

反射法弾性波探査と TBM 機械データを利用した トンネル切羽前方の地質予測及びトンネル周辺の地質評価

EVALUATION SYSTEM FOR ROCK PROPERTY AROUND TBM TUNNELS BY THE SEISMIC REFLECTIVE SURVEY AND THE TBM EXCAVATION

山本拓治*・白鷺卓*・小倉永輔**・水戸義忠***・青木謙治***

T. YAMAMOTO, S. SHIRASAGI, E. OGURA, Y. MITO and K. AOKI

This paper describes the relationship between the reflection number obtained from seismic reflective survey and the rock strength value obtained from TBM excavation, and the procedure of the conversion from the reflection number to the rock strength value. Subsequently, geostatistical method is employed to evaluate the rock properties ahead of the tunnel face and around the tunnel with good precision, using both the seismic reflective survey data and the TBM driving data for the purpose of the tunnel driving and enlargement. The applicability of this evaluation method is examined at the actual tunnel site.

Key Words: seismic reflective survey, TBM, rock strength value

1. はじめに

山岳トンネル工事において、トンネル切羽前方及び周辺の地質状態を精度よく予測することは掘削作業の安全性を高めるだけでなく、地山に最適な支保パターンを選定し、合理的な施工を実現する上で非常に重要である。特に、TBM によるトンネル掘削では、その高速施工性を十分に発揮するためにトンネル切羽前方を広範囲にわたって精度よく予測することが求められる。そこで、筆者らはトンネル切羽前方の地質状態を調査することができる 3 次元反射法弾性波探査¹⁾を開発している。これにより、トンネル切羽前方 100m 程度の地質状態を 3 次元的に精度よく予測することができるようになったが、現状では反射強度という探査区間内での相対的な評価にとどまっている。また、筆者らは、推力やトルクといった TBM 機械データをリアルタイムに算出し、TBM のオペレータが切羽の地質状態を連続的にモニタリングすることで、その地質状態に適した運転管理を可能とする TBM 掘削管理システム²⁾を開発している。これにより、目視観察できない切羽の地質状態を把握し、切羽崩落などの大きなトラブルを未然に回避することができるようになったが、前方探査結果とあわせて包括的かつ体系的に支保パターンの選定に生かされた例は、これまで少ないのが現状であった。

したがって、本研究では、まず、3 次元反射法弾性波探査から得られる切羽前方の地質状態の予測結果と TBM 掘削管理システムに収録される切羽の地質状態を表すデータの関係を検討し、前者と後者を結びつける変換式を提案した。また、反射法弾性波探査により求められた切羽前方の 3 次元的な地質状態をバリオグラムでモデル化し、TBM 機械データとあわせてクリギングによる空間補間を行うという地球統計学を導入することで、トンネル切羽前方及びトンネル周辺の地質状態を連続した 3 次元の力学的物性値で評価し、TBM 導坑の掘削時のみならず、その断面拡幅掘削工事において活用できることを確認した。

* 正会員 鹿島 技術研究所

** 非会員 京都大学大学院 工学研究科

*** 正会員 京都大学大学院 工学研究科

2. TBM 機械データと 3 次元反射法弾性波探査のデータ

本論文では、トンネル切羽前方の地質を評価するために、TBM 掘削中に自動収録される TBM 機械データと 3 次元反射法弾性波探査により得られるデータを利用した。

2. 1 TBM 機械データ

TBM 機械データとは、TBM 掘削中の推力、トルク、掘進速度、カッタ 1 回転あたりの貫入量、1 分間あたりのカッタ回転数など、連続して TBM 掘削管理システムに自動収録されるものと、このシステムにより、これらのデータから自動算出される岩盤強度³⁾の総称である。岩盤強度は以下の式で表される。

$$\sigma_c = \frac{F_N}{C \cdot Pe} \quad (1)$$

ここで、 F_N = 推力、 Pe = カッタ 1 回転あたりの貫入量、 C = 定数

2. 2 3 次元反射法弾性波探査のデータ

3 次元反射法弾性波探査の基本的概念は、図-1 に示すとおりである。地山の弾性波速度が既知であれば、ある発振点とそれぞれの受振点の間には、記録した反射波の伝播時間（走時）から、図のような楕円体（等走時面）を描くことができる。本探査では、10 点の受振器を 3 次的に配置しているの、探査対象空間内には、それぞれの発受振点の組合せにより、無数の楕円体が 3 次的に描かれることになる。これら楕円体の接面を反射面として画像化している。

