

# 地下構造物施工時の地山の変形挙動予測におけるデータ同化活用の 基礎的検討

青野 泰久 山本 真哉 鎌田 浩基 櫻井 英行  
(技術研究所) (技術研究所) (技術研究所) (技術研究所)

## Fundamental Studies on Data Assimilation for Prediction of Ground Deformation Behavior during Construction of Underground Structures

Yasuhisa Aono, Shinya Yamamoto, Hiroki Kamada and Hideyuki Sakurai

山岳トンネルや地下発電所などの施工では、切羽の観察や変位の計測結果に基づき、設計や施工方法を適宜修正する情報化施工が採用されている。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、力学パラメータ、初期・境界条件など、多くの不確実性を扱わなければならない。著者らは計測結果に基づき数値モデルを更新し、予測の信頼性を定量化・向上させるデータ同化手法に着目し、弾性モデルを対象にデータ同化を活用した掘削解析手法について検討を行った。そして、弾塑性モデルを仮定した地山にトンネルを施工する問題にこの手法を適用し、地山の変形挙動の予測性能が向上することを確認した。

The support design and the excavation plan of the underground structure such as mountain tunnels and underground power plants, are updated based on the results of measurements of ground deformation and observations of the tunnel face. Since these design changes are sometimes examined through numerical analysis, it is necessary to consider various uncertainties such as initial and boundary conditions, geological structures, and mechanical properties of rocks. An ensemble-based data assimilation (EBDA) is studied to achieve a highly credible prediction of the ground deformation in the construction cycle. An excavation analysis method using EBDA was presented and applied to the problem of tunneling in the ground assuming elasto-plastic model. Our results showed that the presented method improved the prediction performance of the deformation behavior of the ground.

### 1. はじめに

山岳トンネル、地下発電所等の地下構造物の工事では、実際の地山状況を観察し、掘削にともなう地山の挙動および支保工の効果を計測により確かめながら、当初の設計や施工法を実際の地山状況に適合したものに修正する情報化施工が採用されている。地山の過大な変形、切羽の不安定化など、想定外の現象が発生、また、予見される場合には、設計変更のために数値解析も利用される。しかしながら、地山や支保などのモデル化や物性パラメータの設定には多くの課題があり、実際の地山や支保の挙動を適切に表現することは非常に難しい<sup>1)</sup>。これに対し、施工中に得られる計測データを活用し、解析により地山の物性、未掘削箇所を掘削したときの地山変位、支保応力を予測する取り組みが行われている<sup>2),3)</sup>。これらの研究では、削孔エ

ネルギーから換算した地山の物性を解析モデルに当てはめ、地山の挙動の予測が行われているが、計測データや予測モデルがもつ不確かさは考慮されていない。一方、地山は不均質で力学特性が不明確であることから、著者らは参考文献<sup>4),5)</sup>の取り組みのように、解析、計測などにより得られたデータに基づいた、信頼性が定量化された地山および支保の挙動の予測結果が示されるべきであると考えている。そのためには、①施工中に得られるデータの積極的な活用、②計測データや数値解析に使用するパラメータなどが持つ不確かさ、およびこれらの不確かさが解析結果に及ぼす影響の定量的な把握が重要である。

以上の背景から著者らはデータ同化を組み込んだ掘削解析手法の研究を推進している<sup>5)-15)</sup>。一般に、解析モデルは実現象に対して理想化・簡略化された偏微分方程式、初期・境界条件、構成式などの

数学モデルに基づき構築されているだけでなく、離散化誤差や丸め誤差等も含んでいるため、実現象を完璧に再現することはあり得ない。それに対しデータ同化は、解析モデルのもつ誤差を考慮し、計測データを活用して、解析モデルを修正し、予測性能が向上する技術である。データ同化ではパラメータの不確かさを考慮して数値解析を行うため、予測結果の確率分布が得られる。多種・多様な不確かさを扱わなければならない地下の掘削解析の信頼性を定量化し、向上させることが可能な解析スキームとして、データ同化が有望であると考えた。

以下にこれまでの研究の実施内容と成果を概説する。(i)初期の研究<sup>5)~9)</sup>では、単純な構成則である線形弾性モデルを仮定した地山へ無支保のトンネルを施工する問題を対象に、模擬計測値を同化する数値実験(以下、同化検証)を行い、データ同化の活用により地山の変形挙動の予測性能が向上する手法を示した。(ii)研究の次のステップとして、(i)にて示した手法を複数の力学パラメータを扱う弾塑性体の同化検証に適用した。基礎的な検討という位置付けで実施した岩石の載荷試験を模擬した同化検証にて、岩石の応力-ひずみ関係の予測性能が向上することを確認した<sup>10)~13)</sup>。(iii)その後、弾塑性モデル(ひずみ軟化モデル)を仮定した地山に無支保のトンネルを施工する問題を対象に、(i)にて示した手法を適用し、地山の変形挙動の予測性能が向上することを報告している<sup>14)~15)</sup>。同化検証を行う上で、地山の初期応力の推定、不均質性のモデル化等の検討も重要であると考えられるが、これまでの研究では基礎的な研究という位置付けで、地山の物性のみに着目している。

