

コンクリートの破壊シミュレーションにおける 逐次データ同化の適用性の検討

Examination of Applicability of Sequential Data Assimilation in Fracture Simulation of Concrete

相馬悠人¹⁾ 車谷麻緒²⁾
Yuto Soma and Mao Kurumatani

¹⁾工博 福島工業高等専門学校 都市システム工学科

(〒 970-8034 福島県いわき市平上荒川字長尾 30, E-mail: soma@fukushima-nct.ac.jp)

²⁾工博 茨城大学大学院 理工学研究科 都市システム工学領域

(〒 316-8511 茨城県日立市中成沢町 4-12-1, E-mail: mao.kurumatani.jp@vc.ibaraki.ac.jp)

In this study, we applied the Ensemble Kalman Filter to concrete fracture simulation and developed a method for estimating material parameters. Furthermore, we evaluated the applicability and effectiveness of the method by conducting numerical experiments on notched concrete beams. First, we performed a numerical experiment known as a twin experiment. The results confirmed the influence of analysis conditions on the estimation accuracy of material parameters. Next, we applied sequential data assimilation using experimental data to estimate the material parameters of the concrete used in the experiments and evaluated the accuracy of the estimation.

Key Words : Concrete, Fracture Simulation, Damage Model, FEM, Data Assimilation

1. はじめに

コンクリート構造物の複雑な破壊挙動を高精度に予測するためには、実験と数値シミュレーションを併用することが効果的かつ効率的な評価方法として有効である。実験では、実現象を直接測定するため、データの精度が高く保証されるが、測定範囲や試験条件、試験コストなどに制約がある。一方、数値シミュレーションは、広範囲かつ詳細な時空間的データを得られるが、初期条件や境界条件、パラメータなどの設定に不確実性が含まれる。そこで、実験と数値シミュレーションのそれぞれの利点を統合し、より高精度な予測を実現するための手法として、「データ同化」が活用されている。

データ同化は、気象学や海洋学の分野において発展してきた手法であり、観測データと数値シミュレーションを統合することで、天気予報や気候変動などの予測精度の向上に貢献している。近年では、工学分野においてもデータ同化技術を応用した事例が増えており、非線形複合構造のパラメータ推定に応用した例 [1] や、地盤構造物内の初期条件の推定や土の最適な弾塑性モデルの選定などに応用した例 [2,3] が見られる。しかしながら、コンクリート構造へのデータ同化技術の応用例もあるものの [4,5]、強い非線形性を伴う破壊シミュレーションへの適用例はほとんどない。コンクリートは、力学挙動のばらつきが大きい材料であるため、数値シミュレーションの信頼性の評価は重要な課題である。データ同化は、実験と数値シミュレーションの不確実性を考慮したうえで両者を統合するため、コンクリートの数値シミュレーションにデータ同化を適用することができれば、信頼性の高い数値シミュレーションを実現

できると考えられる。

そこで本研究では、データ同化をコンクリートの破壊シミュレーションに適用することにより、コンクリートの破壊シミュレーションにおける材料パラメータを推定できる手法を構築する。そして、双子実験と呼ばれる数値実験を実施することにより、本手法における逐次データ同化の適用性を検証する。さらに、コンクリートはりの曲げ試験の実験データを活用して、本手法を適用することにより、実際のコンクリート材料の材料パラメータの推定を試みる。

2. コンクリートの材料モデル

本研究では、コンクリートの材料モデルに車谷らが提案した等方性損傷モデル [6] を適用する。本手法は、単位面積の破壊面を形成するために必要なエネルギーである破壊エネルギーを考慮しており、エネルギー収支を適切に解くことで、メッシュサイズにほとんど依存しない方法である。等方性損傷モデルの構成式は次式で表される。

$$\sigma = (1 - D(\kappa))c : \varepsilon \quad (1)$$

ここで、 σ はコーシー応力テンソル、 ε は微小ひずみテンソル、 c は弾性係数テンソルである。 $D(\kappa)$ は 0~1 の値を取る損傷変数であり、損傷が全く生じていない状態を 0、完全に損傷した状態を 1 とする変数である。

コンクリートのひずみ軟化挙動をモデル化するため、損傷変数には指数関数で表される次式を適用する。

$$D(\kappa) = 1 - \frac{\kappa_0}{\kappa} \exp\left(-\frac{E\kappa_0 h_e}{G_f} (\kappa - \kappa_0)\right) \quad (2)$$

