

トンネル切羽前方の電気探査解析

新潟大学大学院自然科学研究科	学生員	佐々木 丈
新潟大学工学部建設学科	正会員	阿部 和久
(株) 福田組	正会員	椎谷 成孝
(株) 福田組	正会員	桜沢 雅志
新潟大学大学院自然科学研究科	正会員	紅露 一寛

1. はじめに

電気探査法は、古くから利用されている物理探査法であり、土木建設分野において多く適用されているのが比抵抗法である。比抵抗法は、人工的に外部から地盤に電流を流し、このとき発生した電位を測定することで地盤の比抵抗を求める探査法であり、比抵抗分布から地質構造や地盤状態を推定する。一方、ボーリング調査法は、地盤のボーリングコアの採取によってトンネル切羽前方の地層分布を直接確認する方法であり、このうちパーカッションワイヤラインサンプリング工法は短時間でコアを採取できるボーリング工法である。これらの調査法を組み合わせた比抵抗トモグラフィ探査法は、各探査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。本研究では、ボーリング調査法と比抵抗トモグラフィ探査法を組み合わせたトンネル切羽面で行う探査手法の構築を目的に、比抵抗分布の具体的推定法を構成し、その設定条件について検討する。

2. トンネル切羽前方の電気探査方法

調査には2本のボーリング孔を用いる。探査手順の概略を以下に示す(図1)¹⁾。

(1) 1本目のボーリング掘削と固定電極の設置

- 1) 固定電極を設置するボーリング孔を削孔
- 2) インナーロッド内部に固定電極を挿入
- 3) 固定電極を残してインナーロッドを引き抜く

(2) 2本目のボーリング掘削と電位の測定

- 4) ロッド1本分(1.5m)打撃削孔
- 5) サンプラーを回収し、コアを採取
- 6) インナーロッドを引き抜き、手前に戻す
- 7) 移動電極を先端へ送り、地山に接触させる
- 8) 移動電極と固定電極の間の電圧・電流を測定
- 9) 移動電極をワイヤラインで回収
- 10) インナーロッドを先端まで押し込む
- 11) サンプラーを先端まで送って設置
- 12) 4) ~ 11) を予定深度まで繰り返す

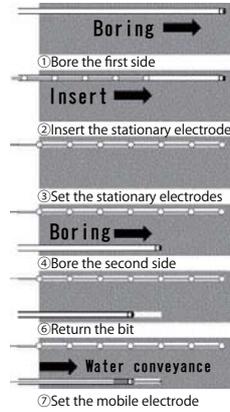


図1 探査手順

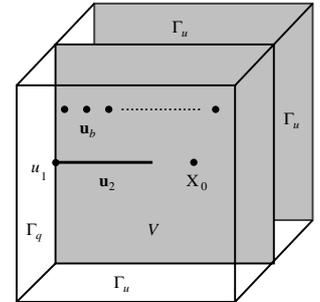


図2 解析対象領域

3. 比抵抗分布の同定手法

(1) 支配方程式と求解方程式

本研究では、図2に示すような三次元場での比抵抗値の分布同定問題を対象とする。支配方程式と境界条件は次式により与えられる。

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

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 は遠方境界領域 Γ_u 上の電位、 \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、境界条件をみだす様に処理することで最終的に次の求解方程式を得る。

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

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、 $\mathbf{1} = \{1 \ 1 \ 1 \dots 1\}^T$ 、 $\mathbf{I} = \text{diag}\{1 \ 1 \ 1 \dots 1\}$ である。

Key Words: トンネル, 電気探査, 比抵抗法, 有限要素法, 正則化

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) 7021

(2) 比抵抗分布の推定法

領域 V に n 個の観測点がおかれており、測定値 $\bar{u}_1 \sim \bar{u}_n$ が得られているとする。このとき、 V 内の部分領域毎の k の値 $k_1 \sim k_m$ を同定する問題を考える。目的関数 J を次式により設定する。

$$J = \sum_i^n (u_i - \bar{u}_i)^2 + [\lambda]^T \{K\mathbf{u} - \mathbf{Q}\} + g\{\mathbf{k}\} \quad (3)$$

ここで、 $\{\lambda\}$ は式 (2) の有限要素方程式に関する Lagrange 未定乗数ベクトル、 g は k の値 $k_1 \sim k_m$ に関する制約条件 (正則化項) である。なお、後述の解析例において正則化項は、隣接部分領域間の変化率 (勾配) を小さく抑える平坦化拘束と、曲率 (勾配の変化) を小さくする平滑化拘束の二つの正則化法を検討した末、平坦化拘束を用いる。また、本研究では式 (3) に随伴変数法を適用して感度解析を行う。逆解析における未知量修正過程には共役勾配法を用いた。

