

TBM工法における 統合地質評価システムの開発と適用

白鷺 卓^{1*}・山本 拓治¹・村山 稔²・福家 佳則³・宮嶋 保幸³・青木 謙治⁴

¹鹿島建設株式会社 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1)

²京都府道路公社 建設事務所 (〒626-0003 宮津市字漁師1775番地の26)

³宮津第12トンネルJV工事事務所 (〒629-2262 京都府与謝郡与謝野町字野田2520-1)

⁴京都大学大学院 工学研究科 (〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂Cクラスター)

*E-mail: shirasag@kajima.com

筆者らは、TBM周辺の地質状況を精度良く把握することを目的として、削孔検層やTBM機械データを一括して取り扱えるTBM統合地質評価システムを開発し、宮津第12トンネル工事の避難坑掘削工事に適用した。地球統計学及び多変量解析を導入した本システムでは、切羽の予測地質評価点、切羽前方の物性値分布、崩落などの地質トラブルの発生リスクをリアルタイムに可視化することができる。このシステムを実現場に適用した結果、常に最新のデータに基づいて統合された地質情報から地質不良部を精度よく把握でき、かつ崩落の発生確率を把握することが可能となったため、安全で合理的なTBM施工を実現することができた。本論文では開発したシステムの概要と適用事例およびシステムの有効性を検証した結果を示す。

Key Words : TBM, drill logging, TBM driving data, multivariate analysis, Geostatistical simulation, Kriging, Sequential Indicator Simulation

1. はじめに

TBM工法は高速掘進を期待して採用されるが、崩落などの地質トラブルが発生すると工程に支障を来し、結果として高速掘進性能を発揮することができない場合がある。特に日本のような複雑な地質条件においては施工中に詳細な地質情報を把握して迅速に対応することが地質トラブルを回避するためには不可欠である。

そのため、筆者らはこれまでに削孔検層¹⁾を利用したTBM前方探査やTBM機械データ、ベルトスケール、ずり形状監視システムを組み合わせたインテリジェントなTBM掘削管理システム²⁾を開発し、切羽前方及び掘削箇所地質状況を予測する技術として実用化してきた。

しかし、これらの手法はそれぞれが独立した評価手法であったため、個々のデータを統合して施工へ反映させるには専門的な知識、経験が必要であると同時に分析時間も多くかかった。そこで、筆者らは様々なデータを統合して評価することでより精度の高い地質評価を行うシステムの開発を目的として、削孔検層からの破壊エネルギー係数とTBM機械データ及び地質観察による地質評価点を多変量解析し、求めた回帰式から地質評価点を予測する方法³⁾や破壊エネルギー係数とTBM機械データを

利用して地球統計学の1つの手法であるKriging及びSequential Indicator Simulationを実施することで、切羽前方から既掘削区間の物性値の分布図や強度脆弱部が出現する確率分布図を出力する方法⁴⁾を開発した。

本論文は現場にて多変量解析及び地球統計学手法による統合地質評価をリアルタイムに行うことができる「統合地質評価システム」を開発し、宮津第12トンネルの避難坑のTBM工事に適用した結果、従来のシステムより的確に地質状況を予測できることを確認した成果を報告するものである。また、支保パターンの選定や地質不良部における対応において確率的なリスク管理を行いながら安全かつ合理的な施工することができたので報告する。

2. 宮津第12トンネルの概要

(1) 工事概要

当工事は延長3,660mの本坑と併行する延長3,692mの避難坑を掘削するもので、本研究の対象はTBMで掘削された延長3,457mの避難坑である。使用したTBMは、直径5.0mの改良オープン型TBMで、本体には削孔検層及び地質不良部における補助工法に使用する削岩機を搭載した。

