

拡張カルマンフィルタを用いた トンネル切羽前方の三次元電気探査

新潟大学大学院自然科学研究科	学生員	佐々木 丈
新潟大学工学部	正会員	阿部 和久
(株) 福田組	正会員	椎谷 成孝
鉦研工業(株)	正会員	今村 大介
新潟大学工学部	正会員	紅露 一寛

1. はじめに

ボーリング調査法と電気探査比抵抗法を組み合わせた比抵抗トモグラフィー探査法は、これらを別個に実施した場合と比較して効率的に地山を調査することが可能である。これまで著者らは、トンネル掘削と並行して行える比抵抗トモグラフィー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¹⁾。しかし、正則化項の設定に結果が大きく依存すること、人工境界の影響を低減するために解析対象領域が大きくなり、計算負荷が増すことが問題となっていた。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を行うために拡張カルマンフィルタを導入し、さらに、推定領域近傍に無限領域と等価な Dirichlet 境界を設定することで計算負荷の軽減を実現し、三次元的な地質構造推定手法の構築を試みる。また、本調査手法を鳥取県内の道路トンネル工事の地質調査に適用した結果について報告する。

2. トンネル切羽前方の電気探査方法

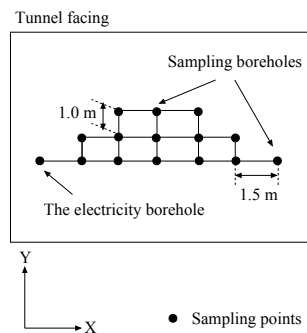


図1 切羽面電極位置

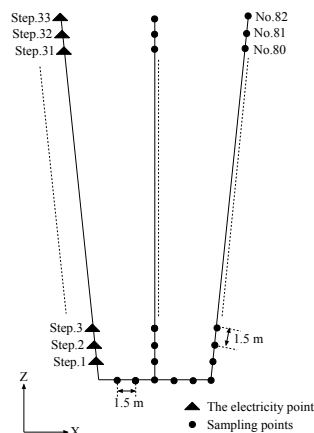


図2 ボーリング孔内電極位置

三次元的な推定を目的として3本のボーリング孔を図1、図2のように設定する。具体的な手順は以下の通りである。

(1) 固定電極の設置(中央、右部ボーリング削孔)

- 1) 固定電極を設置するボーリング削孔
- 2) 孔内に固定電極を設置
- 3) 1), 2)を中央、右部ボーリングで実施

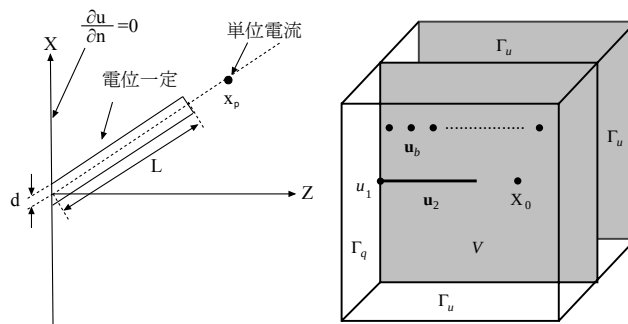


図3 境界条件の設定

図4 解析対象領域

(2) 移動電極の設置と電位の測定(左部ボーリング削孔)

- 4) ロッド1本分(1.5m)打撃削孔
- 5) 移動電極を先端へ送り、地山に接触させる
- 6) 移動電極と固定電極の間の電圧・電流を測定
- 7) 移動電極をワイヤラインで回収
- 8) 4)~7)を予定深度まで繰り返す

3. 比抵抗分布の同定手法

(1) 境界条件の設定方法

本工法では導電体である金属ロッドを使用する。したがって、一様半無現場の理論解が適用できず、導電体存在下での解を導出して境界節点値を設定する必要がある。図3に示すような正のZ方向に半無限な均質場を考える。長さL、半径dの円筒状の導電体が存在し、その軸上に単位電流が入力されている。このとき、導体軸上を区間一定関数で離散化して仮想の電流(ソース密度)を設定し、X軸が自由面となるように鏡像法を適用すると次式を得る。

$$\frac{4\pi}{\rho}u = u^*(\mathbf{X} - X_p) + u^*(\mathbf{X} + X_p) + \sum_j \int_{l_j} u^*(\mathbf{X} - \xi) d\xi \quad a_j \quad (1)$$

ここで、 u は任意節点の電位、 ρ は比抵抗、 X_p は電流入力点、 $\mathbf{X}$ は任意の節点、 a_j はj番要素のソース密度、 $u^* = 1/|\mathbf{X} - \xi|$ である。測定点の電位と式(1)から得られる電位との誤差が最小となる様に、各測定回数毎に見掛け比抵抗値を求めておく。その下で、式(1)より図4の人工境界 Γ_u での電位を求め、これを境界節点値に設定する。

