位置する飯豊山の南麓に位置し、阿賀野川水系実川に建設を進めている水路式発電所の導水路トンネルで、掘削径 $\phi 3,520\text{mm}$ 、延長 $L=4,413\text{m}$ である。地質は、白亜紀～古第三紀の花崗岩類からなり、第三紀の貫入岩類がわずかに分布し、基盤岩を覆って局部的に段丘堆積物、崖錐堆積物が見られる。花崗閃緑岩は、やや節理が多いものの、一軸圧縮強度は 100N/mm^2 程度の硬質岩である。トンネル全長にわたって幅 10～20m 程度の断層破碎帯が、7ヶ所推定されている。切羽からの大量湧水はない。

3. TBM 機械仕様と支保構造

硬質の火成岩帯を高速掘進するために、高回転域での低トルク運転と低回転域での高トルク運転を可能とするオープンタイプ TBM を計画した。坑外へのずり搬出は、連続ベルトコンベヤを採用し、TBM 稼働率を向上させた。支保構造は、地質性状に対応して 4 パターンとし、A 種は無支保、B 種と C 種はファイバ-入りモルタル吹付けとした。D 種はファイバ-入りモルタル吹付けに溝形鋼のリング支保工を併用した。補助工法として、ル-フサ-ト内からの注入式フォ-リング³⁾や水抜きサ-リング⁴⁾削孔が可能な構造とした。

4. TBM 坑の掘進状況

平成 13 年 1 月 19 日より本掘進を開始し、9 月 21 日に貫通した。2 月中旬までは、外気温が氷点下になるなどから機械トラブルが頻発し、計画進行の月進 392m は確保できなかった。最大日進は 62.9m、最大月進は 802.7m、初期掘進開始時から貫通までの平均月進は 455m である。当初計画では、支保パターンの A 種、B 種は全体の約 95%を想定

表－1 TBM 仕様とずり搬出設備

TBM 型式	オープンタイプ
掘削径	$\phi 3,520\text{mm}$
カット数	26 個 (15.5 インチ)
カット駆動装置 電動機出力 トルク 回転数	150kW×4 台 872kN・m (4.6rpm) 1.3～11.4rpm (5 段階変速)
スラスト装置 総推力 スラストジャッキ 伸長速度 ストローク長	5,880kN 2,940kN×2 本 max. 100mm/min 1,500mm
グリッパ装置 形式 シュー面圧	水平対向式、2 基 3.5N/mm ²
ずり搬出設備 ベルト幅 ベルト速度	連続ベルトコンベヤ 610mm 90～150m/min

表－2 支保パターンと区間延長

支保パターン名	A種	B種	C種	D種
概要図	無支保	ファイバーモルタル吹付 $t=20$ 120°	ファイバーモルタル吹付 $t=20$ 180°	ファイバーモルタル吹付 $t=30$ 120° 溝形鋼 150×75×65×10 リング支保工 1.0～1.2mピッチ
1 掘進長	1.5m			
計画延長(m)	1,310	2,911.79	152	40
施工延長(m)	1,417	1,876.79	888	232

キ-ワード：TBM 工法、高速掘進、岩盤等級、TBM 機械²⁾、掘削エネルギー値

連絡先：清水建設（株）土木本部技術第二部トンネルグループ Tel.03-5441-0566、Fax.03-5441-0515

していたが、実績では約75%であった。D種区間では、切羽崩壊や大規模崩落などにより、TBMが長期間にわたって停止するようなことはなかった。

5. 支保パターンの推定方法

TBM工法では、切羽観察と支保設置位置は、カッターヘッド先端位置から掘削径の約1.0～2.0倍後方となるので、支保設置までの間に、TBM機械データなどで、事前に、地山性状が把握できれば、合理的な支保構造や補助工法、地山補強工などが選定できるようになる。このことから、支保パターンの判定方法として、一般に崩落度による方法が適用されているが、これに加えて、1ストローク毎の掘削エネルギー値（ E_t : $\text{N}/\text{mm}^2/\text{mm}$ ）として数値化し、これの適用性を試みた。

$$E_t = \{F \times 1000 + 2\pi \times (N \times T \times 1000 \times 1000) / V\} / A$$

ここで、 F はスラスト推力 (kN)、 N はカッター回転数 (rpm)、 T はカッター力 ($\text{kN} \cdot \text{m}$)、 V は掘進速度 (mm/min)、 A は掘削断面積 (mm^2) を表す。

6. 適用結果と考察

全ストロークの掘削エネルギー値とスラスト推力を支保パターン別にプロットしたものを図-1に示す。支保パターンと掘削エネルギー値の対応度では、地山状況が激しく変化した2,100m～2,400m区間について、図-2に示す。これらから次のことがいえよう。

