

## 導坑掘削時のTBM機械データを用いた拡幅時の岩盤評価手法

### A METHOD TO ESTIMATE ROCK MASS CLASSIFICATION OF ENLARGED TUNNEL BASED ON TBM MACHINE DATA DURING EXCAVATION OF PILOT TUNNEL

城間 博通\*, 赤木 渉\*, 伊藤 文雄\*\*, ○谷 卓也\*\*  
Hiromichi SHIROMA, Wataru AKAGI, Fumio ITO, Takuya TANI

At Shimizu No.3 tunnel many kinds of support patterns were examined as the first trial of the 3 lines tunnel using TBM pilot tunnel. It was clear that support pattern of enlarged tunnel can be estimated by TBM machine data during excavation of pilot tunnel. We use two kinds of machinery data, the specific energy related to rock strength and the coefficient of main gripper related to elastic modulus. Using these data we propose the new criterion which rock mass classification is judged by. Based on our proposed criterions the reasonable support system of enlarged tunnel can be determined.

#### 1. はじめに

現在、第二東名高速道路のトンネルの一つである清水第三トンネル(延長1,123m)において、TBM導坑先進拡幅掘削工法を採用して大断面トンネルの試験施工が行われている。本工法は図-1に示す①~④の順で掘削を行うが、本研究は①のトンネル天端近傍の導坑(トンネル断面積の約10%)をTBMで掘削する際に得られる機械データから、拡幅後の地山の岩盤評価が可能であるかを検討したものである。大断面トンネルの施工において、拡幅時の地山状況をTBM導坑から迅速に得られれば、急速施工や合理的な支保設計に寄与できる。

既往の研究における機械データを用いた岩盤評価手法としては、主に機械データの各項目と地山データとの統計関係(単回帰,重回帰)を用いる方法<sup>1)</sup>、機械データの各項目の相互関係より実験式を導いて岩盤特性を求める方法<sup>2)</sup>、掘削体積比エネルギーを用いる方法<sup>3)</sup>がある。本研究では、岩盤特性を評価する際に必要なデータが、既存の運転モニター用の積算電力計から簡単に得られるという利点のある掘削体積比エネルギーを、岩盤評価に用いる機械データの一つとして採用した。

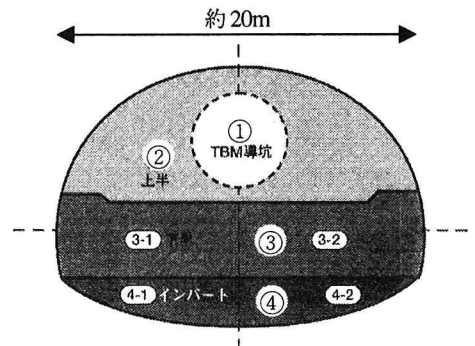


図-1 TBM導坑先進拡幅掘削工法加背割図

\* 正会員 日本道路公団 試験研究所

\*\* 正会員 大成建設(株) 技術研究所

本論文では、はじめに導坑を掘削している TBM から取得できる機械データの内、掘削時の本坑地山の岩盤評価に必要なパラメータについて、導坑の地山状況との関連性を検討する。次に、提案する岩盤評価手法で評価した結果を本坑地山の良・不良を示す支保パターンと比較・分析し、その適用性について考察を加えるものである。

## 2. 導坑の地山状況と TBM 機械データ

### 2.1 岩盤評価に用いる TBM 機械データ

導坑の地質情報から本坑の地山状況を把握するために TBM 機械データを用いるが、岩盤評価に当たっては、従来の岩盤強度  $\sigma_c$  のみによる評価ではなく、図-2 に示すように地山の変形挙動を規定する変形係数  $E$  も考慮した岩盤評価手法とすることとした。そのため、TBM 機械データによる岩盤評価には、岩盤強度と相関の高い「掘削体積比エネルギー」と、地山の変形係数に相当する「MG 係数」の両者を採用した。以下に、岩盤評価に用いる掘削体積比エネルギーと MG 係数について、これらのパラメータと地山状況の関連性について分析する。分析対象区間は、採取した岩石コアの一軸圧縮強度が得られている下り線の 700m 区間 (STA913+00~920+00) とした。この区間の地質は新生代新第三紀の砂岩もしくは砂岩泥互層であり、坑内では近接する断層の影響と思われる多数の亀裂や、角礫状に破碎されている地山状況も観察されている。

