

地下構造物周辺地山の変形挙動予測を目的とした データ同化の適用性に関する基礎的検討

奥野哲夫¹・青野泰久²

¹ 深田地質研究所

² 清水建設株式会社 技術研究所

A fundamental study on the applicability of data assimilation for predicting deformation
of rock masses around underground structures

OKUNO Tetsuo¹, AONO Yasuhisa²

¹ Fukada Geological Institute

² Shimizu Institute of Technology

要旨：本研究では、トンネル掘削時の弾塑性挙動を対象としたデータ同化手法の適用性に関する基礎的検討を行う。データ同化手法として、アンサンブルカルマンフィルタ（EnKF）と粒子フィルタ（PF）の2種類の手法を比較する。具体的には、EnKF系としてESTKF（Error-Subspace Transform Kalman Filter）を、PF系としてNETF（Nonlinear Ensemble Transform Filter）を比較する。検討には、原位置試験から得られた物性値を参考に変形係数、粘着力、内部摩擦角を設定する。CH級岩盤の均質モデルと、CH級岩盤がD級岩盤に隣接する不均質モデルを想定し、それぞれのモデルを用いた数値解析から得られたトンネル掘削時の壁面変位の模擬観測データを用いて、物性値を逆に推定する。その結果、ESTKFは弾性挙動が卓越するCH級岩盤で変形係数を良好に同定でき、塑性挙動が卓越するD級岩盤では変形係数に加え、粘着力や内部摩擦角を推定できることがわかった。一方、NETFでは粒子の退化が課題となり、良好な同定結果が得られなかった。これらの特徴を踏まえてデータ同化を行う必要がある。

キーワード：データ同化、弾塑性挙動、トンネル掘削、岩盤、物理定数

Abstract: In this study, we conduct a fundamental study on the applicability of data assimilation methods targeting elasto-plastic behavior during tunnel excavation. As data assimilation methods, we compare two types of methods, the Ensemble Kalman Filter (EnKF) and the Particle Filter (PF). We specifically compare the ESTKF (Error-Subspace Transform Kalman Filter) as the EnKF type and the NETF (Nonlinear Ensemble Transform Filter) as the PF type. In the study, we set the deformation coefficient, cohesion, and internal friction angle based on the physical properties obtained from in-situ tests. A homogeneous model of CH-class rock mass and a heterogeneous model in which CH-class rock mass is adjacent to D-class rock mass are assumed. The physical property values are identified inversely using simulated observation data of wall displacement during tunnel excavation obtained from numerical analysis using the homogeneous model and the heterogeneous model.

As a result, we find that the ESTKF can identify the deformation coefficient well for CH-class rock mass, which has predominantly elastic behavior, and that it is possible to estimate the cohesion and internal friction angle in addition to the deformation coefficient for D-class rock mass, which has predominantly plastic behavior. On the other hand, NETF has an issue with particle degradation and reasonable identification results cannot be obtained.

Keywords: data assimilation, elasto-plastic behavior, tunnel excavation, rock masses, physical properties

1. はじめに

数値解析に基づき定量的な予測を実施しようとする際、対象物の物性値や初期条件・境界条件、あるいは荷重条件などに不確実性を伴う場合、予測期間中に現場で得られる計測データを予測解析に援用（同化）させ、その後の不確実性を減らして予測精度を高める「データ同化手法」（北川，2005；樋口，2011；中村ら2005）の利用が増えている。建設工事においても、事前調査に限界のあるトンネルなどの地下構造物では、施工時の計測データなどの援用により、切羽前方を施工する際の岩盤の変形挙動の予測精度の向上を図る場合がある。このような場合を想定し、データ同化手法はトンネル施工時の岩盤の変形挙動の予測にも適用が検討され始めている（青野ら，2021，2023；Aono and Okuno, 2023）。特にトンネル工学分野では、計測データが得られるタイミングやその結果をトンネル施工に反映させるまでの時間的制約があり、またトンネル切羽前方に新たな領域を掘進しながら地下での狭隘な線状空間で同様の計測が繰り返されるという特徴から、逐次型の効率的なデータ同化手法が望まれる。

データ同化は、特に気象・海洋学の分野を中心に発展してきた（淡路ら，2009）。一方、地盤・岩盤工学分野でもこれまで多くの逆解析手法が提案・適用されており（村上ら，2002，2009），逆解析により求めた物性値を用いてその後の予測精度の向上を図り施工に役立てることも主目的の一つである。敢えてデータ同化の違いを言えば、予測を主眼として、それに計測データを同化させる立場をとることである。またその特徴として、アンサンブルベースのデータ同化は確率論に基づく状態量の推定と予測にガウス分布を仮定する必要がなく、任意の確率分布にも適用できる

点が注目されている。

以上より、本検討では、現場の岩盤物性の調査結果を参考に設定した物性値とトンネル掘削モデルを真の状態と仮定し、その数値解析で求めたトンネル壁面の変位を計測データとして設定した双子実験（真値を隠したブラインドテストと同様）を行い、設定した物性値が推定可能か複数のデータ同化手法を比較検討する。各手法の推定・予測過程を考察して、岩盤物性の推定と岩盤の変形挙動の予測の効率向上を目指した基礎的な検討を行う。特に、ガウス分布以外の確率分布にも適用性が期待されるアンサンブルベースの逐次型手法を用い、トンネル軸方向の岩盤物性の変化（切羽前方の不良地山の推定）に関して推定過程を比較し、切羽前方の岩盤物性の推定の可能性も検討する。

2. データ同化手法

まず、逐次型のデータ同化手法の概要とその特徴を示す。1990年代から発展してきた逐次型のデータ同化手法の多くは、それ以前から適用されてきたカルマンフィルタ（Kalman Filter：KF）や拡張カルマンフィルタ（Extended Kalman Filter：EKF）に理論的基礎を置く（有本，1977；片山，1983）。数値計算手法の発展と共にモンテカルロ的な手法としてアンサンブルベースの手法が発展し多くの改良型が提案されているが、アンサンブルカルマンフィルタ（Ensemble Kalman Filter：EnKF）（Evensen, 1994, 2006）と粒子フィルタ（Particle Filter：PF）（Gordon et al., 1993；Kitagawa, 1996；北川，2005）の系統に大別される。

いずれの方法も観測更新（計測データの同化）は、得られた観測値の条件付確率から1期先予測

値を修正（フィルタリング）するベイズ更新である。このうち KF は線形・ガウス状態空間モデルに基づき、カルマンゲインにより観測値と予測値の差の修正量を決めて更新を行う。EKF は、KF に対して非線形な 1 期先予測式を線形一次近似により線形化を行う。非線形性への適応が期待される一方、線形一次近似によるヤコビ行列が計算量の増大を招き、計算効率の観点からデメリットとなる。また、ヤコビ行列を用いることが不安定性の原因にもなり、FEM 解析などの予測解析アルゴリズムとオンラインでヤコビ行列を計算する必要が生じる。著者の一人も、非定常な地下水流動予測問題に透水係数の空間分布推定と地下水位の予測および最適なモデル選択に EKF を用いて検討を行い（奥野ら、1993、1994、1995、1997）、ヤコビ行列の計算コストが増大した。

このようなデメリットの解決のため EnKF が開発され、KF と 2 次モーメントまで一致するようにアンサンブルの修正を行う。EnKF が前述のカルマンゲインにより予測値を観測更新するのに対して、PF は尤度に基づく重み関数により粒子（サンプル）のリサンプリング（再標本化）を行うことが主な相違点である。

なお、PF のアルゴリズムは、提案された当初はモンテカルロフィルタ（Monte Carlo Filter）、ブートストラップフィルタ（Bootstrap Filter）と呼ばれていたが、その後は粒子フィルタと呼ばれることが多い（樋口、2011）。

以上より、主に以下の二点のメリットからアンサンブルベースのカルマンフィルタを用いて検討する。

- ・非線形・非ガウス性の確率分布モデルへの適用
- ・1 期先予測の分散共分散行列の計算量の削減（ヤコビ行列の計算不要）

3. 本検討の状態空間モデルとデータ同化手法

本手法で用いる状態空間モデルを式 (1)、(2) に示す。

システムモデル

$$\mathbf{x}_t = \mathbf{f}_t(\mathbf{x}_{t-1}, \mathbf{v}_t) \quad (1)$$

観測モデル

$$\mathbf{y}_t = \mathbf{H}_t \mathbf{x}_t + \mathbf{w}_t, \quad \mathbf{w}_t \sim N(\mathbf{0}, \mathbf{R}) \quad (2)$$

