

地球統計手法を用いたトンネル切羽前方地質の 統合的予測システム

白鷺 卓¹・山本 拓治¹・水戸 義忠²・Mohd ASHRAF³

¹正会員 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)

E-mail:shirasag@kajima.com

²正会員 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)

E-mail: mito@kumst.kyoto-u.ac.jp

³School of Civil Engineering, Universiti Sains Malaysia

山岳トンネル工事を安全かつ効率的に進めるためには、プロジェクトの各段階で得られるさまざまなデータを有効に活用して切羽前方の地質性状を高精度に予測し、当初の掘削計画や事前設計を合理的に適宜更新する、いわゆる情報化設計施工が必要不可欠である。施工中のパターン変更についてはこれまで、熟練技術者の知識や経験にもとづいた判断に頼ることが多かったが、少子高齢化による作業員不足や社会資本整備に対するコストダウンを要求する世論に対して、山岳トンネル工事をさらに合理化する必要がある。そこで筆者らは、これまでに構築してきた様々なトンネル切羽前方地質の予測手法を、施工段階での目的に応じて最適化し、統合させたシステムにした。本論文はそのシステムの概要と実際の現場における適用を通してその有用性を検証した結果を示したものである。

Key Words : tunnelling, site characterization, geostatistics, observational design and construction

1. はじめに

山岳トンネル工事を安全かつ効率的に進めるには、プロジェクトの各段階で得られるさまざまなデータを有効に活用して切羽前方の地質性状を高精度に予測し、当初の掘削計画や事前設計を合理的に適宜更新する、いわゆる情報化設計施工が必要不可欠である。施工中の切羽前方地質は反射法弾性波探査、削孔検層および切羽観察などから得られる情報に事前の調査結果を合わせて予測され、さまざまな目的のために活用されるが、施工段階に応じて目的や要求精度は変化することから、予測手法を施工の各段階で最適化することが重要である。

そこで本研究では、予測手法を長区間（トンネル全線）、中区間（切羽～30m前方）および短区間（切羽～5m前方）に分類し、それぞれの区間で要求される目的に最適な予測手法をサブシステムとして構築した。各サブシステムに地球統計手法を導入しており、地質状態の空間分布を予測するだけでなく、その予測精度（誤差）を把握することも可能となり、地質リスクマネジメントの観点から、より合理的な意思決定を行うことができるようになる。以下では、構築した各サブシステムを実際の現場で得られたデータを利用してその適用性を実証す

ることができたので報告する。

2. トンネル切羽前方探査技術に関する従来の研究と本研究の目的

山岳トンネル工事は一般に、事前に実施される弾性波探査や電気探査といった物理探査およびコアボーリングにより地質状態を評価したうえで発注される。施工中の切羽前方探査は、この情報をもとに通常前方100m程度を対象とした広域探査手法から、施工の進捗に応じて徐々に精度の高い探査手法を実施していくことから、その順番に則って従来研究を整理していく。

まず最初に実施される坑内反射法弾性波探査法にはTSP法¹⁾、HSP法²⁾、SSRT法³⁾およびTRT法⁴⁾がこれまでに提案されており、多くの研究成果がある。これらの技術は発振方法、受振センサー、発受振点配置、解析結果のイメージングなどに違いがあるものの、原理に本質的な違いはない。いずれもトンネル坑内の複数点で起震し、周辺地山からの反射波を坑内の受振器でとらえて、切羽前方100m程度の地質構造を面的に予測する方法である。次に行われる、切羽前方数10mを対象としたボーリン

グを利用する方法のうち削孔検層システム⁹⁾は、油圧式パーカッションドリルによって削孔を行う際に得られる削孔データを利用し、簡便かつ迅速に地山状況の把握を行うことができるシステムで、排出ズリおよび削孔水の状況等から岩質変化を判定するための経験と熟練が不要となる破壊エネルギー係数を提案した画期的な技術である。ただし、削孔線上のデータであるため、広域の地質構造の把握には限界がある。

切羽地質観察⁹⁾は古くから実施されており、現在ではトンネル掘削中の最も一般的な施工管理方法となっている。岩石の硬軟、風化・変質、割れ目間隔・状態、湧水量、水による劣化状態などの観点から切羽の地質を採点し、その評点を地山等級の判定や支保パターンの決定等に活用するもので、真下ら⁷⁾により設計と実績の比較等の研究がされているが、切羽評価だけにとどまり、前方地質予測という観点からは前方1m以内に限られる。

ここまで、切羽前方100m程度の面的データであるが精度がボーリングに比べてそれほど高くない坑内反射法弾性波探査結果、精度は比較的高いが削孔線上の切羽前方数10mに限られる破壊エネルギー係数、正確だが切羽前方1m以内の地質データである切羽評価点による地質予測手法を述べた。これらは施工の各段階においてそれぞれ独立的に適用され、3つの地質データが揃っても体系的に地質予測に活用される例は少なかった。

そこで、Yamamoto et al.⁹⁾は削孔検層により得られる破壊エネルギー係数、TBM掘進中に得られる各種機械データおよび坑壁観察から得られる地質評価点に対し、地球統計学的手法を導入することで地質予測を行う手法を開発した。Mito et al.⁹⁾はさらに、地球統計学的シミュレーションを適用することで、切羽前方地質状態の確率分布を考え、対象とする物理量の不確定性について評価する方法を示した。山本ら¹⁰⁾は続いて、坑内反射法弾性波探査から得られる反射強度の3次元分布とTBM機械データから算出される岩盤強度に対して地球統計手法を適用することで、3次元地質モデルを作成し、これが実際の地質状態で確認された異方性、類似性、連続性に整合することを示した。最近では、筆者ら¹¹⁾がTBM工法において多変量解析および地球統計手法を導入し、ある程度データが蓄積された時点で削孔検層からの破壊エネルギー係数、TBM機械データおよび坑壁地質評価点を利用して、切羽前方数10mの物性値および崩落発生確率マップをリアルタイムに作成する統合地質評価システムを開発している。

以上、個々の前方探査技術およびそれらを体系的に評価する研究についてまとめたが、いずれも切羽前方100m程度までの地質予測に限られている。したがって、施工段階に応じて変化する目的や要求精度に対応しきれず、山岳トンネル工事の情報化設計施工に求めら

れるそれ以上遠方あるいはトンネル全線の工程管理の精度向上や切羽近傍の高精度地質予測といった、掘削の進行段階によって異なる必要な情報を提供するシステムにはなっていない。

そこで本研究では、地質予測手法を長区間、中区間および短区間に分類し、それぞれの区間で要求される目的に最適な予測手法をサブシステムとして組み込んだ、あらゆる山岳トンネル(NATM, TBM工法)に適用可能となる統合的予測システムを構築することとした。

3. 観察・計測データの概要

(1) 山岳トンネル工事における情報化設計施工

情報化設計施工を行うためには、目的を明確にし、それに見合った適切な観察・計測を行い、その結果を適切に分析評価して設計・施工に反映する必要がある¹²⁾が、山岳トンネル掘削においては、掘削の進行段階によって情報化設計施工における目的が異なる。

掘削初期段階においては、既存資料調査やボーリング調査、物理探査といった事前調査による情報から構築されたプロジェクト管理のフレームワークに対して、既掘削部の現場データを反映させることによってフレームワークの確認・修正を行い、工程管理や品質管理の精度を向上させることが目的となる。

また、掘削サイクルにおいては、ボーリング調査や物理探査、切羽観察などの調査をもとに、計画段階では予測し得ない切羽前方100m程度の断層破碎帯などの脆弱な地層の存在を事前に把握し、補助工法の必要性判定などの安全管理・品質管理の精度を向上させること、あるいは切羽前方数mまでの地質状況を把握し、切羽の安全性判断や対策工法の選定、支保の決定といった最終的な安全管理・品質管理・工程管理の精度を向上させることが目的となる¹³⁾。