### 2.2 掘削体積比エネルギーと一軸圧縮強度の関係

TBM 機械データのうち、既往の研究で一軸圧縮強度との相関が認められているものに掘削体積比エネルギーがある。掘削体積比エネルギーは単位体積 ( $1\text{m}^3$ ) の岩盤掘削に要するエネルギー量で定義される。掘削に要するエネルギーは、トルクと推力から求めるエネルギーの和であるが、推力によるエネルギーはトルクによるものと比較して無視できるほど小さい<sup>3)</sup>ため、トルクによる仕事量のみを考慮すれば良い。掘削体積比エネルギー  $E_s$  は、カッターモーター消費電力を  $W$ 、掘削時間を  $t$ 、トンネルの断面積を  $A$ 、掘進長を  $l$  とすれば、 $E_s = W \cdot t / A \cdot l$  で算出できる。

清水第三トンネルにおける掘削体積比エネルギーと岩盤強度との間には、図-3 に示す比例関係が見られた。図の縦軸と横軸は、それぞれ岩石コアの採取地点を中心に前後 5m 区間の掘削体積比エネルギーの平均値、採取したコアの一軸圧縮強度である。図中、事前のボーリング調査で得られたコアの試験結果は白抜き四角で、導坑内のボーリングから得られたコアの試験結果は黒丸でプロットしている。なお、TBM の掘削時には岩石が湿潤状態にあると考えられるので、どちらも湿潤状態で試験した値のみを用いている。

### 2.3 MG 係数と亀裂頻度の関係

MG 係数は TBM が掘進に要する推進力と回転偶力の反力を得るためにメイングリッパーを地山に張り出す際の面圧とグリッパー変位から、岩盤の変形係数に相当する値を評価したものである。清水第三トンネルにおいては、施工中にメイングリッパー試験を自動で行い、左右のグリッパーのシュー面

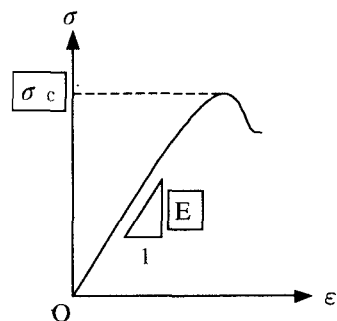


図-2 本評価手法における岩盤評価項目

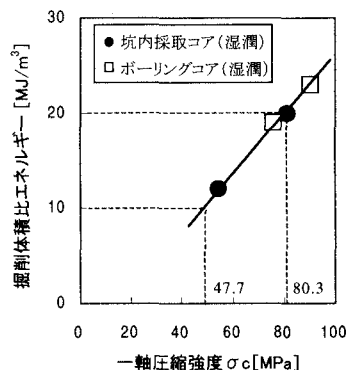


図-3 掘削体積比エネルギーと一軸圧縮強度の関係

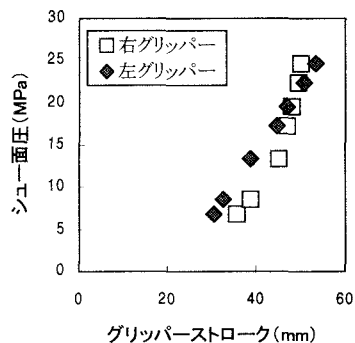


図-4 シュー面圧ーグリッパーストローク線図

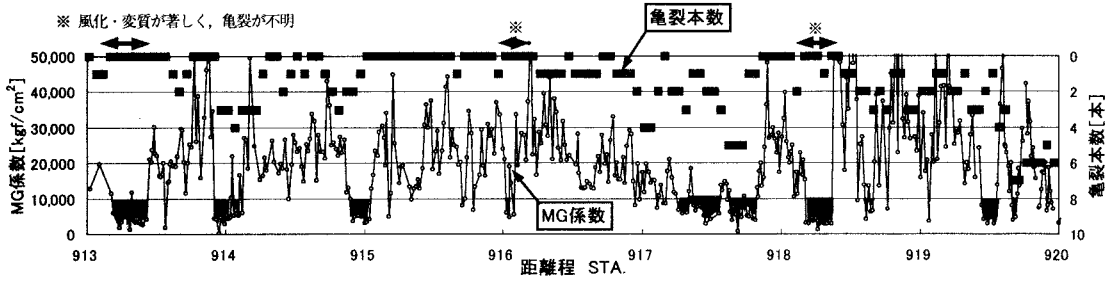


図-5 導坑内観察による亀裂本数とMG係数の関係

圧とグリッパーストロークを5～10秒間隔で取得し、孔内载荷試験の式<sup>4)</sup>を用いてMG係数を算出した。図-4にSTA914+08(上り線)におけるメイングリッパーストローク試験で得られたシュー面圧-グリッパーストローク線図の一例を示す。