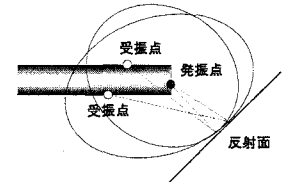


図-1 3 次元反射法弾性波探査の基本的概念

断層、破碎帯、地層境界、空洞といった地山の不連続面は弾性波速度の変化度としての「反射強度」により、反射面として検出される。弾性波速度の異なる媒体 k 及び $k+1$ が隣接して存在する物体中を弾性波が伝播した場合、両媒体の境界での反射強度は以下の式で表される。

$$\gamma_k = C \times \frac{V'_{k+1} - V'_k}{V'_k + V'_{k+1}} \quad (2)$$

このとき、

$$V'_k = C_0 V_k \quad (3)$$

$$V'_{k+1} = C_0 V_{k+1} \quad (4)$$

ここで、 V_k 、 V_{k+1} = 媒質 k 及び $k+1$ の弾性波速度、 C_0 = 定数

また、定数 C については、式 (2) を

$$V'_{k+1} = \frac{1 + \frac{\gamma_k}{C}}{1 - \frac{\gamma_k}{C}} \times V'_k \quad (5)$$

と変換したときに、

$$C \geq 0 \quad (6)$$

という条件を満たすように決定する。

3. 岩盤強度と反射強度の関係

3. 1 反射強度の変換

3 次元反射法弾性波探査によって得られる反射強度は、弾性波速度の変化度を表す相対的な値であるので、この値のままでは TBM 機械データから算出される岩盤強度との相関性は得られない。そのため、以下に示す方法で反

射強度データを変換する。

まず、3次元反射法弾性波探査からトンネル延長方向の各点の反射強度が2.5m間隔で得られる(図-2)。これら各点において、式(5)を用いることで反射強度 γ を V' に変換する(図-3)。ここでは、 V'_1 を2.5km/secとした。

次に、岩盤強度と弾性波速度との間には、岩盤強度が大きくなるほど弾性波速度が大きくなるという関連性が知られていることから、その関連性を用いて V' が岩盤強度に適合するように平均及び分散を利用して変換する。TBM機械データから算出される岩盤強度データを図-4に示す。

V' の平均を $m_{V'}$ 、分散を $s_{V'}$ 、岩盤強度の平均を m_σ 、分散を s_σ とすると、

$$m_{V'} = \frac{\sum V'}{N} \quad (7)$$

$$s_{V'} = \frac{\sum (V' - m_{V'})^2}{N} \quad (8)$$

$$m_\sigma = \frac{\sum \sigma}{N} \quad (9)$$

$$s_\sigma = \frac{\sum (\sigma - m_\sigma)^2}{N} \quad (10)$$

となる。これらを利用して、岩盤強度は

$$\sigma = m_\sigma + \sqrt{\frac{s_\sigma}{s_{V'}}} (V' - m_{V'}) \quad (11)$$

で導かれる。式(11)を利用して V' を岩盤強度に変換したものを図-5に示す。

以上のような変換を行うことで、TBM機械データから算出された岩盤強度と反射強度から変換された岩盤強度の相関性の検討を行うことが可能となる(図-6)。

3.2 TBM機械データから算出された岩盤強度と反射強度から変換された岩盤強度の相関性

本論文において検討対象としたトンネルでは、TBM導坑掘削時にTD1400m、TD1520m及びTD1620mの3箇所において3次元反射法弾性波探査が実施された。それぞれの探査結果について、反射強度を岩盤強度に変換したものと、その地点におけるTBM機械データから算出される岩盤強度との相関性を検討し、まとめたものを図-7に示す。

これより、相関係数は0.866と高い値を示しており、両者の間には明確な相関性が存在するといえる。つまり、この変換手法により、反射強度という相対的な値を岩盤強度という力学的物性値に変換することの妥当性を確認することができた。

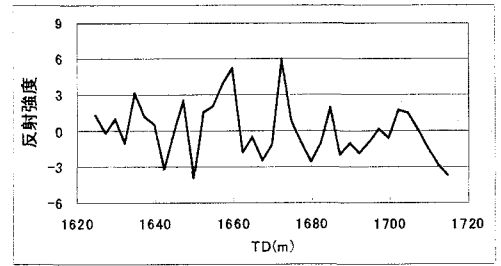


図-2 反射強度

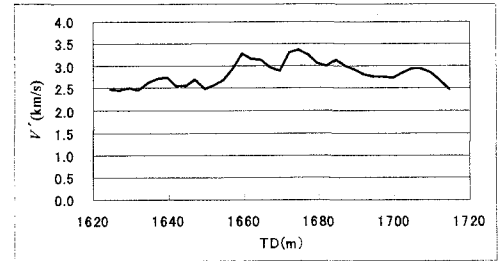


図-3 反射強度から変換された V'

