

トンネル切羽前方における三次元比抵抗推定法の改善

新潟大学大学院自然科学研究科

学生員 竹内 新

新潟大学工学部社会基盤工学プログラム

正会員 阿部 和久

株式会社福田組

正会員 椎谷 成孝

新潟大学工学部社会基盤工学プログラム

正会員 紅露 一寛

1. はじめに

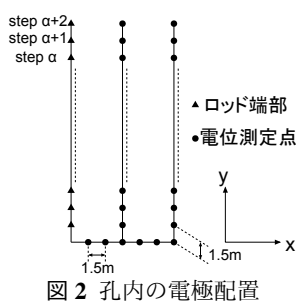
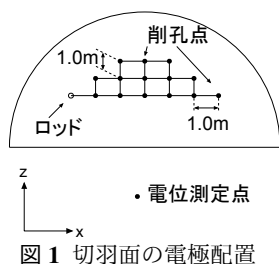
トンネル工事をはじめとする地下工事では、突発的な出水や断層帯の存在に起因する崩壊等の施工障害が発生する恐れがある。安全性の確保や工期短縮のために、事前地質調査等に基づいてトンネルの支保構造や工法等を検討することが重要である。

本研究室では、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¹⁾。文献¹⁾では拡張カルマンフィルタの援用により比抵抗値を概ね推定することができたが、未知量推定の収束性が緩慢で計算に時間を要していた。そこで本研究では、推定精度の向上と計算時間の短縮を目的に Newton 法に基づく手法の構築を試みる。

2. トンネル切羽前方探査法の概要

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図 1, 2 のように設定する。固定電極を設置する中央と右部ボーリング孔を削孔し、削孔終了後に中央と右部に固定電極を 1.5 m 間隔で挿入する。また、切羽には固定電極を z 軸方向 1.0 m, x 軸方向 1.5 m 間隔に設置する。左部ボーリング孔はロッド一本分 (1.5m) を打撃削孔して移動電極を孔の先端に送り、先端電極を地山に接触させることによって固定電極の電圧、電流を測定する。以上により得た電位データを用いて比抵抗逆数の推定を行う。

トンネル切羽面



3. 比抵抗逆数の推定法

電気探査を 1~ M ステップまで実施する場合について考える。そのとき、第 α ステップの電位に関する有限要素方程式は次式で与えられる。

$$[A^{(\alpha)}]\{u^{(\alpha)}\} = \{b^{(\alpha)}\}, \quad (\alpha = 1, \dots, M) \quad (1)$$

ここで係数行列 $[A^{(\alpha)}]$ は未知量 (比抵抗逆数) $\{x\}$ の陽な関数で与えられ、 $\{u^{(\alpha)}\}$, $\{b^{(\alpha)}\}$ は節点電位と電流入力に関する既知ベクトルである。それまでの掘削より事前情報 $\{x\}$ と、その期待値 $\{\tilde{x}\}$ が与えられているものとする。

また、測定電位を $\{y^{(\alpha)}\}$ とし、それに対する電位の正解値を $\{h^{(\alpha)}\} = [B]\{u^{(\alpha)}\}$ で与えるものとする。測定ノイズを $\{\epsilon^{(\alpha)}\}$ とすると $\{y^{(\alpha)}\} = \{h^{(\alpha)}\} + \{\epsilon^{(\alpha)}\}$ となる。 $\{\epsilon^{(\alpha)}\}$ は期待値 0、標準偏差 σ_ϵ のホワイトノイズとする。Bayes の定理から得られる $\{x\}$ の事後確率分布より、目的関数を次式で定義する。

$$J = \frac{1}{2}[\mathbf{x} - \tilde{\mathbf{x}}]^T [\Phi] [\mathbf{x} - \tilde{\mathbf{x}}] + \frac{1}{2\sigma_\epsilon^2} \sum_{\alpha} \|\mathbf{y}^\alpha - \mathbf{h}^\alpha\|^2 + \sum_{\alpha} [\lambda^\alpha]^T [A^{(\alpha)} \mathbf{u}^{(\alpha)} - \mathbf{b}^{(\alpha)}] \quad (2)$$

ここで右辺第 3 項目は随伴方程式、 $\{\lambda\}$ は未定乗数ベクトルである。 $\{x\}$ の事後確率分布の最大値は J を最小にする $\{x\}$ によって求められ、それによって比抵抗逆数を推定する。なお、目的関数の最小値探索には Newton 法を適用する。

事前分布の精度行列 $[\Phi]$ および σ_ϵ^2 は超パラメータとして扱い、EM アルゴリズムに基づき修正する²⁾。式 (2) より Newton 法を用いた未知量の修正と超パラメータの修正計算を順に反復する。本解析における超パラメータ Φ, σ_ϵ^2 の修正値は次式で与えられる。

$$\Phi = [\Gamma - \frac{\Gamma\{\bar{x} - \tilde{x}\}[\bar{x} - \tilde{x}]^T \Gamma}{1 + [\bar{x} - \tilde{x}]^T \Gamma [\bar{x} - \tilde{x}]}] \quad (3)$$

$$\sigma_\epsilon^2 = \frac{1}{nM} \sum_{\alpha} E(\|\mathbf{y}^\alpha - \mathbf{h}^\alpha\|^2) \quad (4)$$