清水第三トンネル工事ではTBM導坑の効果を検証するために種々の計測・観察が行われており、その一つとして導坑壁面の亀裂の位置と走向・傾斜を調査している。図-5は横軸に距離程、縦軸にMG係数と亀裂本数を示したものである。亀裂本数は、観察した全ての亀裂の走向・傾斜から亀裂モデルを作成し、5m毎に導坑断面を横切る亀裂の本数を算定したものである。ここで算定した亀裂は、開口幅5mm以上のもの、または粘土の付着が見られたもの、または周囲が破碎されているものとし、風化・変質が見られない密着した亀裂については算定の対象としていない。図に示すように、亀裂頻度の高い個所ではMG係数が地山状況の変化を敏感に捉えていることがわかる。図中、STA.913～913+50およびSTA.915+30、STA.916+00近傍では、亀裂本数がほぼ0であるにもかかわらずMG係数は10,000kgf/cm<sup>2</sup>(980MPa)以下の低い値となっている。これらの箇所における地山状況は、坑壁全体が粘土質であり明確な亀裂が観察できない破碎帯であった。このことから、MG係数は亀裂と風化・変質の両方の地山状況を反映していると考えられる。

#### 2.4 本坑の地山状況の分析

以上の検討により、TBM機械データが導坑の岩盤強度、亀裂頻度および風化・劣化という地山状況を反映することが分かった。本節では、掘削時の本坑地山状況の良し悪しを示す切羽評価点が主にどのような地質観察項目に支配されるかを分析し、採用したTBM機械データによる本坑地山に対する岩盤評価の妥当性を検討する。

掘削時の本坑坑内の地山観察における調査項目は、

①岩盤強度、②風化変質、③亀裂間隔、④亀裂状態、⑤走向・傾斜、⑥湧水量、⑦水による劣化の計7項目である。①～④までの項目は岩盤の硬さと亀裂に関する切羽評価点の算定項目であるため、図-6に示すように各項目の得点と切羽評価点の相関性は高い。図では、評価点、各項目の得点ともに、点数が高いほど地山の状況が良好であること示している。また、

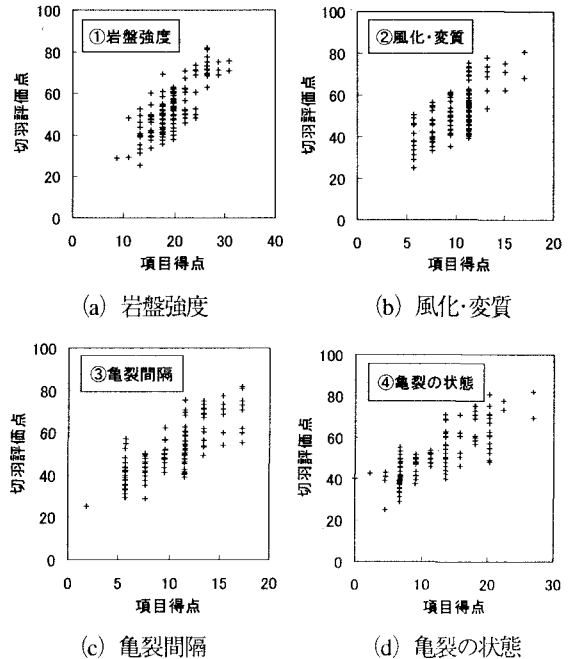


図-6 本坑における坑内観察調査項目の得点と切羽評価点との相関関係

⑤～⑦までの項目は図-7に示すように切羽評価点との関連性はみられなかった。以上の検討結果から、本坑地山的良好度は主に岩盤強度と亀裂の状態、風化・変質に支配されていると考えられ、本坑の岩盤評価に掘削体積比エネルギーとMG係数の両者を採用することで、TMB導坑から本坑の地山状況を推定できることが確認できた。

