

三次元電気探査法に基づくトンネル切羽前方地山の推定

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

トンネル掘削の際に、切羽前方域の地山構造を事前に把握することは、施工の安全性や経済性確保などの面で重要である。また、その構造を三次元的に把握するためには、従来の方法であるボーリング調査法に加え、それを補完する新たな手法の導入が必要となる。

そこで本研究室では、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⁾。

本研究では、文献¹⁾で構成した拡張カルマンフィルタを用いた推定法に替わり、勾配法に基づいた非線形推定法を適用することにより、計算負荷が小さく、さらに安定且つ速やかな収束性を確保し得る手法を構築した²⁾。この手法を適用し、実際の現場の地山の推定を試みた。

2. トンネル切羽前方探査法の概要¹⁾

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。まず、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。続いて当該ボーリング孔に、固定電極を奥行1.5m間隔で挿入する。その後、左部ボーリング孔をロッド一本分(1.5m)打撃削孔する。そ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、固定電極の電圧、電流を測定する。以上の作業を繰り返し、得られた電圧より比抵抗逆数の推定を行う。

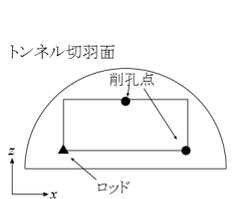


図1 切羽面の電極配置

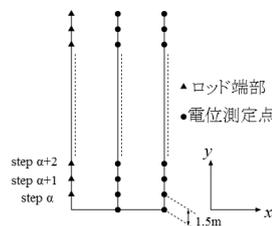


図2 孔内の電極配置

3. 本手法の概要²⁾

上述の操作を1~Mステップまで実施するものとする。そのとき、第 α ステップの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 $[A^\alpha]$ は有限要素の未知比抵抗逆数値 $\{x\}$ を含む陽な関数で与えられ、 $\{u^\alpha\}$ 、 $\{b^\alpha\}$ はその時の解と右辺ベクトルである。

次に、測定電位を $\{y^\alpha\}$ とし、それに対する電位の正解値 $\{h^\alpha\}$ 、 $\{x\}$ の事前情報 $\{\tilde{x}\}$ 、共分散行列の逆行列 $[\Phi]$ が与えられた時の事後確率分布の指数部より、目的関数を次式のように定義する。

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

ここで $\{\lambda^\alpha\}$ 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、それにより比抵抗逆数を推定する。式(1)を考慮し、 $\{\lambda^\alpha\}$ に随伴方程式を課すと、式(2)より $\partial J / \partial x_i$ は次式で与えられる。

$$\frac{\partial J}{\partial x_i} = \Phi_{ij}(x_j - \tilde{x}_j) + \sum_{\alpha} \lambda_k^\alpha \frac{\partial A_{kl}^\alpha}{\partial x_i} v_l^\alpha \quad (3)$$

$\{\lambda^\alpha\}$ に随伴方程式を課すことで、感度を求める必要がなくなり、そのための求解計算が不要となる。以上より求めた勾配を用い、修正計算を行って比抵抗逆数、さらには超パラメータを推定する。

4. 現場測定データを用いた解析

(1) 解析条件

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した。その現場条件をモデル化したものを、図3、4に示す。境界条件は、ロッド上を等電位拘束とし、切羽面における半円内には切羽面に対して垂直方向への電流が0であるNeumann条件、それ以外の境界には、電流入力点からの距離に反比例した電位を与えるDirichlet条件を課した。