ここで $\mathbf{x}_t = (\mathbf{u}_t^k, \boldsymbol{\theta}^l)^T$ は状態ベクトルで、 t は時刻を、 T は転置を示す。 \mathbf{u}_t^k は時刻 t （後述の FEM 解析ではトンネル切羽位置 TD〈Tunnel Distance : トンネル距離程〉に対応）の位置 k （後述の FEM 解析の節点 k に対応）の絶対変位の x , y , z 方向成分からなる変位ベクトルである。 k 点是对象とする節点を必要なだけ複数並べて \mathbf{x}_t を構成することが可能である。 $\boldsymbol{\theta}^l$ は推定対象となる岩盤領域 1 ごとの物性の未知パラメータを複数並べたベクトルである。後述の FEM 解析モデルでは、弾塑性モデルの変形係数 E , 粘着力 c , 内部摩擦角 ϕ がこれに相当する。また、 \mathbf{v}_t はシステムノイズで任意の分布でよい。 $\mathbf{f}_t(\cdot)$ は \mathbf{x}_{t-1} と \mathbf{v}_t をベクトル変数とする非線形ベクトル値関数で、状態ベクトルの 1 期先の時間更新を表す。また、 \mathbf{y}_t は観測ベクトルで、 \mathbf{H}_t は状態ベクトル \mathbf{x}_t から観測される成分のみ 1, 他の成分は $\mathbf{0}$ の線形変換マトリクスである。 \mathbf{w}_t は観測ノイズで $N(\mathbf{0}, \mathbf{R})$ に従うと仮定する。すなわち、観測ベクトル \mathbf{y}_t は、状態ベクトル \mathbf{x}_t から \mathbf{H}_t により取得された値に正規分布に従う観測ノイズ \mathbf{w}_t が加わりモデル化される。なお、本検討では分散共分散行列 \mathbf{R} の成分は相互に独立で、対角成分の分散 σ^2 のみと仮定する。

以上の状態ベクトル \mathbf{x}_t には岩盤変位 \mathbf{u}_t^k 以外にも未知パラメータ $\boldsymbol{\theta}^l$ として岩盤物性 (E , c , ϕ) を含み、1 期前（トンネル掘削の 1 切羽前）

の推定値から1期先(トンネル掘削の1切羽先)の岩盤変位の予測値を後述の解析モデルから求める。予測した t 期になるとそれと同期の岩盤変位の計測値を用い、計測値を再現するよう岩盤物性値の推定値 θ^l が更新され、同時に岩盤変位の予測値 u_t^k も更新される。

本検討の対象とする同化手法は、EnKFの系統に属するESTKF(Error-Subspace Transform Kalman Filter)(Nerger et al., 2012)とPFの系統に属するNETF(Nonlinear Ensemble Transform Filter)(Tödter and Ahrens, 2015)の2種類を設定した。両手法ともデータ同化の計算アルゴリズムにおいて逆行列の計算を回避するなど改良・効率化された手法である。また、これらの手法と比較するためPF系で基本となるPF(Particle Filter)(Gordon et al., 1993; Kitagawa, 1996)も一部のケースで実施した。

なお、前述のとおりEnKFの系統ではカルマンゲインによる更新を行い、PFの系統では尤度に基づく粒子のリサンプリング(再標本化)による更新を行う違いがある。この違いのイメージを図1に示す。カルマンゲインは観測値を再現する方向にアンサンブルメンバーを移動させることで事後確率分布を表現し、リサンプリングは尤度の小さい粒子を棄却し、その代わりに尤度の大きい粒子を複製することで事後確率分布を表現する。この際の各アンサンブルメンバーの尤度 $\lambda_t^{(i)}$ は以下の式で求められ、これに比例した重みにより事後分布を更新する。

$$\begin{aligned} \lambda_t^{(i)} &= p(\mathbf{y}_t | \mathbf{x}_{t-1}^{(i)}) \\ &= \left(\sqrt{(2\pi)^m} \right)^{-1} \exp \left[-\frac{1}{2} (\mathbf{y}_t - \mathbf{H}_t \mathbf{x}_{t/t-1}^{(i)})^T \right. \\ &\quad \left. \mathbf{R}_t^{-1} (\mathbf{y}_t - \mathbf{H}_t \mathbf{x}_{t/t-1}^{(i)}) \right] \end{aligned} \quad (3)$$

ここで m は \mathbf{y}_t の次元を示す。また、 (i) はアンサンブルメンバー i を、 $t/t-1$ は時刻 $t-1$ の推定値から時刻 t の状態ベクトルの予測値を示す。

4. 解析モデルと検討ケース

4.1 解析モデル

後述する検討ケースでは岩盤が均質な1種類から構成されるモデルと切羽前方に不良地山を想定した2種類の岩盤からなるモデルを想定する。これら2種類の解析モデルを図2に示す。式(1)の予測を担う非線形解析にはFEMの弾塑性解析を行い、構成モデルはMohr-Coulombの破壊規準に従う弾完全塑性モデルとする。使用する解析ソフトは汎用ソフトのPLAXIS3Dである。

トンネル形状と計測断面の計測点位置を図3に示す。計測断面では5点の計測点で x , y , z 方向の変位が計測されることを設定し、トンネル軸方向(y 軸方向)に切羽が2m掘進するごとに切羽から2m手前の断面に計測点が設置されるものとした。

表1に用いる岩盤物性を示す。ここではアサハン第3水力発電所建設事業(酒井ら, 2022)の排水路トンネルで得られた原位置試験結果を参考に物性値を設定した。当該周辺岩盤は、古生代石炭紀の終わりからベルム紀の初めに堆積したと推定されるおよそ3億年前の密実な礫混じり砂岩からなり、割れ目は存在するもののほとんどが電中研式岩盤分類(岩盤分類基準化委員会編, 2004)のB/CH~CM級と判定される。本検討では、このような岩盤から得られた変形係数や強度定数を低下させた仮定の岩盤を想定し、CH級とD級の岩盤を真の状態として設定し、岩盤物性の推定対象を変形係数 E 、粘着力 c 、内部摩擦角 ϕ とし、ポ

地下構造物周辺地山の変形挙動予測を目的とした
データ同化の適用性に関する基礎的検討

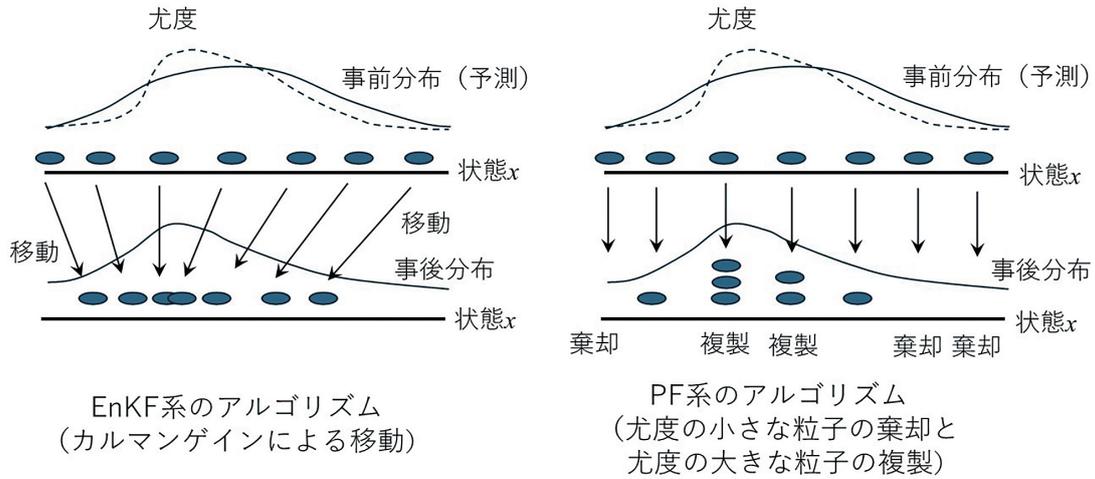


図1 EnKF系とPF系の観測更新のイメージ (樋口, 2011).