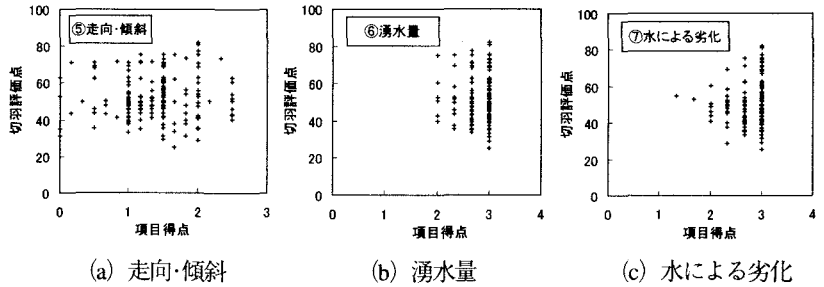


図-7 本坑における坑内観察調査項目の得点と切羽評価点との相関関係

### 3. 機械データによる岩盤評価手法

掘削体積比エネルギーとMG係数の2つの機械データを用いて、本坑の地山状況を地山等級として判定する方法について、表-1に示す判定基準を使って説明する。地山等級の判定には大きく2つの段階を設け、第1段階では掘削体積比エネルギーによって地山等級を決定し、第2段階ではMG係数の条件により、[基準1]で決定した等級の変更(ランク下げ)を判定する。これは[基準1]では岩盤の強度を、[基準2]では岩盤の変形特性を考慮した判定を行うことと等価である。

以下に、具体的な評価手順を示す。TBM機械データによる地山等級判定では、まず[基準1]に示すように掘削体積比エネルギーを用いて地山等級をB、CⅠ、CⅡの3段階に分ける。判定で用いる閾値を決定する際には、清水第三トンネルで採用した坑内観察調査表における圧縮強度の評価区分を参考にした。この評価区分では最高ランクを1,000 kgf/cm<sup>2</sup> (98.0MPa)以上、その下のランクを500 (49.0)～1000 (98.0) kgf/cm<sup>2</sup> (MPa)としている。清水第三トンネルのTBM掘削では、掘削体積比エネルギーの値がほぼ0～30 MJ/m<sup>2</sup>の範囲に分布している。この範囲を3等分したときの境界値である10、20 MPaは、図-3で示した一軸圧縮強度掘との関係では47.7、80.3 MPaに対応しており、この値が評価区分の境界値とほぼ等しいことから、[基準1]の閾値としたものである。

次に、MG係数を用いた[基準2]の判定を行う。[基準2]では、MG係数が10,000 kgf/cm<sup>2</sup> (980MPa)を10 m以上連続して下回った場合、[基準1]で求めた地山等級のランクを1つ下げる操作を行う。なお、[基準2]の閾値は、MG係数が10,000 kgf/cm<sup>2</sup> (980MPa)を下まわる地山では崩落性が高いという既往の研究例<sup>9)</sup>を参考にして決定した。清水第三トンネルの導坑においても、MG係数は導坑の崩落程度と相関が高く、崩落個所の多くでMG係数が10,000 kgf/cm<sup>2</sup> (980MPa)以下であった。

このようにして判定した地山等級が、数メートルしか連続せずに他の等級と上下を繰り返すような場合、ひとつの地山等級区分の区間長が10 m以上連続すると仮定し、低い方の等級を採用する。例えば、[基準2]による判定後、地山等級BとCⅠが、数メートル程度の短い区間で交互に繰り返して一つの等級が10 m以上連続しない場合には、この区間の地山等級を全てCⅠとする。

表-1 岩盤判定基準

基準1		基準2		総合判定
掘削体積比エネルギーEs		MG係数が10,000[kgf/cm <sup>2</sup> ]以下の値が10m以上連続する		※
Es[MJ/m <sup>2</sup> ]	判定1	MG係数条件	判定2	地山等級
20<Es	B	満たさない	ランク変更なし	B
		満たす	1ランク下げ	
10<Es<20	CⅠ	満たさない	ランク変更なし	CⅠ
		満たす	1ランク下げ	
Es<10	CⅡ	満たさない	ランク変更なし	CⅡ
		満たす	1ランク下げ	
※ ひとつの岩盤等級区分区間が10m以上連続しない場合には、安全側(地山悪)の評価とする				