本稿ではこれまでの研究の成果のうち、データ同化の活用により地山の変形挙動の予測性能が向上するか確認するために行った(i)の線形弾性モデルを仮定した地山に無支保のトンネルを施工する同化検証と、(iii)のひずみ軟化モデルを仮定した地山に無支保のトンネルを施工する同化検証の結果についてまとめ、新たな知見を加えた。

## 2. データ同化と掘削解析

データ同化の手法には様々なものが存在するが、本研究では逐次型かつアンサンブルベースのデータ同化手法である ESTKF (Error Subspace Transform Kalman Filter)<sup>16)</sup>を採用した。ESTKFは ETKF (Ensemble Transform Kalman Filter)<sup>17)</sup>

から派生した手法であり、最初に以下のような状態空間モデルを設定する。

$$\mathbf{x}_n^{\text{FVM}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}_{n-1}, \mathbf{v}_n) \quad (1)$$

$$\mathbf{y}_n = \mathbf{H}\mathbf{x}_n^{\text{FVM}} + \boldsymbol{\omega}_n, \boldsymbol{\omega}_n \sim N(\mathbf{0}, \mathbf{R}) \quad (2)$$

ここで、 $\mathbf{x}$ は節点の変位、要素の応力、地山の物性などの状態変数で構成される状態ベクトル、 $\mathbf{v}$ はシステムノイズ、添え字 FVM、 $n$ はデータ同化前の有限体積法(FVM)による解析結果(事前分布)、載荷ステップを表す。 $\mathbf{f}$ はある載荷ステップ  $n-1$  から  $n$  までの変数の時間発展を表現する演算子であり、本稿では ITASCA 社製のソフトウェア FLAC3D V.9.0 を用いた FVM による掘削解析が対応する。 $\mathbf{y}$ は掘削により計測点に生じた変位で構成されるベクトル(以降、計測値ベクトルとする)、 $\mathbf{H}$ は線形の観測演算子である。また、 $\boldsymbol{\omega}$ は平均  $\mathbf{0}$ 、共分散行列  $\mathbf{R}$ の正規分布に従う観測ノイズである。

計測データに基づく状態変数の更新は、以下の式(3)中の線形変換行列  $\mathbf{T}$ を用いて行う。

$$\mathbf{x}_n^{\text{DA}} = \bar{\mathbf{x}}_n^{\text{FVM}}\mathbf{T}(\mathbf{w} + \mathbf{W}) \quad (3)$$

ただし、

$$T_{ij} = \begin{cases} 1 - \frac{1}{N} \frac{1}{\frac{1}{\sqrt{N}} + 1} & \text{for } i = j, i < N \\ \frac{1}{N} \frac{1}{\frac{1}{\sqrt{N}} + 1} & \text{for } i \neq j, i < N \\ -\frac{1}{\sqrt{N}} & \text{for } i = N \end{cases} \quad (4)$$

$$\mathbf{w} = \mathbf{A}(\mathbf{H}\mathbf{x}_n^{\text{FVM}}\mathbf{T})^T + \mathbf{R}^{-1}(\mathbf{y}_n - \mathbf{H}\mathbf{x}_n^{\text{FVM}}) \quad (5)$$

$$\mathbf{W} = \sqrt{(N-1)}\mathbf{C}\mathbf{T}^T \quad (6)$$

$$\mathbf{A}^{-1} = (N-1)\mathbf{I} + (\mathbf{H}\mathbf{x}_n^{\text{FVM}}\mathbf{T})^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H}\mathbf{x}_n^{\text{FVM}}\mathbf{T} \quad (7)$$

$$\mathbf{C}\mathbf{C}^T = \mathbf{A} \quad (8)$$

ここで、 $\bar{\mathbf{x}}_n^{\text{FVM}}$ は状態ベクトルの平均、 $\mathbf{I}$ は  $N-1$  次の単位行列、 $N$ はアンサンブルのサンプル数である。添え字  $i, j$ はそれぞれアンサンブルメンバーと状態変数のインデックス、DA はデータ同化後の事後分

布を表す。ETKFでは $\mathbf{T}$ を計算する際に逆行列の計算を行う必要があるが、ESTKFでは逆行列の計算が不要となるため、計算コストが比較的小さいという利点がある。逐次データ同化では、式(1)による予測と式(3)によるフィルタリングを繰り返しながら時間発展の計算を進める。すなわち、式(3)で得られた状態ベクトルの事後分布を次のステップの式(1)による予測に用いる。

### 3. 線形弾性モデルによる検討

データ同化の活用により、トンネル施工時の地山の变形挙動の予測性能が向上しうるか検討するため、最も単純な構成則である線形弾性モデルを仮定した地山にトンネルを施工する問題を対象に、単一の地山の力学パラメータ(变形係数  $E$ )を更新する同化検証を行った。この同化検証では、式(1)に対応する  $n+1$  ステップまで行う掘削解析における式(3)の  $\mathbf{x}_n^{DA}$  を構成する状態変数の扱い方を変え、地山の变形挙動の予測性能の比較を行った。