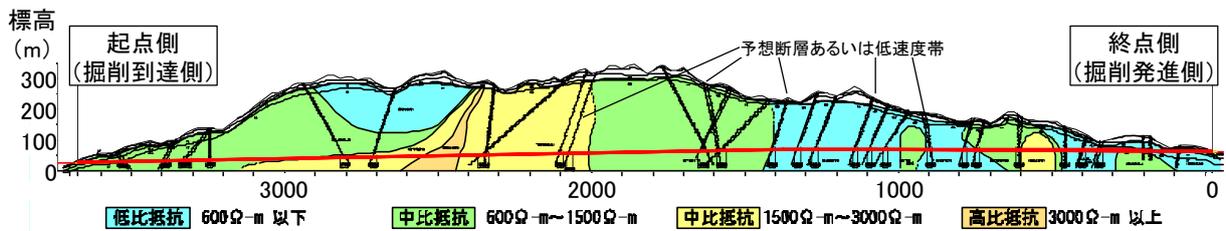


図-1 高密度比抵抗探査結果の縦断面図

(2) 地形・地質概要

地質は西南日本内帯の山陰部に属し、基盤岩として中生代白亜紀の花崗岩類が分布するが、貫入時期の違ういくつかの花崗岩体が組み合わさっているため、通常の花崗岩地山に比べ地質の変化が大きく複雑な性状を示す。最大土被りは約280mである。

(3) 事前調査結果及び設計支保パターン

事前調査では本坑の路線において弾性波探査、ボーリング調査及び高密度比抵抗探査が実施された。地山平均弾性波速度は4.0～5.0km/sであり、30箇所での低速度帯とボーリング調査による7箇所での断層が確認されていた。岩級区分は弾性波探査と比抵抗探査の結果からB～D級となっていた。図-1に高密度比抵抗探査結果の縦断面図を示す。

表-1に各支保パターンの構成、図-2に設計及び実施支保パターンの比率を示す。実際の地山状況は設計に比べて1～2ランク悪かった。また、支保パターンは、数m～数十m毎に変化する非常に複雑な地質状況であった。

3. 統合地質評価システムの概要

統合地質評価システムとはTBM機械データ、削孔検

表-1 支保パターン構成

支保パターン	地質評価点の目安	掘進長 (m)	ファイバ入りモルタル吹付け		鋼製支保工 (サイズ、建込間隔)
			範囲 (°)	厚さ (cm)	
B-T	65～100	1.5	なし	なし	なし
CI-T	55～70	1.5	120	2	なし
CII-T	35～60	1.5	180	2	H-100, 1.5m
DI-T	0～40	1.0	180	3	H-100, 1.0m
鋼製ライナ	0～40	1.0	金網 360°		C-100, 1.0m

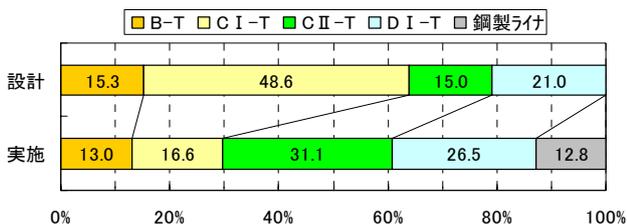


図-2 設計及び実施支保パターンの比率の比較

層結果、坑壁地質評価点等のデータを多変量解析や地球統計学を利用して統合的に扱うことで、切羽前方の地質状態をリアルタイムに可視化し、施工にフィードバックする情報化施工システムである。

(1) TBM工法における統合地質評価システムの特徴

図-3に従来の地質評価手法のフロー、図-4に統合地質評価システムのフローを示す。図-3に示すように、従来は施工の流れに沿って削孔検層、TBM機械データ、坑壁地質評価点の順でデータを取得し、それぞれ独立して地質状況の評価してきた。

一方、図-4に示すように、統合地質評価システムはある程度データが蓄積された時点で（本現場では700m掘削時点）、削孔検層、TBM機械データを説明変数、坑壁地質評価点を目的変数として多変量解析を実施することにより、切羽の地質評価点を予測する回帰式を導出し、その後は削孔検層及びTBM機械データから自動的に切羽の予測地質評価点をリアルタイムに算出することができることを特徴としている。