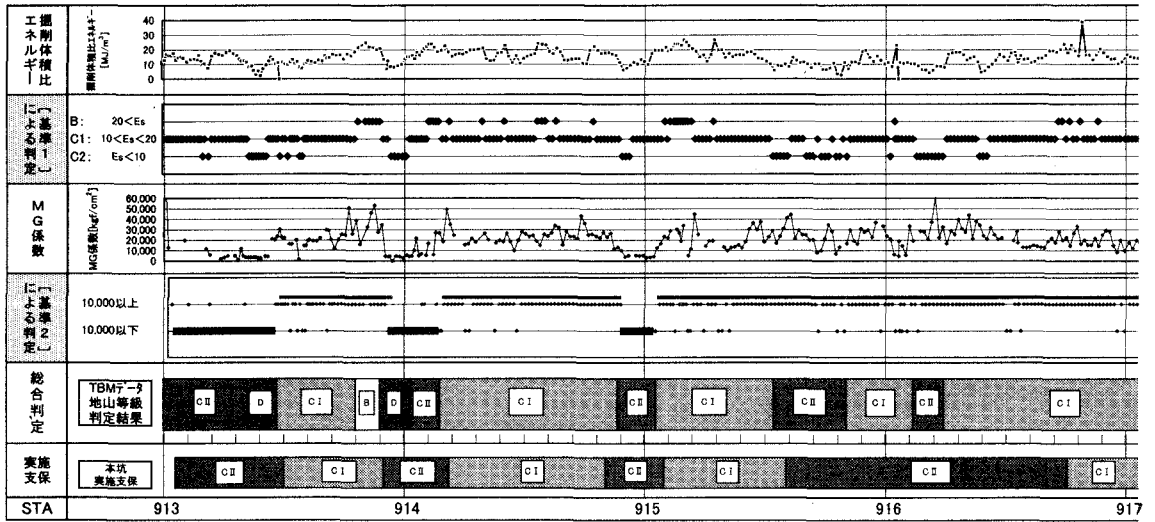


図-8 TBM 機械データによる本坑の岩盤評価結果 (清水第三トンネル下り線)

#### 4. 岩盤評価結果

清水第三トンネルのTBM機械データを用いて、地山等級を判定した結果を図-8に示す。ここでは、下り線STA913+00～917+00の判定結果について示している。図中、[基準1]による地山等級判定結果を点で、[基準2]に従ってランクを変更した区間を太い実線で示している。また、図から分かるように、[基準2]による判定により、STA913+00～913+35、914+00前後、915+00前後の3区間では、[基準1]のみによる判定結果に比べ、実施支保をより正確に予測できていることが分かる。図示した区間において、本坑の実施支保と判定が一致した区間長を実施支保区間長(約400 m)で除した合致率は約70%であり、本論文で提案した手法によりTBM機械データから本坑の地山状況が評価できることが分かった。

#### 5. まとめ

導坑TBMの機械データの内、岩盤強度と相関のある掘削体積比エネルギーと、地山の変形係数と相関のあるMG係数の両者を用いて岩盤の評価を行った。その結果、拡幅時の本坑の岩盤特性(新切羽評価点により決定した支保パターン)と比較的良好一致をみた。本論文で提案した手法により、亀裂の状態と風化・変質が変形挙動を支配する地山において、連続性かつリアルタイム性の高い導坑のTBM機械データから拡幅時の岩盤評価が可能であることを確認できた。今後は導坑内の地質観察と本評価手法を併用して、短時間に的確な岩盤評価ができる手法を検討する所存である。

#### 6. 参考文献

- 1) 吉野, 他: TBM トンネル施工時の機械データと地山特性の相関について, 日本応用地質学会 研究発表会 講演論文集, pp.127-130, 1995.
- 2) 福井, 大久保: TBM の掘削抵抗を利用した岩盤物性の把握, トンネルと地下, 2月号, pp.35-43, 1997
- 3) Teale, R.: The Concept of Specific Energy in Rock Drilling, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 2, pp. 57-73, 1965.
- 4) 土木学会編: 軟岩の調査・試験の指針(案), p.106, 1991
- 5) 日本トンネル技術協会: 湯田第二トンネルTBM 施工に関する調査検討(その2) 報告書, 1995.