

# TBM掘進データを用いた地質統計学的手法による 切羽前方地質評価

## Evaluation of the geological condition ahead of the tunnel face by geostatistical techniques using TBM driving data

山本拓治\*・白鷺 卓\*\*・山本真哉\*\*\*・青木謙治\*\*\*\*

Takuji YAMAMOTO, Suguru SHIRASAGI, Shinya YAMAMOTO and Kenji AOKI

In tunnel excavation by TBM, the ground condition ahead of and near the tunnel face is difficult to grasp because the face can't be observed during tunnel driving. Because of this fact, it has been impossible to fully achieve the high-speed excavation capability of the TBM in ground having complex conditions. Therefore, the authors developed the TBM Excavation Control System, the purpose of which is to grasp quickly and precisely, and in real time, the geological condition ahead of and surrounding the tunnel face. The special feature of this system is that the geological condition ahead of the TBM can be predicted with good precision by analyzing by geostatistical techniques both drill logging data from pilot boring and TBM driving data obtained during excavation.

**Key Words:** tunneling, TBM, geostatistic, navigation system

### 1. はじめに

TBMによるトンネル掘削では、掘進中の切羽観察ができないために、切羽前方及び切羽付近の地山状況の把握が困難である。そのため、複雑な地山においては、TBMの高速掘進性能を十分に発揮できないのが現状であった。そこで筆者らは、迅速かつ精度良く、切羽前方や周辺の地質状況をリアルタイムに把握することを目的とした、地山情報を重視したTBM掘削管理システムを開発した<sup>1)</sup>。本システムは、通常の測量管理や施工管理のほかに、掘削前情報としての事前地質調査情報と前方探査結果(削孔検層)、掘削中情報としてのTBM機械データ(スラスト、トルク、貫入量等)から得られる岩盤強度( $\sigma_c$ F)<sup>2)</sup>及び掘削体積比エネルギー( $Q_v$ )、グリップ反力係数、さらには掘削後情報としての地山情報(ズリ形状、ズリ重量)を総合的に分析・評価し、次の掘削にフィードバックすることを主目的としており、現場適用の結果、個々の指標は、充分地質評価指標として有効であることを確認している。しかし、削孔検層結果から得られる切羽前方の破壊エネルギー係数と、TBM機械データから得られる掘削位置での岩盤強度や掘削体積比エネルギーの関連性について、体系的に検討された事例はほとんどない。従って、今回はこのようなデータに関連づけ、切羽前方地質の評価としてさらに有効に活用することを試みた。

その際、より高精度な地質評価ができるように、地質統計学的手法を取り入れ、実際の現場のデータを用いて、TBMの掘削進行毎に切羽前方地質の予測を行った。その結果とTBM機械データの実測値や掘削後に得られたロックシュミットハンマの推定一軸圧縮強度及びトンネル壁面観察結果を比較したところ、地質の時空間的3次元分布が精度良く

\*正会員 修士 鹿島建設(株) 技術研究所 土木技術研究部

\*\*正会員 鹿島建設(株) 技術研究所 土木技術研究部

\*\*\*学生会員 修士 京都大学大学院 工学研究科

\*\*\*\*正会員 工学博士 京都大学大学院 工学研究科

合理的に捉えられていること、また、施工の進捗に伴い、精度が向上していくことを確認したので、以下にその概要を報告する。

表－１ 計算式一覧

|    | 式                                                  | 説明                                                                                                                |
|----|----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 式① | $Ev = (E \cdot N) / (v \cdot A)$                   | Ev：破壊エネルギー係数(J/cm <sup>3</sup> )<br>E：打撃エネルギー(J) N：打撃回数(/min) V：削孔速度(cm/min) A：削孔断面積(cm <sup>2</sup> )            |
| 式② | $\sigma cF = F / (C_1 \cdot Pe)$                   | $\sigma cF$ ：岩盤強度(F)(N/mm <sup>2</sup> )<br>F：推力(N) Pe：貫入量(mm)<br>C <sub>1</sub> ：定数                              |
| 式③ | $Qv = F / A + 2\pi \cdot N \cdot Tr / (A \cdot v)$ | Qv：掘削体積比エネルギー(J/cm <sup>3</sup> ) F：推力(N) A：掘削断面積(m <sup>2</sup> ) N：カット回転数(rpm)<br>Tr：カットトルク(N・m) v：掘削速度(cm/min) |