以上のことから、山岳トンネル掘削においては各掘削段階での目的に応じた、観察・計測結果の分析評価手法が必要となる。これに関しては次章で述べることで、次節では、実際の現場において観察・計測されるデータのうち、本研究で利用したものについて簡単に説明する。

(2) 現場観察・計測データ

a) 物理探査データ(事前調査データ)

事前に実施される物理探査として弾性波探査および電気探査が通常よく適用される。前者は地山のP波速度を測定するもので、設計支保パターンを決定する要素のひとつである。一方後者は、地山の電気比抵抗を測定するもので、設計支保パターンを決定する要素ではないが、地山の地下水分布や断層破碎帯などの粘土に対して感度

が高いことから、最近よく適用されるようになった。

b) 削孔検層データ (施工中データ)

筆者らが開発し、山岳トンネル施工で用いられている削孔検層システムでは、削孔時に連続的に得られるデータから、油圧ドリルによる打撃が単位体積あたりの岩盤を破壊するのに要したエネルギー E_v (破壊エネルギー係数 (J/cm³)) を次式で定義する。

$$E_v = (E \cdot N / v \cdot A) \times \alpha \quad (1)$$

ここで、 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 (cm²), α : フィード (押付け圧) による補正係数である。

c) TBM機械データ (施工中データ)

TBM掘進に伴って得られる機械データには推力、トルク、貫入量、カッター回転数、掘進速度等がある。Kleinら¹⁴⁾は、これらのデータのうち、TBMの掘削抵抗を示す貫入量と推力からfield penetration index (FPI) という指標値を算出することにより、切羽周辺の岩盤の力学的特性を評価する方法について提案している。FPIは次式によって定義され、本研究でも使用した。

$$FPI = F / P_e \quad (2)$$

ここで、 F : 推力 (N), P_e : 貫入量 (mm/面盤1回転) である。

d) 切羽・坑壁観察データ (施工中データ)

トンネル切羽の観察結果から算出される指標値として切羽評価点がある。これは岩の圧縮強度、割れ目間隔、割れ目状態などの項目に評価区分を設け、各項目から算出された評点の総和を切羽の部位ごとに算出し、加重平均して総合的な岩盤の評価を行う。算出された切羽評価点はトンネルの支保パターンの選定基準となる。TBMにおいては切羽での観察が不可能なことから、TBMで1ストローク掘削後に切羽観察と同じ要領で坑道壁面を観察し、地質評価点を求めるが、支保パターンを選定するための総合的な岩盤評価という点では違いはない。

4. 切羽前方地質予測手法の構築

(1) 地球統計手法

本研究においては、限られた個所でのみ取得できるデータをもとに対象領域の物性値を推定するために地球統計手法を用いた。

a) 空間構造のモデル化

地球統計手法では、空間構造を記述するにあたっては2点間の相関の様相を表す関数であるバリオグラムを用いる。バリオグラムの推定量 $\gamma(h)$ は次式で求められる。

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i + h) - Z(x_i)]^2 \quad (3)$$

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。このバリオグラム推定値に対して、次式に示す球体モデルを用いてフィッティングする。

$$\gamma(h) = \begin{cases} c \left[\frac{3}{2} \cdot \frac{h}{a} - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] & h \leq a \\ c & h > a \end{cases} \quad (4)$$

ここで、 a はレンジ、 c はシルを表しており、モデルのフィッティングにより算出されるパラメータである。

b) 空間分布の推定

地球統計手法では、空間分布の推定にあたって線形回帰による推定方法であるクリギングを用いる。任意の位置 x_0 における推定値 $Z^*(x_0)$ は次式で表される。

$$Z^*(x_0) - \mu(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i [Z(x_i) - \mu(x_i)] \quad (5)$$

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。重み係数 $(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$ を求めるにあたっては、本研究では次式の通常型クリギングを用いる。

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma(|x_j - x_i|) + \eta = \gamma(|x_j - x_0|) & j = 1, 2, \dots, n \\ \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \end{cases} \quad (6)$$

c) 不確定性の評価

不確定性の評価にあたっては、逐次インディケーターシミュレーション (sequential indicator simulation: SIS)¹⁵⁾を用いた。この手法では、あらかじめ複数のしきい値 z_l (四分位数などによる) を設定する。そして、乱数によって推定地点を決定し (図-1 (a)), 既存のデータに関してインディケーター値 $i(x, z_l)$ を割り当てる (図-1 (b))。インディケーター値は、以下の式で表される。

$$i(x; z_l) = \begin{cases} 1 & \text{if } z(x) < z_l \\ 0 & \text{if not} \end{cases} \quad (7)$$

このしきい値に関してバリオグラムを作成する。

$$\gamma_l(h) = \frac{1}{2} E \left\{ [I(x; z_l) - I(x+h; z_l)]^2 \right\} \quad (8)$$

次に、得られたバリオグラムをもとにして、式 (6) から重み係数を算出し、推定地点において推定値がしきい値以下となる確率を求める。

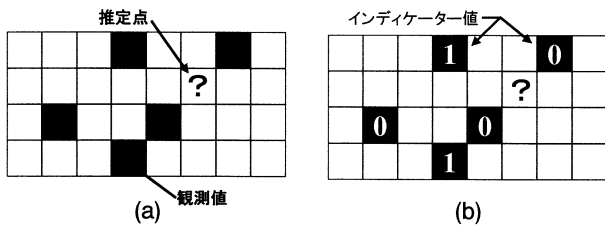


図-1 SISの推定手順

$$p_{z_i}^*(x) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(x) \cdot I(x_i; z_i) + \left[1 - \sum_{i=1}^n \lambda_i(x) \right] \cdot m_{z_i} \quad (9)$$

設定された各しきい値についての確率を求め、しきい値ごとの下側確率をもとに累積分布関数を描く。そして、0～1までの乱数を選択し、分布関数をもとにこの場所での推定値を得る。得られた推定値は既知データとして扱い、次の推定点を乱数で選択し、推定を繰り返す。すべての地点での推定値が求められたところで推定を終了する。このような手順を異なる乱数列を用いて繰り返すと、複数の結果（実現値マップ）を得ることになる。ここで、一定のしきい値 z_c を設定し、推定点ごとに次式を用いてその下側確率 $p(z_c)$ を求める。

$$p(z_c) = \frac{N_R(x|Z(x) < z_c)}{N_R(x)} \quad (10)$$

ここで、 $N_R(x|Z(x) < z_c)$ は条件 $Z(x) < z_c$ を満たす点 x の実現値の個数を表す。この確率により不確定性の評価が可能になる。

ところで、SISによる地球統計シミュレーションでは、場所によって平均値および分散が異なるようなデータ（非定常データ）を扱うことはできない。そこで、あらかじめ非定常データのトレンド成分を標準化によって除去してSISを実施し、シミュレーション結果に除去したトレンド成分を戻すというユニバーサルクリギング¹⁰⁾ の考え方を今回導入した。標準化の方法は次節で述べる。

(2) 地質特性の評価に用いる指標値

切羽前方の地質性状を予測するにあたり、各現場データを利用して、地質物性の定量的な評価が可能な指標値としてRSI（Rock Strength Index）を提案する。RSIは一軸圧縮強度に相当する値とし、 N/mm^2 という単位を持つ。

まず、TBM機械データからRSIを算出する方法について説明する。式(2)で示されるように、TBM機械データからFPIという岩盤の力学的特性を表す値を算出することができる。FPIは1つの現場においては力学的特性の定量的な評価が可能であるが、岩盤の性状やTBMの寸法・機種にも影響されるため、様々な現場での共通な指標値として用いることができない。そこで、施工現場ごとに行われるシュミットロックハンマー試験でのハンマー