Key Words: トンネル, 電気探査, 有限要素法, カルマンフィルタ

連絡先: 950-2181 新潟市西区五十嵐二の町 8050 番地 TEL 025 (262) 7028 FAX 025 (262) 6775

(2) 支配方程式と求解方程式

以上の準備の下、図4に示すような三次元場での比抵抗値の分布同定問題を考える。支配方程式と境界条件は次式により与えられる。

$$\begin{aligned} \nabla(k\nabla u) &= -Q\delta(X - X_0) \quad \text{in } V \\ \mathbf{u}_2 &= u_1 \mathbf{1} \quad (\mathbf{1} = \{1 \ 1 \cdots 1\}^T) \\ q_1 &= 0 \\ \mathbf{u}_a &= \bar{\mathbf{u}}_a \quad \text{on } \Gamma_u \\ q &:= \frac{\partial u}{\partial n} = 0 \quad \text{on } \Gamma_q \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 k は比抵抗値の逆数、 Q は流束、 $\delta(X - X_0)$ は X_0 に関する Dirac のデルタ関数、 $\mathbf{u}_a$ は境界 Γ_u 上の電位、 $\bar{\mathbf{u}}_a$ は Dirichlet 境界節点値、 $\mathbf{u}_2$ は導電体部の電位であり電位参照節点値 u_1 と同一値となる。 q_1 は当該節点の流束である。式(1)を有限要素で離散化し、境界条件をみたす様に処理することで最終的に次の求解方程式を得る。

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

ここで、 $\mathbf{u}_b$ は $\mathbf{u}_a$, u_1 , $\mathbf{u}_2$ 以外の節点における電位、 $\mathbf{q}_2$ は $\mathbf{u}_2$ に対応する流束、 $\bar{\mathbf{q}}_b$ は $\mathbf{u}_b$ に対応する流束を表す。また、 $\mathbf{1} = \{1 \ 1 \ 1 \cdots 1\}^T$, $\mathbf{I} = \text{diag}\{1 \ 1 \ 1 \cdots 1\}$ である。

(3) 拡張カルマンフィルタによる比抵抗分布の推定法

図1に示した本工法の特徴を踏まえて次のような問題を考える。図4における $\mathbf{X}_0$ の位置を S 段階更新して測定を行う。第 k ステップ目までの測定データから推定した比抵抗の逆数を $\hat{\mathbf{x}}_k$ とおき、第 $k+1$ ステップの測定に対する順解析を $\hat{\mathbf{x}}_k$ に基づいて行うものとして次式を設定する。

$$A(t_{k+1}; \hat{\mathbf{x}}_k) \{u_{k+1}\} = \{b_{k+1}\} \quad (4)$$

ここで $A(t_{k+1}; \hat{\mathbf{x}}_k)$ は比抵抗分布を $\hat{\mathbf{x}}_k$ で設定し、 $\mathbf{X}_0$ を第 $k+1$ ステップ時のもので設定した時における式(3)の係数行列である。 $\{u_{k+1}\}$, $\{b_{k+1}\}$ はその時の解と右辺ベクトルである。また、第 $k+1$ ステップの推定値を次式で与える。

$$\hat{\mathbf{x}}_{k+1} = \hat{\mathbf{x}}_k + \mathbf{K}_k \{y_{k+1} - h_{k+1}\} \quad (5)$$

ここで、 y_{k+1} は第 $k+1$ ステップにおける測定値、 h_{k+1} は式(3)を解いて得られる u_{k+1} から抽出した対応するベクトルである。また、 $\mathbf{K}_k$ はカルマンゲインである。

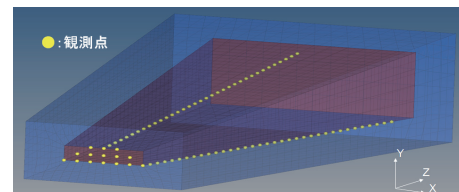


図5 有限要素モデル

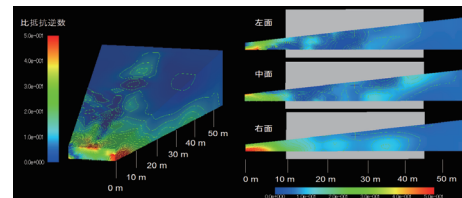


図6 解析結果

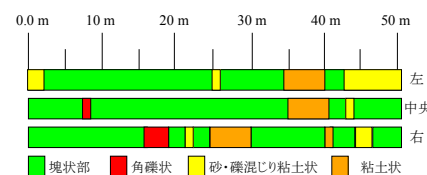


図7 ボーリングデータ

4. 解析例

(1) 解析条件

移動電極（構造変化部分）は1.5mの延伸を33回繰り返す。その都度図1および図2の82箇所電位を測定する。この条件を反映した有限要素モデルを図5に示す。なお、黄点が電位測定点であり、推定対象領域から1mだけ離れて境界を設定し、カルマンフィルタの修正回数は100回とした。

(2) 解析結果

解析の結果を図6に示す。右部ボーリング25m近傍、中央ボーリング40m近傍で比抵抗逆数が大きくなっており、図7に示すボーリング調査において当該箇所が粘土状層であったことと符合している。一方、探査領域深部では比抵抗逆数の変化に乏しく一致していない。これは、電位測定データが探査深度の増加にしたがって少なくなること起因していると考えられる。また切羽面近傍での不一致は、切羽面後方の存在がモデル化されておらず、その影響によるものと考えられる。

5. おわりに

本研究では、移動電極を用いた三次元的な比抵抗トモグラフィ探査法の構築を試みた。未知量同定には有限要素モデルを用い、拡張カルマンフィルタによって推定を行った。また、人工境界にDirichlet条件を設定することにより解析領域の縮小を図り、計算負荷を低減した。

参考文献

- 1) 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, Vol.33, pp.224-227, 2015.