#### 3.1 解析条件

本同化検証では図-1に示す解析メッシュを用いた。基礎的な検討という位置付けのため、素掘のトンネルの施工を模擬した。同化検証では、正解の条件を設定した解析モデル(正解モデル)により計算した結果を計測データと考え、正解と異なる条件の解析モデル(予測モデル)に計測データを逐次データ同化させる。同化検証では真値の同定可能性から、着目する問題に対しデータ同化が正しく機能するか否かの検証を行うことができる。同化検証では、まず、正解の条件で行った掘削解析の結果から計測値ベクトルを設定する。この計測値ベクトルに逐次データ同化をさせながら予測モデルの掘削解析を進め、地山の变形挙動の予測性能が向上す

るか検証を行う。掘削解析に要する時間の短縮のため、TD(Tunnel Distance) 0m から 6m ごとのトンネル断面の天端と側壁に変位の計測点を設けた。実際のトンネル掘削における計測を想定し、掘削を 2m 進めるごとに得られる、前のステップの変位に対する相対変位をデータ同化に用いた。式(2)の  $\mathbf{R}$  に対応する計測誤差は測量機器の仕様から 1.0mm とし、共分散は 0 とした。正解の地山の  $E$  は 50MPa、初期の予測モデルが取りうる  $E$  の範囲は文献<sup>18)</sup>の統計量に基づき  $47.25 \leq E \leq 57.75$ MPa 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。本同化検証では、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、 $\sigma$  は応力を表す。ケース 1-1 は  $\mathbf{x}_{n+1}^{FVM}$  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する保証がない。したがって、ケース 1-1 では  $\mathbf{x}_{n+1}^{FVM}$  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 1-2 である。ケース 1-2 では、 $\mathbf{x}_{n+1}^{FVM}$  の計算において、直前の更新結果  $\mathbf{x}_n^{DA}$  に含まれる变形係数  $E_n^{DA}$  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  $n+1$  ステップまで式(1)の掘削解析  $\mathbf{f}$  を実施する方法である。

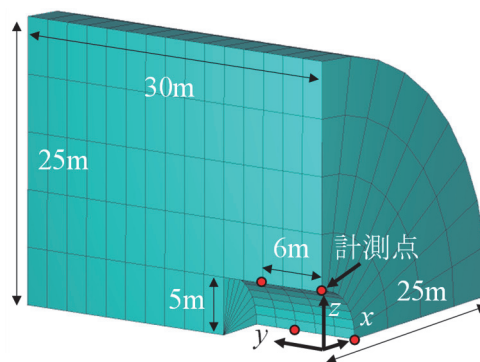


図-1 線形弾性モデルを仮定した地山の解析メッシュ

表-1 同化検証のケース

ケース	1-1	1-2
$\mathbf{x}_{n+1}^{FVM}$ の計算方法	$\mathbf{x}_{n+1}^{FVM} = \mathbf{f}(E_n^{DA} \quad \mathbf{U}_n^{DA} \quad \sigma_n^{DA})$	$\mathbf{x}_1^{FVM} = \mathbf{f}(E_n^{DA} \quad \mathbf{U}_0^{FVM} \quad \sigma_0^{FVM})$ $\vdots$ $\mathbf{x}_{n+1}^{FVM} = \mathbf{f}(E_n^{DA} \quad \mathbf{U}_n^{FVM} \quad \sigma_n^{FVM})$
施工ステップ $n+1$ まで行う掘削解析における解析メッシュの縦断図		

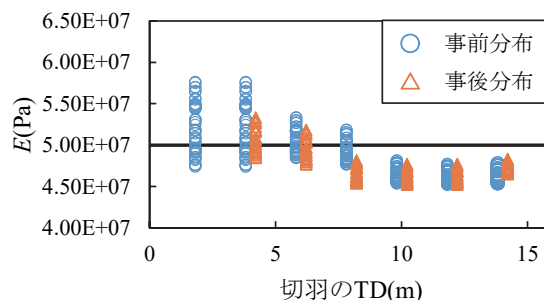
### 3.2 結果

図-2 に同化前後の地山の物性と切羽の位置の関係、図-3 に TD0m の天端の沈下の絶対量と切羽の位置の関係を示す。図-2 の黒線は正解の物性値、青、橙のプロットは各ステップの掘削解析に使用した物性値(事前分布)、更新後の物性値(事後分布)である。図-3 の黒、青、橙の線は、正解の条件、ケース 1-1 のアンサンブル、ケース 1-2 の同化を 6 回実施後のアンサンブルにより計算した沈下量である。図-2 より、ケース 1-2 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 1-1 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 1-1 の切羽の位置が TD14m における、正解の天端の沈下量に対する予測結果の誤差は、約 35mm であった。これは上述したように力学モデルを満足する保証がない更新後の状態変数を用いて  $n+1$  のステップの掘削解析を行うことで、 $U_{n+1}$  が適切に予測できていないためである。一方、ケース 1-2 の切羽の位置が TD14m における、沈下量の正解と予測結果の誤差は約 3mm と小さい。ケース 1-2 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、力学モデルを満足する相対変位が得られるため、 $E$  が正解の値に収束し、正解との誤差が小さい沈下量の予測結果が得られている。