ここで、 E はヤング率、 G_f は破壊エネルギー、 κ_0 は破壊発生ひずみ、 h_c は要素長さである。 κ は変形履歴における等価ひずみの最大値であり、一度生じた損傷が回復しないことを表している。

本研究で採用する等方性損傷モデルは、ヤング率 E 、ポアソン比 ν 、圧縮引張強度比 k 、破壊発生ひずみ κ_0 、破壊エネルギー G_f の計 5 つの材料パラメータで構成される。

3. 逐次データ同化による材料パラメータ推定

(1) アンサンブルカルマンフィルタ [7]

データ同化は、非逐次データ同化と逐次データ同化に大別される。非逐次データ同化は、観測データを一括で利用し、数値シミュレーションの初期条件やパラメータを最適化する手法である。この手法では、全ての観測データが得られた後に解析を実施するため、逐次的なデータ更新は行われない。非逐次データ同化は、安定した観測データが利用可能な場合に有効であるが、逐次的なシミュレーション更新ができないため、時系列変化の把握には適していない。また、実装が容易ではないという特徴がある。

一方、逐次データ同化は、新しい観測データが得られるたびにシミュレーションを更新する手法である。代表的な逐次データ同化の手法として、アンサンブルカルマンフィルタや粒子フィルタが挙げられる。この手法は、時間変化を伴う問題に適しており、コンクリートの破壊のように進行する現象のパラメータ推定にも有効である。また、実装が容易であるといったメリットがある。

本研究では、非線形問題に適用可能な逐次データ同化の一種であるアンサンブルカルマンフィルタを適用する。アンサンブルカルマンフィルタは、非線形問題にも適用が容易であり、比較的精度の高いアルゴリズムである。データ同化において定義されるシステムモデルと観測モデルは次式で表される。

$$\mathbf{x}_t = f(\mathbf{x}_{t-1}, \mathbf{v}_t) \quad (3)$$

$$\mathbf{y}_t = \mathbf{H}_t \mathbf{x}_t + \mathbf{w}_t \quad (4)$$

ここで、 f は非線形なシミュレーションモデルを表す。 \mathbf{x}_t は状態ベクトル、 \mathbf{v}_t はシステムノイズであり、平均ベクトル $\mathbf{0}$ 、分散共分散行列 \mathbf{Q}_t で表されるガウス分布従うベクトルである。 \mathbf{y}_t は観測ベクトル、 \mathbf{w}_t は観測ノイズであり、平均ベクトル $\mathbf{0}$ 、分散共分散行列 \mathbf{R}_t で表されるガウス分布従うベクトルである。 \mathbf{H}_t は観測行列であり、観測ベクトルと比較する状態ベクトルの値を抜き出すための行列である。

図-1 に示すように、モンテカルロ近似（アンサンブル近似）により、状態ベクトルの確率密度関数を表す。アンサンブル平均 $\bar{\mathbf{x}}_t$ と分散共分散行列 \mathbf{P}_t は次式で表される。

$$\bar{\mathbf{x}}_t \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mathbf{x}_t^{(i)} \quad (5)$$

$$\mathbf{P}_t \approx \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\mathbf{x}_t^{(i)} - \bar{\mathbf{x}}_t)(\mathbf{x}_t^{(i)} - \bar{\mathbf{x}}_t)^T \quad (6)$$

