

地下構造物の施工中における線形弾性体の地山の挙動のデータ同化解析

清水建設 正会員 ○青野 泰久
 清水建設 正会員 山本 真哉
 清水建設 正会員 櫻井 英行

1. はじめに

山岳トンネルや地下発電所などの地下構造物の施工では、日常的に実施される切羽の観察や変位の計測結果に基づき、設計や施工方法を修正する情報化施工が採用されている。地山の想定外の挙動が発生、予見される場合、数値解析により設計変更が検討されることもあるが、地山の構成モデルやそのパラメータの設定、初期・境界条件の扱いなど、多くの不確実性を扱わなければならない。実際の地山の挙動を適切にモデル化し予測する手法は確立されていないのが実状である。これに対し、著者らは計測結果に基づきモデルを更新し、数値モデルによる予測の信頼性を定量化・向上させるデータ同化に着目し、これを利用した施工時の地下構造物における地山の変位、支保に作用する応力などの予測を行う掘削解析手法の研究を推進している。本稿では手法の概要について説明し、手法の特徴を確認するために実施した数値実験の結果を報告する。

2. データ同化手法を利用した掘削解析

本研究では、掘削解析には市販の有限体積法(FVM)ソフトによる数値モデル用い、次式で表されるアンサンブルベースの逐次型のデータ同化²⁾を採用した。

$$\left(\mathbf{x}_n^{\text{DA}}\right)_i = \left(\mathbf{x}_n^{\text{FVM}}\right)_i + \mathbf{K}_n \left[\mathbf{y}_n + \boldsymbol{\omega}_n - \mathbf{H} \left(\mathbf{x}_n^{\text{FVM}}\right)_i \right] \quad (1)$$

ここで、 \mathbf{x} は節点の変位、要素の応力、地山のヤング率などの状態変数で構成される状態ベクトル、 \mathbf{y} は観測ベクトル、 \mathbf{H} は線形の観測演算子、 $\boldsymbol{\omega}$ は観測ノイズ、 \mathbf{K} はカルマンゲインである。上付きの添え字 FVM, DA は、それぞれデータ同化前の掘削解析の結果(事前分布)、データ同化後の事後分布を表す。下付きの添え字 n, i は、それぞれ施工ステップ、アンサンブルメンバーの番号を表す。アンサンブルベースのデータ同化では式(1)に示すように、観測ベクトル \mathbf{y} とカルマンゲイン \mathbf{K} から事前分布 $\mathbf{x}_n^{\text{FVM}}$ を更新し、事後分布 \mathbf{x}_n^{DA} を得る。その後、 \mathbf{x}_n^{DA} の情報を用いて $n+1$ ステップまでの掘削解析を実施し、 $\mathbf{x}_{n+1}^{\text{FVM}}$ 、 $\mathbf{x}_{n+1}^{\text{DA}}$ を求めることを繰り返すことになる。本研究では、後述するように \mathbf{x}_n^{DA} の用い方に関する二つの方法の検証を行った。

3. 数値実験の概要

図1に示す解析モデルを用いて、線形弾性体を仮定した均質な地山に素掘のトンネルを施工する問題を対象に、模擬観測データを用いた数値実験(以降、同化実験)を行った。同化実験では、まず、正解の条件で行った掘削解析の結果から観測ベクトルを設定する。この観測ベクトルに逐次データ同化させながら正解とは異なる状態変数を初期条件とした掘削解析を進め、十分な精度で正解の状態変数の同定が可能か否かの検証を行う。本報告では、実際のトンネル掘削における計測を想定し、観測値は TD(Tunnel Distance) 0m から 6m ほどのトンネル断面の天端と側壁に設けた観測点における相対変位とし、掘削を 2m 進めるごとに得られる相対変位を用いた。観測誤差は測量機器の仕様から 1.0mm とした。正解の地山のヤング率 E は 50MPa、検証のための E の取りうる範囲は文献3)の統計量に基づき $47.25 \leq E \leq 57.75$ とし、一様乱数により 50 サンプルのアンサンブルを発生させた。

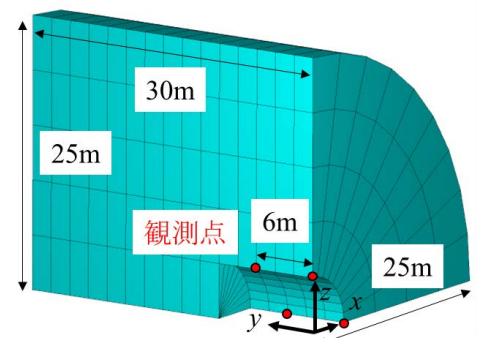


図1 同化実験に使用した解析モデル

キーワード 地下構造物 データ同化 数値実験

連絡先 〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17 清水建設(株) 技術研究所 TEL 090-2731-9485

本同化実験では、表1に示す2種類のデータ同化を試行した。表中、 \mathbf{U} は絶対変位、 $\boldsymbol{\sigma}$ は応力を表す。 \mathbf{f} は施工ステップ n から $n+1$ の状態変数の時間発展を計算する演算子であり、FVMによる掘削解析に対応する。なお、この問題では、 $\boldsymbol{\sigma}_n^{\text{DA}} = \boldsymbol{\sigma}_n^{\text{FVM}}$ となるため、応力はデータ同化の状態ベクトルから外した。

