

TBM工法におけるベルコン上のズリ形状から切羽評価と結びつける技術開発

田邊 茂

1前田建設工業株式会社 中国支店 広島TBM作業所.

TBM工法ではNATM工法のように切羽を直接観察できない点を主因として、地質的な要因によるトラブルに見舞われる。その対策として、リアルタイムに計測されるマシンデータの分析・評価手法は研究されてきた一方で、前者と同様、リアルタイムに得られる掘削ズリの評価手法については、昨今あらゆる分野で叫ばれている機械化・省力化が進んでいないのが現状である。本紙では、早期にトラブルの予兆を捉え、掘進の可否や適切な補助工法の選定を行うため、ベルトコンベア上を流れる掘削ズリの形状をLiDARにて連続的に計測し、リアルタイムに地山判定するシステムの実証実験を行った結果について報告する。

キーワード：TBM，ズリ，切羽評価，LiDAR

1. 工事概要

工事件名：広島水道用水供給事業二期トンネル整備工事
(海田～矢野工区)

工事場所：安芸郡海田町東海田(海田総合公園内)～広島市安芸区矢野町

工事内容：工事延長 L=4812m
TBM掘削工L=4791.5m
先進拡幅坑 L=20.5m
接続トンネル工 L=13.5m
立坑(内径Φ11m) 1基、H=63.2m
附帯工 一式

工期：自 平成28年12月1日
至 令和8年3月15日

発注者：広島県 広島水道事務所

施工者：前田・国土・河井広島水道用水供給事業二期トンネル整備工事共同企業体(海田～矢野工区)

(1) 本工事の特徴

本工事は、安芸郡海田町東海田(海田総合公園内)の既設海田導水トンネルから呉市二河峡町の二河接合井間に立坑および新設導水トンネル等を設置し、自然流下による水道用水の導水を目的とする事業の内、安芸郡海田町東海田～広島市安芸区矢野町間(海田～矢野工区)について、立坑および新設導水トンネル(TBM工法)等の一部の設計及び工事を実施するものである。

二期トンネルは、地中深さ約25m～500mを通る自然流下式の水路トンネルであり、安芸郡海田町と呉市吉浦町にそれぞれ深さ約60mと約25mの立坑を掘削したのち、計3基のTBM(トンネルボーリングマシン)にて水平方向にトンネル掘削を行うもので、当工区は令和4年11月17日に4791.5mの掘削を完了した。



図-1 工事位置図

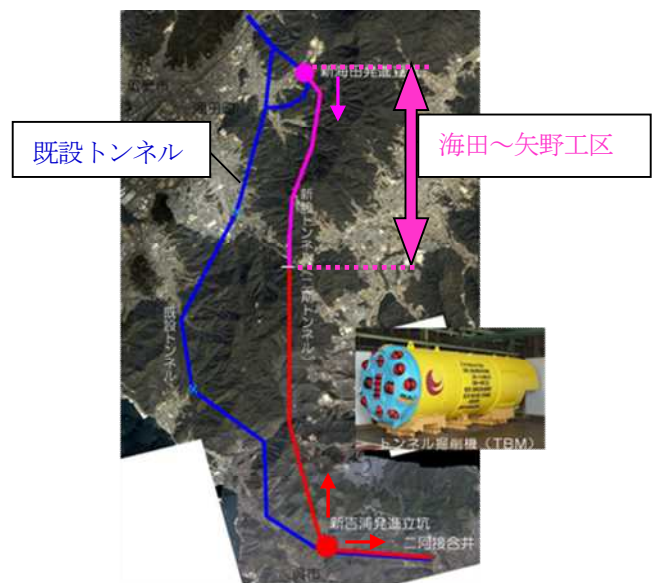


図-2 工事位置図(拡大)

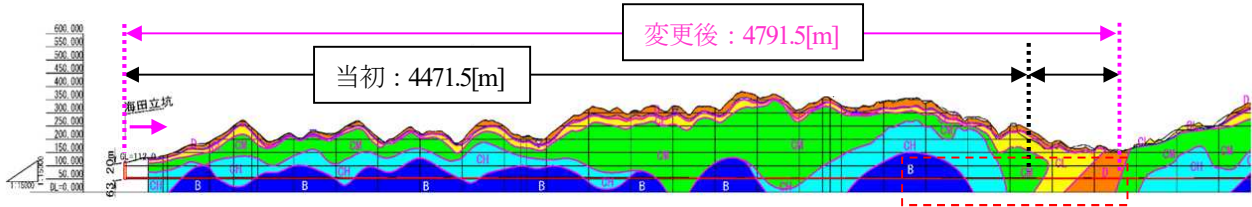


図-3 地質縦断面図 (海田～矢野工区)