①岩盤等級がCLのD種では、掘削エネルギー値は約 $15\text{N}/\text{mm}^3$ 以下となり、自立度が低いので、肌

落、崩落が生じる。これが約 $35\text{N}/\text{mm}^3$ 以上になると、CH級の無支保となる。

②掘削エネルギー値からの推定支保パターンと実施支保パターンの変化の様子は、類似する傾向が見られる。

③実施支保パターンは、掘削面での崩落の規模などを目視観察し、その結果に基づいて決定しているが、

TBM機械データより数値化した掘削エネルギー値による方法は、支保パターンの事前の推定方法としての適用性は高い。

7. まとめ

岩盤性状に対応する支保パターンの選定は、一般に、掘削面の崩落度により判定されているが、火成岩帯でのTBM機械データからの掘削エネルギー値による支保パターン推定方法は、その適用の可能性は高いことがわかった。文献1) 佐々木千好他：TBMによる長大トンネルの高速施工新小荒発電所導水路工事、トンネルと地下、第33巻6号、2002。

表-3 岩盤等級の判定基準

岩盤等級区分	CH以上	CH～CM	CM	CM～CL
掘削エネルギー値	$30\text{N}/\text{mm}^3$ 以上	$23 \sim 30\text{N}/\text{mm}^3$	$15 \sim 23\text{N}/\text{mm}^3$	$15\text{N}/\text{mm}^3$ 未満
支保パターン	A種	B種	C種	D種
一軸圧縮強度	$80\text{N}/\text{mm}^2$ 以上	$50\text{N}/\text{mm}^2$ 以上	$20\text{N}/\text{mm}^2$ 以上	$20\text{N}/\text{mm}^2$ 未満
掘削面の性状	長期的に安定する。	長期的に肌落の恐れがある。	掘削時に肌落があり、長期的に崩落の恐れがある。	掘削時に肌落、崩落の恐れがある。
崩落の規模	5cm以下	5～15cm	15～25cm	25cm以上
割目性状	割目は密着しており、風化生成物・粘土は挟まない。	割目は密着するが、割目に沿って変色し、薄い粘土が付着する。	割目は開口し、粘土物質を挟在することがある。	割目は著しく開口し、粘土物質を挟在する。
割目間隔	50cm以上	50～20cm	20～10cm	10cm以下
湧水	にじむ程度	滴水程度	集中湧水	全面湧水

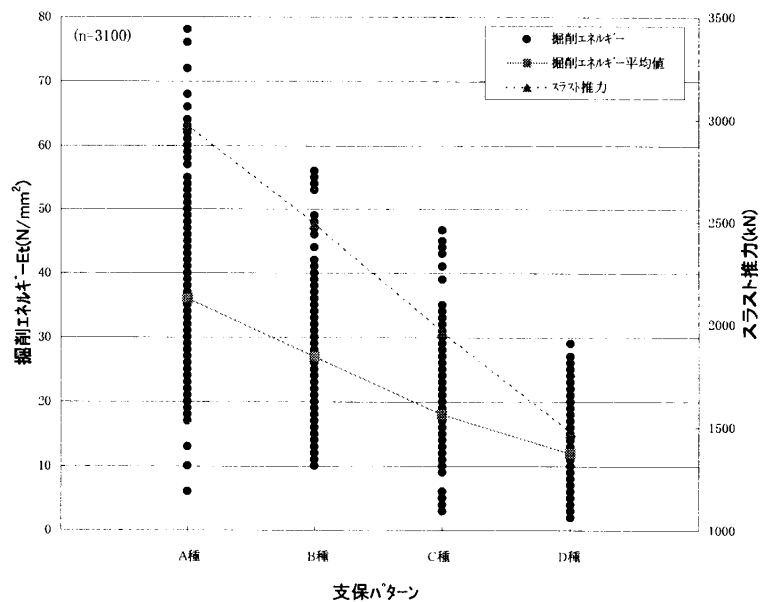


図-1 支保パターンと掘削エネルギー値（実績）

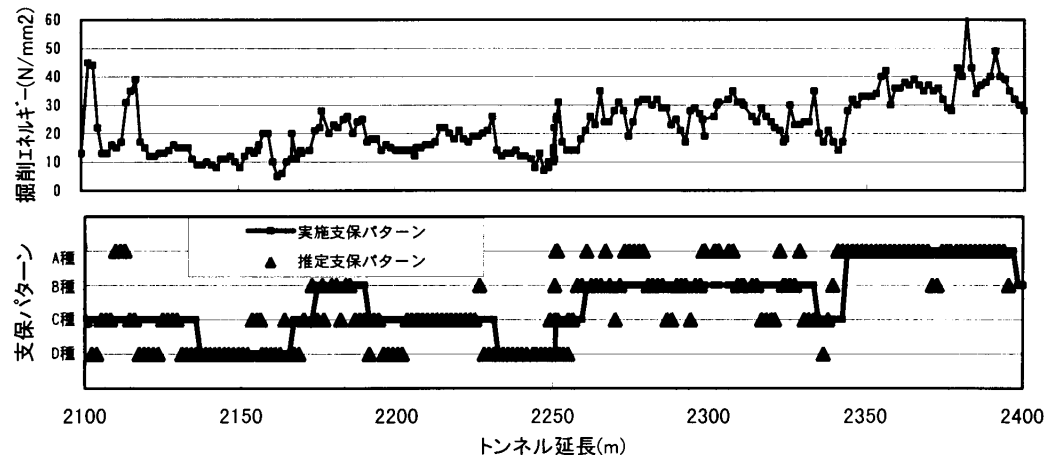


図-2 推定支保パターンと実績の相違（2,100～2,400m区間）