

比抵抗トモグラフィによるトンネル切羽前方の三次元地山構造推定

3-D EVALUATION OF GEOLOGICAL STRUCTURE IN FRONT OF TUNNEL FACE
USING RESISTIVITY TOMOGRAPHY佐々木 丈¹⁾, 阿部 和久²⁾, 椎谷 成孝³⁾, 今村 大介⁴⁾, 紅露 一寛⁵⁾

Jo SASAKI, Kazuhisa ABE, Shigeyuki SHIYA, Daisuke IMAMURA and Kazuhiro KORO

- 1) 新潟大学大学院自然科学研究科 (〒 950-2181 新潟市西区五十嵐二の町 8050, E-mail: f16e031e@mail.cc.niigata-u.ac.jp)
- 2) 新潟大学工学部工学科 (〒 950-2181 新潟市西区五十嵐二の町 8050, E-mail: abe@eng.niigata-u.ac.jp)
- 3) 株式会社福田組 (〒 950-8668 新潟市中央区一番堀通町 3-10, E-mail: siiya3070@dws.fkd.co.jp)
- 4) 鉦研工業株式会社 (〒 171-8572 東京都豊島区高田 2-17-22 目白中野ビル 1F, E-mail: imamura@koken-boring.co.jp)
- 5) 新潟大学工学部工学科 (〒 950-2181 新潟市西区五十嵐二の町 8050, E-mail: kouro@eng.niigata-u.ac.jp)

A resistivity tomography method is developed for three-dimensional evaluation of geological structure in front of the tunnel face. To achieve this, three boreholes are arranged at tunnel face. An electrical source is located at the end of one borehole, while observation points are arranged along other two boreholes. Three-dimensional distribution of the resistivity in front of the tunnel face is evaluated using the extended Kalman filter. The electrical field is obtained by finite element analysis. Boundary conditions which can approximate the infinite domain and the influence of tunnel face are examined. Through a numerical example and application to an in-situ investigation, the feasibility of the proposed method is discussed.

Key Words: Finite element method, Kalman filter, Resistivity tomography method

1. はじめに

電気探査法⁽¹⁾は地盤中に人工的に電流を流したときに生じる各地点の電位を計測することで非破壊的に地盤内の地質を把握する手法であり、いくつかの測定法が提案されている。中でも比抵抗法は、広く用いられている探査法の一つである。当該法は、接地した電極から地盤に電流を入力し、この際に発生する電位を複数の観測点で測定することで得られた電位分布から地盤の比抵抗(見掛け比抵抗値)を求める探査手法であり、この比抵抗分布から地質構造や地盤状態あるいは地下水分布を推定する。特にボーリング孔や坑道を利用して二次元あるいは三次元的に地下構造を推定する比抵抗トモグラフィ探査法は、直接土を採取することなしに広域的な地質の推定断面情報が得られ、経済性に優れている手法である。しかしながら比抵抗値は水飽和度や間隙率、水質、温度、自然電位等の様々な影響を受ける定性的物性値であるため、変形特性や強度を示す物理量と異なり、岩種を完全に特定することはできない。

一方、最も一般的に実施されている地質調査法としてボーリング調査が挙げられる⁽²⁾。ボーリング調査は、実際に地盤を掘削して地中の土や岩の試料を目視によって直接観察し

たり、強度試験を実施することが主な目的である。また土や岩等の試料を持ち帰り、室内で土質試験を実施することで土の工学的性質を把握することができる。しかし、面状の詳細な情報を得るためには複数のボーリング削孔を必要とすることに加え、地質技術者による地山区分判定の差が現れ、ボーリングデータだけでは地山区分の推定が困難となるケースが報告されている⁽³⁾。

そこで、著者らはボーリング調査法と比抵抗トモグラフィ探査法とを組み合わせた、トンネル掘削と並行して行えるトンネル切羽前方探査法の開発を試みている⁽⁴⁾。これは、トンネル切羽より前方へパーカッションワイヤラインサンプリング工法で二本または三本の水平ボーリングを実施し、そのボーリング孔を使用して比抵抗トモグラフィ探査を行うものであり、切羽前方の比抵抗分布を二次元あるいは三次元的に推定し、ボーリング結果と照合することで、切羽前方の地質や地下水等の詳細を調査する手法である。