また、削孔検層から得られた破壊エネルギー係数と多変量解析により予測した地質評価点を地球統計学により処理することで、切羽前方の破壊エネルギー係数マップ及び切羽前方の崩落箇所発生確率マップを作成することができる。特に後者は崩落等の発生リスクを確率として把握することができ、施工時のリスク管理に大きく貢献することができる。さらに、これらのマップはTBM掘進に伴ってリアルタイムに更新されるため、地質予測の精度の信頼性が高くなることが期待できる。

(2) 統合地質評価システムの構成要素概説

a) 掘削時に取得される各種基本データ

破壊エネルギー係数は、TBM本体に搭載した削岩機によって前方40m程度まで削孔し、その削孔データを用いて破壊エネルギー係数を算出する削孔検層システムにより取得されるデータである。破壊エネルギー係数は単位体積の岩を破壊するために必要なエネルギーとして定義され、岩が硬いと値が高くなる。

TBM機械データは、TBM掘削管理システムに収録される貫入量、トルク、回転数、掘進速度、推力、ずり重量などで、リアルタイムにモニタリングすることにより

TBMオペレータを援助するデータである。

地質評価点は、TBMのテールから現れる地質を観察し、岩石強度、風化変質、割目間隔、割目状態、湧水、水による劣化の6項目に対して4~6段階で採点、算出される値である。支保パターンの選定は、地質評価点と坑壁の崩落規模や頻度などによって総合的に決定した。

b) 多変量解析による予測地質評価点回帰式の設定

当初は他現場で得られた回帰式を利用して運用を開始し、その後、十分なデータが蓄積された700m掘削完了後及び比較的地山状況が硬質に変化し始めた2,000m掘削完了後に回帰式を見直した。掘削初期のデータから求め

た回帰式では、予測地質評価点に対してカット回転数及び推力の正の相関性が高かった。これは、変質を受けて粘土化した区間が漸続的に出現したため、地質評価点が低くなるような脆弱な箇所では回転数を上げられない状況であるとともに、推力を与えてもすぐに推力が低下するような状況であったことを反映したものと考えられる。

一方、2,000m以降の回帰式では、予測地質評価点に対してずり重量の負の相関性が高かった。これは、この区間の比較的硬質な区間の地質評価点は亀裂の密集の度合いに依存する傾向があることから、亀裂密集部での小規模な切羽の抜落ちを示す、一時的なずりの取込み過多を