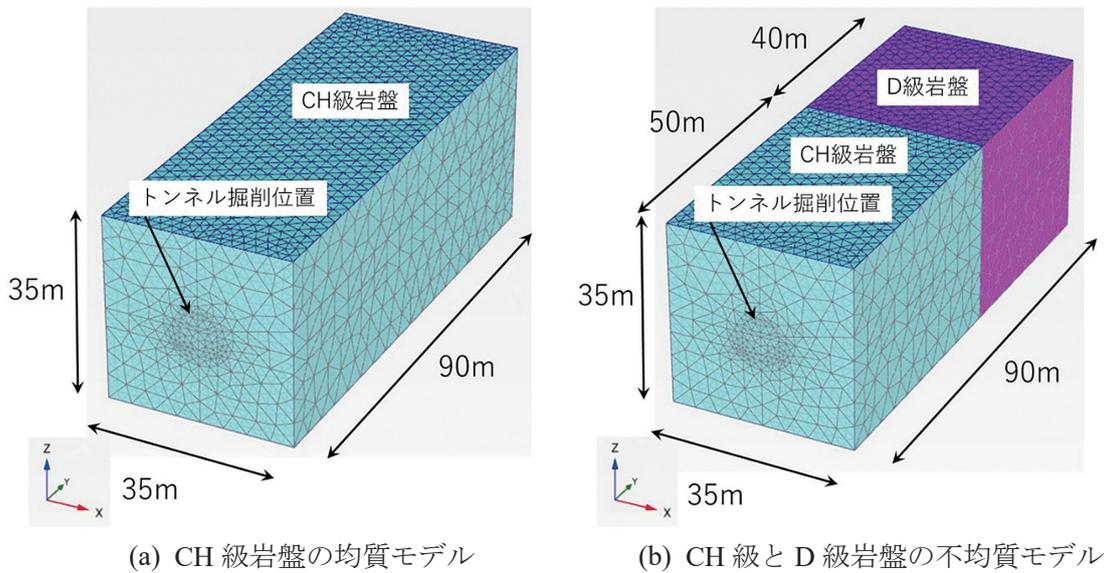


図2 解析モデル (FEM 解析モデル).

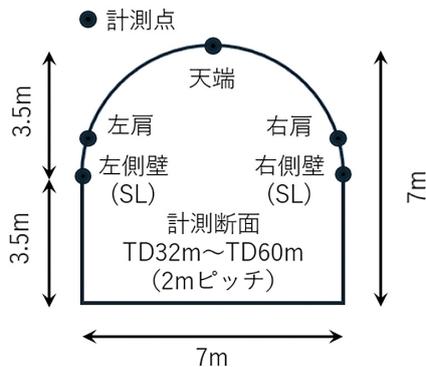


図3 トンネル形状と計測断面の計測点位置.

表1 岩盤物性.

対象岩盤		物性	変形係数 E (MPa)	粘着力 c (MPa)	内部摩擦角 ϕ ($^{\circ}$)	ポアソン比 ν
原位置試験	参考値		2390	2.78	50	0.2
設定した真値 (正解値)	CH級		2390	2.22	40	0.2
	D級		500	1.00	30	0.3
アンサンブル メンバーの 初期値の範囲	CH級		1000~5000	0.15~6.00	15~65	0.2
	D級		100~3000	0.10~3.00	15~50	0.3

表2 初期応力. [単位: MPa]

σ_{ij}	x	y	z
x	6.68	2.57	-0.99
y	Sym.	3.10	1.38
z	Sym.	Sym.	6.40

σ の下付き添え字 i, j はそれぞれ x, y, z の成分を表す.

アソソ比は既知とする. この設定の下, アンサンブルメンバーの初期値の範囲として表1の範囲の1様分布を設定し, 乱数を発生させてアンサンブルメンバーを生成し, 掘削解析, データ同化を実施する. なお, 後述のデータ解析の検討結果において, 各データを用いたデータ同化後の事後分布において物性値が負の値となり物理的意味を持たないアンサンブルメンバー (および粒子) は, 継続する切羽掘削解析の事前分布として表1の1様分布の初期値の下限値に設定し直すものとする.

表2に同じくアサハン第3水力発電所建設事業において, 原位置で測定された初期応力を示す. 初期応力は高い応力を示しており, 現場計測値をそのまま解析モデルに用いる.

4.2 検討ケース

本検討の検討ケースを表3と表4に示す. これらの表は図2の解析モデル (岩盤領域区分) に対応して均質モデルと不均質モデルに分けて示している. 表3のケースは図2(a)に示すよう

に全領域がCH級岩盤で均質なケースを, また表4のケースは不均質モデルを対象にした図2(b)のケースに対応する. 不均質モデルでは良好なCH級岩盤がTD0~50mに, 不良地山のD級岩盤がその先TD50~90mに存在する. これら2種類の岩盤モデルで, それぞれデータ同化手法の違い, 観測ノイズの大きさの違い, サンプル数 (アンサンブルメンバー数および粒子数と同義) を変えたケースを設定して比較する.

観測ノイズに関しては, まず観測ノイズが極端に小さい場合のデータ同化状況を確認する目的から, 均質モデルにおいて標準偏差 $\sigma: 2.0E-3$ mm のケースを設定する. それ以外は計測装置の仕様から標準偏差 $\sigma: 1.0$ mm を基本とする. サンプル数は50を基本とし, NETFではサンプル数100の場合も実施する. これはPF系ではサンプル数の影響を受けることが懸念されるため, PFでもサンプル数が50と100の2ケースを比較のため設定した.

なお, 本手法のノイズの捉え方として, 観測ノイズは前述のとおり変位計測装置の計測誤差を対象に設定する. 一方, 実際の岩盤の不連続面等も含む地質構造の不確実性や物性の不均質性ならびに岩盤の力学的挙動を表現する構成モデルの誤差, さらには推定過程で生じる応力経路に依存した力学挙動の誤差など, 各種のモデル化で生じる

表3 検討ケース (CH級の均質モデル).

ケース名	対象岩盤 (岩級区分)	データ同化 手法	観測ノイズ (標準偏差 σ : mm)	サンプル数 (粒子数)
C-E0-50	CH (均質)	ESTKF	2.0E-3	50
C-N0-50	CH (均質)	NETF	2.0E-3	50
C-E1-50	CH (均質)	ESTKF	1.0	50
C-N1-50	CH (均質)	NETF	1.0	50
C-N1-100	CH (均質)	NETF	1.0	100
C-P1-50	CH (均質)	PF	1.0	50
C-P1-100	CH (均質)	PF	1.0	100

表4 検討ケース (CH級とD級の不均質モデル).

ケース名	対象岩盤 (岩級区分)	データ同化 手法	観測ノイズ (標準偏差 σ : mm)	サンプル数 (粒子数)
D-E1-50	CHとDの 2領域	ESTKF	1.0	50
D-N1-100	CHとDの 2領域	NETF	1.0	100
D-P1-100	CHとDの 2領域	PF	1.0	100

誤差はシステムノイズとして捉える。これは奥野ら (1997) と同様である。これを基本として、今回の検討では真の状況を設定した解析モデルから数値解析で得た岩盤壁面の変位を模擬計測データとすることから、以上のモデル化の誤算は基本的に存在しない。各アンサンブルメンバーの推定過程における応力経路の違いはあるものの比較的モデル化の誤差は少ないと考えられることから、システムノイズは0と見なす。実際の原位置岩盤を対象とした上記のモデル化誤差をシステムノイズとして捉える方法については今後別途検討する予定である。

以上の検討ケースに対してデータ同化による物性値の推定結果を次章で示すが、次章で述べる「収束」とはある一点に推定値が漸近して近づくこと (分散が0に近づくこと) を表現している。しかし、地質の不均質性などを考慮した物性値の

事前分布や、観測点配置などによる推定対象への計測値 (データ) の感度の大小、さらに観測ノイズやシステムノイズなど、様々な不確実性が存在する状況下では、必ずしも推定値が一点に収束することを期待するものではなく、ある確率分布 (分散が必ずしも0でない) への収束を本来期待するものである。この点に留意して次章で推定結果を示す。

5. 物性値の推定結果と考察

5.1 均質モデルのデータ同化結果と考察

まず、CH級岩盤の均質モデルで真の物性値を用いてトンネル掘削解析を行って得られる初期状態からのトンネル壁面の絶対変位の一部を図4に示す。また、この弾塑性解析から得られた塑性域の分布を図5に示す。CH級の良好な岩盤を設定