これまで著者らは、前述の比抵抗トモグラフィ探査法の構築を目的に、感度解析に基づく比抵抗分布の推定法を検討してきた。しかし、正則化項の設定に結果が大きく依存することや、解析領域の打ち切り端の影響を低減するためには解析対象領域を広く設定する必要があり、計算負荷が増大するこ

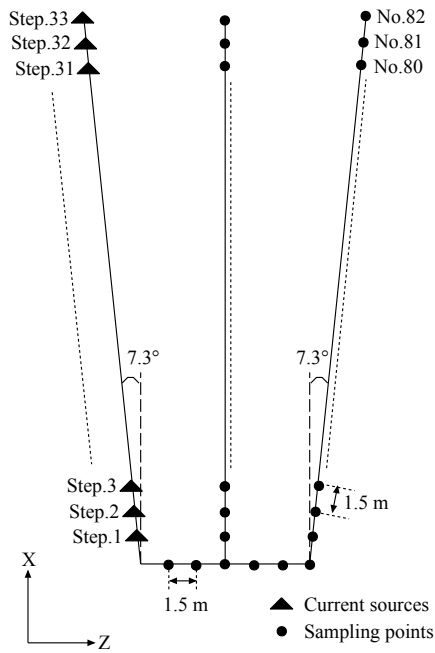


Fig. 1 Location of electrodes in boreholes

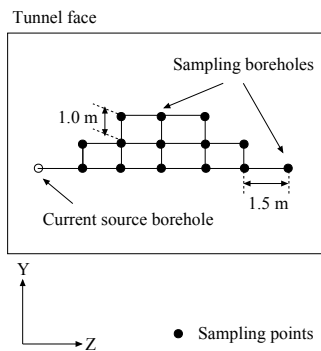


Fig. 2 Location of electrodes on tunnel face

とが課題となっていた．そこで本研究では，各種パラメータを客観的に設定しつつ未知量推定が可能な拡張カルマンフィルタ^(5,6)を採用する．なお，非線形推定手法として，アンサンブルカルマンフィルタや粒子フィルタ⁽⁷⁾などが提案されている．これらによる場合，推定の安定化が期待できる一方，本問題のように未知量が比較的多い場合，メンバー数(粒子数)をある程度多くする必要が考えられるため，計算負荷の増大が懸念される．そのため，本研究では拡張カルマンフィルタを用いることとした．さらに，計算負荷の軽減を図る目的で，未知量推定領域の比較的近傍に無限領域における電位分布を近似した Dirichlet 境界を設定し，その設定条件について検討する．また，これまでは二本のボーリング孔を用いた手法を採用していたが，この場合，面的な推定に限定されていた．そこで三次元的に配置した三本のボーリング孔を適用することで三次元的な推定法の構築を試みる．さらに，本調査手法を鳥取県内の道路トンネル工事の切羽前方探査に適用し，その結果に基づき提案法の有用性について検討する．

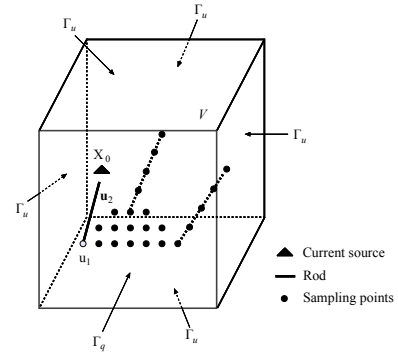


Fig. 3 Outline of analysis region

2. トンネル切羽前方の電気探査手順

トンネル切羽前方における地山比抵抗の三次元的推定を目的に，三本のボーリング孔を Fig.1, Fig.2 のように設定する．本研究の工法の詳細な測定手順は以下の通りである．

- 1) 固定電極を設置する中央と右部ボーリング孔を削孔する．
- 2) ボーリング削孔終了後，中央と右部ボーリング孔に固定電極 (1.5m 間隔) を挿入する (Fig.1)．
- 3) 切羽面に固定電極 (y 軸方向 1.0m, z 軸方向 1.5m 間隔) を設置する (Fig.2)．
- 4) 左部ボーリング孔においてロッド一本分 (1.5m) を打撃削孔する．
- 5) 移動電極を左部ボーリング孔先端へ送り，先端電極を地山に接触させる．
- 6) 固定電極の電圧・電流を測定する．
- 7) 移動電極をワイヤラインで回収する．
- 8) 4) ~7) を繰り返す．

