

トンネルおよび周辺地山の 3次元数値モデル作成システムの開発

○東北大学工学部 学生会員 阿部功介
東北大学大学院 学生会員 牛田貴士
東北大学大学院 正会員 京谷孝史
東北大学大学院 正会員 寺田賢二郎

1. はじめに

本研究では、地質構造と地中構造物の3次元有限要素モデル作成技術の確立を目的とし、周辺地山の地層平面図と限られた断面図から Kriging 法¹⁾を用いてデータを内挿し、ボクセル状に近似した3次元有限要素モデルを作成する。更に、作成したモデルに均質化法²⁾を用いて解析を行い、実測値と比較・考察する。こうした3次元数値モデルの作成技術はトンネルの合理的な維持管理や設計時の詳細な数値解析に役立つ。

2. 3次元有限要素モデルの作成

本章は、周辺地山の地層平面図と限られた断面図から Kriging 法を用いた、トンネルおよび周辺地山の3次元有限要素モデル作成の手法を述べる。

2.1 地層データの抽出

図-1の様な地層平面図とトンネル周辺の断面図から、物性の近い地層を分類統合する。そして、各地層の座標・厚さ等を入力データとして取っていく。この時、地層の変化が多いところは多めに地層の座標を記録しておく。この入力ポイント数とその分布が増えれば、それだけ信頼性がある内挿の結果が得られる。

2.2 Kriging 法

抽出した地層データをもとに、限られた数のボーリングデータを用いて、Kriging 法によってデータを3次元的に内挿する。

Kriging 法は未測定点の値を推定するために周囲の測定値に加重をする内挿法の一つである。データの加重平均としては次のような一般式で表現される。

$$\hat{Z}(s_0) = \sum_{i=1}^N w_i Z(s_i) \quad (1)$$

ここに、 $Z(s_i)$ は i 番目のサンプル点 s_i における観測データ、 w_i は i 番目のサンプル点 s_i における観測データに対する未知のウェイト、 s_0 は推定値、 N は測定値の数である。すなわち、空間的に分散されたオブジェクトは空間的に関連しているということである。

2.3 ボクセル化

Kriging 法によって内挿された地層境界は図-2に示すような格子状の各交点のポイントデータとして与えられる。まず、何も属性を持たないボクセルを作り、それを一つ一つ積み上げて地山の外形を作成する。図-2のデータから各地層の属性をそれぞれのボクセルに振り分ける。ボクセルの各点(図-3参照)上にある地層境界のポイントデータの平均値とボクセルの重心の座標とを比べて各々のボクセルに属性を与えて地層の3次元有限要素モデルを作って

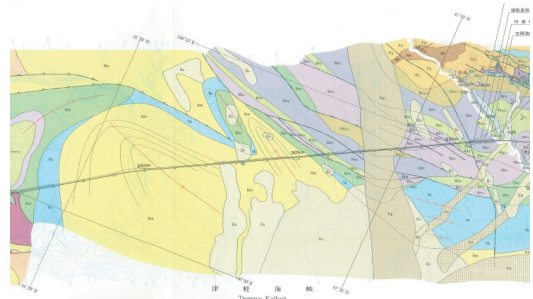


図-1 地層平面図

いく。この手法は前項の Kriging 法の出力データの間隔を変えて、ボクセル一つ一つの大きさを変えることで様々なスケールに対応できる。さらに、この手法はボクセル有限要素法におけるボクセルを立方体と仮定し、それを FEM における六面体要素と等価に扱うことが出来るという事と同じである。また、有限要素は全て同一形状(立方体)であるため、剛性マトリックスは異種材料数のみ用意するだけでよい。

2.4 トンネル周辺のモデル化

本手法は、ボクセル化したトンネル周辺地山に図-4の様に、トンネル部のライニングなどを詳細に作った3次元モデルを入れることが出来る。その詳細なトンネル部の3次元モデルを作るために、図形処理ソフトを用いてトンネルの外形をデータとして取り込み、それをもとにトンネル部をモデル化している。更にこの時に、トンネル周辺地山のモデルとトンネル部の詳細なモデルが接する部分において、節点と同じ箇所に生成されるようにトンネル部のモデルを作った。また、トンネル部の3次元モデルは周期境界条件を満足するように作った。

2.5 均質化法を用いた解析手法

今回は、均質化法を用いることによってトンネル部を均質体とし、ボクセルに近似して扱うことにした。これによって、トンネルを含む地山全体のボクセル法によるモデル化が可能になる。全体の流れとしては、まず、均質化したトンネル部を入れた地層全体図-4を解析し、トンネル部のマクロひずみを求める。そうして求めたマクロひずみを均質化する前のトンネル部のモデルに返すことによってミクロひずみを得る。

3. トンネルへの適用例と結果

本章では2章で作成したトンネルおよび周辺地山のモデルを汎用 FEM ソフトを用い、解析しトンネル上部の荷重変化を想定した解析を行い、その結果と実測値を比較し考察する。