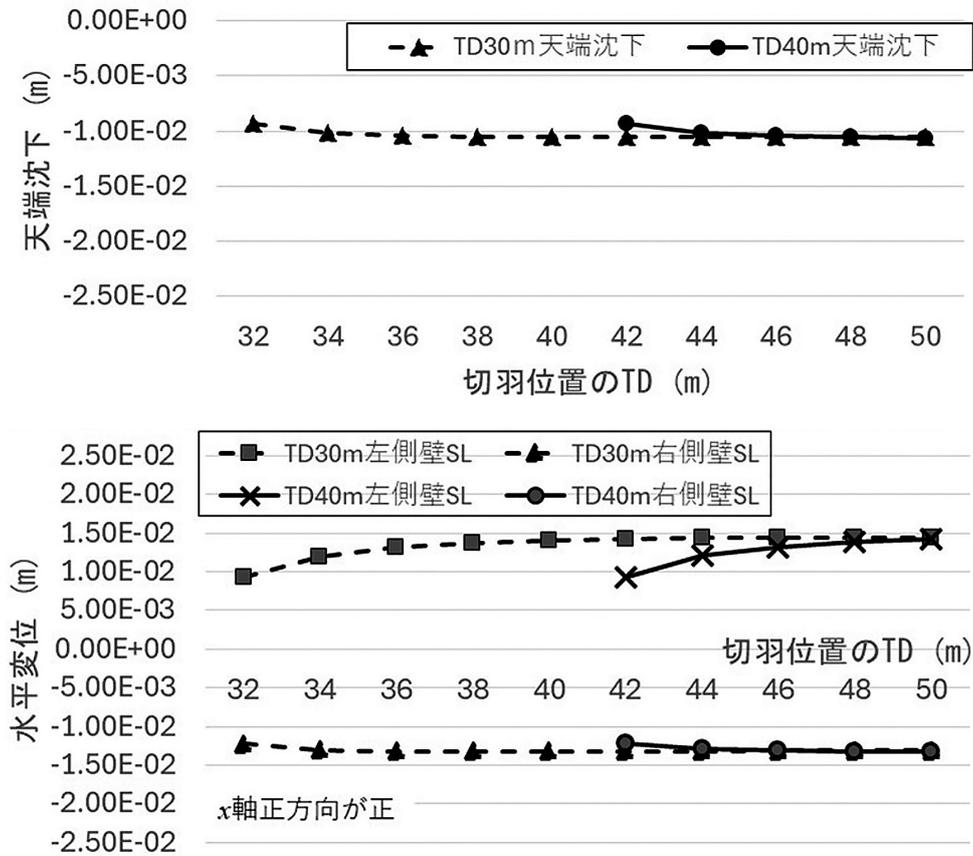


図4 トンネル掘削時の壁面変位 (CH級の均質モデル).

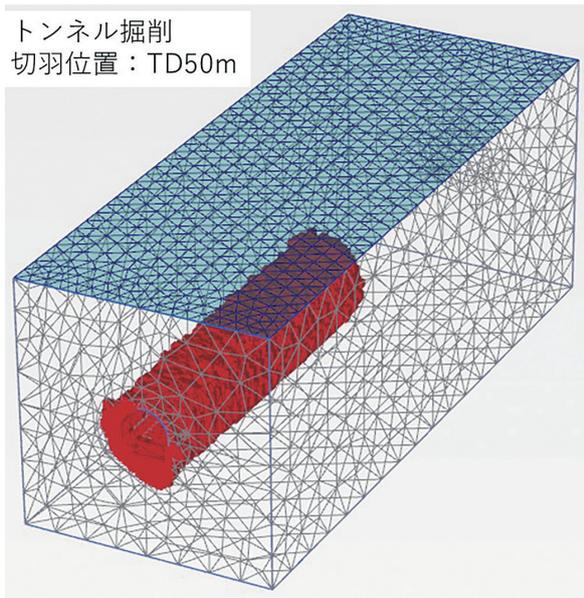


図5 トンネル掘削時の塑性域分布 (CH級の均質モデル).

しているため、高い初期地圧の下で天端沈下は最大でも 10mm 程度である。また、初期地圧の方向の影響を受け、トンネル側壁の水平変位の方が天端沈下より大きく約 15mm 程度生じているが、塑性域はトンネル壁面近傍に限定される。

このような状況の岩盤変位を計測データとして用い、均質な岩盤の物性の推定状況を図6 (1), (2), (3) に示す。図6 (1), (2), (3) は横軸に切羽位置の TD を、縦軸に各アンサンブルメンバーで得られる各物性値の推定値を示しており、切羽掘進 2m ごとにそれまでの推定値の事前分布と、計測点で得られた壁面変位を用いてデータ同化を行った事後分布を示す。またその度数分布もその右に表示している。切羽 2m ごとに得られるこれらの表示は、視認性を確保するため正確な切

地下構造物周辺地山の変形挙動予測を目的とした
データ同化の適用性に関する基礎的検討

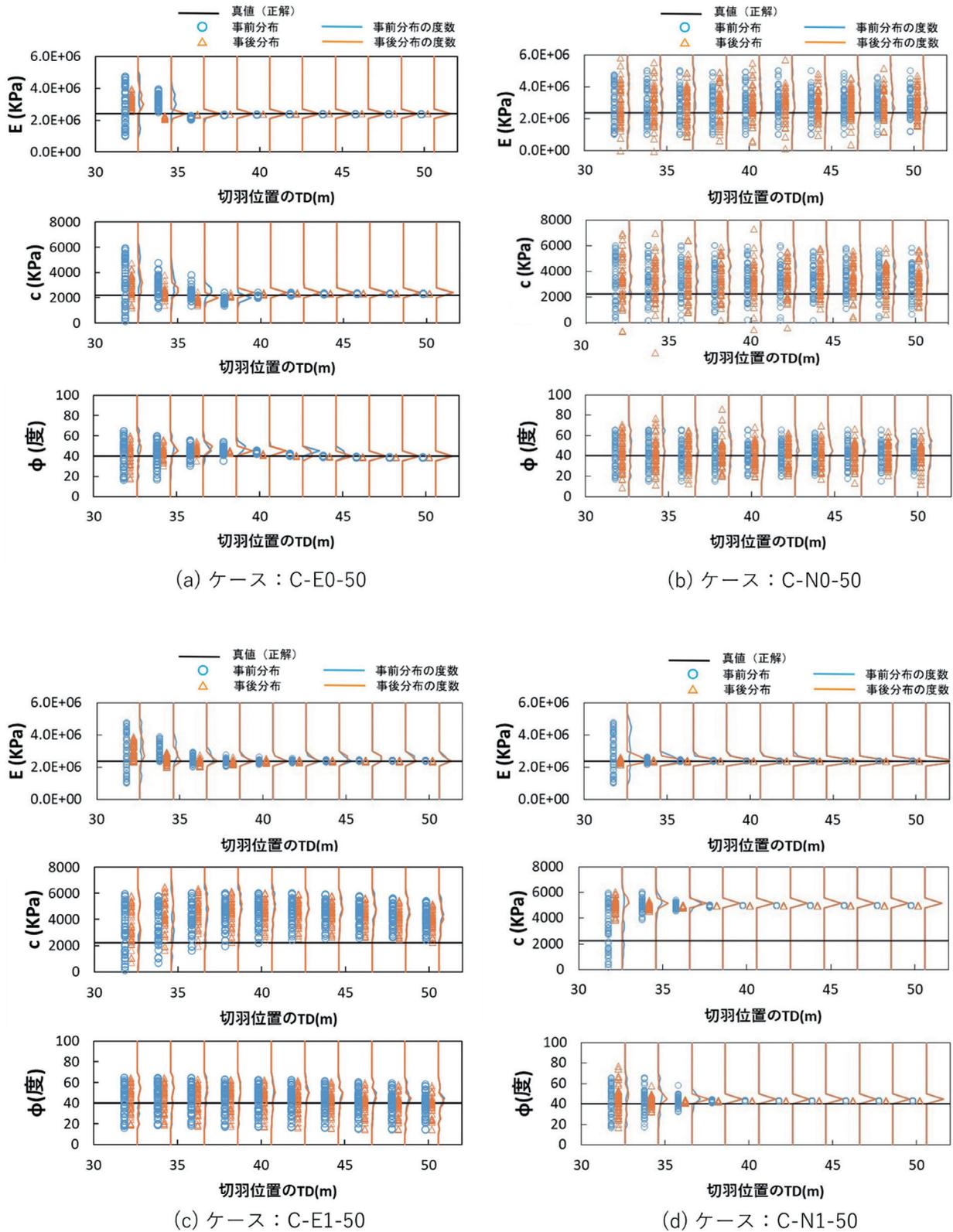


図 6 (1) 均質モデルの物性値の推定結果 (CH 級岩盤).