3. 比抵抗分布の推定手法

3.1. 支配方程式と求解方程式

2. で述べた探査手順に基づき，本研究では Fig.3 に示すようなトンネル切羽前方領域を想定した三次元場での比抵抗値の分布推定問題を対象とする．当該領域における電場の支配方程式は次式により与えられる．

$$\nabla(k\nabla u) = -Q\delta(\mathbf{X} - \mathbf{X}_0) \quad \text{in } V \quad (1)$$

ここで， ∇ はナブラ演算子， u は電位， k は比抵抗値の逆数， Q は入力電流， δ は Dirac のデルタ関数， \mathbf{X}_0 は移動電極による電流入力点である．また境界条件は次式により与えられる．

$$\begin{aligned} q &:= \frac{\partial u}{\partial n} = 0 && \text{on } \Gamma_q \\ u &= \bar{u} && \text{on } \Gamma_u \\ u_2 &= u_1 \end{aligned} \quad (2)$$

トンネル切羽面 Γ_q では流束 $q = \partial u / \partial n = 0$ となる．一方，それ以外の境界 Γ_u では，電位を規定値 \bar{u} に設定するものとする．移動電極を挿入する左部ボーリング孔には，金属ロッドが存在しており，そのため電位が一定値をとる． u_1 は当

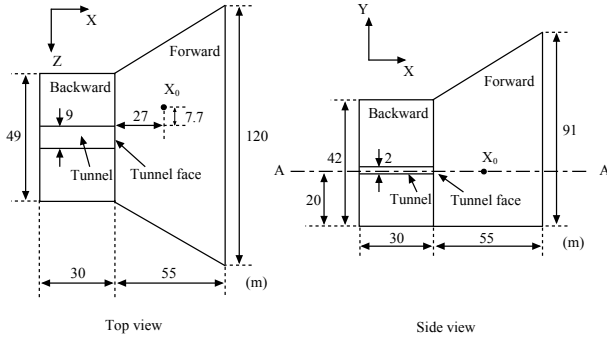


Fig. 4 Analysis region

該ロッド切羽面端部における電位 (未知量) であり, ロッド上の電位 u_2 は u_1 と同一値をとる.

式 (1) を有限要素で離散化し, 式 (2) に示した境界条件を満たすように処理することで最終的に次の求解方程式を得る.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mathbf{K}_{ba} & \mathbf{K}_{bb} & \mathbf{K}_{b1} & \mathbf{K}_{b2} & 0 \\ \mathbf{K}_{1a} & \mathbf{K}_{1b} & \mathbf{K}_{11} & \mathbf{K}_{12} & 0 \\ \mathbf{K}_{2a} & \mathbf{K}_{2b} & \mathbf{K}_{21} & \mathbf{K}_{22} & -\mathbf{I} \\ 0 & 0 & -\mathbf{1} & \mathbf{I} & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{u}_a \\ \mathbf{u}_b \\ u_1 \\ u_2 \\ \mathbf{q}_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \bar{\mathbf{u}}_a \\ \bar{\mathbf{q}}_b \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3)$$

ここで, \mathbf{u}_a は Γ_u 上の規定電位節点ベクトル, \mathbf{u}_b は \mathbf{u}_a , u_1 , u_2 以外の節点における電位, \mathbf{q}_2 はロッドからの流束, $\bar{\mathbf{q}}_b$ は \mathbf{u}_b に対応する流束を表し, \mathbf{X}_0 において Q , それ以外の節点でゼロとなる. また, $\mathbf{1} = \{1 \ 1 \ 1 \cdots 1\}^T$, $\mathbf{I} = \text{diag}[1 \ 1 \ 1 \cdots 1]$ である.

3.2. 拡張カルマンフィルタによる比抵抗分布の推定法

本研究では, ボーリングの延伸を複数回繰り返すことから, その都度解くべき問題が変化する. この特徴を踏まえ, 理工学分野で広く用いられているカルマンフィルタを非線形推定問題に適用した拡張カルマンフィルタを用いる. カルマンフィルタは, 逐次変化するシステムの状態を観測データから推定する手法であるが, 本研究では比抵抗逆数が推定対象となる.