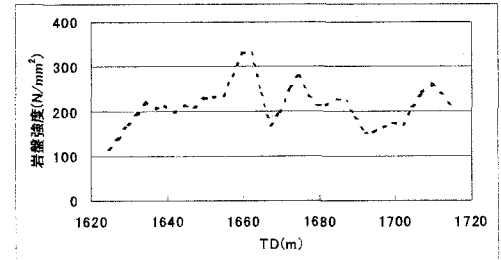


図-4 TBM機械データから算出された岩盤強度

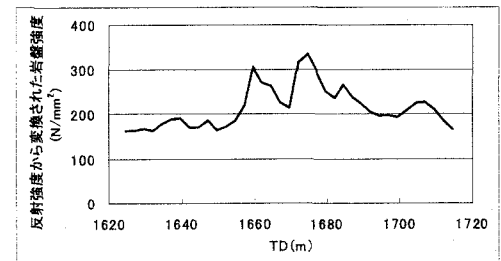


図-5 反射強度から変換された岩盤強度

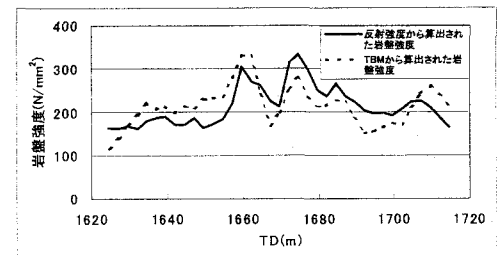


図-6 TBM機械データから算出された岩盤強度と反射強度から変換された岩盤強度の比較

4. 地球統計手法による3次元地質モデルの作成

4. 1 モデル化の概要

本論文では、大断面トンネル掘削時に合理的な支保の選定を行うための、より精度の高い地質予測手法を構築することを目的としている。ここでは、大断面トンネルの3次元地質モデルを提案し、そのモデルと地質観察記録を比較することによってモデル化手法の妥当性の評価を行った。

大断面トンネルの3次元地質モデルの作成手順を以下に示す。

- ① TBM 機械データから算出される岩盤強度を大断面トンネルの3次元地質モデル作成時の推定パラメータとする。
- ② TBM 掘削時に3次元反射法弾性波探査を行うことによって、大断面トンネル周辺の反射強度が、2.5m 間隔の3次元データとして得られる。
- ③ TBM 機械データから岩盤強度が算出されている箇所のデータを用いて、反射強度と岩盤強度との関連性を検討し、その相関性を用いて反射強度を岩盤強度に変換する。
- ④ 2.5m 間隔の3次元データである変換された岩盤強度をより細かいデータ分布にし、かつ、地質の異方性や類似性を考慮に入れるため、地球統計手法を用いてデータの3次元の補間を行い、3次元地質モデルを作成する。

このような手順で大断面トンネルの3次元地質モデルを作成することによって、地山の不連続面の位置を予測するだけでなく、その物性値も評価することが可能となる。

4. 2 地球統計手法による補間

4. 2. 1 地球統計学の概要

地球統計学 (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る。その主たる目的のひとつとして、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が挙げられる。その際、空間的なばらつきを確率的に考慮している点が特徴である。

地球統計学を用いた推定方法は、

- ① 評価対象である物理量の空間的な特性 (空間構造) を記述し、観測値から確率場としてモデル化する
- ② モデル化した空間構造を用いて、観測値の得られていない任意地点での値を推定する (Kriging)

①は、対象とする物理量の平均値や分散、空間的なばらつきを表す共分散を観測値から推定する段階である。本論文では、Variogram 関数を用いて空間構造の記述を行った。②は、①で記述したモデルを基にして、観測値の得られていない地点の値を、得られた観測値の線形和として推定する段階である。すなわち、対象とする物理量の空間的な補間を行う。本論文では、Ordinary Kriging 手法を用いて検討した。

4. 2. 2 確率場のモデル化

前述のとおり、推定を行うには空間的な特性である確率場をモデル化する必要があり、本論文では、Variogram を用いて空間構造を記述した。Variogram とは2点間の相関の様相を表す関数であり、 $\gamma(h)$ を Variogram の推定量とすると、 $\gamma(h)$ は次式で表される。

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i + h) - Z(x_i)]^2 \quad (12)$$

ここで x_i は位置、 $Z(x_i)$ は確率変数、 $N(h)$ はデータ間の距離が h 離れている観測データの組の数である。Variogram はある点の影響がその点から離れるにつれて、どのように変化していくかを示したものと考えることができ、その変化の特徴は、対象とするものの性質によって異なる。そして、その性質を表現する最適な Variogram を見つけ