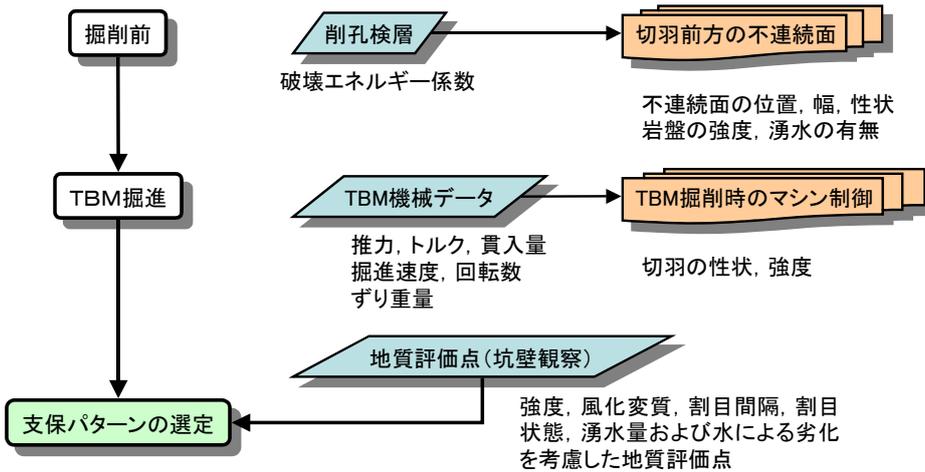


図-3 従来の地質評価手法のフロー

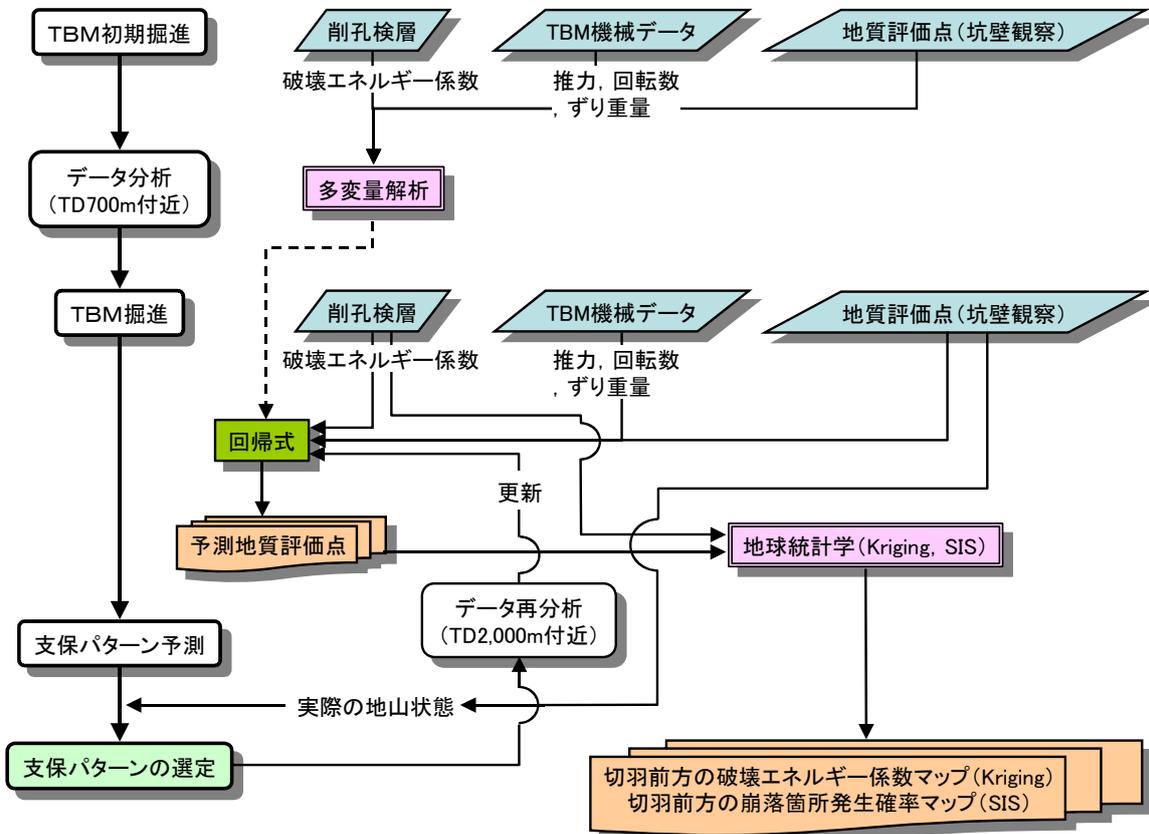


図-4 統合地質評価システムのフロー

反映したものと考えられる。以上のように、多変量解析を用いた回帰式は地質状況の変化を反映して適切な時期に見直すことが重要であると思われる。2,000m以降に適用した回帰式を式(1)に示す。

$$S = 3.3R + 0.0034T_h - 0.36M + 35 \quad (1)$$

ここで、 S =予測地質評価点

R =カッタ回転数(回転数/min)

T_h =推力(kN)

M =ずり重量(t/h)

c) 地球統計学による切羽前方の地質状態予測

地球統計学の主たる目的は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であり、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切羽前方予測にはKrigingによる岩盤物性分布図とSequential Indicator Simulation (SIS)による岩盤物性出現確率分布図があり、手順は以下の通りである。

- i) 評価対象である物理量の空間的な特性(空間構造)を観測値の平均値や分散、空間的なばらつきを表す共分散から推定し、確率場としてモデル化する
- ii) モデル化した空間構造を用いて、観測値から観測値のない地点の値を線形和として推定する(Kriging)
- iii) 観測値のない地点の推定値を順次観測値(既知データ)として取扱いながら空間全体の推定マップを作成する
- iv) この時に推定箇所の順番を乱数によって変えることで多数の推定マップを作成し、各地点における推定

値の出現確率を評価、出力する(SIS)