本工法 (Fig.1, Fig.2) の手順に基づき, 以下のような問題を考える. Fig.3 における \mathbf{X}_0 の位置を S 段階更新して測定点での電位を評価する. 解析に当たり, 比抵抗逆数 k を推定する部分領域 V_0 における有限要素毎の k を成分を持つベクトルを $\hat{\mathbf{x}}$ とおく. なお, それ以外の領域における k の設定については後述べる. 第 j ステップ目までの測定データから推定した比抵抗逆数を $\hat{\mathbf{x}}_j$ とおき, 第 $j+1$ ステップの測定に対する順解析を $\hat{\mathbf{x}}_j$ に基づいて行うものとして, 式 (3) より次式を設定する.

$$\mathbf{A}(t_{j+1}; \hat{\mathbf{x}}_j) \{\mathbf{u}_{j+1}\} = \{\mathbf{b}_{j+1}\} \quad (4)$$

ここで, $\mathbf{A}(t_{j+1}; \hat{\mathbf{x}}_j)$ は V_0 における比抵抗分布を $\hat{\mathbf{x}}_j$ で設定し, 左ボーリング孔をロッド一本分割孔して \mathbf{X}_0 を第 $j+1$ ステップ時の位置に設定したときの式 (3) の係数行列である. $\{\mathbf{u}_{j+1}\}$, $\{\mathbf{b}_{j+1}\}$ はその時の解と右辺ベクトルである.

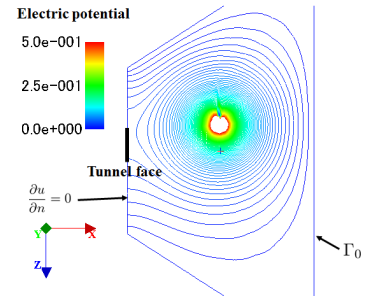


Fig. 5 Distribution of electric potential on A-A plane (without the tunnel region)

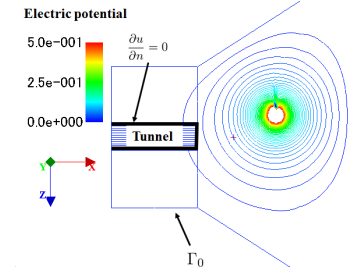


Fig. 6 Distribution of electric potential on A-A plane (with the tunnel region)

第 $j+1$ ステップの比抵抗逆数推定値を次の修正式により求める.

$$\hat{\mathbf{x}}_{j+1} = \hat{\mathbf{x}}_j + \mathbf{K}_j \{\mathbf{y}_{j+1} - \mathbf{h}_{j+1}\} \quad (5)$$

ここで, \mathbf{y}_{j+1} は第 $j+1$ ステップにおける電位の測定値, \mathbf{h}_{j+1} は式 (4) を解いて得られる \mathbf{u}_{j+1} から抽出した \mathbf{y}_{j+1} に対応するベクトルである. また, \mathbf{K}_j はカルマンゲインであり, 次式により与える.

$$\mathbf{K}_j = \mathbf{P}_j \mathbf{M}_j^T [\mathbf{M}_j \mathbf{P}_j \mathbf{M}_j^T + \mathbf{R}]^{-1} \quad (6)$$

ここで, \mathbf{P}_j は第 j ステップにおける比抵抗逆数の共分散行列推定値, \mathbf{R} は測定値の共分散行列である. 本解析では, 各測定値の誤差は独立な Gauss 性ノイズとし, \mathbf{R} は対角行列で与えた. また, \mathbf{P}_{j+1} および, 比抵抗逆数の感度 \mathbf{M}_j は次式で与えられる.

$$\mathbf{P}_{j+1} = [\mathbf{I} - \mathbf{K}_j \mathbf{M}_j] \mathbf{P}_j [\mathbf{I} - \mathbf{K}_j \mathbf{M}_j]^T + \mathbf{K}_j \mathbf{R} \mathbf{K}_j^T \quad (7)$$

$$\mathbf{M}_j := \left. \frac{\partial \mathbf{h}_{j+1}}{\partial \hat{\mathbf{x}}} \right|_{\hat{\mathbf{x}}=\hat{\mathbf{x}}_j} = \mathbf{B} \left. \frac{\partial \mathbf{u}_{j+1}}{\partial \hat{\mathbf{x}}} \right|_{\hat{\mathbf{x}}=\hat{\mathbf{x}}_j} \quad (8)$$

なお, \mathbf{B} は \mathbf{u}_{j+1} から \mathbf{y}_{j+1} に対応するベクトル \mathbf{h}_{j+1} を抽出する行列である.