2. 削孔検層データ及びTBM機械データの概要

筆者らが開発した削孔検層システムとは、油圧ドリルで岩盤を削孔する時に得られるデータ（削孔速度、打撃圧力等）を測定し、各深度の地山状況を評価するものである。表－１に示す、単位体積あたりの岩盤を掘削するのに必要なエネルギーを表す「破壊エネルギー係数」（式①）を用いると、地質評価が精度良く行えることを確認している<sup>3)</sup>。

また、TBM機械データとは、掘削時に逐次収録されている推力、トルク、貫入量、カット回転数などのことで、TBM掘削管理システムでは、これらから地山評価に必要な岩盤強度（式②）及び掘削体積比エネルギー（式③）をリアルタイムで自動計算している<sup>1)</sup>。

3. 地質統計学的手法（Geostatistics）を用いたトンネル切羽前方地質評価の概要

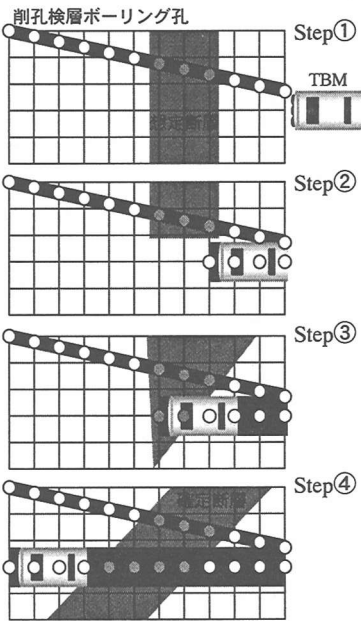
地質統計学（Geostatistics）とは、空間的な変動に関する事象を取り扱った統計手法であり、限られた標本データから全体の空間分布を精度良く推定することを主たる目的とする。鉱山における鉱床の品位や埋蔵量の予測精度の向上を目的とした研究に起源を発し、現在では、地球科学における多くの問題に適用されるようになってきている。

地質統計学を用いた評価においては、まず、評価の対象である物理量の空間的な特性である変動のトレンドやばらつきをモデル化する。例えば、一般に物性値の空間分布には、周辺と比較して大きな値を示している個所や小さな値を示している個所が存在するのが普通であり、これらがトレンドをもつて分布していることも少なくない。また、一般に空間の異なる2点における物性値を比較すると、距離が大きい場合には2点の物性値の間には関連性がほとんどないが、2点間の距離が小さい場合には物性値が類似した値を示すことが多い。このような、空間構造を位置の情報を含む関数である平均値関数や共分散関数によってモデル化する。

次にこのモデルを基にして、観測値の得られていない任意地点での値を推定して補間する。この補間にあたって、2点間の距離によって変化する重み係数により観測値の線形和として推定を行う方法のうち代表的なものがKrigingと呼ばれる線形補間手法である。

地質統計学的手法をトンネル切羽前方地質評価に適用したのは今回が初めてであり、その手順を以下に示す（図－１）。

- (a) 切羽前方の各位置において削孔検層により得られた破壊エネルギー係数を、予め検討した相関関係をもとに岩盤強度及び掘削体積比エネルギーに変換する。
- (b) 変換した岩盤強度及び掘削体積比エネルギーの空間分布について、その空間構造を平均値関数及び共分散関数によりモデル化する。
- (c) Krigingにより切羽前方の岩盤強度分布及び掘削体積比エネルギー分布を推定（補間）する（図－１中Step①）。
- (d) TBM掘進のステップ毎に、得られた岩盤強度及び掘削体積比エネルギーを実測値として入力し、同様の方法



図－１ 切羽前方地質評価例

で切羽前方での物性値の分布を推定する。すなわち、施工の進捗に伴って得られる実測値を迅速にフィードバックすることによってより精度の高い地質評価を実現するものである（図－1中Step②③④）。

本手法を取り入れることで、今まで掘削地点の地質評価にしか利用されていなかったTBM機械データが、切羽前方の地質予測にも使われることが可能となる。これまでも、徐々に地質が悪くなっていく状況や、ある周期で繰り返し地質が変化する状況などは、オペレータが定性的に感じ、切羽前方の地質を判断していたが、この手法を使えば、機械データからも定量的に切羽前方地質を予測することが可能である。

#### 4. 地質統計学的手法を用いた切羽前方地質評価結果

今回、この地質統計学的手法を利用して、データ分析・検討を行ったトンネルは、全長約 3,000m で、東西に延びている。事前地質調査によると、東側約 2,000m が花崗岩、西側約 1,000m が第三紀層の泥岩及び砂岩で、それらは大規模の断層を挟んで接している。後者は、前者に比べ、比較的軟らかい岩である。また、第三紀層の断層に近い部分は、花崗岩の貫入による熱変性を受け、ホルンフェルス化している。