反発度から推定される一軸圧縮強度とRSIが一致するように次式

$$RSI = C_F \cdot FPI \quad (11)$$

における定数 C_F を決定することにより、TBM機械データからRSIを算出する。

次に、破壊エネルギー係数から力学的特性の定量的な評価が可能なRSIを算出する方法について説明する。RSIと破壊エネルギー係数はともに掘削抵抗を表す指標値であるため、地山の力学的特性に応じた値の変化の傾向は等しくなると考えられる。そこで、破壊エネルギー係数を標準化し、TBM掘削で得られたRSIの平均、分散を用いて、破壊エネルギー係数からRSIへの変換を行う。標準化は次の式で定義されている。

$$Z = (X - \mu) / \sigma \quad (12)$$

ここで、 Z ：標準化得点、 X ：標準化の対象、 μ ：母集団の算術平均、 σ ：母集団の標準偏差である。破壊エネルギー係数を標準化することで、平均0、分散1の標準化得点という無次元の値に変換される。この標準化得点をTBMによって得られたRSIの平均、分散を用いて標準化と逆の操作を行うことで、破壊エネルギー係数をRSIへ変換することができる。

(3) 切羽前方長区間予測手法

ここでは、本研究で構築した切羽前方の長区間における地質性状予測手法について述べる。本手法は、掘削初期段階において、既掘削部で得られたデータを事前調査データに反映させ、事前に構築されたプロジェクト管理のフレームワークの確認・修正を行い、工程管理・品質管理を向上させることを目的としている。

本研究では、事前調査データとして電気探査によって得られる比抵抗値データ、既掘削部で得られるデータとして切羽観察によって得られる切羽評価点を用い、前述のSISを用いて未掘削部の切羽評価点を予測した。図-2は、本坑既掘削部の切羽評価点と比抵抗値の関係性から本坑未掘削部の切羽評価点を予測するために、3回シミュレーションを行った場合の概念図を示す。予測の手順を以下に示す。

- ① 比抵抗値に対する階級を設定する。
- ② 既掘削部の切羽評価点を比抵抗値の階級別に集計し、比抵抗と切羽評価点の関係性を把握する（図-3）。
- ③ 式(12)を用いて階級ごとに切羽評価点を標準化し、各階級の切羽評価点を標準化得点に変換する。
- ④ 前述したSISを用いて、未掘削部の標準化得点をシミュレートする。この操作によって、一つの予測対象に対して、複数の幅を持ったRealization

(実現値)を得ることができる。

- ⑤ SISによって算出された標準化得点を、比抵抗値の階級ごとに切羽評価点へと変換する。この操作により、比抵抗値の階級ごとに特有な切羽評価点のトレンドとばらつきを再現することができる。
- ⑥ ⑤で得られた切羽評価点をもとに、工程管理に大きく影響する各支保パターンの延長を求める。切羽評価点と支保パターンの対応は、各トンネルで設定されている対応表に従う。

以上の手順により得られた予測支保パターン延長から、工期・工費の概算や安全対策の策定などが可能となる。

(4) 切羽前方中區間予測手法

ここでは、本研究で構築した切羽前方の中區間における地質性状予測手法について述べる。本手法は、事前調査の段階では予測し得ない地質状況の変化を掘削サイクルの中で事前に把握し、補助工法の必要性判定や支保パターンの仮選定など、安全管理・品質管理の高精度化を目指し、より合理的な情報化設計施工を可能にすることを目的としている。

本研究では、先行して避難坑が存在するトンネルを対象として、避難坑および本坑の坑壁・切羽評価点をもとに、地球統計手法を用いて切羽前方中區間の地質性状を

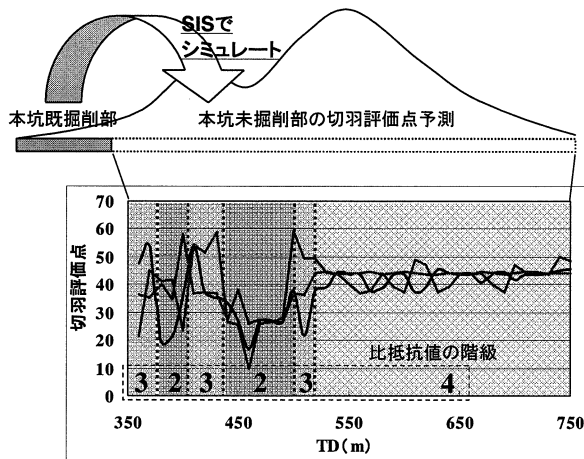


図-2 切羽前方長區間予測概念図

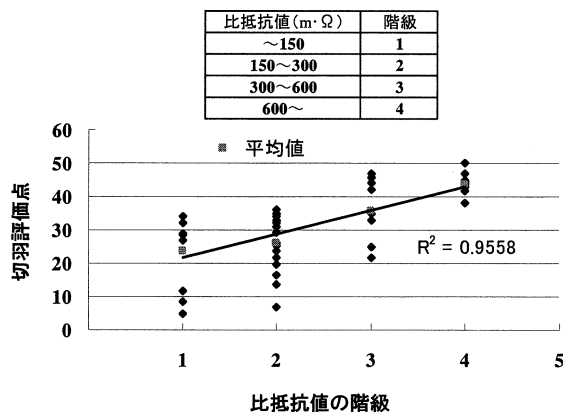


図-3 比抵抗値の階級と切羽評価点との関係例

予測する手法について検討を行った。図-4は、本坑および避難坑既掘削部の切羽評価点の空間分布特性から未掘削部の切羽評価点を予測する概念を示す。以下に手法の手順を示す。

- ① 避難坑の坑壁評価点と本坑の切羽評価点から、地球統計手法を用いて切羽前方の切羽評価点を予測する。
- ② ①で得られた切羽評価点の分布から切羽前方の地質性状を予測し、その状況に応じて事前地山補強や、事前支保設計を行う。
- ③ 掘削を行う。掘削後切羽を観察し、切羽評価点を算出する。
- ④ 算出された切羽評価点をもとに支保パターンを決定し、事前に予測した支保とずれがある場合には確認・修正を行いながら、適切な支保工を行う。

この①～④までの手順を繰り返しながら、本坑の掘削を進めて行く。地質構造を考慮しつつ掘削データを更新しながら予測を適時行うことで、事前の地質性状把握および支保パターンの選定が可能となる。

(5) 切羽前方短區間予測手法

ここでは、本研究で構築した切羽前方の短區間における地質性状予測手法について述べる。本手法は、切羽近傍の地質性状を事前に予測し、適切な安全対策、支保選定などを可能にすることを目的としている。

本研究では、既掘削部の地質データおよび未掘削部の削孔検層データを用いて、地球統計手法により切羽前方短區間および周辺における地山の力学的な物性値を推定し、切羽近傍の地質性状を予測した。図-5は、切羽前方の削孔検層データと既掘削部のTBMデータの空間分布特性から切羽近傍未掘削部の地質性状を予測する概念を

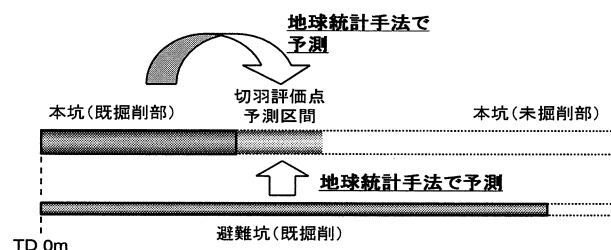


図-4 切羽前方中區間予測概念図

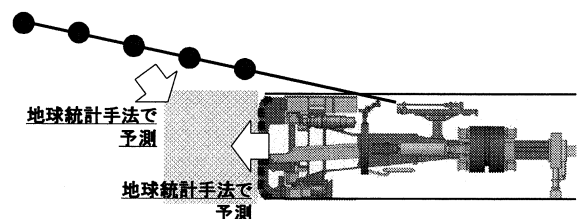


図-5 切羽前方短區間予測概念図

示す。山岳トンネル掘削におけるトラブルの主たるものである崩壊は、総じて切羽の周辺で起こっており⁹⁾、本手法はこうしたトラブルを未然に防ぎ、最終的な安全管理の精度向上を図るとともに、工程管理・品質管理の面においても高精度化を達成するものである。本手法は次に示すような5つの手順よりなる。