さらに, $\Delta \hat{\mathbf{x}}$ を未知量の増分とすると, 式 (4) より次式を得る.

$$\mathbf{A}(t_{j+1}; \hat{\mathbf{x}}_j + \Delta \hat{\mathbf{x}}) \{\mathbf{u}_{j+1} + \frac{\partial \mathbf{u}_{j+1}}{\partial \hat{\mathbf{x}}} \Delta \hat{\mathbf{x}}\} = \{\mathbf{b}_{j+1}\} \quad (9)$$

式 (9) を展開し, $\Delta \hat{\mathbf{x}}$ の一次の項より次式を得る.

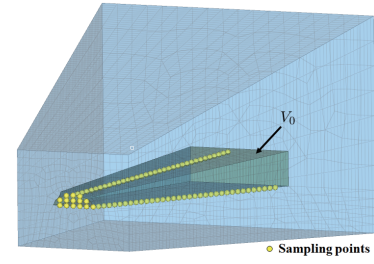
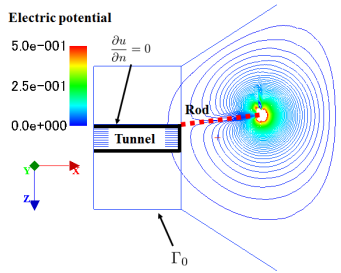


Fig. 7 Distribution of electric potential on A-A plane (with rod)

Fig. 8 FEM model

$$\mathbf{A}(t_{j+1}; \hat{\mathbf{x}}_j) \frac{\partial \mathbf{u}_{j+1}}{\partial \hat{\mathbf{x}}_j} = - \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial \hat{\mathbf{x}}_j} \mathbf{u}_{j+1} \quad (10)$$

式 (8), 式 (10) により, 比抵抗逆数の感度 \mathbf{M}_j を求めることができる。

4. Γ_u における境界値の設定法

本研究では有限要素解析を行うに当たり, 無限領域と等価な人工境界を推定領域外側に設定する。この設定の際に, 推定対象であるトンネル切羽前方のみのモデル化では, トンネルの存在による電位分布特性を再現できない可能性がある。また, 本工法では導電体である金属ロッドを用いるため, その影響の大小について確認した上で境界値を求める必要がある。したがって以下では, トンネル切羽後方の影響, 金属ロッドの影響について検討し, それに基づいた境界 Γ_u での電位規定の方法について述べる。

4.1. トンネル切羽後方の影響

本工法ではトンネル切羽前方を未知量推定領域としているため, トンネル切羽前方のみを離散化することが効率的で望ましい。しかし現実のトンネル施工時には, 既に掘削したトンネル坑内から切羽前方探査を実施するため, モデル化の際に未知量推定領域外の地山や既設のトンネル坑を含めたトンネル切羽後方の存在が影響し得る。そこで, 切羽前方の一つの点に単位電流を入力したときの電位分布を, トンネル切羽前方のみ, および後方も含めた有限要素解析の両者で比較し, 切羽後方の影響について検討する。

解析領域 (節点数 56650, 要素数 52566) の寸法は Fig.4 に示す通りとし, 切羽後方 (トンネル) についてはその影響を考慮するため, 十分な長さとして 30m を設定した。なお, 本研究では, 8 節点 6 面体要素を用いて離散化している。切羽前方および後方の外側境界 Γ_0 に Dirichlet 境界値 $u = 0$ を与え, トンネル坑内の壁面では流束を $q = 0$ に規定する。また, 図中 \mathbf{X}_0 に単位電流を入力している。ただし, 金属ロッドはモデル化していない。一方, 切羽前方のみをモデル化した場合は, 文献 (4) と同様にトンネル切羽面を含む面全体に $q = 0$ の Neumann 境界を設定した。

各ケースで求めた \mathbf{X}_0 を含む A-A 平面 (Fig.4) における電位分布を, Fig.5, Fig.6 に示す。切羽前方のみをモデル化した場合 (Fig.5) では, 切羽面を含む平面境界全体に Neumann 境界条件 ($q = 0$) を適用しているため, 切羽面に対して垂直