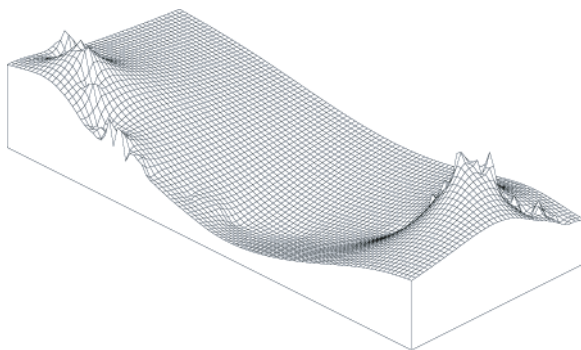


図- 2 格子状となっている地層の座標

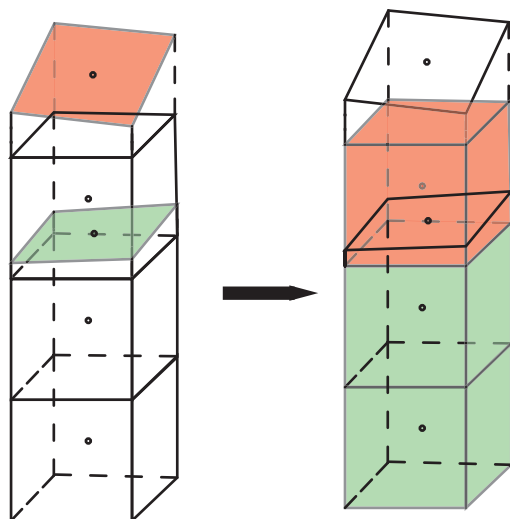


図- 3 ボクセルの属性定義

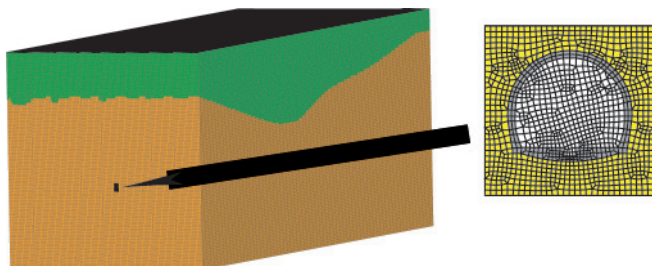


図- 4 トンネル部の均質化

3.1 解析条件

トンネルにかかる荷重変化を想定し、更に実際のトンネルの変位の測定は、応力がかかってある程度変形した状態を初期位置としているのでその初期位置に合わせるため、解析の慣性力は実際の $1/1000$ 、 $1/2000$ 、 $1/3000$ にした。また、トンネルのライニングの Young 率は 10GPa 、Poisson 比は 0.3 を用いて解析を行った。

3.2 結果

図-5、図-6 は解析の結果と実測値（独立行政法人 鉄道建設・運輸施設整備支援機構提供）の比較である（グラフの 1-2 は図-7 の①と②の側線間）。実測値は時間の経過とともに変化しているため、その最大値と最小値を取り、実測値の幅として載せた。

3.3 比較・考察

図-5、図-6 から解析値は実測値の最大値と最小値の幅の中の収まっているという結果が見られる。よって、この

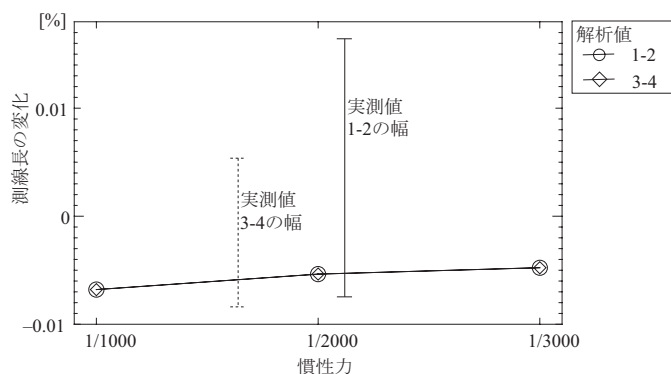


図- 5 解析値と実測値の比較 1

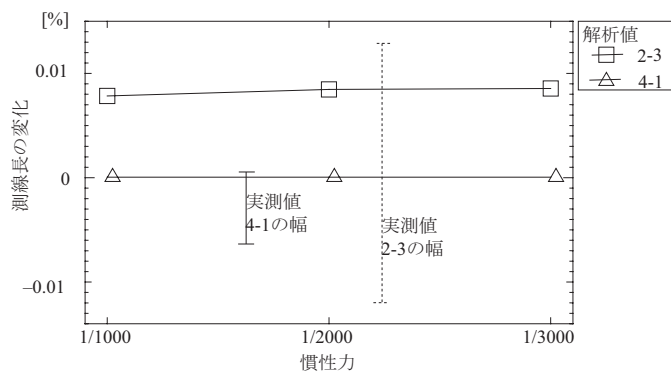


図- 6 解析値と実測値の比較 2

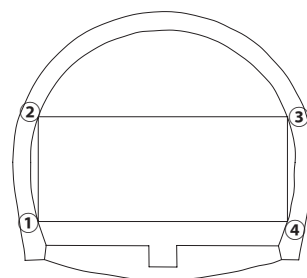


図- 7 トンネル測定位置

トンネルの変形の主な原因は荷重が原因ではないかと思えることが出来る。また、既存のトンネルの維持管理のために逆解析を行い、変形データと解析値を比較して明らかに異なった場合、主な変形の原因は荷重由来以外のものによるかと思えることも出来る。

4. おわりに

本研究では、トンネルおよび周辺地山の地質構造と地中構造物の 3 次元有限要素モデル作成手法を開発し、合理的な維持管理や設計時の詳細な数値解析を可能にした。

更に、均質化法などその他の方法を用いて解析することによって、トンネルの経年劣化による変形の逆解析も行えるような技術を開発した。

参考文献

- 1) Jill McCoy, Kevin Johnston: ArcGIS Spatial Analyst ユーザーズ・ガイド, ESRI, 2001.
- 2) 寺田賢二郎, 菊池昇: 均質化法入門, 丸善, 2003.