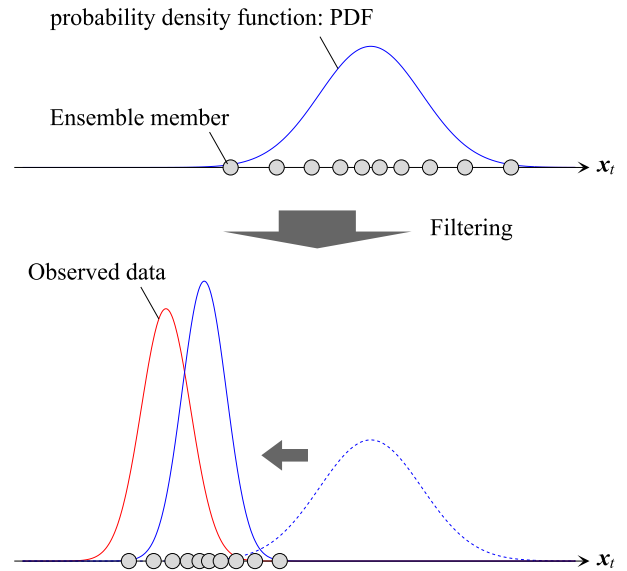


図-1 アンサンブルカルマンフィルタの概要

ここで、 N はアンサンブル数である。

ベイズの定理に基づき、状態ベクトルは次式によって修正される。

$$\mathbf{x}_{t|t}^{(i)} = \mathbf{x}_{t|t-1}^{(i)} + \mathbf{K}_t(\mathbf{y}_t - \mathbf{H}_t \mathbf{x}_{t|t-1}^{(i)}) \quad (7)$$

ここで、添え字の $t|t-1$ は計算するステップにおける修正前の状態を表し、 $t|t$ は修正後の状態を表す。 \mathbf{K}_t はカルマンゲインであり、次式で表される。

$$\mathbf{K}_t = \mathbf{P}_{t|t-1} \mathbf{H}_t^T (\mathbf{H}_t \mathbf{P}_{t|t-1} \mathbf{H}_t^T + \mathbf{R}_t)^{-1} \quad (8)$$

(2) アンサンブルカルマンフィルタを用いた材料パラメータ推定

本研究では、等方性損傷モデルの系を表すベクトルとして、状態ベクトル \mathbf{x}_t を次式のように定義する。

$$\mathbf{x}_t = \{F_t, \mathbf{d}_t, \boldsymbol{\kappa}_t, \mathbf{p}_t\}^T \quad (9)$$

ここで、 F_t は数値シミュレーションによって得られる荷重、 \mathbf{d}_t は節点変位ベクトル、 $\boldsymbol{\kappa}_t$ は積分点における変形履歴における等価ひずみの最大値を並べたベクトル、 \mathbf{p}_t は推定する材料パラメータを並べたベクトルである。

一方、実験で得られる値を並べた観測ベクトルに関して、本研究では、実験において荷重のみが得られることを想定し、次式のように定義する。

$$\mathbf{y}_t = \hat{F}_t \quad (10)$$

ここで、 \hat{F}_t は実験で得られる荷重である。数値シミュレーションで得られる荷重と実験で得られる荷重を比較するため、観測ベクトル \mathbf{H}_t は、(1,1) 成分を 1 とし、それ以外の成分はゼロで表される行列となる。

4. アンサンブルカルマンフィルタの適用性検証

(1) 双子実験の概要

双子実験と呼ばれる数値実験を実施し、アンサンブルカルマンフィルタの適用性を検証する。双子実験と

は、実験データを用いずに、数値シミュレーションにより生成した計算結果を疑似的に実験データとして扱い、データ同化を実施することで、データ同化の適用性を検証する方法である。本研究では、図-2に示すような切欠きを有するコンクリートはりの曲げ試験を対象とし、双子実験を実施することで、コンクリートの破壊シミュレーションにおけるデータ同化の適用性を検証する。有限要素には4節点アイソパラメトリック四角形要素を使用した。節点数は1,722、要素数は1,614である。

疑似的な観測データを生成するため、材料パラメータを表-1に示すような普通コンクリートが取り得る平均的な値に設定し、強制変位0.3 mmを300 stepで与える非線形有限要素解析を実施した。数値シミュレーションにより得られた荷重の値に任意のばらつきを仮定することで、疑似的な実験データとして扱うこととした。

本検討で推定する材料パラメータとして、引張破壊の力学挙動に大きく影響するヤング率 E 、破壊発生ひずみ ϵ_0 、破壊エネルギー G_f の3つを対象とした。したがって、表-1に示す値を正しく推定できることを検証する。データ同化を実施する際の初期の材料パラメータは、ポアソン比と圧縮引張強度比は表-1の値とし、推定する3つの値に関しては、表-1の値の2倍の値に設定した。強制変位量およびステップ数は、観測データを生成した解析と同様とした。