な等電位線が得られており, 切羽周辺の電位場を適切に再現できていない。一方, 切羽面後方もモデル化した場合 (Fig.6) では, 切羽面後方へも連続的に電位が分布しており, その乱れはトンネル切羽面の極近傍に限られている。なお, Γ_0 で $u = 0$ と規定しているため, いずれのケースにおいても Γ_0 近傍の等電位線が境界に沿うように分布している。

以上より, Γ_0 の無い電位場を考えれば, トンネル周辺以外における電位分布は無限場中に電流入力点を置いた場合のもので近似できると考えられる。

4.2. 金属ロッドの影響

本工法では, 導電体である金属ロッドを使用するため, それが境界値設定時の電位分布に影響を及ぼすことが考えられる。そこで導電体の存在の有無による単位電流入力時の電位分布を比較し, その影響について検討する。導電体を考慮した場合の電位分布を Fig.7 に示す。なお, それ以外の解析条件は Fig.4 と同様の条件で設定した。Fig.6 に示した導電体の無いモデルの電位分布と比較すると, 金属ロッド近傍における電位に差異が認められるものの, 当該部近傍以外では, 両者の電位分布は類似しており, 金属ロッドの影響は, その極近傍に限定されることがわかる。

4.3. Γ_u における電位境界値の設定

無限領域から取り出した有限な解析領域の境界 Γ_u における境界値の設定方法について考える。 Γ_u 上の電位境界値を設定する時点では, 地山の物性値分布は未知となっている。そのため, 観測値を元に, それらを最も良好に再現し得る一つの代表値によって全解析領域を一様場近似する。なおこの場合, 4.1, 4.2 の検討結果より, 金属ロッドやトンネルを無視した無限場の解により電位境界値を評価しても精度上差し支えない。領域を代表する比抵抗値は, 以下の手順により設定する。

$k = 1$ の一様無限場に単位電流を入力したときの電位は次式で与えられる。

$$u^* = \frac{1}{4\pi r} \quad (11)$$

ここで, r は電流入力点からの距離である。

入力電流 Q の下での測定値を \bar{u} として, 次の誤差の二乗和 E を目的関数として与える。

$$E = \sum_i (\rho Q u_i^* - \bar{u}_i)^2 \quad (12)$$

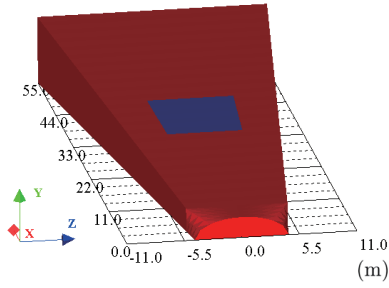


Fig. 9 True distribution of conductivity in identified region

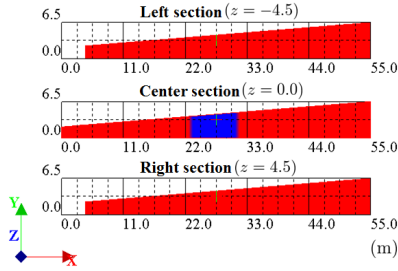


Fig. 10 True distribution of conductivity on three cross sections

ここで、 $\rho = 1/k$ は比抵抗、 $()_i$ は第 i 番測定点における値である。なお、領域を一様場と見なして得られる比抵抗は、見掛比抵抗値と呼ばれている。式 (12) の目的関数の最小条件より、見掛比抵抗値は次式により求められる。

$$\rho = \frac{\sum \bar{u}_i u_i^*}{Q \sum u_i^{*2}} \quad (13)$$

トンネル切羽面以外は、それを含む境界面に関しても電位規定境界 Γ_u に設定し、そこでの規定値を $u = \rho Q u^*$ により与える。ただし、トンネル切羽面のみは Neumann 境界とする。