(3) 本システムの地質評価画面の概説

図-5に地質評価画面の一例を示す。画面構成は左側に現在切羽位置やストロークナンバーなどの基本的な数値を表示し、右側に統合地質評価の結果を表示する。これらの表示は1ストローク掘削毎(1.0~1.5m毎)に1クリックで解析・更新できる。これにより、様々なデータと分析手法を駆使した地質評価を現場で簡単に実施できるため、迅速な情報化施工を実現することができる。

a) Krigingによる破壊エネルギー係数マップ(①)

削孔検層とTBM掘削のデータからKrigingを利用して、前方及び周辺の地質状況として破壊エネルギー係数をマッピングする。

b) SISによる崩落箇所発生確率マップ(②)

特に地質の悪い部分を特定し、崩落がどの程度の確率で発生するかを予測する。本現場では破壊エネルギー係数が150 J/cm³以下になる確率をSISによりマッピングした。

c) 多変量解析による切羽地質評価点グラフ(③)

回帰式(1)にしたがって、削孔検層及びTBM機械データを代入することで求めた評価点をグラフ化する。

d) 支保パターンの表示(④)

「設計支保パターン」、「c)で算出された予測地質評価点に基づく予測支保パターン」、「実際に採用された支保パターン」を表示させることができる。

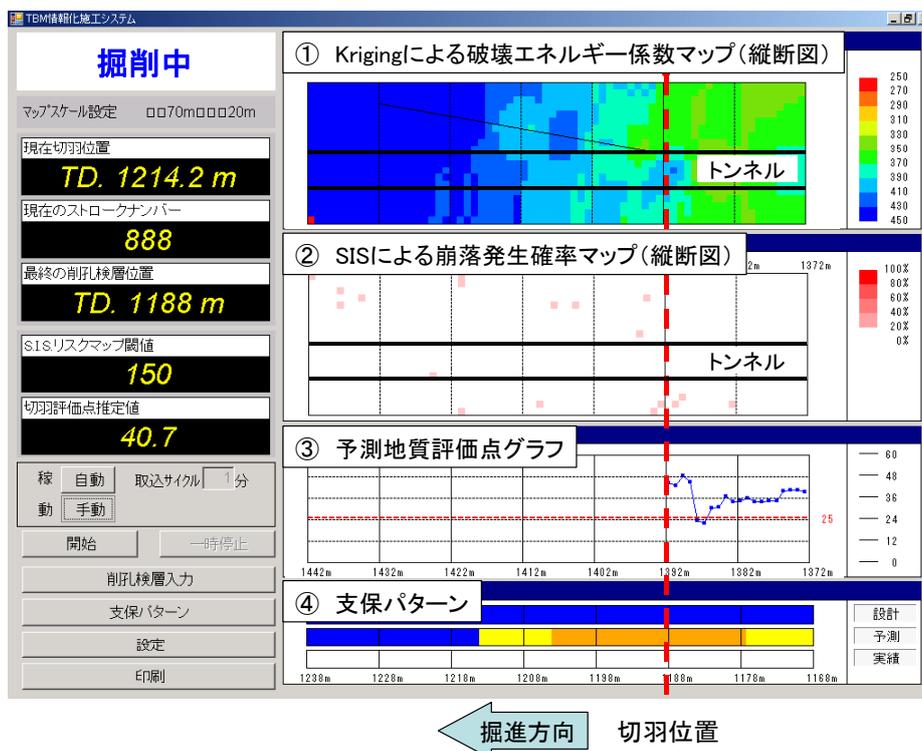


図-5 地質評価画面

4. 実施への適用結果

図-6は適用結果の一例であり、当該区間までの地質は亀裂の発達によって抜落ちが発生したり、部分的に風化・変質したりした箇所があるものの比較的安定した掘

削ができる地質が続いていたが、本区間ではTD3,360m付近に出現した土砂化あるいは粘土化した断層区間を本システムにより事前に把握し、鋼製ライナーへの変更を迅速に決断したことによって、坑壁の崩落を拡大することなく、掘削を完了できたので、以下に詳細を示す。