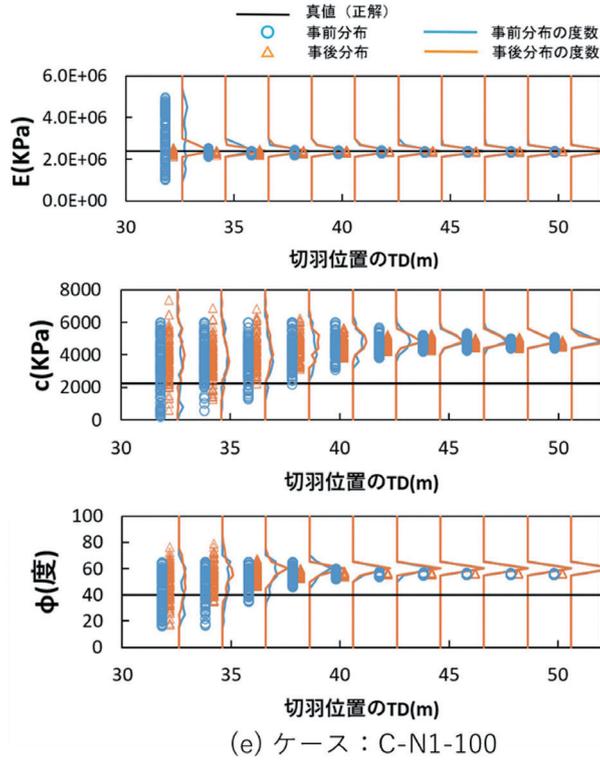


図 6 (2) 均質モデルの物性値の推定結果 (CH 級岩盤).

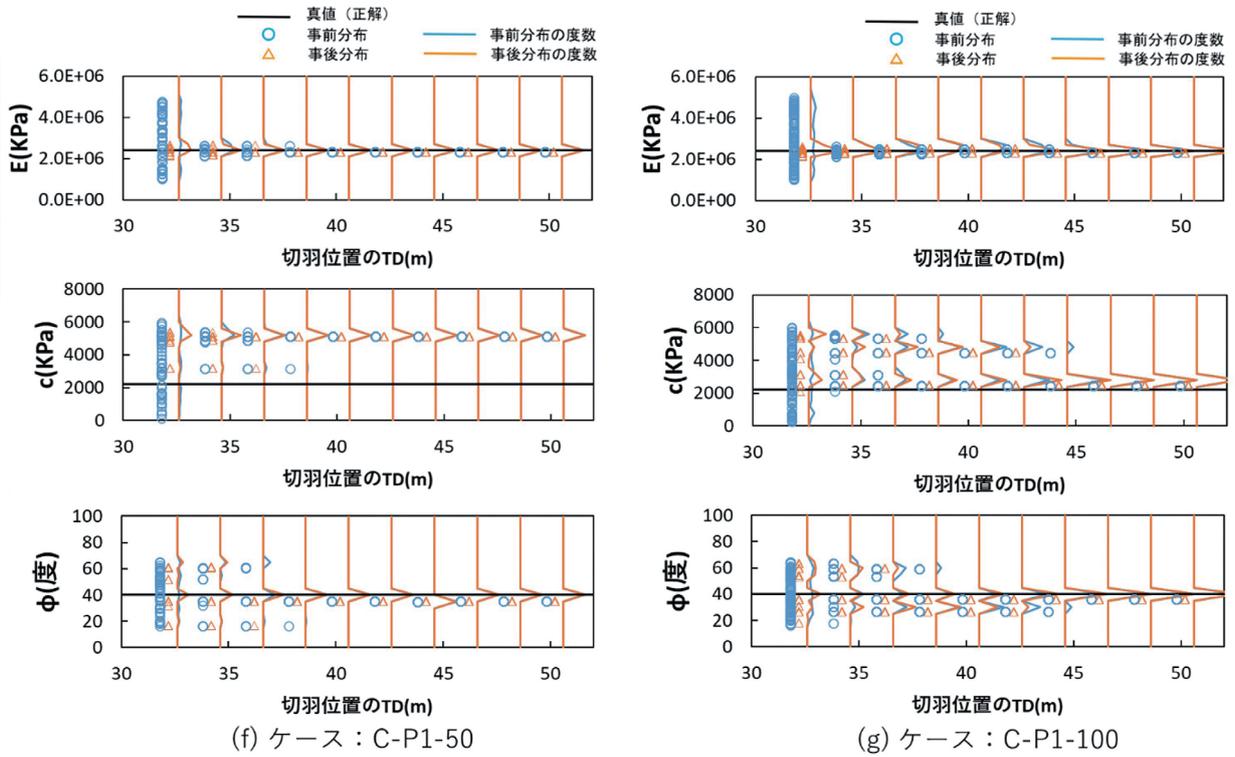


図 6 (3) 均質モデルの物性値の推定結果 (CH 級岩盤).

羽位置の左右に若干移動させて表示している。

ケース C-E0-50 では、 E 、 c 、 ϕ すべての推定が良好に行われている。このケースは観測ノイズがない状況（観測ノイズが極小値）を想定しているため、CH 級の硬岩で 10～15 mm 程度の変位に対しても ESTKF では推定可能な事が確認できる。一方、ケース C-N0-50 では E 、 c 、 ϕ の 50 個のアンサンブルメンバーがいずれも初期の一樣分布から真値に収束する傾向を示さない。この原因に関して別途詳細を調べた結果、観測ノイズを極小値にすると、式 (3) の尤度が 50 個すべてのアンサンブルメンバーで 0 となる。これは式 (3) の観測値と 1 期先予測の差 $\mathbf{y}_t - \mathbf{H}_t \mathbf{x}_{t/t-1}$ に対して観測ノイズの分散 σ^2 を対角項に持つ \mathbf{R}_t^{-1} が相対的に大きくなるため、指数関数内が負の大きな数値となることから尤度が 0 になる。もちろん、十分多くのサンプル数（粒子数）を設定した場合には、その中でいくつかのものは尤度が 0 にはならず、観測ノイズが小さく精度のよい計測値に対して精度の高い推定を行うことができるものと考えられる（中村ら, 2005; 樋口, 2011）。しかし、弾塑性解析などの非線形数値解析を予測解析に用いる場合、一般に収束計算に時間を要する。このため 1 章に記載したトンネル工学分野での現場の時間的制約を考慮すると、数千～数万個のサンプル数を用いたデータ同化は困難と考えられる。このような ESTKF と NETF の違いは、図 1 に示した EnKF 系と PF 系の手法の違いによるもので、手法の違いにより観測ノイズとサンプル数（アンサンブルメンバー数および粒子数）の設定に注意が必要なことがわかる。

次にケース C-E1-50 では E は良好な推定を示すが、 c 、 ϕ は真値に収束していない。観測ノイズ σ が 1 mm 程度であっても塑性域が全体挙動に占める影響が少なく、そのパラメータを推定する

には感度が低いためと考えられる。これは別途検討した結果（Aono and Okuno, 2023 ; 青野ら, 2023）と整合する。

一方、ケース C-N1-50 では E 、 ϕ の推定は良好であるが、 c の推定値が真値と異なっている。この理由として、推定過程で一時的に観測値を再現できる当てはまりのよい値に推移し、そこで「退化」が生じたためと考えられる。PF 系のデメリットとして粒子数が少ないと「退化」が生じることが知られており（中村ら, 2005）、50 個程度のアンサンブルメンバー数では退化の回避が困難な可能性が考えられる。