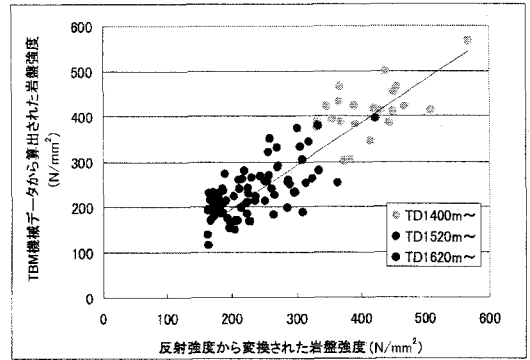


図-7 TBM 機械データから算出された岩盤強度と反射強度から変換された岩盤強度の相関

ることが、確率場（空間構造）の推定にあたり、Kriging 手法の適用の前提条件となる。

式 (12) で求めた Variogram 推定値に対して、理論 Variogram モデルによって近似することをモデルのあてはめという（図-8）。通常、あてはめには計算を簡略化する理由から単純な数式モデルが用いられる。

本研究では、モデルのあてはめに球体モデルを用いた。球体モデルは次式の関数で表される。

$$\gamma(h) = \begin{cases} c \left[\frac{3}{2} \cdot \frac{h}{a} - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] & h \leq a \\ c & h > a \end{cases} \quad (13)$$

ここで、 a はレンジ、 c はシルを表しており、モデルのあてはめにより算出されるパラメータである。たいていの場合、ある点の影響は離れれば離れるほど減少し、最終的にまったく影響を及ぼさない距離に至る。このまったく影響を及ぼさない距離 h をレンジといい、その時の Variogram $\gamma(h)$ の値をシルと呼ぶ。

また、Variogram $\gamma(h)$ と共分散関数 $C(h)$ との間には次式の関係がある。

$$C(h) = C(0) - \gamma(h) \quad (14)$$

ここで、 $C(0)$ はシルである。この式は Variogram が共分散関数に正反対に挙動していることを意味している。

4. 2. 3 Ordinary Kriging 手法

確率場のモデル化を行った後、そのモデルを基にして、観測値の得られていない地点の物理量を推定する方法が Kriging である。Kriging が、いわゆる古典的な線形回帰と異なる点は、データ間の確率的な相関性を考慮している点にある。Kriging 手法は基本的にはどれも線形回帰による推定であり、任意の位置 x_0 における推定量 $Z(x_0)$ は次式で表される。

$$Z^*(x_0) - \mu(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i [Z(x_i) - \mu(x_i)] \quad (15)$$

ここで、 $\mu(x_0)$ は、確率変数 $Z(x_0)$ の期待値 $E[Z(x_0)]$ である。

式 (15) から推定量を求めるためには重み係数 ($\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$) を求める必要がある。そのための方程式が Kriging 方程式であり、基本的には「推定誤差分散の最小化」と「推定量の普遍性」という 2 つの条件を満たすように決定する。本論文では次式に表される Ordinary Kriging 手法を利用した。

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma(|x_j - x_i|) + \eta = \gamma(|x_j - x_0|) & j = 1, 2, \dots, n \\ \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \end{cases} \quad (16)$$

4. 3 岩盤強度の推定

地球統計手法による補間を行うことによって、図-9 に示すような岩盤強度分布としての 3 次元地質モデルを作成することができる。この図は、岩盤強度が $140 \sim 180 \text{ N/mm}^2$ の比較的低い部分のみを可視化しており、黒色に近いほど岩盤強度が小さいことを示している。また、点線で示した箇所が掘削された TBM 導坑の位置である。このように、3 次元反射法弾性波探査で探査した範囲全体の 3 次元の岩盤強度分布を詳細に可視化することができることを確認した。

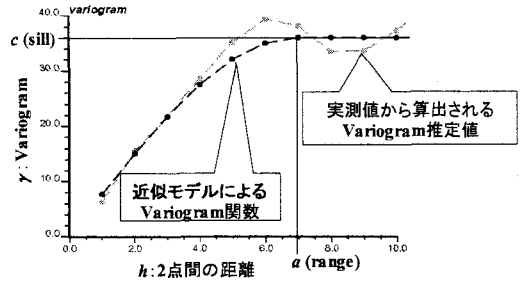


図-8 モデルのあてはめによる Variogram 関数の算出

4. 4 地質状態との比較

TBM 導坑の左側壁部 (SPL)、天端部、右側壁部 (SPR) などの地質状態を展開して描いた地質観察記録と3次元地質モデルを比較したものを図-10 に示す。上部の坑壁地質展開図では主要な不連続面を太線で示している。下部の岩盤強度分布推定図はトンネルセンターラインでの縦断面図で、太線は上部展開図の主要な不連続面をおとしたものである。これより、TBM 導坑を取り囲む広い範囲にわたって、地山の不連続面が存在する箇所はもとより、それらが交差する部分の岩盤強度が特に低くなっていることがわかった。したがって、地球統計手法により推定した岩盤強度分布は地質の異方性、類似性及び連続性を考慮し、実際の地質状態によく整合していることを確認することができた。