また,当工区は設計変更により工区境が320m延長しており,上の地質縦断面図(図-3)から読みとれるように工区境近傍において,非常に硬質な花崗岩(B級:青色)から熱水変質の影響を受けた不良地山(D級:橙色)へ地質が徐々に変化していくと予想されたため,掘削ズリ形状にも相応の変化がみられると考えられた。

表-1 TBM掘削データ例(1次データ)

機械データ	単位	概要説明
スラスト推力	MN	スラストジャッキ圧にジャッキ内空面積と使用ジャッキ本数の積 $t = \pi/4 (D^2 \times P) \times N / 10^3$ シリンダー内径: D [cm] シリンダー本数: N [本] 使用圧力: P [Pa] 推力: t [N]
グリッパ支持力	MN	メイングリッパジャッキにかかる油圧にジャッキ内空面積とジャッキ本数の積 $t = \pi/4 (D^2 \times P) \times N / 10^3$ シリンダー内径: D [cm] シリンダー本数: N [本] 使用圧力: P [Pa] 支持力: t [N]
純掘進速度	Cm/min	スラストジャッキの単位変化量(掘進速度/掘進時間)
カッタ回転速度	min ⁻¹	カッタヘッドが1分間に回転する回数
カッタ電流	A	カッタ回転に必要な電流値

(2) TBM工法における切羽評価方法の特徴

TBM工法は,その施工性の特徴から長大トンネルに適用されることが多いため一般的に土被りが大きくなり,地質踏査や物理探査が十分行えない地域に計画されることが多い。したがって,切羽を含めた掘削直後の坑壁の自立性を設計・施工計画段階で評価することが難しいため,施工時に得られる情報が地山分類(=支保パターン)を決定する上で特に重要となる。しかしながら,NATM工法では掘削中に切羽での地質状況や地山の挙動を直接観察できるのに対して,TBM工法では切羽の状況が直接観察できず,掘削後数m後方のTBM本体から出たわずかな範囲しか観察ができない¹⁾。一方,TBM工法では切羽から直接得られる情報としてTBMの掘削時に得られるマシンデータと掘削ズリ性状が挙げられる。そこで,本工事では切羽(壁面)性状,TBM掘削データ,掘削ズリ性状から総合的に判断し切羽評価を行った。

(3) TBM掘削データについて

TBM掘削データには表-1のようなものがあり,これら機械的データ(1次データ)を組合せた二次加工データとして,より地山の地質状況を的確に表現し,施工管理にフィードバックできないかという研究や試行も各機関で行われている¹⁾。そのような二次加工データのうち,特に掘削体積比エネルギーについては,図-4に示すよう