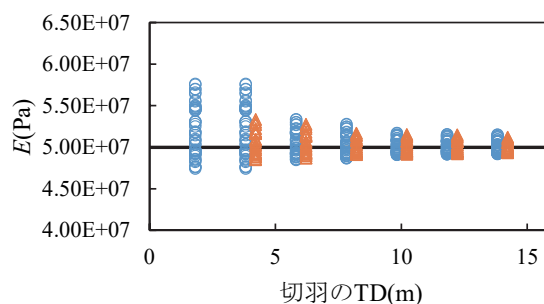
以上、線形弾性体を仮定した地山へのトンネル施工の同化検証の実施により、掘削前の初期の解析モデルにデータ同化で更新された地山の物性を付与し、掘削解析をやり直すことで、掘削により生じる地山の変位の予測性能が向上することを示した。なお、数百から数千 m 掘削を行う実際のトンネルの施工への適用を考えると、この手法は実用的ではない。データ同化で扱う地山の変位を適切に予測できるよう、掘削が計測点の変位に影響を及ぼす範囲を考慮し、どの掘削ステップまで戻るのが適切か、解析対象の地山ごとに検討を行う必要がある。

### 4. ひずみ軟化モデルへの適用性

3 章にて線形弾性モデルを仮定した地山を対象に検討した手法が、実際の地山に近い挙動を再現する構成則である弾塑性モデルを対象に適用可能か、同化検証により確認した。ここでは、脆性的な破壊の挙動を再現可能な、ひずみ軟化モデルを用いた。破壊規準には Mohr-Coulomb の破壊規準を採用した。ひずみ軟化モデルでは扱う力学パラメータの数が線形弾性モデルより多く、本同化検証では 6 個のパラ



(a) ケース 1-1



(b) ケース 1-2

図-2 地山の変形係数の事前分布、事後分布

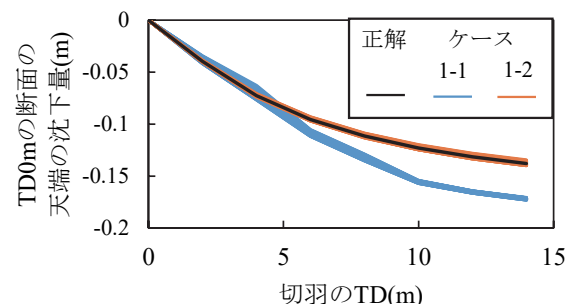


図-3 TD0m の断面の天端の沈下量 (50 サンプル分)

メータを更新対象とした。このモデルの応力-ひずみ関係は非線形であるため、推定する力学パラメータと観測変位との関係は単純ではない。更新するパラメータが増えることにより、文献<sup>10),11)</sup>に示すように、物性の組み合わせが負の相関を示すこともあり、地山の力学パラメータの推定、変形挙動の予測が難しい逆問題ととらえることができる。

#### 4.1 解析条件

図-4 に本同化検証にて使用した解析メッシュと計測点の位置を示す。この解析メッシュは当社施工のインドネシアの Asahan No.3 Hydroelectric Power Plant Project のトンネルの断面形状を参考に作成した。均質な地山を仮定し、境界条件が地山の変位に及ぼす影響を排除するため、TD30m 以降の断面に計測点を設けた。掘削解析に要する時間を短縮するため、計測断面は TD30m から 2m ごとに設け



た。TD30m から TD50m の区間を対象に、2m の掘削ごとに計測点の絶対変位を同化した。

表-2 にひずみ軟化モデルを仮定した地山の物性値を示す。図-5 に示すように、ひずみ軟化モデルの軟化時の挙動は、塑性せん断ひずみ  $\epsilon^{ps}$  の増加に伴う粘着力  $c$ 、せん断抵抗角  $\varphi$  の減少により表現される。 $c_r$  と  $\varphi_r$  はそれぞれ残留状態における地山の粘着力とせん断抵抗角である。ケース 2-1、2-2 の正解の条件の地山の物性は、先述した工事現場にて実施された原位置試験の結果を参考に設定し、トンネル周辺の地山の  $\epsilon^{ps}$  の大きさが地山の物性の推定結果や変形挙動の予測結果に及ぼす影響を確認した。解析モデルの初期応力は、原位置試験の結果から設定した ( $\sigma_{xx} = 6.68\text{MPa}$ 、 $\sigma_{yy} = 3.10\text{MPa}$ 、 $\sigma_{zz} = 6.40\text{MPa}$ 、 $\tau_{xy} = 2.57\text{MPa}$ 、 $\tau_{yz} = 1.38\text{MPa}$ 、 $\tau_{zx} = -0.99\text{MPa}$ )。図-6 に TD30m の掘削面周辺の要素の  $\epsilon^{ps}$  と切羽の位置の関係を示す。ケース 2-1 では、掘削面周辺の要素の  $\epsilon^{ps}$  は  $\epsilon_r^{ps}$  より小さく、降伏した要素の  $c$ 、 $\varphi$  は  $c_r$ 、

$\varphi_r$  まで減少しない。一方、ケース 2-2 では要素の  $\epsilon^{ps}$  は  $\epsilon_r^{ps}$  より大きく、降伏要素の  $c$ 、 $\varphi$  は  $c_r$ 、 $\varphi_r$  まで減少する。