- ① 削孔検層の実施：水平長さ30m程度の削孔検層を実施する。得られた削孔検層データから破壊エネルギー係数を算出し、RSIに変換する。
- ② RSI分布の推定：その時点で得られている削孔検層データ（①）および地質データ（⑤）から算出されたRSIを領域変数とする地球統計解析を行い、対象領域のRSIの分布を推定する。推定には通常型クリギングおよびSISを利用する。
- ③ 切羽前方の地山評価と対策：②で得られたRSIの分布から切羽前方の地質性状を予測し、その状況に応じて、監視の強化・掘削機械の運転制御・事前対策を行う。
- ④ 支保選定：②で得られたRSIの分布から支保の対象となる個所の力学的特性を評価し、支保の選定を行う。
- ⑤ TBM掘進および支保工：③および④の結果をもとに掘進および支保工を実施する。このとき、地質データをもとにRSIを算出し、この結果を迅速に②に反映させる。

②から⑤の手順を繰り返しながら掘進し、削孔検層区間の先端の1切羽前に達したときに次の削孔検層（①）を実施して、再度②～⑤の手順を繰り返す。この手順をトンネルが貫通するまで繰り返す。これにより、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

ることが可能となり、各時点において最良の精度で推定および評価を行うことができる。

5. 予測手法の実用性の検証

本章では、前章までで構築した各予測手法を実際のトンネル現場に適用しシステムの有効性を検証した結果を示す。

(1) 検討対象サイトの概要

a) Aトンネル

本トンネルは延長約3.6km、断面積約80m²のNATMトンネル（本坑）で、断面積約20m²の避難坑がTBM工法で先行掘削されている。トンネル区間の基盤岩は粗粒黒雲母花崗岩、花崗閃緑岩であり、区間内には破碎帯や断層が存在する。図-6に事前地質調査の電気比抵抗分布縦断面図を示す。本トンネルを対象に、既掘削区間の長さを仮定して、その時点で持ち得るデータを用いて、切羽前方長・中・短区間予測手法（図-2、図-4、図-5）すべてを適用した。切羽前方中区間予測手法では、NATM本坑予測にTBM先行掘削時のデータも使用可能である。

b) Bトンネル

本トンネルは延長約4.2km、断面積約10m²のTBMトンネルで、地質は白亜系粘板岩である。図-7に事前地質調査の電気比抵抗分布縦断面図を示す。本トンネルを対象に、既掘削区間の長さを仮定して、その時点で持ち得るデータを用いて、切羽前方長区間予測手法（図-2）を適用したが、比抵抗値と切羽評価点の間に有意な関係性が認められなかったTD2000m以降のデータは除外した。

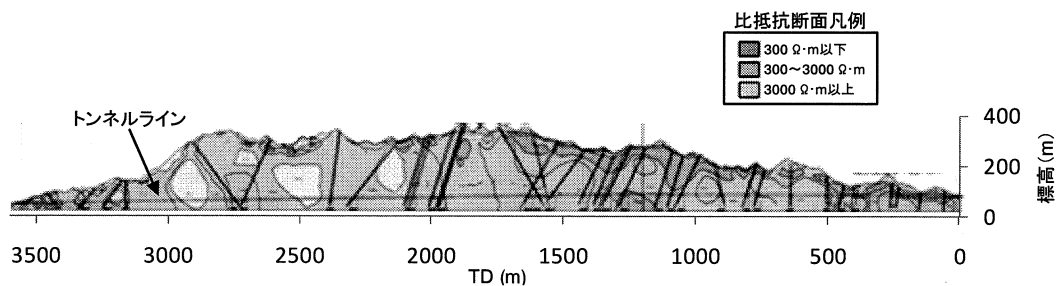


図-6 Aトンネルの電気比抵抗分布縦断面図

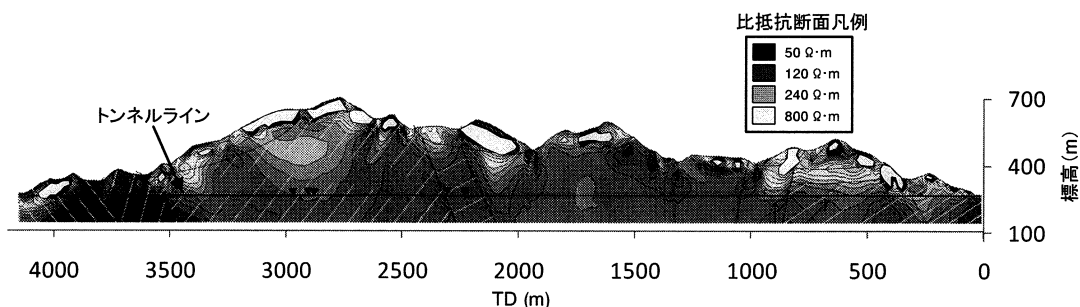


図-7 Bトンネルの電気比抵抗分布縦断面図

(2) 切羽前方長区間予測手法

ここでは、Aトンネル本坑およびBトンネルを対象として、4章(3)で述べた手法で求めた予測支保パターンを実際の実施支保パターンと比較することで予測手法の有用性の検証を行った。また、既掘削区間（Aトンネルは本坑のみ対象）の長さで予測精度の関係性についても評価するため、異なる既掘削区間長を用いて予測し、比較・検討を行った。加えて、予測支保パターンの各区間長を実際の支保パターンごとの掘削速度で割って予測工

期を算出し、実際に要した工期と比較した。なお、SISのRealization（実現値）の数は200と設定した。確率統計シミュレーションによる予測においては試行回数の設定が予測精度に大きく影響するが、計算効率や実現値の正規分布の妥当性などを考慮してこれを設定した。しきい値の下側確率ごとにフィッティング（式（4）参照）したバリオグラムの一部を図-8に示す。

図-9、図-10では、予測した各支保パターン延長および実施支保パターン延長を比較したグラフを示す。支保パターンの予測に際しては、予測切羽評価点を実際の切羽評価点-支保パターン対応表にしたがって分類し、予測支保パターンとした。更に200個の実現値の平均値から標準偏差の2倍の範囲（ $\pm 2\sigma$ ）を予測範囲とし、実測値が予測範囲内にあれば予測精度が高いことを示す。階級区分を行わなかった場合の結果も併せて示す。

これらの結果を検討サイトごとに見ていくと、Aトンネルにおいては階級区分による精度向上が見られる。またBトンネルに関しても、階級区分により実測値が予測範囲の中心に近くなっており、よりよい予測ができていることが確認できる。したがって、これらの2トンネルに関しては、本手法は有用であると言える。