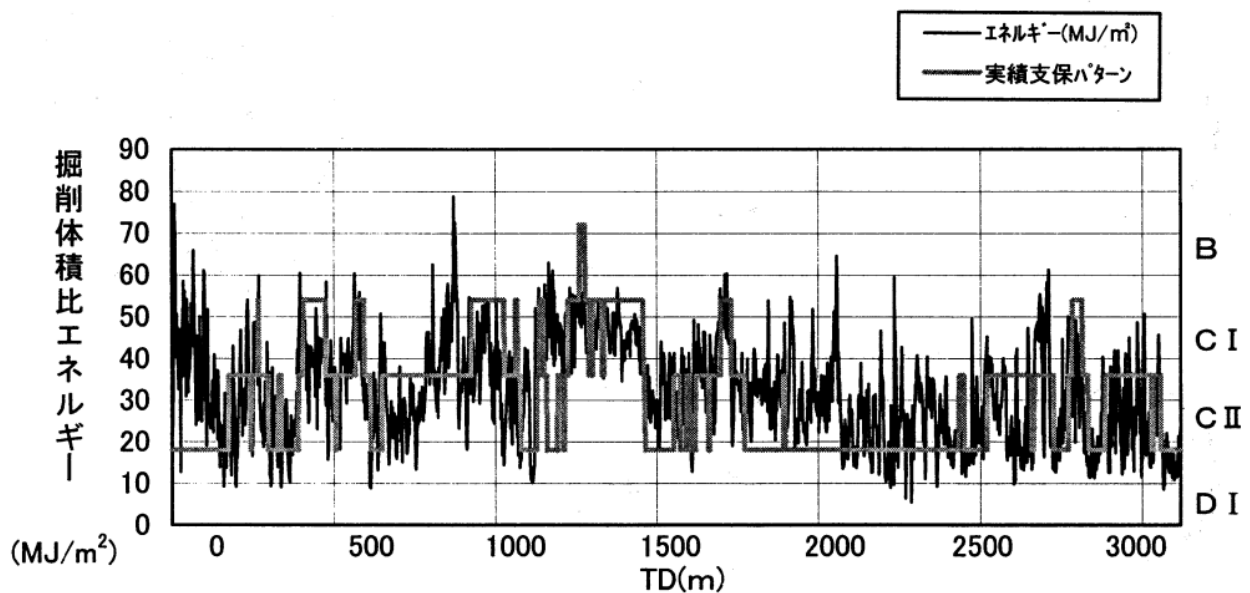


図-4 掘削体積比エネルギーと支保パターンの関係図

に支保パターンとの傾向が比較的一致しており、切羽の地山状況がある程度リアルタイムに予測できる1指標として用いることが十分可能であると考えられている²⁾。

(4) 掘削ズリ性状について

TBMの切削機構から、安定した地質においては掘削ズリの形状が扁平状（葉片状）になるのに対して、亀裂が多い場合は角柱状あるいは大塊状になることが分かっている。また、掘削ズリの色調を観察することにより、風化・変質の程度を推測することができる¹⁾。したがって、掘削ズリ形状を観察することで掘削面の定性的な状況を間接的に推察することは十分可能であると考えられる。しかしながら、掘削ズリ性状の観察方法については切羽担当者の目視によって実施されているのが現状であるため、掘削から観察までの間にタイムラグが生じるだけでなく、実際に観察される掘削ズリは全体のうちのごく一部である。そのため、切羽の状況をリアルタイムに予測するための重要な情報を十分に活用できておらず、切羽担当者の業務負担を大きくする一因となっている。そこで、本紙では掘削ズリ性状を機械的データとして採取することを主目的とし、更に掘削ズリ性状のデータをリアルタイムに解析し、地山判定した結果を出力するシステムの実証実験を行った結果について報告する。



図-5 LiDARによる掘削ズリ形状計測状況

掘削ズリ形状の3次元解析をリアルタイムにできないか試行した。しかしながら、約1.0m/秒の連続計測かつリアルタイムに判定結果を出力することが求められたため、3次元データのままで解析ソフト側の処理が不足する事態となった。そのため、スキャンライン的（2次元の）にデータ前処理を行うように改良した。

2. 掘削ズリの形状計測方法

掘削ズリ形状計測機器は、室内実験により精度を確認した上で、コスト・データの取扱い性・対候性・サイズ等から手のひらサイズのLiDARの適用性が高いと判断し選定した。ただし、LiDARによって得られるデータは3次元の点群データ（対象物までの深度データ、および対象物の光の反射率）であることから、精度検証のため視覚的に得られる掘削ズリの情報（形状、および色調）をGoProにて同時並行で取得する計画とした。

当初の計画段階では、LiDARで得られた深度データから

3. 掘削ズリ形状による地山判定方法

地山判定精度の検証を行うため、ズリ鋼車での掘削ズリ観察、TBM掘進後の坑壁観察、TBM掘削データも併せて分析を行い、掘削ズリ形状計測を行うことで得られる「扁平程度」に着目することで地山判定可能であることを確認した。ズリの扁平度により地山評価する福井ら³⁾の研究に倣い実施した。その結果の一例を図-7に示す。一般的に地山評価判定するためには色調や風化変質等の指標が挙げられるが、今回の検討によって点群データの