1.5m掘削するごとにロッドの先端から電流を入力し、電流入力点は計34回行った。また、推定対象領域は図3の Ω_0 で示す六面体の領域である。

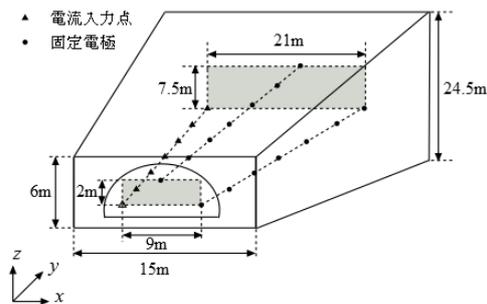


図3 解析モデル 立体図

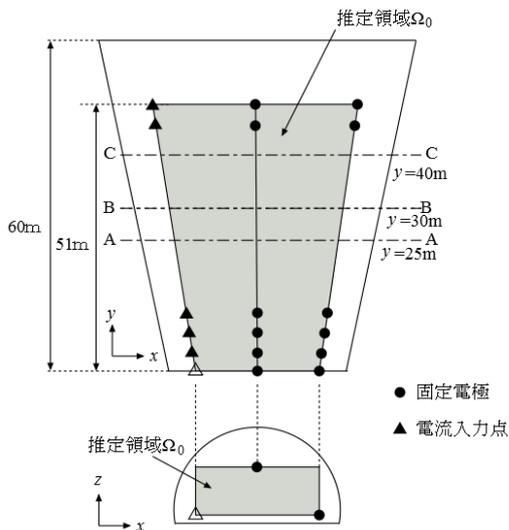


図4 解析モデル x-z 平面図

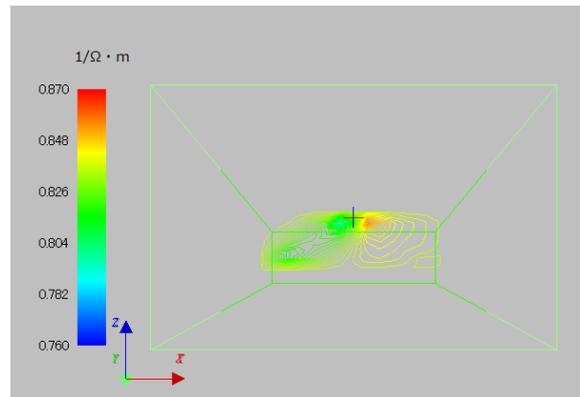


図6 切羽面から 25 m地点 A-A 断面図

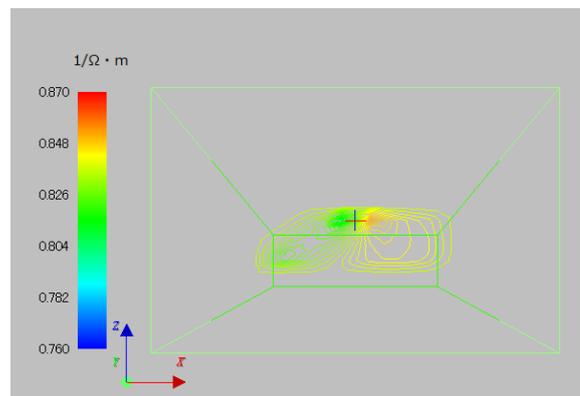


図7 切羽面から 30 m地点 B-B 断面図

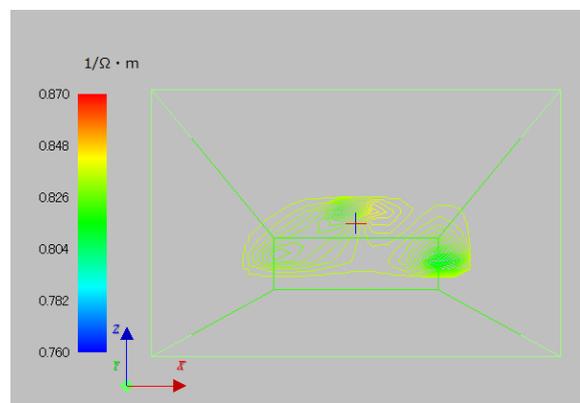


図8 切羽面から 40 m地点 C-C 断面図

(2) 解析結果

現場条件に合わせた解析領域を離散化し、推定を行った。実際のボーリングデータを図5、 $y = 25, 30, 40\text{m}$ における推定結果を図6, 7, 8に示す。 y 座標方向に進むにつれて、推定値の高い領域が右から左へ移動する様子が確認できる。実際のボーリングデータと照合すると、完全には一致していないものの、一般に比抵抗逆数の高い粘土状の地質が同様の位置に分布していることがわかる。以上より、本推定手法による推定結果とボーリングデータとを組み合わせることで、地質分布の三次元的な推定が可能であると考えられる。また、今回の解析における収束までのステップ数は4ステップ、計算時間は約30分となり、先行研究¹⁾と比較すると大幅に計算時間を短縮することができた。

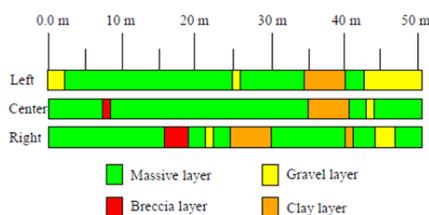


図5 ボーリングデータ

5. まとめ

本研究では、EM アルゴリズムと勾配法を用いた三次元比抵抗推定を試みた。現場測定に適用した結果、文献¹⁾で構成した手法に比べ、収束までに要する計算時間を大幅に短縮可能であることがわかった。

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) 竹内新, 阿部和久, 椎谷成孝, 紅露一寛: 三次元電気探査法に基づくトンネル切羽前方地山推定手法の改善, 計算数理工学論文集, 19, 43-48, 2019.