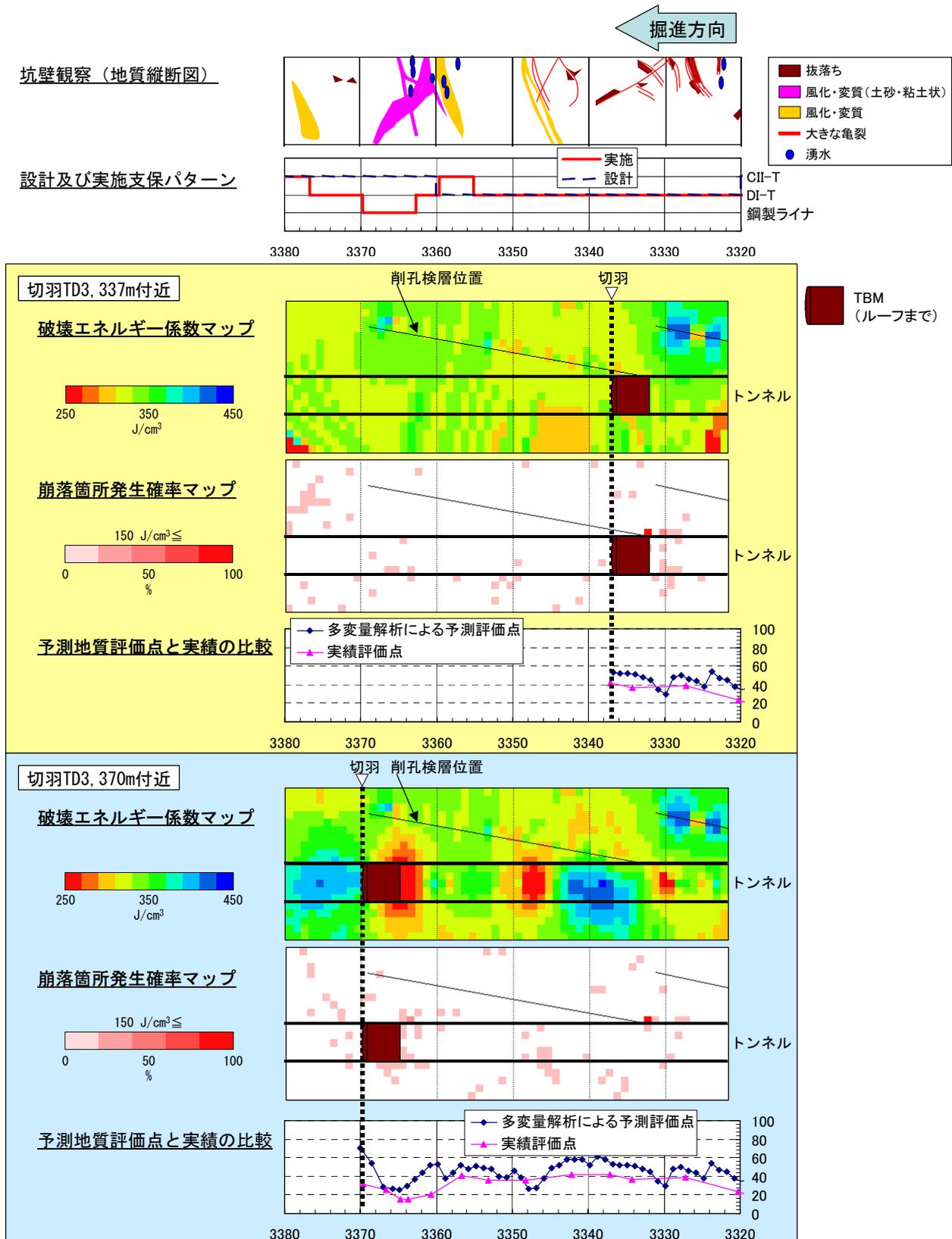


図-6 TD3,320~3,380mにおける統合地質評価システム適用結果

図-6はTD3,320mからTD3,380mにおける統合地質評価システムの適用結果である。上から順に坑壁観察による地質縦断図、設計及び実施支保パターンの比較グラフを示す。その下に、切羽がTD3,337m付近にあるときに本システムから出力された破壊エネルギー係数マップ、崩落箇所発生確率マップ及び予測地質評価点と実績地質評価点の比較グラフを初期値として示し、さらに切羽がTD3,370mにあるときの同様の図を最終値として示した。