以下に同化検証の手順を示す。最初に正解の物性値で掘削解析を行い、地山の変位の模擬計測値を作成する。次に、表-2 の初期のアンサンブルメンバーが取りうる物性の範囲に示す一様分布の上下限値の範囲から一様乱数により複数の条件を組み合わせたアンサンブルを発生させ、掘削ステップ  $n$  まで掘削解析を行い、地山の物性、計測点の変位で構成される状態ベクトルを作成する。サンプル数は 3 章の同化検証と同様に 50 とした。ひずみ軟化モデルを仮定しているため、 $c_{r,ens}$ 、 $\varphi_{r,ens}$  は  $c_{ens}$ 、 $\varphi_{ens}$  よりも小さい範囲から取得した。その後、正しい物性値とアンサンブルでそれぞれ計算した計測点の変位を同化し、表-2 に示した 6 個の物性を更新する。更新されたひずみ軟化モデルの物性値が現実的でない場合(例えば負の値、 $c_r^{DA} > c^{DA}$ 、 $\varphi_r^{DA} > \varphi^{DA}$  等)、表-2 の初期

表-2 ひずみ軟化モデルを仮定した地山の物性

		$E$	$c$	$c_r$	$\varphi$	$\varphi_r$	$\epsilon_r^{ps}$
		(MPa)			(°)		
正解の条件	ケース 2-1	2390	2.22	0.8	40	36	0.008
	ケース 2-2	2390	1.67	0.6	30	27	0.008
初期のアンサンブルメンバーが取りうる物性の範囲		500-	0-	0-	15-	0-	0-
		5000	6.00	$c_{ens}$	65	$\varphi_{ens}$	0.015

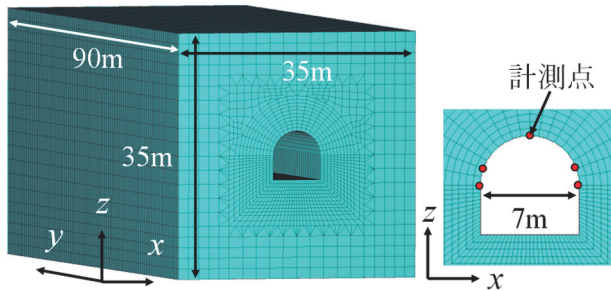


図-4 ひずみ軟化モデルを仮定した地山の解析メッシュ

$$\Delta \epsilon^{ps} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\Delta \epsilon_1^{ps} - \Delta \epsilon_m^{ps})^2 + (\Delta \epsilon_2^{ps} - \Delta \epsilon_m^{ps})^2 + (\Delta \epsilon_3^{ps} - \Delta \epsilon_m^{ps})^2}$$

$$\Delta \epsilon_m^{ps} = (\Delta \epsilon_1^{ps} + \Delta \epsilon_3^{ps}) / 3$$

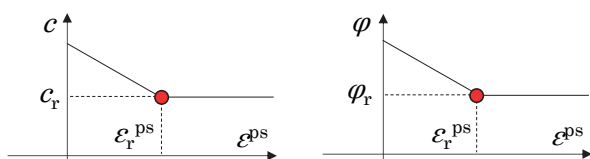
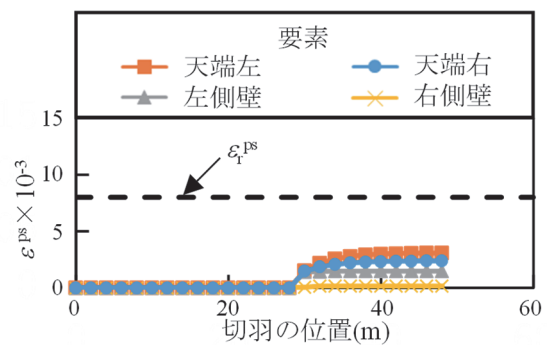
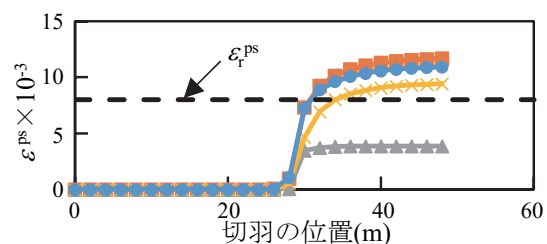