このため NETF においてアンサンブルメンバー数を 100 に設定した C-N1-100 を図 6 (2) に、また PF においてアンサンブルメンバー数を 50 と 100 に設定した C-P1-50 と C-P1-100 を図 6 (3) に示す。その結果、C-N1-100 は先の C-N1-50 と比較すると、特に粘着力 c の推定過程の「分散」に変化が見られる。この理由として、NETF は PF 系の手法であるが、EnKF が KF と 2 次モーメント（分散共分散）まで一致するようにアンサンブルの修正（観測更新）を行うことにヒントを得て、NETF では非線形・非ガウス性の確率分布に対してベイズ理論に基づく事後分布に 2 次モーメント（分散共分散）まで一致するようにアンサンブルの修正（観測更新）を行うよう改良された手法であることの効果表れているものと考えられ、急激な退化が回避されているように考えられる。ただし、本ケースの例では推定値が正解値に近づく改善効果までは認められていない。一方、PF でデータ同化を行った C-P1-50 と C-P1-100 では、図 1 に示した PF 系のアルゴリズムによるイメージに近い観測更新過程の様相が再現されており、図 1 の EnKF 系のアルゴリズムによるイ

メージに近い観測更新過程の様相が再現されている図 6 (1) の C-E0-50 や C-E1-50 などと対照的である。さらに、推定値が正解値を再現できているかという点に着目すると、C-P1-50 では C-N1-50 と同様に E や ϕ の推定は正解値に近い値に収束しているが、 c の推定値は正解値とは異なる。しかし、アンサンブルメンバー数を 100 に増やした C-P1-100 では TD 50m に切羽位置が進むまでに E , c , ϕ のすべてが正解値近傍に収束している。このことからアンサンブルメンバー数を増やした効果が認められる。

以上を参考に、次節に示す不均質モデルでは NETF および PF の粒子数は 100 に設定したケースを実施した。

5.2 不均質モデルのデータ同化結果と考察

均質モデルと同様に、トンネル掘削解析を行って得られるトンネル壁面の変位の一部を図 7 に、また弾塑性解析で得られる塑性域分布を図 8 に示す。ここで注意すべき点として、不良地山を想定して D 級岩盤を設定した TD 50 ~ 90m の範囲は全て、トンネル掘削を行う前の初期応力状態から塑性域になってる点である。これは不良地山の状況としてトンネル掘削前から大きく緩んだ状態を設定したものである。このような状況でトンネルを掘削すると、図 7 の変位に示すように、D 級岩盤の TD 54m 位置では TD 60m まで掘削した時点で水平変位は左側壁 SL で約 60mm、右側壁 SL で約 80mm、天端沈下は約 80mm に近い変位が生じている。

このような岩盤変位を計測データとして用いて得られた岩盤物性の推定状況を図 9 (1), (2) に示す。図 6 と同様に、横軸に切羽位置の TD を、縦軸に各アンサンブルメンバーで得られる各物性値の推定値を示している。不均質なモデルである

ため、図 9 (1), (2) では切羽の位置と物性値の関係のグラフを岩級区分ごとに分けて示す。すなわち、図に示す「CH 級岩盤の推定」においては、横軸に示す切羽位置の TD 50 ~ 60m の範囲では、切羽は D 級岩盤領域まで掘進した状態において切羽手前 2m 位置まで順次設置した変位計で計測した壁面変位を用いて、TD 0 ~ 50m の CH 級岩盤の物性の推定結果をグラフにして示している。同様に「D 級岩盤の推定」においては、横軸に示す切羽位置の TD 30 ~ 50m の範囲では、切羽は CH 級岩盤領域にある状態において切羽手前 2m 位置まで順次設置した変位計で計測した壁面変位を用いて、TD 50 ~ 90m の D 級岩盤の物性の推定結果をグラフに示している。すなわち、「D 級岩盤の推定」において横軸の切羽位置の TD 30 ~ 50m の範囲は、前方の掘削していない D 級岩盤の物性の推定を行っている。この不均質性に注意するため CH 級と D 級の岩盤等級の領域境界を図中に赤字と赤色の一点破線で示しているが、岩盤等級が大きく変化する TD 50m 前後に切羽が到達すると、2つの岩盤領域の物性の推定結果に変化が見られる。

ケース D-E1-50 の CH 級岩盤の推定では、CH 級が存在する TD 50m までに E は推定されるが、 c , ϕ の推定は十分になされていない。しかし、TD 50m を超えた D 級の領域に切羽が掘進すると CH 級の c , ϕ の推定値が真値に収束する。これは両岩級境界での相互作用的な挙動により CH 級岩盤の c , ϕ の推定が進むものと考えられ、加えて EnKF 系統の手法は基本的に退化を生じない(中村ら 2005) ため、ESTKF では弾塑性域に加えて弾塑性域でも良好な推定結果が得られたものと考えられる。一方、D 級岩盤の物性は、TD 44 ~ 46m 辺りの両岩盤境界手前 4 ~ 6m 程度から E の推定値に変化が現れ、TD 50m でまず E が

地下構造物周辺地山の変形挙動予測を目的とした
データ同化の適用性に関する基礎的検討

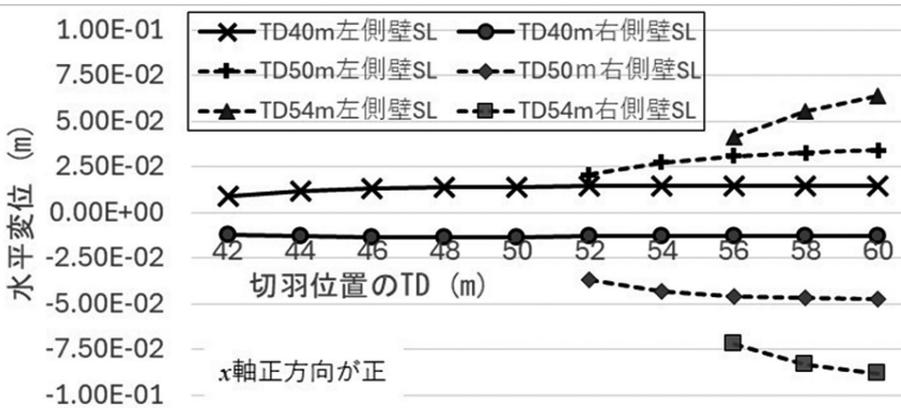
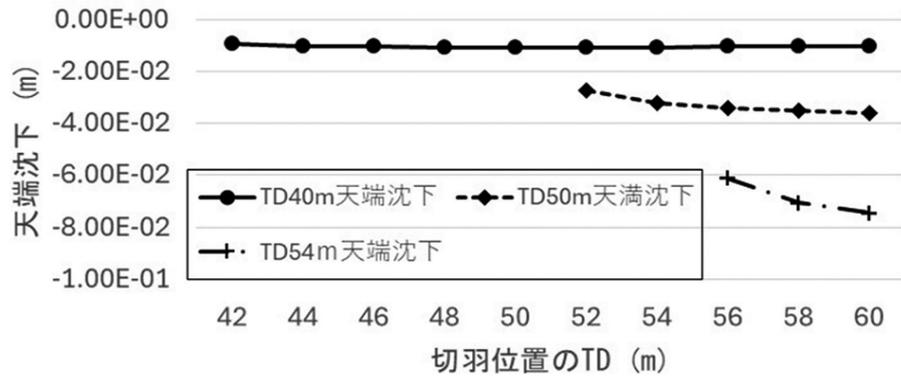


図7 トンネル掘削時の壁面変位 (CH級とD級の不均質モデル).

推定され、その後 c 、 ϕ が推定される。このため前方探査としてD級岩盤の数十m手前のCH級岩盤掘削前からD級岩盤を推定するのは困難と考えられる。しかし、塑性域が主となるTD50m以上の領域では、 c 、 ϕ の推定も良好に行われている。以上は既存の検討（青野ら，2021；Aono and Okuno, 2023；青野ら，2023）に整合する結果である。

一方、粒子数を100に増加させたケースD-N1-100とD-P1-100では、CH級岩盤の E およびD級岩盤の ϕ は真値に概ね一致しているが、他の物性値は異なる値に収束・退化しており、この程度の粒子数では退化を回避できていないと考えられる。ただし、NETFのケースD-N1-100では「観測更新後」の「分散」の様相が、PFのケースD-P1-100と異なり急激な退化は回避されてい