次に、入力データとなる既掘削区間の範囲を変えた場合の予測精度の変化を検討した。図-11および図-12に結果のグラフを示す。

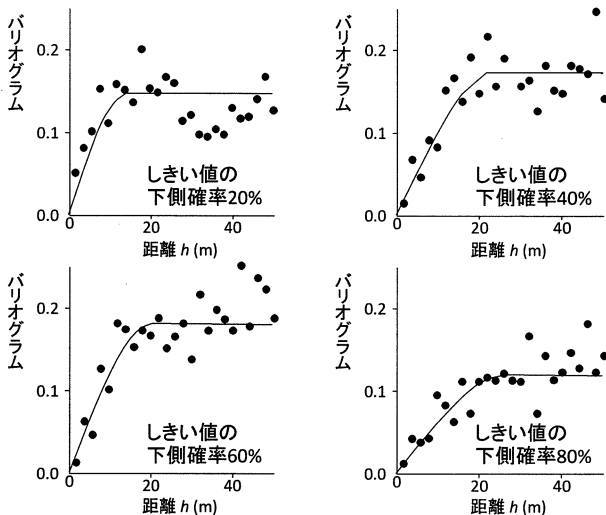


図-8 SISにおける標準化切羽評価点のバリオグラムの例

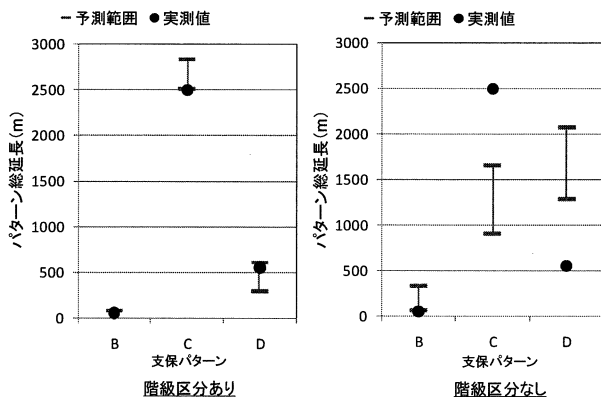


図-9 Aトンネル支保パターン長予測結果（階級区分）

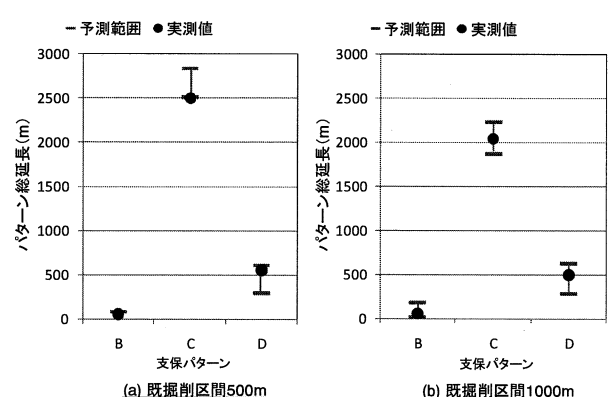


図-11 Aトンネル支保パターン長予測結果（既掘削区間長）

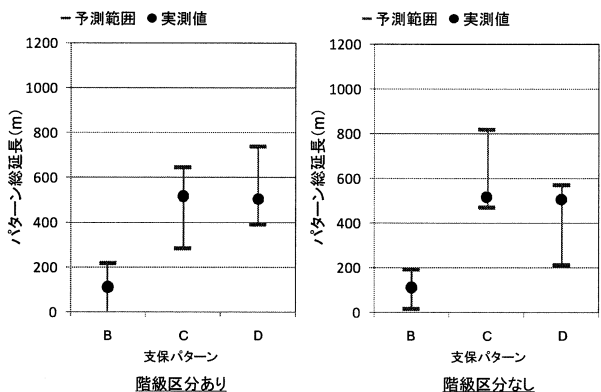


図-10 Bトンネル支保パターン長予測結果（階級区分）

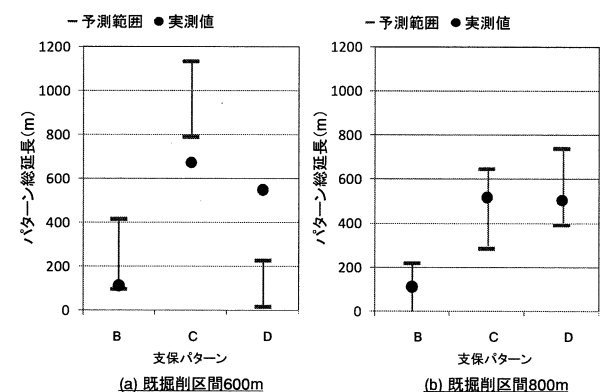


図-12 Bトンネル支保パターン長予測結果（既掘削区間長）

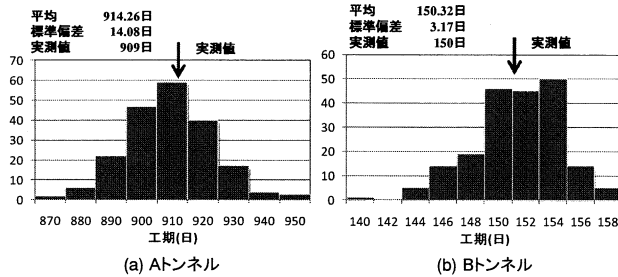


図-13 工期予測の結果

図-11に示すAトンネルにおいては、既掘削区間が短くても比較的精度の高い予測ができることが確認された。これは、既掘削区間500mが全線3600mの地質性状の代表にふさわしいものであったことを示しており、すなわち、本トンネルにおいては、既掘削区間500mは、それにおいて求めた比抵抗値と切羽評価点の対応によって全線を精度よく予測できる代表として適切な区間だと言える。

一方、Bトンネルでは既掘削区間が短い場合に精度が落ちている。これは、TD700m付近までの切羽評価点がほとんど一様だったのに対し、それ以降TD800m付近までの切羽評価点にはばらつきが見られることがわかっており、その結果、比抵抗階級ごとの評価点分布に差が現れ、前者の予測精度が後者に比べて低くなったと考えられる。したがって、Bトンネルのように比抵抗値と切羽評価点との対応関係が変化するような場合は、全体の代表として適切な既掘削区間長を確保することが重要であり、掘削の進行に合わせて予測を適宜更新・確認・修正していく必要がある。

最後に、両トンネルにおいて予測した支保パターンに対して、実際の支保パターンごとの掘削速度を適用し、掘削工期の概算を求めた。SISで求めた200個の実現値をヒストグラムにし、図-13に示す。これより、標準偏差が予測工期の平均の2%程度以下で、かつ実測値に対して5日以内の誤差で予測されていることから、掘削初期における全体工程の予測であることを考慮すれば、実用上十分な予測精度であると思われる。

しかしながら、ここで適用した掘削速度は全線の掘削実績から算出したもので、本来予測をする段階では分かっていない。また、掘削初期の速度を適用する場合、作業に慣れる前の状態を反映しており、一般的に掘削後期に向かって速度は向上していくことから、予測精度は落ちる。掘削速度の設定が予測に大きく影響するため、過去の実績をデータベース化して適用するなどの方策が必要になると考えられる。

(3) 切羽前方中間予測手法

ここでは、4章(4)に示した手法を適用した結果と考察を示す。なお、先行トンネルは常に本坑より十分(200m)先行しているものとした。

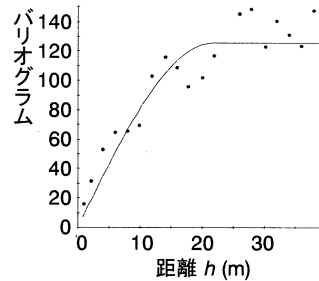
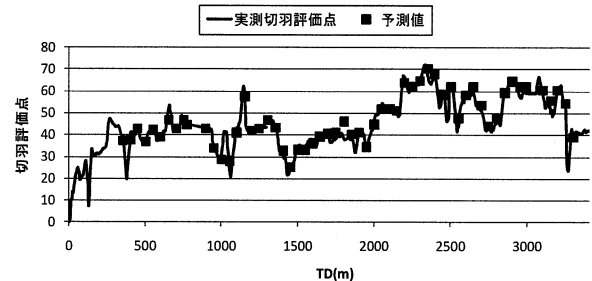
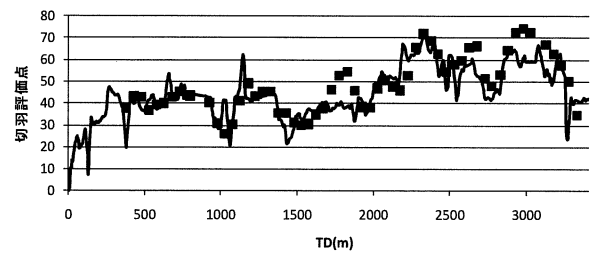