図-5 ひずみ軟化モデルにおける  $c_r$ 、 $\varphi_r$  と  $\epsilon_r^{ps}$  の関係



(a) ケース 2-1



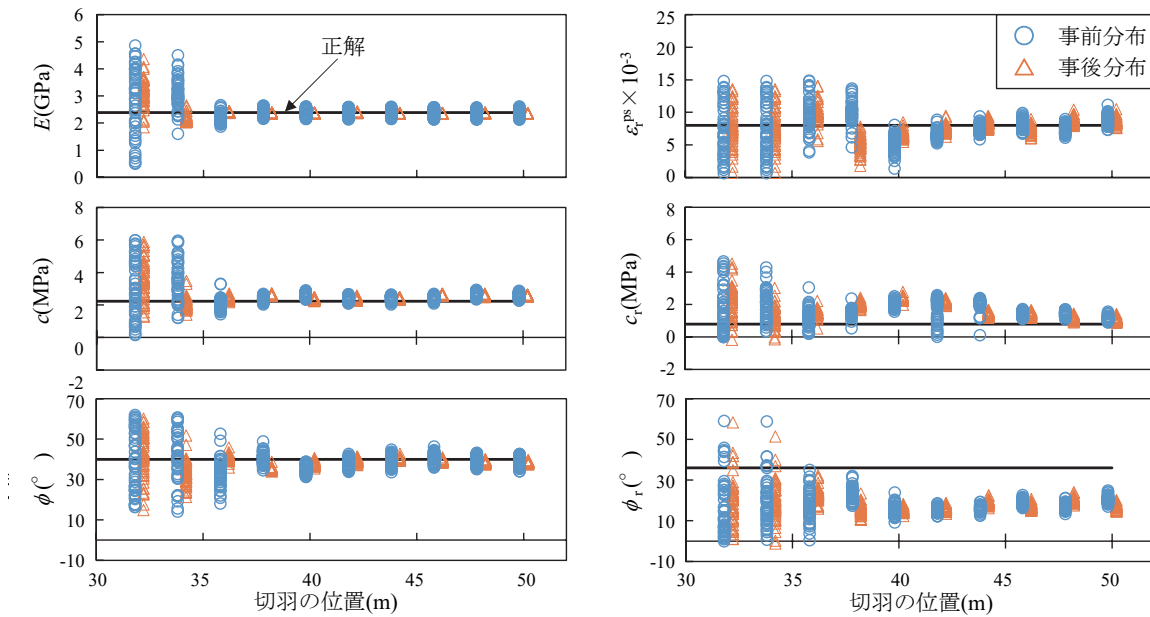
(b) ケース 2-2

図-6 切羽の位置と TD30m のトンネル周辺の要素の  $\epsilon_r^{ps}$  の関係

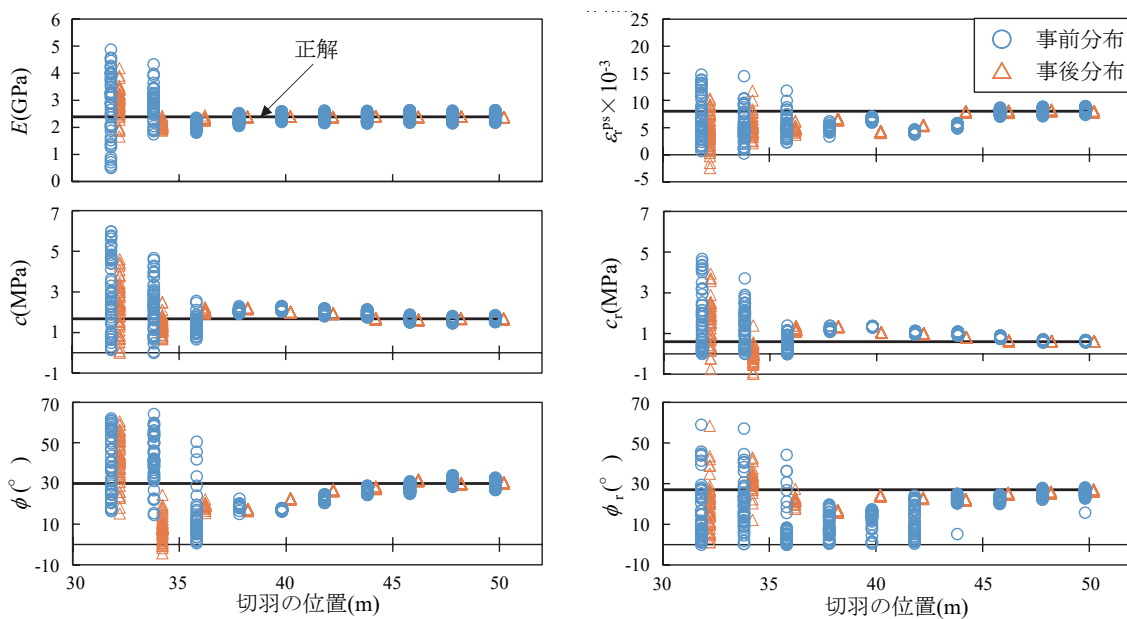
のアンサンブルメンバーが取りうる物性の範囲から物性値を再生した。データ同化によりひずみ軟化モデルを仮定した地山の変形挙動の予測が行えるかの基礎的な検証のため、式(2)の  $\mathbf{R}$  に対応する計測誤差は  $2.0 \times 10^{-2} \text{mm}$  と極めて小さな値に設定し、共分散は 0 とした。計測誤差を極めて小さくしたため、更新後の各パラメータにおいて、広がりを持った分布が表現できなくなることが予想された。この問題を回避するために、更新後の各パラメータには式(1)の  $\mathbf{v}$  に該当するシステムノイズとしてアンサンブル平均の-10~10%の値を加え、掘削ステップ  $n+1$  まで掘削解析を行った。

## 4.2 結果

図-7にケース 2-1、2-2 の同化前後の地山の物性と切羽の位置の関係を示す。黒線は正解の物性値、青、橙のプロットは各ステップの掘削解析に使用した物性値(事前分布)、更新後の物性値(事後分布)である。ケース 2-1 では、 $\alpha_r$  と  $\varphi_r$  以外の物性値の分布が正解に収束している。一方、ケース 2-2 では  $\alpha_r$ 、 $\varphi_r$  を含む全ての物性の分布が正しい値に収束している。図-6より、ケース 2-1 の物性値の組み合わせでは、降伏した要素の  $\varepsilon^{ps}$  が正しい  $\varepsilon_r^{ps}$  より小さく、降伏した要素の  $c$ 、 $\varphi$  が  $\alpha_r$ 、 $\varphi_r$  に減少していない。一方、ケース 2-2 では掘削面周辺の要素の  $\varepsilon^{ps}$  は  $\varepsilon_r^{ps}$  よりも