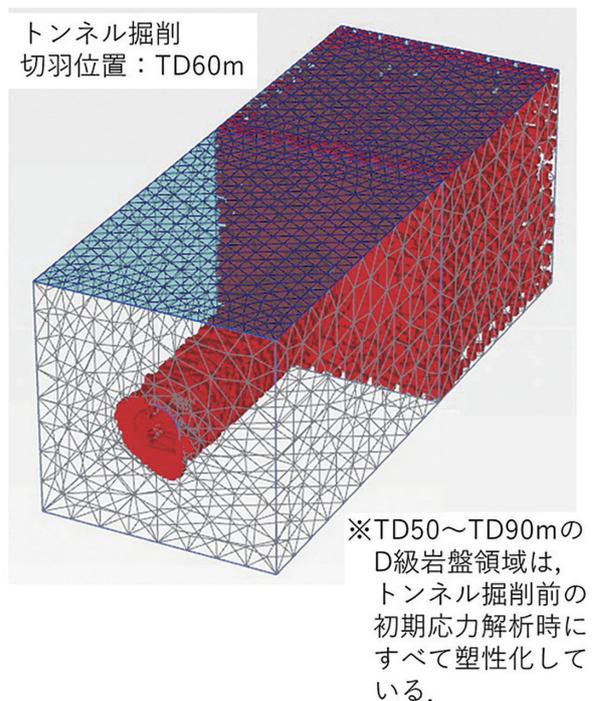
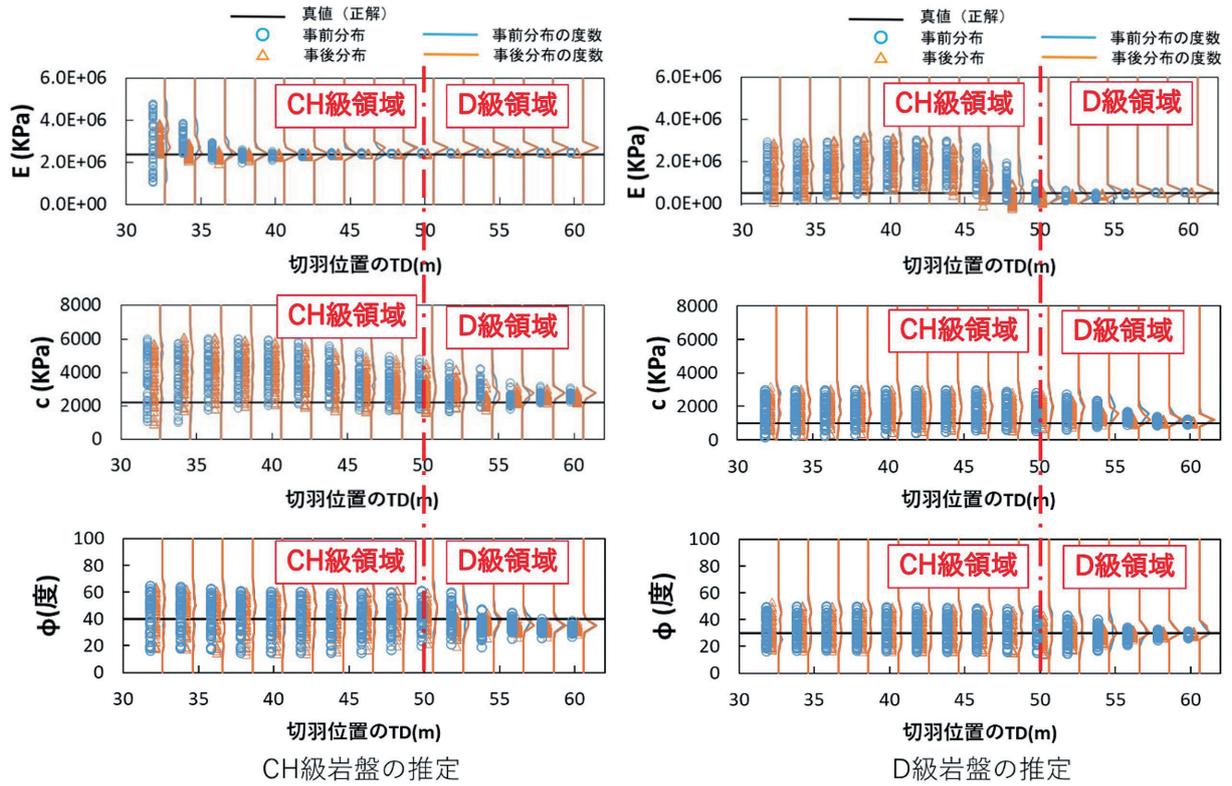
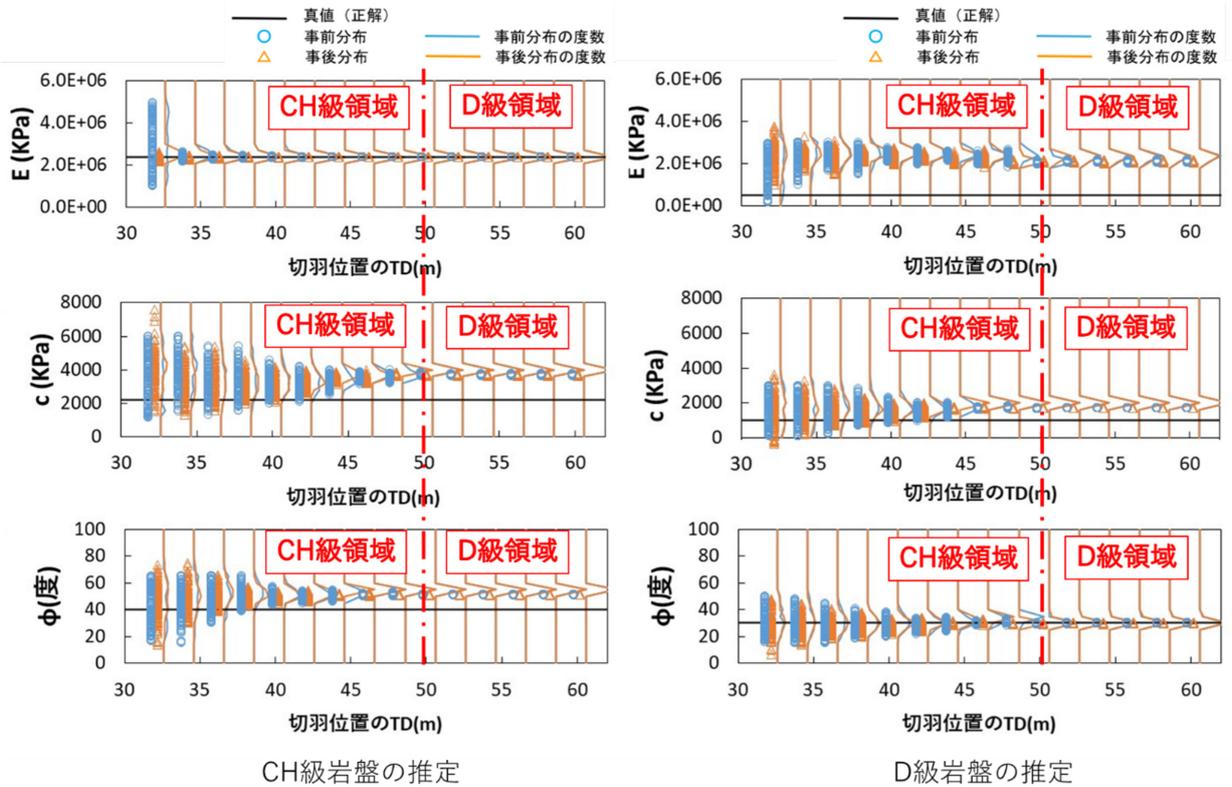


図8 トンネル掘削時の塑性域分布 (CH級とD級の不均質モデル).