このトンネルでは、削孔検層が全線にわたって実施されたため、破壊エネルギー係数のデータやTBM機械データが全線にわたり存在している。また、ほぼ全線にわたって、ロックシュミットハンマによる推定一軸圧縮強度と壁面観察結果が得られているため、これらデータを用いて比較・検討した。

##### 4. 1 破壊エネルギー係数と岩盤強度及び掘削体積比エネルギーの相関

削孔検層から得られた破壊エネルギー係数の空間的特性に、岩盤強度あるいは掘削体積比エネルギーの空間的特性を加えていく際、それら2つの間に存在する相関関係を把握することが、地質統計学的手法を用いる上での第一歩である。

1m 毎のある地点における破壊エネルギー係数、岩盤強度及び掘削体積比エネルギーは、その前後 0.5m 区間内の各データの平均（1m 区間移動平均）を代表値とし、それぞれについて相関をとった（図－2）。なお、各データは掘削進行 2cm 毎に得られている。

個々の相関係数を見ると、地質統計学的手法を適用する上で必要な相関関係は充分満たしていることが確認できたため、それぞれのデータを関連づけた地質予測が可能になったことがわかった。

##### 4. 2 予測結果と実測値の比較

地質統計学的手法に則り、削孔検層から得られた破壊エネルギー係数からTBM前方の岩盤強度を予測した。

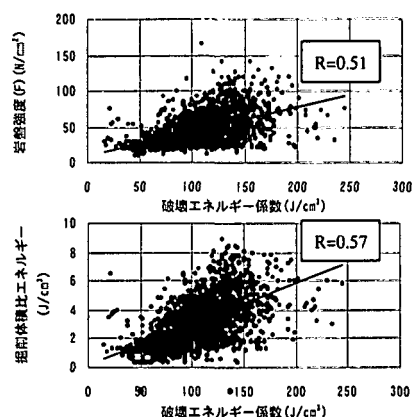
ここで予測に使用したのは破壊エネルギー係数のみで、

TBM機械データは反映されていない。図－4－①に真の地山強度としてのロックシュミットハンマ計測結果、

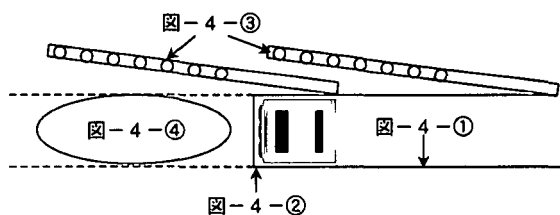
図－4－②にTBM機械データから算出される予測岩盤

強度（F）、図－4－③に削孔検層により得られた破壊エネルギー係数、図－4－④に破壊エネルギー係数から空間予測した、TBM掘削測線上の破壊エネルギー係数を比較した図を示す。

図－4－①と②を見てみると、傾向のみならず、絶対値までもほぼ一致している。TBM機械データから算出される予測岩盤強度は、かなりの精度で掘削地点の地質状態を反映できると思われる。次に、図－4－③と④を見てみると、走向はトンネル直交、傾斜は鉛直である本現場の地質構造において、④は③に比べてややばらつきが小さい結果になっているが、傾向や絶対値がほぼ同じになった。これより、TBM掘削断面の上方への削孔検層から得られた破壊エネル



図－2 破壊エネルギー係数と岩盤強度及び掘削体積比エネルギーの相関



図－3 予測値と実測値

ギー係数でも、地質統計学的手法により空間補間を行うことで、TBM前方の地質状態をより精度良く評価できると考えている。ここで図-4-①と④を比較すると、その傾向はやはり一致している。以上より、図-4-①と②、図-4-①と④の間には高い相関性があり、この手法を使った地質評価の実用性が高いことが確認された。

### 4. 3 断層付近の推定結果

4. 1、4. 2より、地質統計学的手法により精度良く切羽前方の地質を予測することが可能であることが確認された。ここでは、局所的な地質不良部の施工データの例を使い、適用性を詳細に検討した。