ここで Γ は J の Hesse 行列、 n はの観測点数である。

Key Words: Newton Method, EM Algorithm, 3D Tomography

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

4. 解析例

(1) 解析条件

解析対象の問題を図3に示す。当該領域を6069節点、6面体要素5120で離散化した。

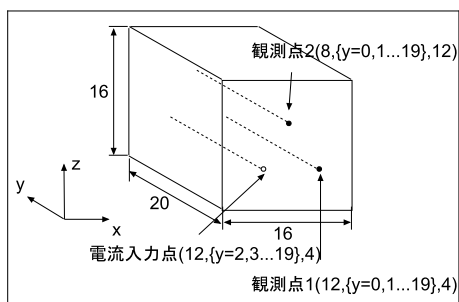


図3 解析モデル

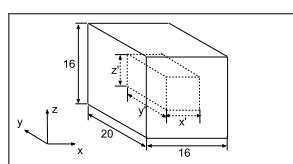


図4 未知領域の設定

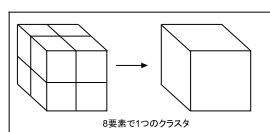


図5 未知比抵抗逆数のクラスター化

未知領域における比抵抗逆数の初期推定値を1.5とし、それ以外の領域でのそれを1.0と設定した。また、入力は単位電流で与えた。その下で行った順解析結果に標準偏差 1.0×10^{-4} のホワイトノイズを付加して観測データ $\{y\}$ を作成した。

前面はNeumann条件、それ以外の境界はDirichlet条件とした。未知な比抵抗逆数を有する領域は図4の様に (x', y', z') の部分領域に設定した。以降に示す解析では、以下4ケースの未知領域形状について検討した。また、未知量は8要素毎に同一値で与えた(図5)。

case1 比抵抗逆数:領域内2, 領域外1

$$\{x':6-10, y':6-14, z':4-12\}$$

case2 比抵抗逆数:領域内2, 領域外1

$$\{x':4-12, y':6-14, z':4-8\}$$

case3 比抵抗逆数:領域内2, 領域外1

$$\{x':4-12, y':8-12, z':4-12\}$$

case3' 比抵抗逆数:領域内1, 領域外2

$$\{x':4-12, y':8-12, z':4-12\}$$

(2) 解析結果

各ケースに対する推定結果を図6~9に示す。なお、いずれのケースも3~4ステップで最小解を得ることができた。

case1 は yz 平面内に未知領域が分布するケースである。ロッドから観測点1, 観測点2までの2つの直線上に比抵抗逆数が高い領域が分布しており、双方の観測データによって当該領域を検出できた。

case2 ではロッドから観測点2の直線上に未知領域が存在せず、そのため推定に有効なデータ量が比較的少なく、そ

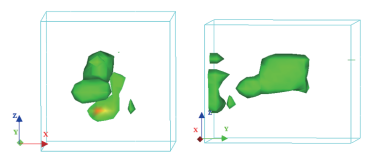


図6 case1 の計算結果

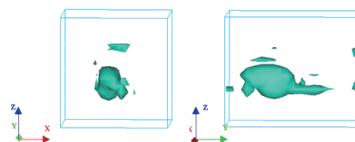


図7 case2 の計算結果

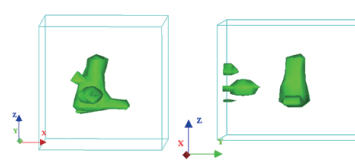


図8 case3 の計算結果

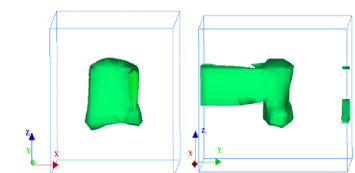


図9 case3' の計算結果

の分感度が低下するため、十分な精度が得られなかったものと考えられる。

case3 のような xz 平面内に未知領域が分布する場合、電流入力点と観測点1, 2をつなぐ直線上に沿って、比抵抗逆数が高い領域が検出されており、L字型のような推定結果を得た。また case3' のように内部の比抵抗逆数が低い領域でも、双方の観測点による解析から、比較的良好な解析結果が得られた。

5. おわりに

EM アルゴリズムと Newton 法を用いた比抵抗逆数の三次元分布推定を試みた。電流入力ロッドと観測用電極の本数が3本と限られるため、未知量の空間分布のパターンによっては検出が難しいものの、数回の反復で最小解に到達でき、計算負荷を軽減することができた。

参考文献

- 1) 佐々木丈, 阿部和久, 椎谷成孝, 今村大介, 紅露一寛: 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, 計算数理論文集, 17, 71-76, 2017.
- 2) 関原健介: ベイズ信号処理, 共立出版, 2015.