(a) ケース 2-1



(b) ケース 2-2

図-7 データ同化前後の地山の物性の分布

大きく、残留状態の変位を用いて同化が行われたため、全ての物性値が正解の値に収束したと考えられる。図-8に TD60m の断面の天端の沈下の絶対量と切羽の位置の関係を示す。黒、青、橙の線は、正解の条件、同化実施前の初期アンサンブル、同化を10回実施後のアンサンブルにより計算した沈下量である。ケース 2-1、2-2 とともに同化により物性値のばらつきが減少し、同化を10回実施した後のアンサンブルメンバーで予測した切羽の位置が TD80m における沈下量と正解との誤差は約 2mm に減少した。計測誤差が極めて小さいという条件下ではあるが、3章で検討した手法により、ひずみ軟化モデルにおいても地山の変形挙動の予測性能の向上にデータ同化が有効であることを確認した。ケース 2-1 では  $\alpha_r$  と  $\phi_r$  が正解の値に収束していないが、 $\alpha_r - \varepsilon_r^{ps}$ 、 $\phi_r - \varepsilon_r^{ps}$  関係の組み合わせとして尤もらしい値を推定することで、更新された解析モデルが沈下量の予測モデルとして有効であることを示している。しかし、残留状態に至る計測データがないため、残留挙動のメカニズムを説明する力学モデル(ひずみ軟化モデル)の推定まではできていない。そのため、トンネルの施工が進み地山の応力状態が変化した場合に、地山の変形挙動を適切に予測できない可能性がある。

以上、3章にて検討した手法をひずみ軟化モデルを仮定した地山にトンネルを施工する同化検証に適用し、地山の変形挙動の予測性能が向上することを確認した。なお、本同化検証ではパラメータの更新に有意な計測データとなるよう、非現実的な地山の変位の計測誤差、計測点の数を設定したため、今後現実的な値を用いた同化検証を行う予定である。

## 5. おわりに

本稿では、地下構造物施工時の地山の変形挙動の予測を目指し研究を推進している、データ同化を利用した掘削解析手法について説明した。また、データ同化の活用によりトンネル施工時の地山の変形挙動の予測性能が向上する手法の検討のために実施した、線形弾性モデルを仮定した地山にトンネルを施工する同化検証の結果を示した。その後、線形弾性モデルを対象に検討した手法を実際の地山の挙動を再現しうるひずみ軟化モデルを対象に適用した結果を説明した。以下に得られた知見を示す。

- ・線形弾性モデルを仮定した地山にトンネルを施工する問題を対象とした同化検証では、次のステップの掘削解析におけるデータ同化で更新された状

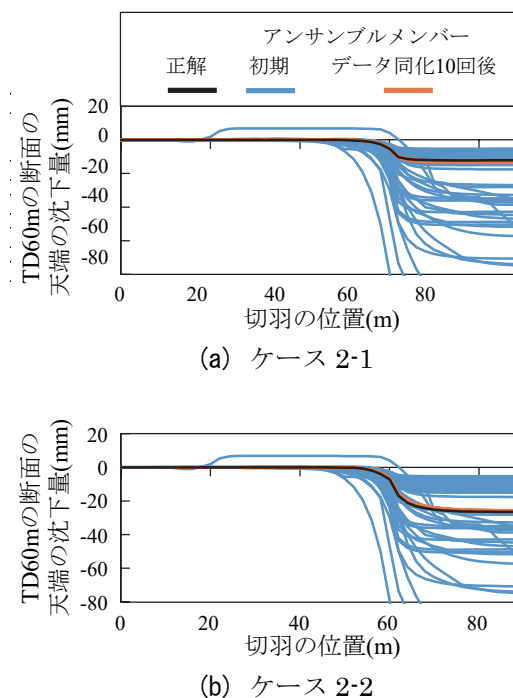


図-8 TD60m の断面の天端の沈下量 (50 サンプル分)

態変数の扱い方を変え、地山の変位の予測結果を比較した。データ同化により更新した地山の変形係数、節点の変位、要素に作用している応力を掘削途中の解析モデルに付与し、次のステップの解析に進むと、正解の天端の沈下量に対し約 35mm 大きい値の予測結果が得られた。一方、データ同化により更新した地山の変形係数を掘削前の初期の解析モデルに付与し、掘削解析をやり直すことで、正解と予測結果の沈下量の誤差が約 3mm まで減少し、掘削により生じる地山の変位の予測性能が向上することを示した。

- ・上記の同化検証にて検討した手法の適用性を、ひずみ軟化モデルを仮定した地山へのトンネル施工を模擬した同化検証にて確認した。トンネル周辺の要素が残留状態に至るケース、至らないケースの模擬計測値を同化した。計測誤差が極めて小さいという条件下ではあるが、両ケースで正解と予測結果の沈下量の誤差が約 2mm まで減少し、ひずみ軟化モデルにおいても地山の変形挙動の予測性能の向上にデータ同化が有効であることを確認した。ただし、トンネル周辺の要素が残留状態に至らないケースの模擬計測値を同化する場合、残留挙動のメカニズムを説明する力学モデルの推定ができておらず、トンネルの施工が進み地山の応力状態が変化した場合に、地山の変形挙動を適切に予測できない可能性がある。