図-14 切羽評価点のバリオグラムの例



(a) 5m前方予測結果と実測値



(b) 30m前方予測結果と実測値

図-15 切羽評価点の予測結果と実測値の比較

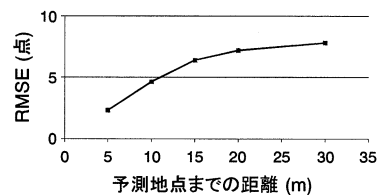


図-16 予測距離ごとの切羽評価点の RMSE

図-14に切羽評価点のバリオグラムの一例を示す。また、これを用いてトンネル全線にわたる切羽評価点を予測した結果を図-15に示した。切羽から5m前方(a)および30m前方(b)を予測した結果を示す。

これより、全線にわたって概ねトレンドをとらえているが、(b)より(a)の予測精度のほうがやや高いことがわかる。これは、図-14のバリオグラムに見られるとおり、距離が近いほど2点間の空間構造的相関関係が強くなることによる。

図-16には予測距離ごとに誤差を比較したものを示す。本研究では誤差の評価において、二乗平均平方根誤差(RMSE: Root Mean Square Error)を用いた。

ここで表-1は、Aトンネルの実際の現場において、切羽評価点をもとに支保パターンを決定する際に用いられた対応表であるが、現状の切羽評価点をもとにした支保パターン選定の際には、技術者の経験や現場の状況に応

表-1 Aトンネルにおける切羽評価点-支保パターン対応表

地山等級	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	目安点
B-a											65~100
C I-a											55~70
C II-a											45~60
C II-b											35~50
D I-a											20~40
D I-b											0~30
D II											0~30

じて柔軟な対応をするために、切羽評価点と支保パターンの対応にある程度の緩衝域を設けてあり、これは切羽評価点に一定量の誤差を許しているものと言い換えることができる。表-1においては、切羽評価点に10%程度の誤差が許されているということができ、これらを考慮すると、今回の予測結果に見られた誤差は実用上十分なものであると考える。

これらの具体的な値自体は、先行トンネルの配置や岩盤の特性によって変化するものと考えられるが、本手法を用いることにより、施工途上において予測値の信頼性を定量的に可視化しながら前方地質の予測が可能となり、山岳トンネル工事の情報化設計施工において有用であると考えられる。

(4) 切羽前方短区間予測手法

ここでは、本手法をAトンネルに適用した結果を示す。本手法では、TBM掘削で得られたRSIと、削孔検層で得られた破壊エネルギー係数から変換されたRSIを用いて、切羽前方のRSIを地球統計手法により予測した。

TBM機械データや削孔検層から得られるデータは非常に小さな距離間隔で計測・記録されるため、データ数および分散が大きくなり、よってデータ解析に要する時間が膨大となったり、空間分布の傾向を捉えにくくなる。また、最終的に不必要となる微小な空間特性を捉えるため効率的でない。したがって、検討区間を適切な寸法の区間に分割し、平均することでその区間（サポート）を代表するデータとした。切羽で生じる崩落などのトラブルの多くは前方数m程度の範囲に限られると考えられることから、ここでは一辺の長さが0.5mの正方形をサポートとした。

また、破壊エネルギー係数をRSIに変換する際、前章で述べたように、TBM掘削データにおけるRSIの平均・分散を用いて関係式を構築することが必要となる。本研究では、破壊エネルギー係数からRSIへの関係式については掘削の進行に伴い適時更新を行った。

図-17にバリオグラムの一例を、図-18に実測RSIが大きく変動した100m区間を拡大したもので、0.5m前方予測(a)と5m前方予測(b)のグラフを示す。なお、2箇所予測値が重なっているのは削孔検層のラップ部分である。

図-18から、全線にわたってRSIの推移をよく予測できていることがわかる。(a)と(b)を比較すると、後者より

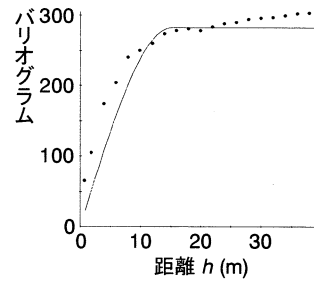
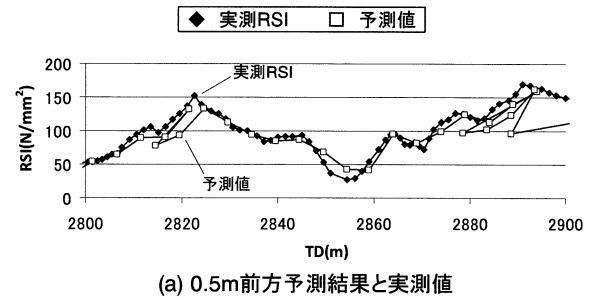
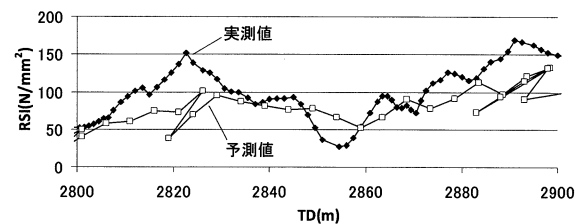


図-17 RSIのバリオグラムの例



(a) 0.5m前方予測結果と実測値



(b) 5m前方予測結果と実測値

図-18 RSIの予測結果と実測値の比較

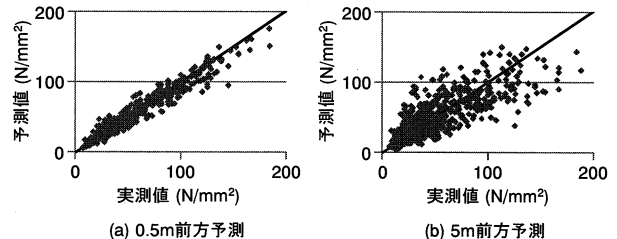


図-19 実測RSIと予測RSIの対応

前者の予測精度が高いことがわかる。また、(b)の結果の方が全体的に予測RSIの振れ幅が小さくなっているが、これは通常型クリギングの特徴でもある平滑化効果が表れたものと考えられる。通常型クリギングでは、既知点と推定点の間に空間的相関性を反映させることが可能であるが、推定点どうしには空間的相関性が反映できない。したがって、推定点と既知点との距離が遠くなるほど空間的な不均質性の評価が難しくなるため、平滑化される。

図-19は、(a)および(b)の実測RSIと予測RSIの対応をプロットしたものである。とくに(a)の場合、実測値と予測値のプロットがほぼ直線 $y = x$ 上に乗っていることが確認できる。

図-20に全線における予測距離ごとのRMSEを示す。これより、予測地点が切羽から離れるほど誤差が大きくなっていることが分かる。また、予測距離が2m程度の領

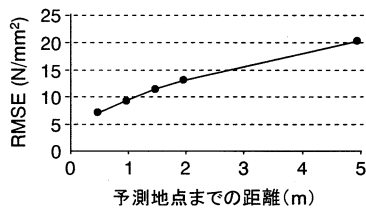


図-20 予測距離ごとのRSIのRMSE

域内の予測誤差は10%以内に収まり、実用上十分小さいと考えられる。

中区間地質予測手法と同様、これらの具体的な値は様々な要因によって変化することが考えられるが、本手法を用いることにより、施工途上において予測値の信頼性を定量的に可視化しながら切羽近傍の地質予測が可能となり、前述した最終的な安全性確認や支保パターンの適正確認といった目的に対して有用であると言える。