(2) 材料パラメータの推定精度の検証

a) システムノイズの影響

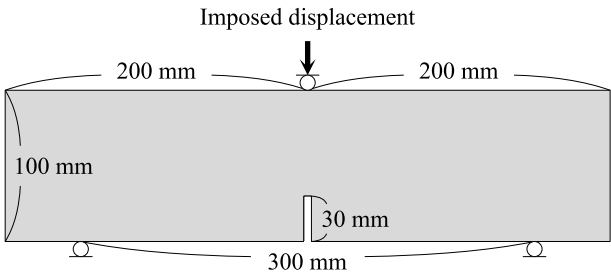
システムノイズが材料パラメータの推定精度に及ぼす影響を確認するため、システムノイズの異なる3つのケースについて推定結果を比較した。各材料パラメータの初期値の変動係数を10%, 20%, 30%に設定し、それぞれに対応する分散値をシステムノイズとして適用した。初期値はシステムノイズに従う正規乱数によってばらつかせた。観測データの標準偏差は100 N、アンサンブル数は100とした。

図-4に各材料パラメータの推定結果を示す。また、表-2に推定された各材料パラメータの相対誤差を示す。いずれの結果においても、データ同化の実施により、真値の材料パラメータに漸近していることが確認できる。また、相対誤差を比較すると、システムノイズとして設定した変動係数の値が大きくなるほど、材料パラメータの推定精度が向上する傾向が見られた。

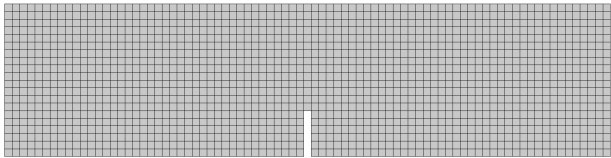
b) 観測ノイズの影響

観測ノイズが材料パラメータの推定精度に及ぼす影響を確認するため、観測ノイズの異なる3つのケースについて推定結果を比較した。荷重の分散値を0.01 kN², 0.1 kN², 1 kN²に設定し、これを観測ノイズに適用した。システムノイズは20%, アンサンブル数は100とした。

図-5に各材料パラメータの推定結果を示す。また、表-3に推定された各材料パラメータの相対誤差を示す。観測ノイズの分散値の値が大きい場合、真値の材料パラメータに漸近しないことが確認できる。したがって、観測データとして使用するデータは、分散値が小さいものを選択することで、材料パラメータをより精度よく推定できることがわかる。



(a) Geometry and boundary condition



(b) Finite element model

図-2 切欠きを有するコンクリートはりの曲げ試験のシミュレーション

表-1 観測データを生成するために使用した材料パラメータ

E	ν	k	ϵ_0	G_f
30 GPa	0.2	10	0.0001	0.1 N/mm

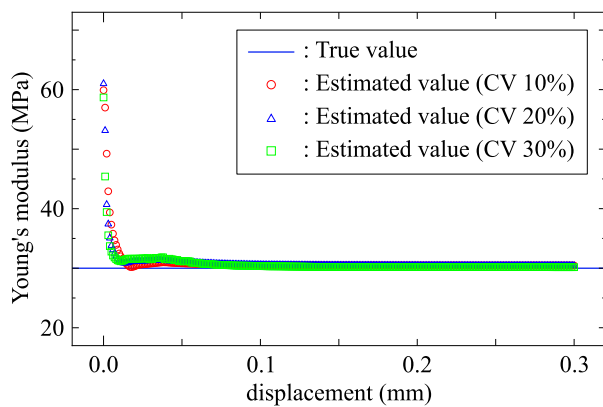
5. 実験データを用いたアンサンブルカルマンフィルタの適用性検証

(1) 切欠きを有するコンクリートはりの曲げ試験の概要

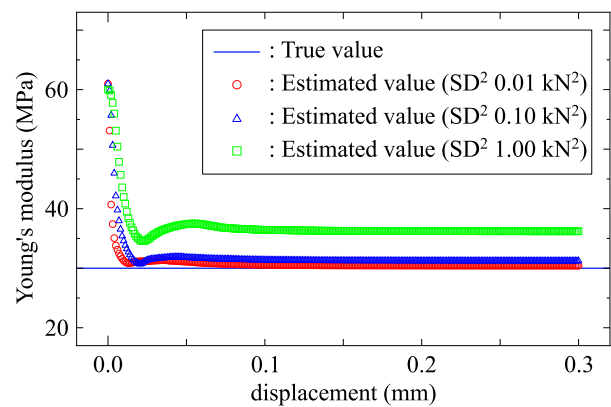
実験データを用いてアンサンブルカルマンフィルタの適用性を検証するため、既往研究 [8] で実施された切欠きを有するコンクリートはりの曲げ試験の実験データを活用した。コンクリートはりの寸法および試験条件は、図-2に示す条件と同様である。3点曲げ試験は、JCI 基準 JCI-S-001-2003[9] に準拠して実施された。試験結果のばらつきを考慮するため、試験体を20体同時に作成し、それぞれ試験を実施した。コンクリートには、普通コンクリートを使用した。試験時に円柱供試体の圧縮試験を行い、圧縮強度および静弾性係数を測定した。圧縮強度の平均値は42.6 MPa、静弾性係数の平均値は34.6 GPaである。