以下に今後の研究の課題について述べる。

- ・線形弾性モデルを仮定した地山の同化検証にて示した掘削前の初期の解析モデルにデータ同化で更新された地山の物性を付与し、掘削解析をやり直す手法は、実際のトンネルの施工への適用を考えると実用的ではない。掘削が計測点の変位に影響を及ぼす範囲を考慮し、どの掘削ステップまで戻るのが適切か、解析対象の地山ごとに検討が必要である。
- ・ひずみ軟化モデルを仮定した地山の同化検証について、実際の地山を想定した場合、残留状態に至る計測データが得られない可能性がある。そのような状況でも地山の力学パラメータの推定が行えるよう、施工中に得られる地山の変位以外の計測データを同化する効果について検討を進めている。
- ・本稿で紹介した同化検証では地山の不均質性、支保工のモデル化を行っていない。また、計測データの誤差については人為的誤差、地山の変位の計測を開始するタイミングの違いに起因する誤差は考慮されていない。今後はこれらのモデル化、誤差の定量化についての検討も必要である。

本稿で報告した知見は、今後行う数値実験の手順の検討、考察を行う際に有益な情報となると考えられる。これまでは模擬計測値を対象にデータ同化を行ったが、上記の課題への取り組みに加え、地下構造物施工中に実際に得られた計測データを対象にデータ同化を行い、検討中の解析手法の予測性能の確認、および課題の抽出を行う。

#### <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) 山下雅之，竹村いずみ，杉本拓也，吉永浩二，前田薫：トンネル変形予測システム「PAS-Def」の開発と適用事例，西松建設技報， vol.38， 2015.
- 3) 小島悠，升元一彦，宮嶋保幸，福島大介，宮石雅子，黒川紗季：穿孔エネルギーを用いた解析モデルの高精度化とトンネル掘削シミュレーション，トンネル工学報告集，Vol.30，I-12，2020.
- 4) 珠玖隆行，村上章，藤澤和謙，西村伸一：地盤解析におけるデータ同化，地盤工学会誌， vol.59， pp.8-11， 2011.
- 5) 熊谷文瑠，石井雅子，珠玖隆行，横田泰宏，伊達健介，宮嶋保幸，升元一彦：穿孔データを活用した地山物性値の多変量正規分布モデルによるトンネル掘削解析技術，トンネル工学報告集， vol.32， I-5， 2022.
- 6) 青野 泰久，櫻井 英行，山本 真哉：データ同化による施工中の地下構造物の挙動の予測手法，計算工学講演会論文集， vol.26， E-03-02， 2021.
- 7) 青野 泰久，櫻井 英行，山本 真哉：データ同化による施工中の地下構造物の挙動の予測，第48回岩盤力学に関するシンポジウム講演集， pp.356-361， 2022.
- 8) Y. Aono, H. Sakurai and S. Yamamoto : Prediction for Behavior of Underground Structures during Construction Phase Using Data Assimilation, *The 15th World Congress on Computational Mechanics & the 8th Asian Pacific Congress on Computational*, p.1766, 2022.
- 9) 青野 泰久，山本 真哉，櫻井 英行：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，土木学会第77回年次学術講演会，VI-816， 2022.
- 10) 青野 泰久，山本 真哉，鎌田 浩基，櫻井 英行：データ同化による地下構造物施工中の地山の挙動予測のための数値実験，計算工学講演会論文集， vol.27， E-03-06， 2022.
- 11) 青野 泰久，山本 真哉，鎌田 浩基，櫻井 英行：施工中の地下構造物の挙動の予測のための弾塑性体のデータ同化解析，第49回岩盤力学に関するシンポジウム講演集， pp.196-201， 2023.
- 12) 青野 泰久，山本 真哉，鎌田 浩基，櫻井 英行：地下構造物の施工時データ同化解析における岩石試験の解析の V&V と検証例，計算工学講演会論文集， vol.28， F-03-05， 2023.
- 13) 青野 泰久，山本 真哉，鎌田 浩基，櫻井 英行：地下構造物の施工時データ同化解析のための岩石試験の同化検証，土木学会第78回年次学術講演会，CS5-12， 2023.
- 14) 青野 泰久，奥野 哲夫：ひずみ軟化を示す地山へのトンネル掘削を模擬したデータ同化解析（シンポジウム講演概要），第26回応用力学シンポジウム， 11011-15-05， 2023.
- 15) Y. Aono and T. Okuno : Data Assimilation for Prediction of Surrounding Rock Mass Behavior during Underground Structure Construction Phases, *15th ISRM Congress 2023 & 72nd Geomechanics Colloquium*, pp.2013-2018, 2023.
- 16) L. Nerger, T. Janjić, J. Schröter, and W. Hiller : A Unification of Ensemble Square Root Kalman Filters. *Monthly Weather Review*, pp.2335-2345, 2021.
- 17) C. H. Bishop, B. J. Etherton, S. J. Majumdar : Adaptive sampling with the ensemble transform Kalman filter. Part I: theoretical aspects, *Monthly Weather Review*, pp.420-436, 2001.
- 18) 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， vol.17， no.181， pp. 902-907， 1968.