次に、同じ区間に対してSISを適用した結果を示す。

図-21にバリオグラムの一例を、図-22に切羽前方0.5mを予測した際に、各点において得られた複数の実現値の平均値および標準偏差を考慮し、範囲付きの予測値としてプロットしたものである。なお、予測範囲は $\pm\sigma$ （標準偏差）分とした。

グラフに示されるように、通常型クリギングのときと同様、概ねよく予測できていると言える。また、通常型クリギングに対して比較的振れ幅が大きくなっていることが確認できる。これは、SISではある時点で推定した推定点を次のサイクルにおいて既知点と同様に扱うため、推定点どうしの空間的相関性も考慮することができ、より不均質性を評価しやすいことが理由として考えられる。

また、SISを用いるメリットとして推定値の不確定性の評価が可能なのが挙げられる。すなわち、複数の実現値を得ることによって推定点が取りうる値を範囲付きで評価することができる。たとえば、本図のTD2855m前後のようにRSIが急激に変化する場合においては、予測範囲が前後と比較して広がっていることが確認できる。このように、予測値ごとに異なる不確定性を可視化することで地質リスクの大小を局所的に予測できるため、トンネル掘削を合理的かつ安全に進める上で非常に有用であると考えられる。

6. 統合的予測システムの提案

(1) 統合的予測システムの提案

ここまで有用性を検証した、掘削段階に応じた3つの異なる予測手法をサブシステムとする統合的な切羽前方地質予測手法を提案する。提案する手法は以下の3つのサブシステムより構成される。

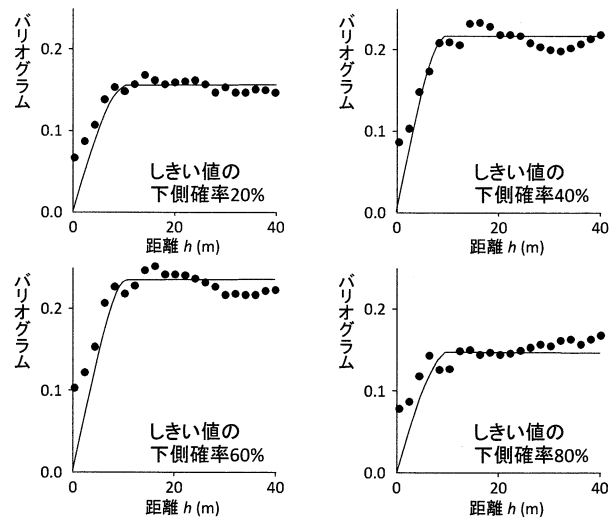


図-21 SISにおける標準化RSIのバリオグラムの例

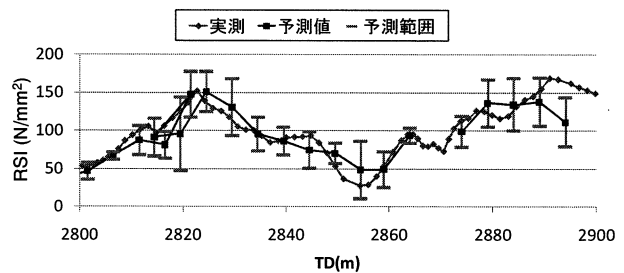


図-22 SISによるRSIの予測結果 ($\pm\sigma$ の予測範囲つき) と実測値の比較

・切羽前方長区間予測サブシステム

事前調査による物理探査データおよび既掘削部の地質データをもとに、地球統計シミュレーションを用いて長区間にわたる地質性状を予測するものであり、トンネル全線にわたる工期・工費の概算、安全対策の策定、施工計画の確認・修正など、プロジェクト管理のフレームワークの構築および確認・修正を目的とする。

・切羽前方中区間予測サブシステム

既掘削区間の地質データおよび先行トンネル等の地質データやトンネル内からの探査データを用いて、地球統計手法により切羽前方の中区間（切羽～30m程度）の地質状況を予測するものであり、補助工法の必要性判定や支保パターンの事前設計など、安全管理・品質管理の高精度化を目的とする。

・切羽前方短区間予測サブシステム

既掘削部の地質データと未掘削部の検層データを用いて、地球統計手法により切羽前方の短区間（切羽～5m程度）の地質状況を予測するものであり、掘削中の安全性確認や掘削パラメータの決定、設計支保パターンの適正確認など、最終的な安全管理、品質管理、工程管理の高精度化を目的とする。

(2) 統合的予測システムのフロー

以下の図-23にフローを示す。

本システムにおいては、掘削サイクルとプロジェクト管理という2つの枠組みを設けた。

まず、掘削サイクルにおいては、切羽前方中區間地質予測サブシステムを用いて、事前調査の段階では予測し得ない切羽前方の地質状況の変化を事前に把握し、補助工法の必要性判定や支保パターンの仮選定など、安全管理・品質管理の高精度化を目指す。それと並行して、削孔検層から得られるデータをもとに、切羽前方短區間地質予測サブシステムを用いて、掘削に直接影響する切羽近傍領域について継続的に予測を行い、掘削パラメータの決定や支保選定など、最終的な安全管理・工程管理・品質管理の高精度化を目指す。

予測サイクルは、短區間予測に関しては、一度の削孔検層に対して高精度な予測が可能な2.0mごとに繰り返し、削孔検層区間の先端に到達する1切羽前に再び削孔検層を行うことを提案する。また、中區間予測に関しては、トンネル内からの探査の可探距離にもよるが、30m程度ごとに予測を行うサイクルを提案する。これらの予測サイクルにおいて本システムを用いることで、実用上十分小さな予測誤差の範囲内で、合理的に掘削を進めることができると考えられる。

しかしながら、工法や掘削機械の違いによって求められる予測サイクルは異なってくると考えられるため、各現場に見合ったサイクルを設定することが重要であると

考えられる。

一方で、プロジェクト管理においては切羽前方長區間地質予測システムを用いて、掘削初期段階の既掘削区間のデータを利用して未掘削部全体の切羽評価点の予測を行い、それに対応する支保パターン、各支保パターンの延長、これを各支保パターンの実際の掘削速度で割ることによる予測工期の順に展開し、プロジェクト管理のフレームワークの構築・確認・修正を行うことで、長期的なプロジェクト管理の高精度化を目指す。プロジェクト管理においては、その性質上短いスパンでの予測サイクルは必要とされないため、掘削サイクルから得られる既掘削部のデータをもとに適宜予測を行うが、Bトンネルのように地質性状が急変する場合もあるため、中・短區間予測システムで得られる情報を参考に、長區間予測を適切なタイミングで更新・修正することが肝要である。

7. まとめ

本研究では、山岳トンネル掘削においてより合理的な情報化設計施工を可能とする統合的な切羽前方地質予測システムの構築を目的とし、プロジェクトの各段階における目的に応じた切羽前方地質予測サブシステムを構築するとともに、それらを統合した切羽前方地質の統合的