5. 本推定手法の妥当性の検証

5.1. 解析条件

Table 1 Resistivity of each region

Region	Resistivity($\Omega \cdot m$)
Silt	10
Conglomerate	100

本研究で構成した、拡張カルマンフィルタによる比抵抗逆数分布推定法の妥当性を検討する目的で、有限要素解析を行なった。移動電極(構造変化部分)は 1.5m の延伸を 33 回繰り返す様に設定した。その都度、移動電極先端部分に電流を入力し、Fig.1 および Fig.2 に示す 82 箇所の固定電極各点において電位を測定する。この条件を反映した有限要素モデル(節点数 22126、要素数 19564、未知数 1430、手前の幅 25.0m、奥の幅 61.0m、手前の高さ 18.0m、奥の高さ 40.5m、奥行き 55.0m)を Fig.8 に示す。なお、電位測定点に囲まれ

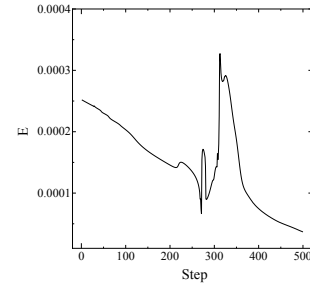


Fig. 11 Convergence of evaluation error

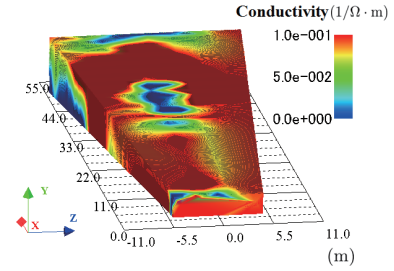


Fig. 12 Evaluation of conductivity

た部分 (Fig.8 中の濃い青色の領域) を未知量推定領域 V_0 とし、その外部に見掛比抵抗値の一様場を設定した。また、当該領域における正解の比抵抗逆数の物性値と分布を Table 1, Fig.9, Fig.10 に示す。比抵抗逆数が高い値をとるシルト層が一様に分布している中に、比抵抗逆数が小さい礫岩の領域が切羽面から x 軸方向に 23~31m の領域中央部分に Fig.10 のように分布する地質構造を設定した。なお、推定対象領域外部にも一様にシルト層が分布するように問題を設定した。

未知な比抵抗逆数は 1430 個であり、その初期値は解析対象領域内に一様に $0.1(1/\Omega \cdot m)$ と与え、観測誤差の分散の初期値および比抵抗逆数の推定値の分散の初期値はともに 0.0001 とした。なお、実際の現場において切羽面の地質状況は目視で確認できることを考慮し、切羽面から 3.0m までの領域は未知量推定領域 V_0 に含めていない。

5.2. 解析結果

推定値の収束状況を Fig.11 に示す。なお、誤差は次式で評価している。

$$E = \sum_i^n (\bar{u}_i - u_i)^2 \quad (14)$$

ここで、 \bar{u}_i は観測電位、 u_i は順解析によって得られた測定電位に対応する推定電位である。300 ステップ前後で変動が認められるが、それ以外では概ね一様な収束が得られた。また、得られた比抵抗逆数の分布を Fig.12, その断面図 (z 軸方向 -4.5m, 0m, 4.5m 地点) を Fig.13 に示す。領域中央部分の切破面から約 22~37m に低比抵抗逆数域が分布している様子が確認でき、正解を概ね推定できている。一方、当該領域左面 50m 付近にも低比抵抗逆数が分布しており、設定条件との不整合が認められる。これは、左面近傍に観測点を持たない移動電極が設定されていることに起因するものと考え

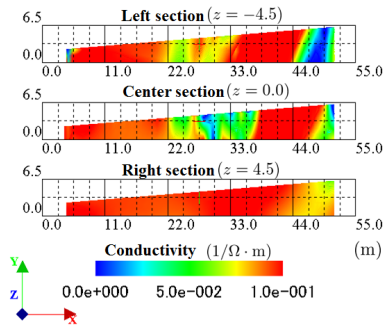


Fig. 13 Evaluated conductivity on three cross sections

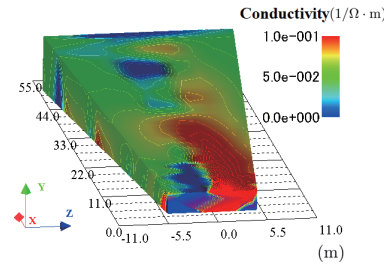


Fig. 14 Evaluation of conductivity (in-situ investigation)

られる。また、未知量推定領域前方端付近(奥側)にも設定値と異なる推定結果が得られている。これは探査領域先端より前方に観測点が存在しないことによる情報量の欠如が影響しているものと考えられる。