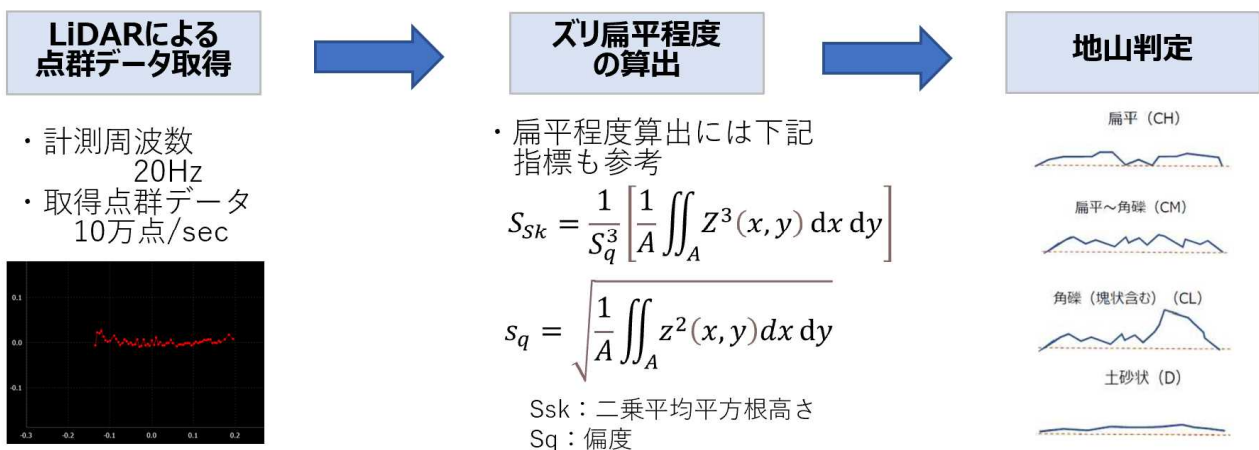


図-6 掘削ズリ形状の地山評価フロー

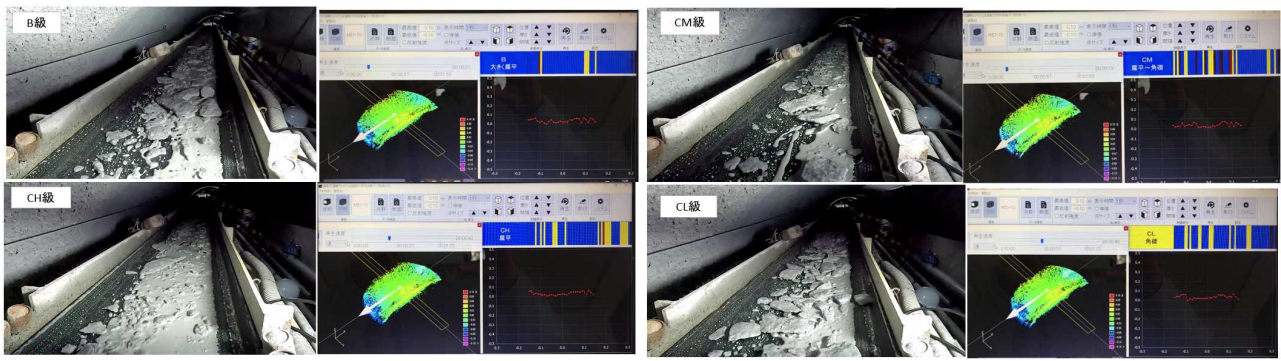


図-7 掘削ズリ形状の地山評価例

凹凸に着目したズリ形状（扁平程度）と地山判定結果について強い相関がみられた。このズリ形状（扁平程度）指標に基づき、実測データを分析評価した上で表-2に示す地山評価判定表を提案した。今後さらなる精度向上のためにはデータの蓄積と併せて判定基準の見直しが必要であるが、本手法によって連続的に地山判定評価ができ、今後データの蓄積によって地山判定精度が向上することが示唆された。

4. 結論

ベルトコンベア上を流れる掘削ズリを切羽担当者の目視によって観察する従来の方法では、掘削中表れていた

不良地山出現の兆候・傾向を見逃していた可能性がある。連続計測した掘削ズリ観察データ、TBM掘削データと坑壁観察を含めた総合的な地山判定をすることで、TBM工法における施工性と安全性のさらなる向上と省力化が期待される。

参考文献

- 1) 社団法人日本トンネル協会, TBMハンドブック, 2000.
- 2) 水上秀夫, 古川哲夫ら, 掘削エネルギー解析システムを用いたTBM掘削, トンネル工学研究論文・報告集第10巻報告(19), pp197-202, 2000.
- 3) 福井勝則, 大久保誠介ら, TBM掘削ずりに関する研究, 資源・素材学会講演集, B1-1, 1998.

表-2 掘削ズリ形状の地山判定表

地山等級		B	CH	CM	CL	D
地山(壁面)の状態・安定性イメージ		長期的にも崩落・肌落ちの恐れのない岩盤	長期的には崩落・肌落ちの危険性があり、掘削天頂部に崩落の危険性がある岩盤	長期的には崩落・肌落ちの危険性があり、部分的に崩落の恐れがある岩盤	掘削中に湧水などにより肌落ちがみられ、長期的には地山の劣化の恐れがある岩盤	壁面の崩落がリング支保工でおさえる事が困難、またはメイングリッパ反力が得られない場合、長期的には地圧がかかる岩盤
掘削ズリ性状観察	形状(扁平度)	大きく扁平 5	扁平 4	扁平～レキ混じり 3	節理面で割れており大塊が混じる 2	土砂状あるいは粘土状 1
	色調	変色していない 5	割れ目沿いに変色している 4	部分的に変色している 3	全体的に変色している 2	著しく変色している 1
	風化変質	新鮮で変質していない 5	新鮮～部分的に多少風化している 4	部分的に風化変質している 3	全体的に風化変質している 2	著しく風化変質している 1