4. 解析例

(1) 解析条件

解析領域を図 3 に示す。固定電極 (電位観測点)、移動電極 (構造変化部) の全長は $14h$ ($h = 1.5m$) である。移動電極 (構造変化部) は $1h$ の長さの延伸を 15 回繰り返す。構造の変化の都度、移動電極先端部に単位電流 1.0 を入力し、固定電極各点で電位測定を行う。図 3 に示した同定領域を対象に逆解析を行った。当該領域における比抵抗逆数分布の真値を図 4 に示す。

(2) 解析結果

解析の際に無限遠方場での電位をゼロと仮定していることを考慮する必要がある。実際の解析では有限領域となるため、領域サイズが電位分布に及ぼす影響を検討した。領域サイズと 4 つの代表点における電位との関係を図 5 に示す。領域の幅が $54h$ ほどでポテンシャルの変化が落ち着き出している。したがって、以下の解析では解析領域の広さを $54h \times 48h \times 38h$ ($h = 1.5m$) と設定する (図 3)。また、一般に地層分布は探査対象領域の外側にも広がっていることから、電極で囲まれている領域の外側における未知量のとりに得べき範囲について検討した。逆解析ステップ数ごとの電位の残差二乗和 (式 (3) の右辺第一項) の推移を図 6 に示す。電極外側 2 要素分、4 要素分を未知量として追加した場合の最終的な残差二乗和がおおよそ等しくなっている。探査対象領域外部の地質構造が、解析結果に影響を及ぼすことを裏付けている。また、外側 2 要素までを未知量とすれば、本問題については十分であることがわかる。これらの結果を踏まえて得られた比抵抗逆数の同定結果を図 7 に示す。高比抵抗層の同定がある程度可能なことが確認でき

た。一方、理由は定かではないが、切羽面近傍の同定精度が低下している。

(3) 現場計測に対する適用例

本研究で構成した解析手法を、長崎県平尾トンネルの現場計測データに適用して得られた結果を図 8 に示す。得られた結果を見る限り、当該現場については概ね一般的な地質構造となっている様子が伺える。

5. おわりに

本研究では、移動電極を用いた比抵抗トモグラフィー探査手法の構築を試みた。未知量同定には有限要素モデルを用い、感度解析の効率化を図るために随伴変数法を採用した。これにより、感度解析における計算量は差分法による評価法よりも大幅に削減できる。また、解析対象領域の取りうるべき範囲等が結果に及ぼす影響を検討した。

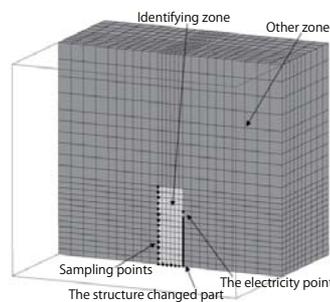


図 3 領域サイズの検討

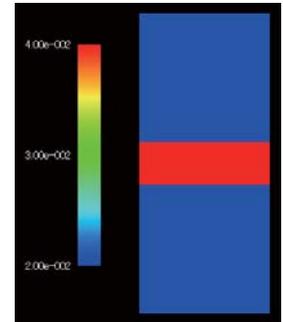


図 4 解析対象領域

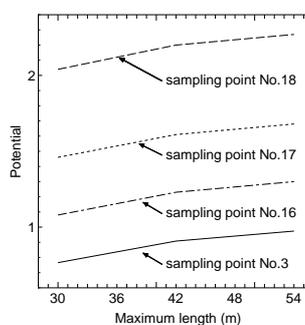


図 5 解析条件

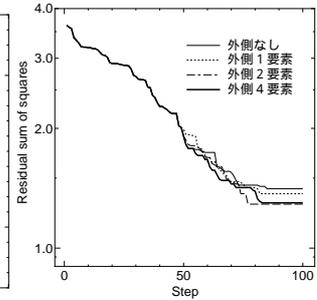


図 6 残差二乗和

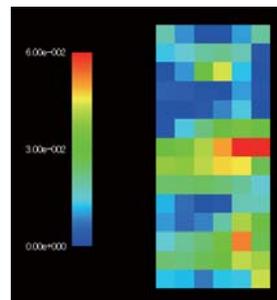


図 7 解析結果

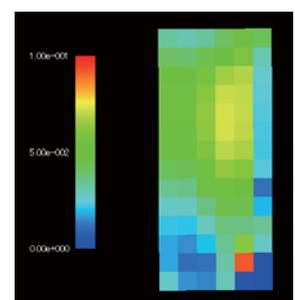


図 8 平尾トンネル

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.