5.3. 現場計測への適用例

本研究で構成した解析手法を、鳥取県にあるトンネル建設現場の地質調査に適用し、その結果と現場で採取したボーリングデータとを比較した。当該現場における解析領域は5.1に述べたものと同じである。結果をFig.14, 断面図(z 軸方向-4.5m, 0m, 4.5m地点)をFig.15に示す。未知量推定領域の手前右側面の約5~20m付近から中央面約13~25mの位置まで比抵抗逆数の高い層が連続的に分布していることが確認できる。一般に比抵抗逆数が大きいほど粘土状の地質となるため、この層は粘土状層であると考えられる。一方、当該現場のボーリング柱状図(Fig.16)では、右側ボーリングの約25~30m地点、および中央ボーリングの約35~40m地点に粘土層(橙色)が存在している。推定結果と照合すると、粘土層の位置は完全に一致してはいないものの、当該領域の右側から中央深部にかけて粘土層が斜めに分布している傾向は一致している。以上より、ボーリング調査で得られた線状の地質情報と、本推定手法による三次元的な地質分布とを統合し、互いに補完することで、位置と空間分布の様子が推定可能と考えられ、本工法の有用性が確認できる。

6. おわりに

本研究では、水平ボーリング孔を利用したトンネル切羽前方の三次元的な比抵抗トモグラフィ探査法の構築を試みた。また、未知量推定には有限要素モデルを使用し、拡張カルマンフィルタによって推定を行った。切羽前方をモデル化し、

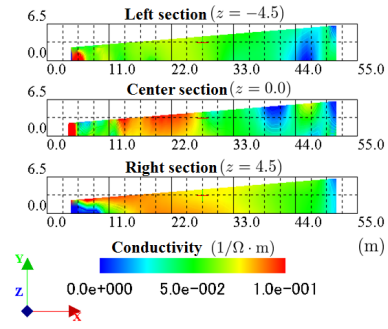


Fig. 15 Evaluated conductivity on three cross sections (in-situ investigation)

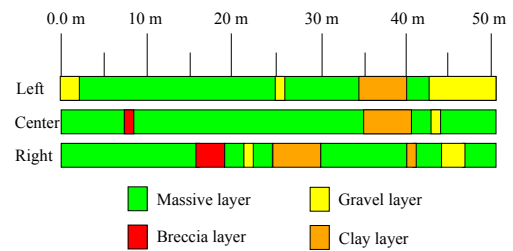


Fig. 16 Boring log

境界の設定方法について検討した結果、金属ロッドの影響は無視できる一方、トンネル切羽を含む面の境界値設定の影響は無視し得ないことがわかった。解析例では比抵抗値を概ね推定することができ、本手法の妥当性を確認することができた。さらに、現場計測への本手法の適用を試みた。その結果、ボーリング調査と本推定とを統合することで、地質分布の位置と三次元構造とを推定可能であることがわかった。

参考文献

- (1) 財団法人物理探査学会: 物理探査適用のてびき, (2008), 財団法人物理探査学会.
- (2) 保坂雅夫, 小池豊: 地質調査ボーリング-その歴史と最近の技術の動向-, 地盤工学会, **41**(1993), No.9, pp.13-18.
- (3) 保岡哲治, 三木茂, 河原弘幸, 北村晴夫, 藤本睦, 徳舛幸隆, 進士正人, 中川浩二: トンネル事前調査における水平ボーリングの実態と坑口調査に関する検討, 日本応用地質学会, **44**(2003), No.3, pp.188-196.
- (4) 椎谷成孝, 佐々木丈, 阿部和久, 木山隆二郎, 倉岡研一, 今村大介: 水平ボーリングによるトンネル切羽前方の電気探査方法の開発について, 土木学会関東支部新潟会研究調査発表会, **33**(2015), pp.224-227.
- (5) Nguyen, L.T., Maria Datcheva, Tamara Nestorovic: Identification of a fault zone ahead of the tunnel excavation face using the extended Kalman filter, Mechanics Research Communications, **53**(2013), pp.47-52.
- (6) 西山清, 中野道雄: パソコンで解くカルマンフィルタ (1993), 丸善.
- (7) 樋口知之: データ同化入門, (2011), 朝倉書店.