これを見ると、TBM掘削が進行するにつれてTD3,348m付近の風化・変質層やTD3,365m付近で発生した大規模な土砂状の抜落ちに対応する位置で低い破壊エネルギー係数が分布し、高い崩落発生確率及び低い予測地質評価点を呈していることが分かる。特に崩落箇所発生確率マップではTD3,363m付近から崩落発生確率の高い箇所が密集し始めていることから、支保パターンを鋼製ライナーに変更することができ、崩落に対するリスク管理、例えば支保の変更や補助工法の検討に大きく貢献できた。

また、多変量解析から得られた予測地質評価点は観察により得られた実績地質評価点と比較するとばらつきが大きいが大局的には一致しており、目視できない切羽の地質評価点を事前に予測することができたため、TBMのループ通過前に支保パターンの決定を行うことが可能となった。

5. まとめ

本論文ではまず、TBM機械データ、削孔検層、坑壁地質評価点を利用して、多変量解析や地球統計学を導入することにより、切羽前方の地質状態をリアルタイムに可視化し、施工にフィードバックする統合地質評価システムの概要について述べ、次に、本システムを宮津第12トンネルで掘削中のTBMに搭載し、実施工に適用した結果の考察を行った。その結果、目視できない切羽の地

質評価点を事前に精度良く予測できること、切羽前方の地質状態を岩盤物性値のマップとして精度よく予測できること、また、崩落が発生する箇所を発生確率マップとして予測できることがわかり、本システムがTBM工法の安全かつ合理的な施工の実現に大きく寄与する統合的な地質評価システムであることを実証した。さらに、実際の地山に対して実施支保パターンが過大でも過小でもなく適正であったことを施工後に検証するための重要な資料にもなると考えている。

今後はデータを詳細に再分析することにより、本システムのさらなる高度化を目指すとともに、地球統計学を本坑へ拡張適用することによって、避難坑を利用した本坑トンネルの地質評価手法としても確立していく予定である。

参考文献

- 1) 青木謙治, 稲葉武史, 塩釜幸弘, 手塚康成: 油圧ドリルによる削孔データを用いた岩盤評価及び切羽前方の予測技術について, 土木学会第8回岩の力学シンポジウム, pp.67-72, 1990.
- 2) 白鷺卓, 山本拓治, 稲生道祐, 西岡和則: 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.
- 3) 山本拓治, 白鷺卓, 水戸義忠, 山本真哉, 青木謙治: TBM掘削データを用いた支保の合理的選定方式について, 第11回岩の力学国内シンポジウム, F22, 2002.
- 4) Mito, Y., Yamamoto, T., Shirasagi, S., Aoki, K. 2003. Prediction of the geological condition ahead of the tunnel face in TBM tunnels by geostatistical simulation technique. *ISRM 2003-Technology roadmap for rock mechanics, Proc. Intern. Symp., Johannesburg, 8-12 September 2003*, pp.833-836. South African Institute of Mining and Metallurgy.

DEVELOPMENT AND APPLICATION OF GEOSTATISTICAL EVALUATION SYSTEM FOR TBM EXCAVATION

Suguru SHIRASAGI, Takuji YAMAMOTO, Minoru MURAYAMA, Yoshinori FUKU,
Yasuyuki MIYAJIMA and Kenji AOKI

The TBM Excavation Control System developed by authors has already been put to practical use, which can monitor the drill energy coefficient calculated from the drill logging data as an index of rock properties and the TBM driving data during the excavation. In this paper, a new evaluation system is developed to realize the automatic, real-time prediction of the rock properties ahead of the tunnel face with good precision by processing the drill energy coefficient, the TBM driving data and the rock grade evaluation data with the geostatistical method. This system is put into practical use and validated in the ongoing construction site.