(2) 逐次データ同化の条件

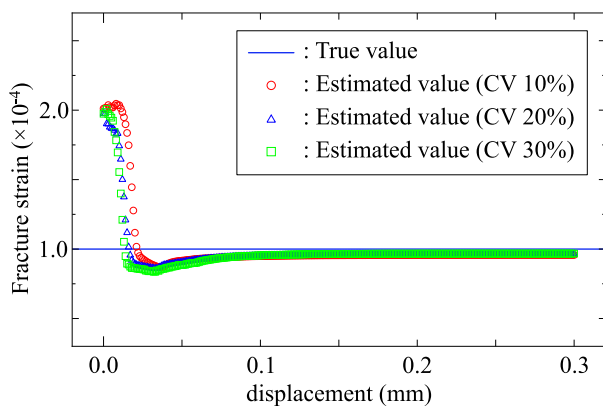
切欠きを有するコンクリートはりの有限要素モデルは、図-2に示すものと同様である。材料パラメータは、事前情報がないことを想定し、表-1に示すコンクリートが取る一般的な値を初期値とした。第4章で示した検証と同様に、推定する材料パラメータは、引張破壊の力学挙動に大きく影響を与えるヤング率 E 、破壊発生ひずみ ϵ_0 、破壊エネルギー G_f とする。それぞれの材料パラメータの初期値にばらつきを持たせるため、変動係数30%に対応する分散値をシステムノイズとして設定し、正規分布に従う乱数を用いて値をばらつかせた。強制変位9 mmを450stepで与え、1stepごとにデータ同化を実施した。