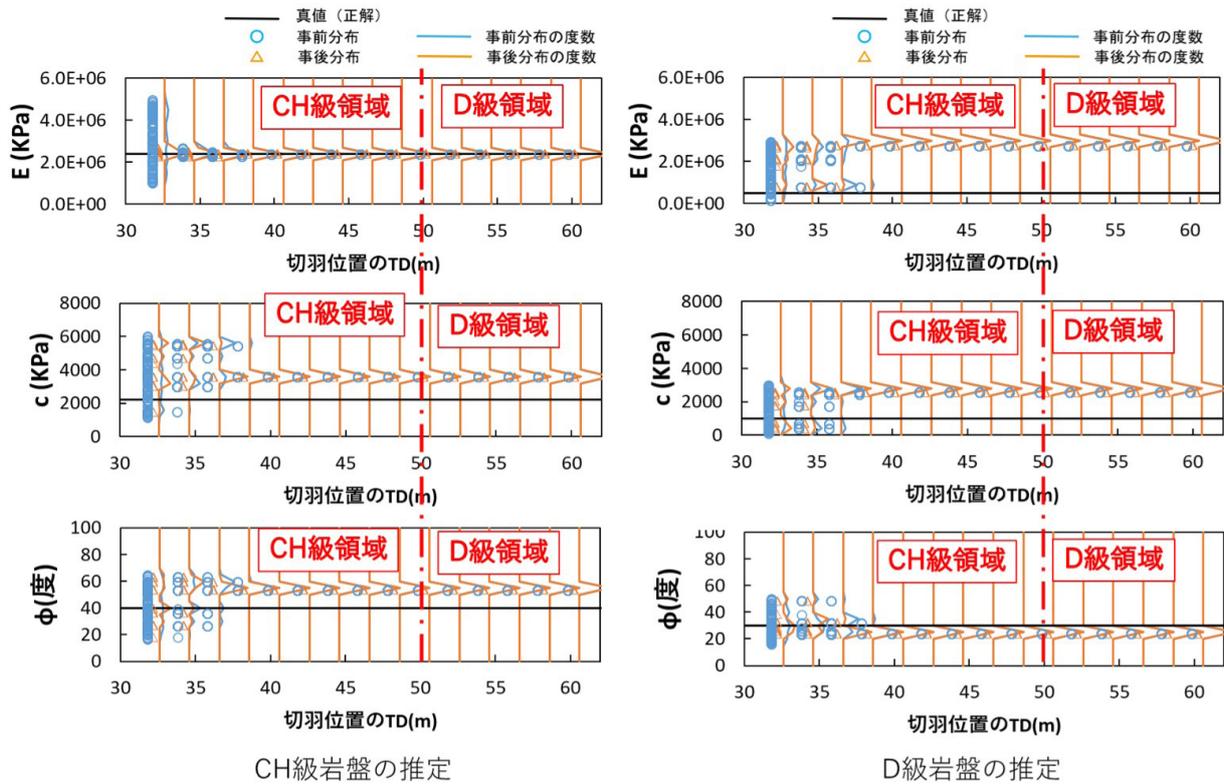
(a) ケース：D-E1-50



(b) ケース：D-N1-100

図9 (1) 不均質モデルの物性値の推定結果 (CH級とD級の岩盤).

地下構造物周辺地山の変形挙動予測を目的とした
データ同化の適用性に関する基礎的検討



(c) ケース : D-P1-100

図 9 (2) 不均質モデルの物性値の推定結果 (CH 級と D 級の岩盤).

る。この理由は前述のケース C-N1-100 の「分散」と同様に、NETF は非線形・非ガウス性の確率分布に対してベイズ理論に基づく事後分布に 2 次モーメントまで一致するようにアンサンブルの修正 (観測更新) を行った効果と考えられる。

6. おわりに

本検討ではトンネル掘削時のデータ同化の適用性に関する基礎的な検討として、模擬的に作成した変位データを用いて EnKF 系と PF 系に属する 2 種類の手法 (ESTKF と NETF) の適用性について検討した。また、両手法との比較のため PF によるデータ同化も一部実施した。

特に弾塑性挙動を示す岩盤物性の推定を中心に検討し、PF 系では観測ノイズの分散が極めて

小さい場合に尤度が 0 となり、推定値が更新されない場合があることを確認した。

次に、変位計測機器の観測ノイズを考慮した推定では、EnKF 系の手法は基本的に退化を生じないことから ESTKF では弾性域で変形係数の良好な推定結果が得られたものと考えられる。ESTKF ではさらに硬岩中に不良地山が突発的に出現するような岩盤境界付近では、硬軟両岩盤の相互作用的な挙動により両岩盤物性が推定できる可能性も認められた。ただし、硬岩掘削中に切羽前方の不良地山の物性推定の可能性は、境界手前 4 ~ 6m 程度から推定値に変化が現れ始めることから、数十 m 程度以上先の推定には前方探査技術など (例えば削孔エネルギーなど) 他のデータも併用することが望まれる。

一方、PF 系の手法である NETF では、粒子数

50～100程度の推定では退化により必ずしも真値を推定できない可能性が認められた。しかし、NETFは非線形・非ガウス性の確率分布に対してベイズ理論に基づく事後分布に2次モーメント(分散共分散)まで一致するようにアンサンブルの修正(観測更新)を行うよう改良された手法であるため、観測更新後の「分散」の様相はPFとは異なり、EnKF系のESTKFに類似して急激な退化は回避される可能性が窺えた。

以上のデータ同化手法の特徴・適用性を認識したうえで、実際の岩盤でのトンネル掘削時のデータ同化を進める必要がある。また、今後これらの手法を基礎に不確実性も考慮した推定手法の改良と適用性を検討する予定である。

文献

- 青野泰久・櫻井英行・山本真哉(2021): 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, **26**, E-03-02.
- Aono, Y. and Okuno, T. (2023): Data assimilation for prediction of surrounding rock mass behavior during underground structure construction phases. *Paper presented at the 15th ISRM Congress*.
- 青野泰久・奥野哲夫(2023): 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. 第26回応用力学シンポジウム, 11011-15-05.
- 有本卓(1977): カルマン・フィルター. 産業図書, 249p.
- 淡路敏之・蒲地政文・池田元美・石川洋一(2009): データ同化ー観測・実験とモデルを融合するイノベーションー. 京都大学学術出版会, 284p.
- Evensen, G. (1994): Sequential data assimilation with a nonlinear quasi-geostrophic model using Monte Carlo methods to forecast error statistics. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **99**, 10143–10162.
- Evensen, G. (2006): *Data Assimilation: The Ensemble Kalman Filter*. Springer, 279p.
- 岩盤分類基準化委員会編(2004): 新規制定地盤工学会基準・同解説 岩盤の工学的分類方法(JGS 3811-2004). 地盤工学会, 70p.
- Gordon, N. J., Salmond, D. J. and Smith, A. F. M. (1993): Novel approach to nonlinear/non-Gaussian Bayesian state estimation. *IEE Proc., F, Radar Signal Process.*, **140**, 107–113.
- 樋口知之(2011): データ同化入門 一次世代のシミュレーション技術ー. 朝倉書店, 240p.
- 片山 徹(1983): 応用カルマンフィルタ. 朝倉書店, 198p.
- Kitagawa, G. (1996): Monte Carlo filter and smoother for non-Gaussian nonlinear state space models. *Journal of Computational and Graphical Statistics*, **5**(1), 1–25.
- 北川源四郎(2005): 時系列解析入門. 岩波書店, 278p.
- 村上 章・登坂宣好・堀 宗朗・鈴木 誠(2002): 有限要素法・境界要素法による逆問題解析ーカルマンフィルタと等価介在物法の応用ー. コロナ社, 187p.
- 村上 章・西村伸一・藤澤和謙・中村和幸・樋口知之(2009): 粒子フィルタによる地盤解析のデータ同化. 応用力学論文集, **12**, 99–105.
- 中村和幸・上野玄太・樋口知之(2005): データ同化: その概念と計算アルゴリズム. 統計数理, **53**(2), 211–229.
- Nerger, L., Janjić, T., Schröter, J. and Hiller, W.

- (2012): A unification of ensemble square root Kalman filters. *Monthly Weather Review*, **140**, 2335–2345.
- 奥野哲夫・鈴木 誠 (1993) : 不圧地下水を対象とした拡張カルマンフィルタによる透水係数の空間分布推定法. 土木学会論文集, **469**/ III -23, 93–102.
- 奥野哲夫・鈴木 誠・市川康明 (1994) : 複数の揚水試験結果を用いた透水係数の空間分布推定と地下水流動の将来予測. 土木学会論文集, **493**/ III -27, 165–174.
- 奥野哲夫・鈴木 誠 (1995) : ベイズ決定理論と観測的方法を用いた掘削工事における最適排水量の設定とその更新. 土木学会論文集, **523**/ III -32, 69–81.
- 奥野哲夫・鈴木 誠・本城勇介 (1997) : ABIC と拡張カルマンフィルタを用いた最適な地下水解析モデルの推定. 土木学会論文集, **575**/ III -40, 179–198.
- 酒井貴之・高岡秀明・菅原将博 (2022) : アサハン第3水力発電所プロジェクトの現況 (2022年). 電力土木, **421**, 100–102.
- Tödter, J. and Ahrens, B. (2015): A Second-Order Exact Ensemble Square Root Filter for Nonlinear Data Assimilation. *Monthly Weather Review*, **143**, 1347–1367.