事前地質調査結果より推測されていた花崗岩と第三紀層を分ける大規模な断層は、TBM施工上、もっとも大きな懸案事項の一つであった。実施工においては、断層が出現すると推測された地点の手前で、通常は1本のところ、切羽から4本、10m掘削後さらに1本の削孔検層を行い、その結果、予想出現位置はTD900~910mとされたため、その周辺の地山を薬液注入により改良した。その結果、TBMは特に大きな問題もなく、断層区間を突破することができた。しかし、削孔検層位置は当然掘削面を外れており、また、計5本を密に行ったとはいえ、やはり、1本1本の線のデータから、面として3次元的に断層の位置を事前に評価するためには、専門的知識と時間が必要である。

ここでは、計5本の削孔検層結果を地質統計学的に処理した断層位置推定結果に、施工の進捗に合わせたTBM機械データを加えて、さらに精度良く推定した結果を紹介する。断層位置推定の際、使用したパラメータは岩盤強度であるので、この付近における破壊エネルギー係数と岩盤強度の相関結果から、あらかじめ破壊エネルギー係数を岩盤強度(F)に変換した。

図-5の上段の図は、削孔検層中採取されたスライム観察結果及び掘削後の坑壁観察結果であり、下段の図は、破壊エネルギー係数と岩盤強度(F)を地質統計学的に分析した結果得られた予想地質縦断面図である。図-5-①は削孔検層5本のデータのみを使用した予測図(Step1)、図-5-②は削孔検層5本のデータとTD897.7mまでの岩盤強度(F)を使用した予測図(Step13)、図-5-③は削孔検層5本のデータとTD909.8mまでの岩盤強度(F)を使用した予測図(Step21)である。

①を見ると、TD902mに低い岩盤強度帯( $\sigma_c F = 16.0 \sim 20.0 \text{ N/mm}^2$ )が認められる。その他の部分については、大きな値となっている。これに、TBM機械データから得られた岩盤強度(F)をステップ毎に加えて分析した②③を見てみると、①では確認できなかったTD889m~TD895m、TD908~910mの硬質部( $\sigma_c = 36.0 \sim 40.0 \text{ N/mm}^2$ )が認識されるなど、岩盤強度分布が複雑かつ詳細に反映されている。坑壁観察結果からも、この付近では亀裂が少なく、比較的硬質であることが確認されている。また、第三紀泥岩起源の微粒子の混入量が増大し始めるTD894mから岩盤強度が低下しはじめ、TD901~905mの断層本体と思われる地点(亀裂密集、粘土化、脆弱化が進行)において最も低い岩盤強度帯が予測されている。実際に、その位置で完全に粘土化した断層本体が確認されており、リング支保の間隔を50cmとして施工している。

このように、削孔検層結果にTBM機械データを逐次加えていくことで、予測結果がステップ毎に詳細かつ精度良く解析されていくことがわかった。

今回適用した現場の地質状態は、傾斜がほぼ鉛直で、走向もトンネル軸と直行することから、切羽前方の時空間的推

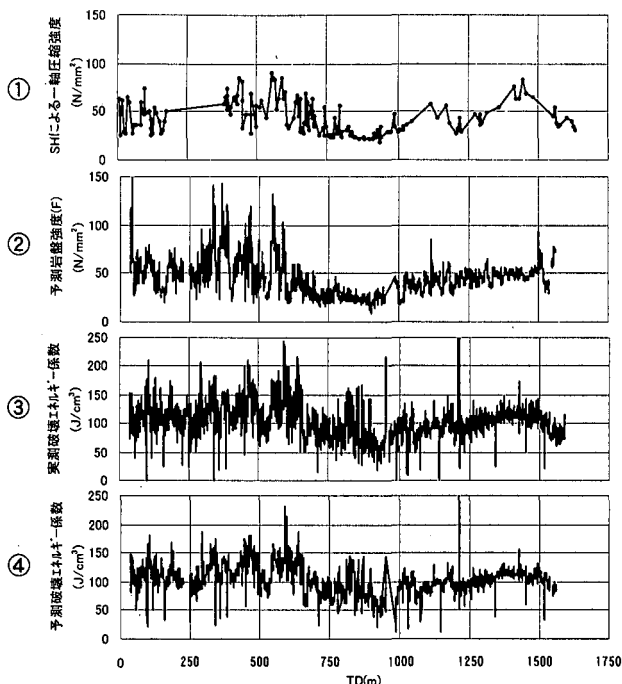


図-4 破壊エネルギー係数の換算岩盤強度と実施工上得られた岩盤強度の比較

定に大きな変化は見られなかったが、断層や地質構造の傾斜が緩い場合の境界付近では、大きな変化が予測できるものと考えている。

5. まとめ

地質統計学的手法を用いることによって、1次元のデータ（削孔検層結果、TBM機械データ）から地質の時空間的3次元分布を精度良く合理的に捉えることができた。施工の進捗に伴い、精度が向上することも確認した。