ケース1は $\mathbf{x}_{n+1}^{\text{FVM}}$ を求める際に、直前の更新結果 \mathbf{x}_n^{DA} の情報を利用する方法である。しかし、データ同化では一般に、更新後の状態変数は力学モデルを満足しない。したがって、ケース1では $\mathbf{x}_{n+1}^{\text{FVM}}$ の計算結果の力学的合理性に欠けることになる。これを改善したのがケース2である。ケース2では、 $\mathbf{x}_{n+1}^{\text{FVM}}$ の計算において、直前の更新結果 \mathbf{x}_n^{DA} に含まれるヤング率 E_n^{DA} のみを利用し、最初の掘削ステップ $n=0$ に戻り、データ同化を行うことなく $n+1$ ステップまでの掘削解析 \mathbf{f} を実施する方法である。以降、これらの2ケースの同化実験による検証結果を示す。

4. 結果

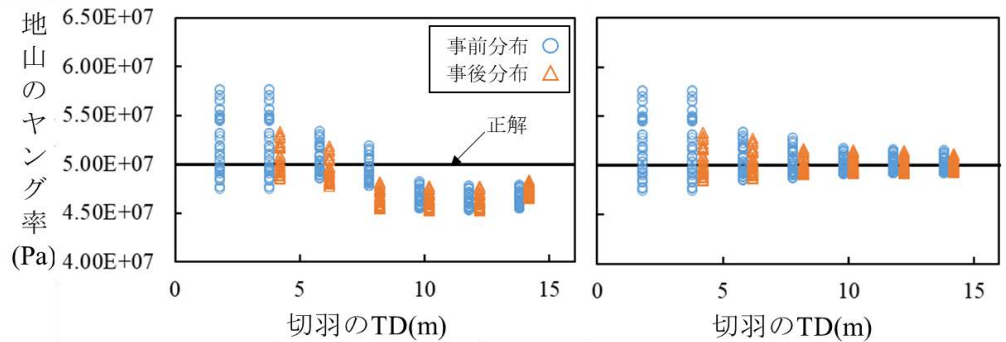
図2にアンサンブルの E の事前分布と事後分布、図3にTD0mの天端の観測点の z 軸方向絶対変位 U_z の事前分布を示す。図3のケース2は、TD14mまで掘削解析を行ったときの事後分布を構成する $E_{n=7}^{\text{DA}}$ を使用して予測した変位である。図2より、ケース2の E の事後分布は正解をまたぐように分布し、正解の値に収束しているが、ケース1では E の事後分布は正解に対し小さい値を推移している。また、図3のケース1の絶対変位の予測結果も正解より大きな負の変位となっている。これは \mathbf{U}_n^{DA} を使用して $n+1$ のステップの掘削解析を行うことで \mathbf{U}_{n+1} を適切に予測できていないこと、すなわちデータ同化に使用する相対変位を適切に予測できていないことが原因であると考えられる。一方、ケース2は E_n^{DA} を用いて最初の掘削ステップ $n=0$ から $n+1$ のステップまでの掘削解析を行うことにより、正解との差が小さい絶対変位の予測結果が得られたことが確認できる。以上より、本同化実験の条件においては、データ同化で得られた地山の物性を用いて、ある掘削段階まで戻り掘削解析をやり直さないと、掘削により生じる変位を適切に予測できないという知見が得られた。

参考文献

- 1)土木学会：山岳トンネルにおける模型実験と数値解析の実務 トンネルライブラリー，pp.119-130，2006。
- 2)Evensen, G.: Sequential data assimilation with a nonlinear quasi-geostrophic model using Monte Carlo methods to forecast error statistics, *Journal of Geophysical Research* 99(5), pp.10143-10162, 1994.
- 3)山口梅太郎：岩石の一軸圧縮強度とヤング率の関係について，*材料*，17巻，181号，pp.902-907，1968。

表1 実験ケース

ケース	1	2
\mathbf{x}_{n+1} の計算方法	$\mathbf{x}_{n+1} = \mathbf{f}(E_n^{\text{DA}}, \mathbf{U}_n^{\text{DA}}, \boldsymbol{\sigma}_n^{\text{FVM}})$	$\mathbf{x}_1 = \mathbf{f}(E_n^{\text{DA}}, \mathbf{U}_0^{\text{FVM}}, \boldsymbol{\sigma}_0^{\text{FVM}})$ \vdots $\mathbf{x}_{n+1} = \mathbf{f}(E_n^{\text{DA}}, \mathbf{U}_n^{\text{FVM}}, \boldsymbol{\sigma}_n^{\text{FVM}})$
施工ステップ $n+1$ まで行う掘削解析の縦断面図		



(a) ケース1 (b) ケース2
図2 ヤング率の事前分布，事後分布

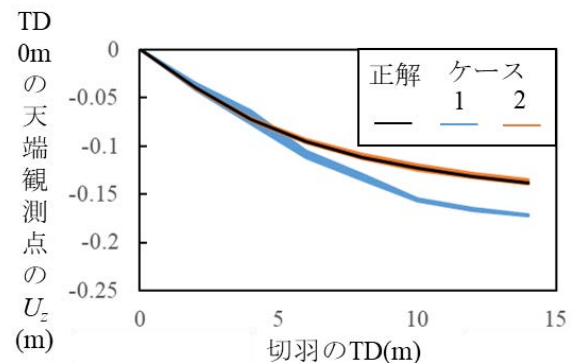


図3 予測結果の変位分布 (50 サンプル分)