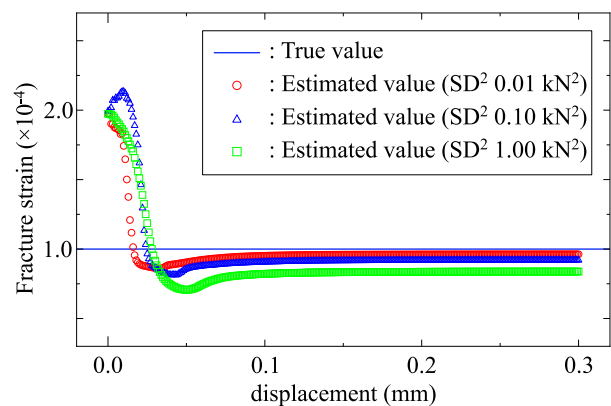
(a) Young's modulus



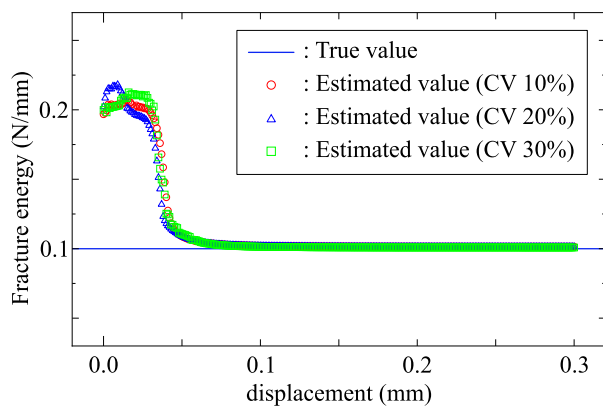
(a) Young's modulus



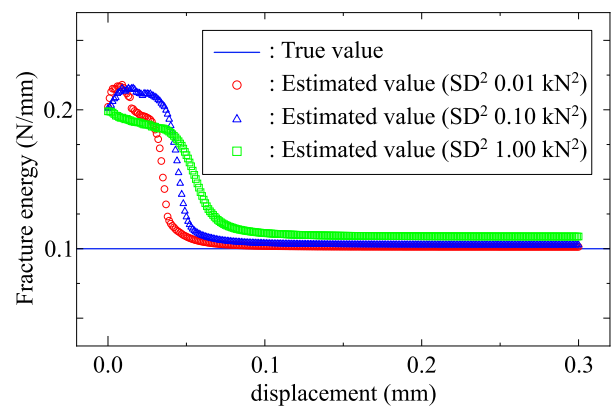
(b) Fracture strain



(b) Fracture strain



(c) Fracture energy



(c) Fracture energy

図-3 システムノイズの違いによる材料パラメータの推定結果

図-4 観測ノイズの違いによる材料パラメータの推定結果

(3) 材料パラメータの推定結果

図-5 に実験と解析における荷重－変位関係を示す。解析結果として、データ同化を行わず初期の材料パラメータで解析した場合と、データ同化を実施した場合を示している。データ同化を実施した結果は、実施していない結果と比べて、実験結果に近づいていることが確認できる。しかしながら、本観測データを用いたデータ同化では、最大荷重付近の観測ノイズが大きく、その影響により最大荷重の推定値に誤差が生じていることがわかる。

図-6 に材料パラメータの推定結果を示す。各材料パ

ラメータの推定結果は、いずれも特定の値に収束していることが確認できる。しかしながら、最大荷重付近の観測ノイズの影響により、材料パラメータの推定精度が低下している可能性が考えられる。したがって、ばらつきの小さい値を観測データとして使用するなどの対応が必要である。

6. おわりに

本研究では、コンクリートの破壊シミュレーションに逐次データ同化の一種であるアンサンブルカルマンフィルタを適用し、材料パラメータを推定する手法を

表-2 システムノイズの違いによる材料パラメータの相対誤差

CV	E	ε_0	G_f
10%	1.53%	-4.24%	1.51%
20%	1.44%	-3.71%	1.35%
30%	0.597%	-3.24%	0.905%

表-3 観測ノイズの違いによる材料パラメータの相対誤差

SD ²	E	ε_0	G_f
0.01 kN ²	1.44%	-3.71%	1.35%
0.1 kN ²	4.06%	-8.02%	2.66%
1 kN ²	20.7%	-16.2%	8.82%

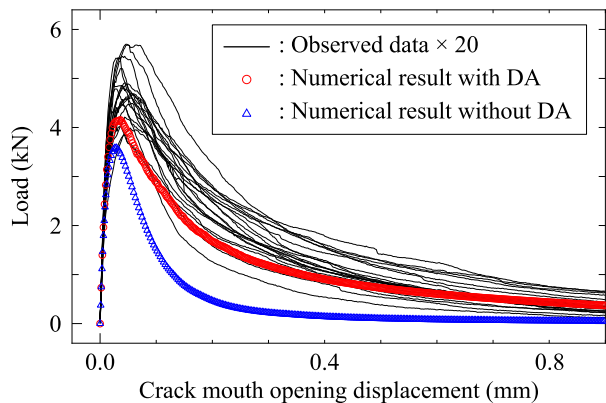


図-5 実験と解析における荷重 - 変位関係

構築した。また、切欠きを有するコンクリートはりの曲げ試験を対象に、双子実験および実験データを用いた検証を行い、アンサンブルカルマンフィルタの適用性を検証した。

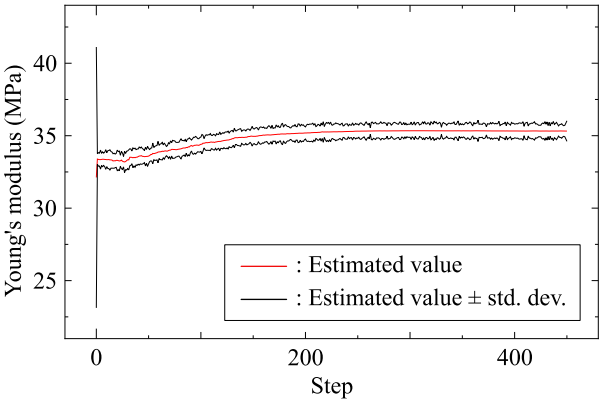
双子実験では、システムノイズおよび観測ノイズが材料パラメータの推定精度に与える影響を検証し、システムノイズが大きく、観測ノイズが小さいほど推定精度が向上することを確認した。一方、実験データを用いた検証では、データ同化を行うことで実験データの荷重 - 変位関係に近づくよう数値シミュレーションの結果が修正されたが、最大荷重付近では観測ノイズの影響が大きく、最大荷重の再現精度が十分ではない可能性が確認された。このため、ばらつきの小さい観測データを追加し、データ同化を実施するなどの対応が必要であると考えられる。