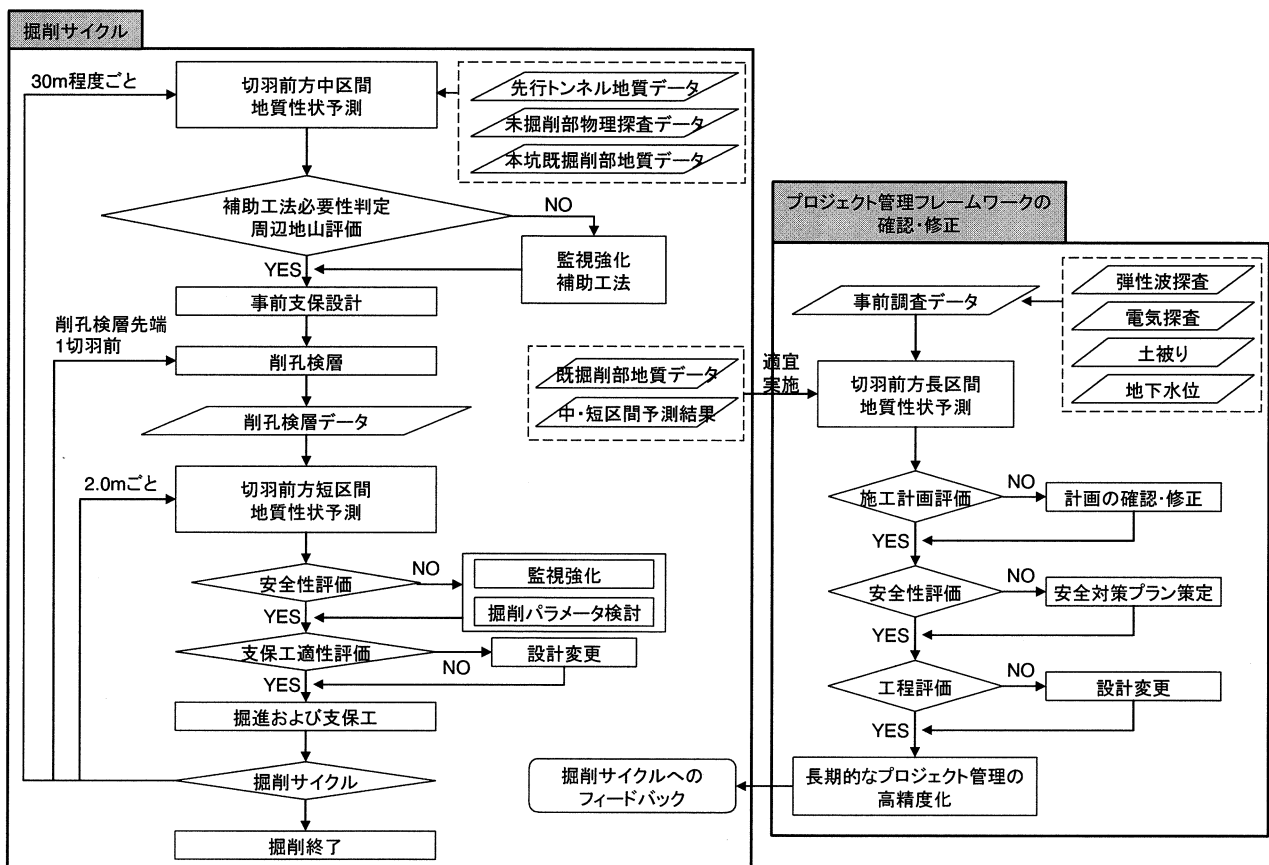


図-23 切羽前方地質の統合的予測システムのフロー

予測システムの提案を行った。その結果、切羽前方長区間にわたる地質予測手法の構築については、事前調査データとして得られる比抵抗値と既掘削部の切羽・坑壁評価点を用いてトンネル全線の予測をSISにより行い、前述の目的に対する本手法の有用性を確認した。切羽前方中区間における地質予測手法の構築については、先行する避難坑および本坑の既掘削部の切羽評価点を用いて地球統計手法により切羽前方30mまでの評価点を予測し、また、切羽前方短区間における地質予測手法の構築については、TBMトンネルを対象として、既掘削部の各種データを用いて切羽前方5mまでのRSIを予測し、いずれも実用上十分な精度で予測できることを確認した。最後に、上記サブシステムを統合し、一連のプロジェクトの流れをカバーする統合的な地質予測システムを提案した。

本システムは山岳トンネル工事の情報化設計施工に大きく貢献できるものと考えられるが、以下の点についてはさらなる検討が必要と考えている。

- ・とくに長区間予測において、未掘削部の地質性状を代表する適切な既掘削区間の設定方法
- ・長区間予測において、電気比抵抗以外の、トンネル全線をカバーし、かつ地質性状を反映するようなデータ（弾性波速度、土被り、地下水位等）の適用性
- ・中区間予測において、避難坑などの先行トンネルがない場合の予測精度
- ・性状のまったく異なる地質が存在する場合（たとえば新第三系と貫入花崗岩体）の本システムの適用性

参考文献

- 1) Sattel, G., Frey, P. and Amberg, R. : Prediction ahead of the tunnel face by seismic methods pilot project in Centovalli Tunnel, Locarno, Switzerland, *First Break*, 10, pp.19-25, 1992.
- 2) 稲崎富士, 千田敬二: 坑内 HSP 法によるトンネル切羽前方弱層評価, 第 25 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.271~275, 1993.
- 3) 加藤卓朗, 浅川一久, 浦木重伸, 村山秀幸, 柳井俊雄: トンネル浅層反射法探査(SSRT)による坑口周辺部の地山評価, 土木学会年次学術講演会講演概要

集(CD-ROM), III-229, 2002.

- 4) 山本拓治, 白鷺卓, 西岡和則, 青木謙治: 反射トモグラフィーによるトンネル切羽前方の地質探査, 土と基礎, Vol.50, No.7, pp.10-12, 2002.
- 5) 青木謙治, 稲葉武志, 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および切羽前方地質の予測技術について, 第 8 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp.67-72, 1990.
- 6) 土木学会トンネル工学委員会: 2006 年制定トンネル標準示方書[山岳工法]・同解説, p.256, 2006.
- 7) 真下英人, 水川雅之, 日下敦, 砂金伸治, 木谷努, 遠藤拓雄: 山岳トンネルにおける施工時観察・計測データの評価手法に関する研究報告書, 土木研究所資料, 第 4099 号, 2008.
- 8) Yamamoto, T., Shirasagi, S., Yamamoto, S., Mito, Y. and Aoki, K. : Evaluation of the geological condition ahead of the tunnel face by geostatistical techniques using TBM driving data, *Proc. of IS-KYOTO 2001*, pp.213-218, 2001.
- 9) Mito, Y., Yamamoto, T., Shirasagi, S. and Aoki, K. : Prediction of the geological condition ahead of the tunnel face in TBM tunnels by geostatistical simulation technique, *Proc. of 10th Congress of the ISRM*, pp.833-836, 2003.
- 10) 山本拓治, 白鷺卓, 小倉永輔, 水戸義忠, 青木謙治: 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およびトンネル周辺の地質評価, 第 33 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.163-168, 2004.
- 11) 白鷺卓, 山本拓治, 杉山稔, 福家佳則, 宮嶋保幸, 青木謙治: TBM 工法における総合地質評価システムの開発と適用, 岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.5-10, 2007.
- 12) 情報化施工技術総覧編集委員会: 情報化施工技術総覧, pp.269-275, pp.300-319, 産業技術サービスセンター, 1998.
- 13) 真下英人: トンネル調査の現状と課題, トンネル切羽前方探査に関するシンポジウム・講演会講演論文集, pp.9-16, 社団法人土木学会関西支部, 2000.
- 14) Klein, S., Schmoll, M. and Avery, T. : TBM performance at four hard rock tunnels in California. *Proc. of RETC*, pp.61-75, 1995.
- 15) Chiles, J-P. and Delginer, P. : Geostatistics Modeling Spatial Uncertainty, JOHN WILEY & SONS, INC. 1999.
- 16) Wackernagel, H. (地球統計学研究委員会訳): 地球統計学, pp.204-211, 森北出版, 2003.

(2011.6.6 受付)

THE INTEGRATED PREDICTION SYSTEM FOR GEOLOGICAL CONDITIONS AHEAD OF TUNNEL FACES

Suguru SHIRASAGI, Takuji YAMAMOTO, Yoshitada MITO and Mohd ASHRAF

It is essential to employ the observational design and construction method to manage tunnel projects efficiently. The original tunnel design is immediately verified or modified based on the in-situ data sequentially obtained in the construction stage. This study proposes an integrated prediction system for geological conditions ahead of tunnel faces, which is composed of long-interval, middle-interval, and short-interval prediction subsystems. The applicability of those subsystems is verified with actual field data.