削孔検層データ及びTBM機械データの分析に地質統計学的手法を採用したのは今回が初めての事例であり、これによりTBM切羽前方の地質を精度良く予測することができることを確認したことは大きな収穫である。

今後、TBM掘削管理システムに地質統計学的手法を取り込むことにより、TBM切羽前方の地質評価をよりインテリジェントに行うことが可能になると思われる。さらに、TBM導坑先進工法で施工されるトンネルにおいて、地質統計学的手法により分析した3次元地質断面図を用いることによって、切掘り時の支保の選定を合理的に行うことができると思われる。

なお、京都大学大学院の水戸義忠先生には、今回の地質統計学的手法の適用に関して、有益なるご助言をいただいた。

【参考文献】

1) 白鷺 卓他：地山情報を重視したTBM掘削管理システムの開発と適用事例，第30回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.298-302，2000

2) 福井勝則他：TBMの掘削抵抗を利用した岩盤強度の推定，資源と素材，Vol.112，No.5，pp.303-308，1996

3) 白鷺 卓他：削孔検層の適用性に関する検討，土木学会第54回年次学術講演会，VI-206，pp.412-413，1999

4) 青木謙治他：地質統計手法による地盤の3次元モデル化手法について，鹿島建設技術研究所年報，Vol.37，pp.215-220，1989

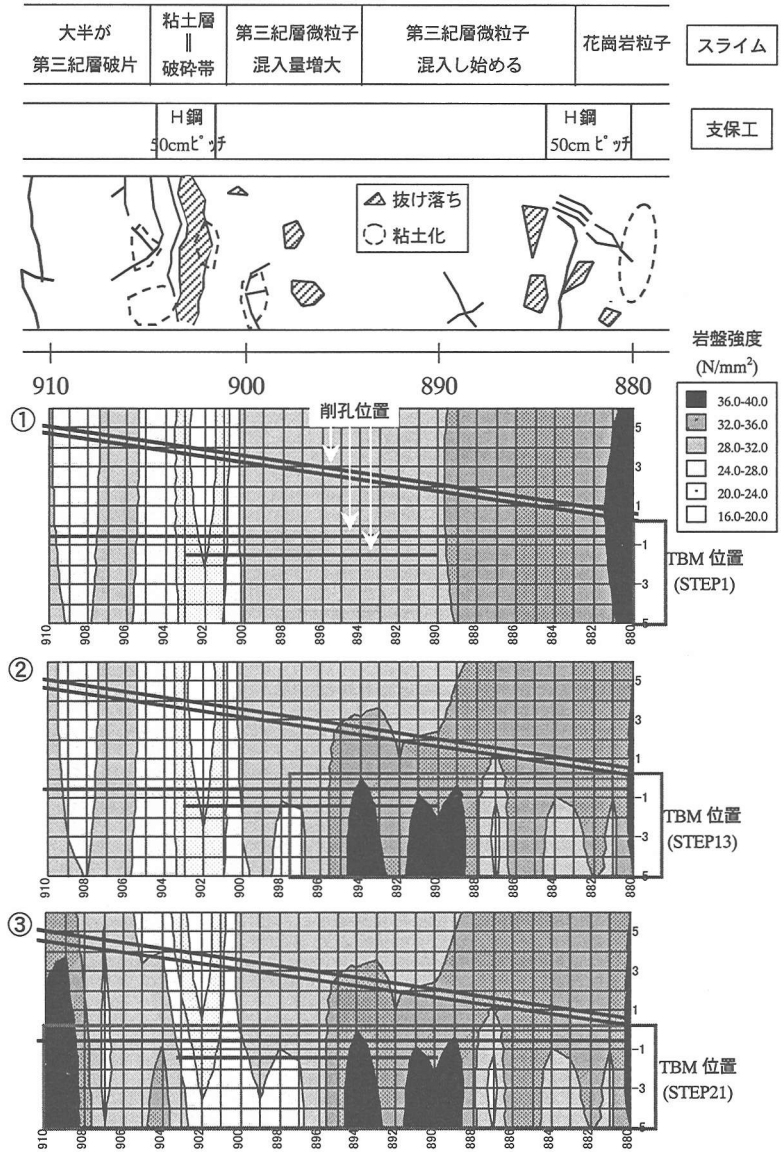


図-5 各ステップにおける予測地質状態図と坑壁観察結果の比較