今後は、コンクリート表面のひずみデータを取得し、荷重に加えてひずみデータも考慮した観測データを用いて、データ同化による材料パラメータの推定精度を検証する予定である。

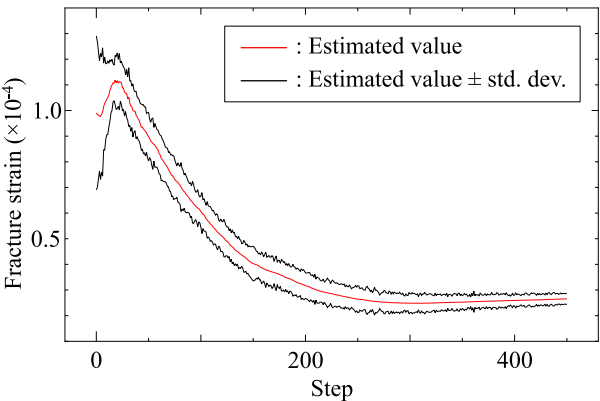
参考文献

[1] 秋田剛, 高木亮治, 嶋英志: アンサンブルカルマンフィルタによるモデルパラメータ推定-大変形を伴う非線形複合構造システムへの適用-, 日本計算工学会論文集, Vol.2010, pp.20100021, 2010.

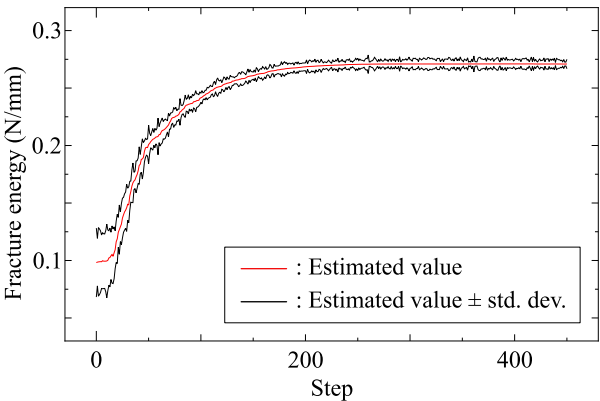
[2] 珠玖隆行, 西村伸一, 藤澤和謙: データ同化による地



(a) Young's modulus



(b) Fracture strain



(c) Fracture energy

図-6 材料パラメータの推定結果

盤構造物内の劣化箇所同定に関する基礎的研究, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol.68, No.2, pp.I.89-I.101, 2012.

[3] 新村隼人, 片岡資晴, 村上章, 大野進太郎, 藤澤和謙: 粒子フィルタによる土の弾塑性モデル/パラメータ同定, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol.68, No.2, pp.I.115-I.126, 2012.

[4] 松岡弘大, 貝戸清之, 徳永宗正, 渡辺勉, 曾我部正道: 逐次データ同化を利用した列車走行時の橋梁加速度応答に基づく変位応答推計, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.69, No.3, pp.527-542, 2013.

- [5] 山本佳士，久保洸太，藤森竣平，園田潤：データ同化を用いたコンクリート内部の比誘電率分布推定に関する基礎的検討，土木学会論文集，Vol.79, No.15, 2023.
- [6] 車谷麻緒，寺田賢二郎，加藤準治，京谷孝史，檜山和男：コンクリートの破壊力学に基づく等方性損傷モデルの定式化とその性能評価，日本計算工学会論文集，Vol.2013, pp.20130015, 2013.
- [7] 樋口知之，上野玄太，中野慎也，中村和幸，吉田亮：データ同化入門－次世代のシミュレーション技術－，朝倉出版，2011.
- [8] 車谷麻緒，小倉大季，櫻井英行：コンクリートの非線形有限要素解析に対する検証と妥当性確認の一例，日本計算工学会論文集，Vol.2022, pp.20220005, 2022.
- [9] JCI 基準：切欠きはりをを用いたコンクリートの破壊エネルギー試験方法，JCI-S-001-2003.