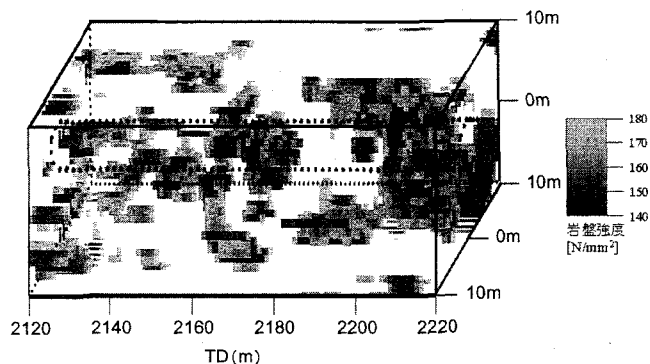


図-9 岩盤強度分布の推定

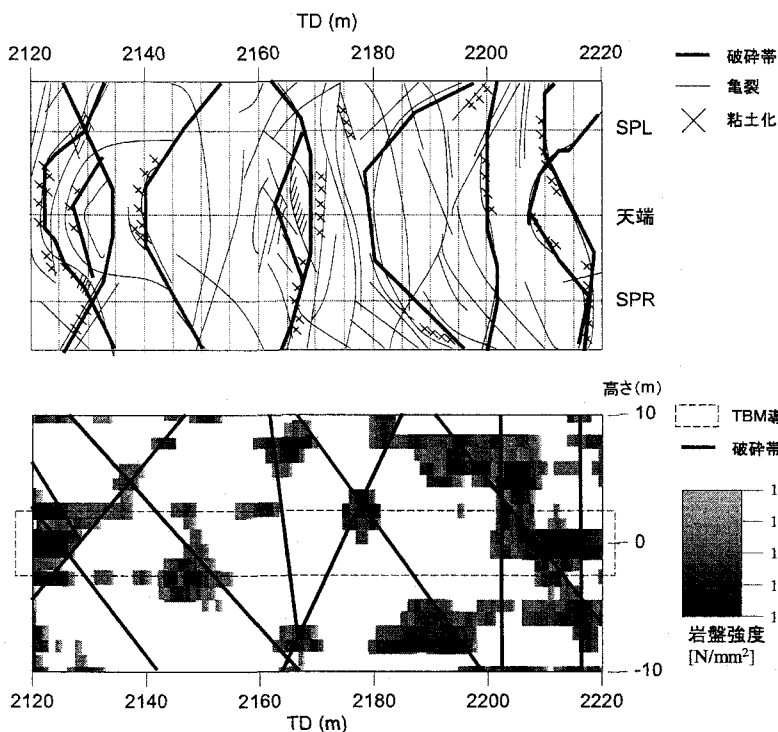


図-10 TBM 坑壁地質展開図 (上) と岩盤強度分布推定縦断面図 (下) の比較

5. まとめ

本論文では、3次元反射法弾性波探査により得られる反射強度とTBM機械データから算出される岩盤強度の関係を分析し、その結果、前者を後者に変換する手法を提案した。また、地球統計手法を取り入れることにより、切羽前方及び周辺の地質状態を3次元的に精度よく推

定することができた。したがって、今後は本手法を用いることにより、TBM 導坑掘削から大断面への拡張掘削まで、支保パターンの選定を体系的に行うことができると考えている。

参考文献

- 1) Yamamoto, T., Shirasagi, S., Aoki, K., Descour, J. M., 2003, Explore the geological conditions around the tunnel face using the seismic reflective survey, ISRM 2003-Technology roadmap for rock mechanics, Vol. 2, pp. 1351-1354.
- 2) Shirasagi, S., Yamamoto, T., Inou, M., Yamamoto, S., Mito, Y., Aoki, K., 2001, Development of intelligent TBM Excavation Control System, Proceedings of the ISRM regional symposium EUROCK 2001, pp. 615-620.
- 3) 福井勝則、大久保誠介、本間直樹：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