

## 第 I 部門 部材復元力の不確定性評価を可能とするデータ同化ハイブリッドシミュレーションの連続桁橋への適用

京都大学大学院工学研究科 学生員 ○尾西 宥紀

京都大学大学院工学研究科 正会員 植村 佳大  
 京都大学大学院工学研究科 学生員 津田葉 涼太  
 京都大学大学院工学研究科 正会員 高橋 良和

### 1. 背景・目的

部材復元力の不確定性の影響を評価する場合、一般にモンテカルロシミュレーションが用いられる。しかし、この手法は、対象構造物の応答を高精度に評価可能な数値モデルを作成する必要がある、モデル化が困難な部材を有する構造物への適用ができないという制約がある。対して、データ同化ハイブリッドシミュレーション(以下、データ同化HS)は、モデル化が困難な部材を実験部分としてHSを実施し、得られた部材復元力を用いてデータ同化を行うため、モデル化が困難な部材を含んでいたとしても適用が可能である。しかし、データ同化HSを行い、その過程で得られる部材復元力の事後分布を用いて不確定性評価を行った例は見当たらない。

そこで本研究では、データ同化HSを用いて部材復元力の不確定性評価を行う筆者らの手法を、複数のRC橋脚を有する連続桁橋に対して適用することで提案手法の有効性検証を行う。

### 2. 提案手法

本研究では、データ同化とHSを組み合わせることで、部材復元力の不確定性を評価する手法を提案する。過去の実験データ(以下、実データとする)から推定した復元力分布を用いて、実験部材を非線形構成則でモデル化した多数の数値モデルに対してデータ同化を適用して不確定性評価を行う。ここで、用いる非線形モデルは実験部材の挙動を完全に再現できる必要はない。HSで用いられる数値モデルを「HSモデル」と呼び、別途作成する  $n$  個の数値モデルを「不確定性評価モデル」、不確定性評価モデル内の要素を「不確定性評価要素」と定義する。

データ同化で用いる観測ノイズの分散  $R$  には、実データから計算した部材復元力の分散  $\sigma_F^2$  を用いる。 $\sigma_F$  は、例えば同一の試験体を複数用いて行った一斉震動実験

や、メーカーにより数多く実施されてきた性能試験の結果から求めることができる。

不確定性評価要素には「不確定性評価指標  $\alpha_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ )」を割り当てる。 $\alpha_i$  は平均  $\mu_F$ 、分散  $\sigma_F^2$  の復元力分布において標準化された値を表す。具体的には、 $i$  番目の不確定性評価要素の部材復元力  $F_i$  は次式のように表される。

$$F_i = \mu_F + \alpha_i \sigma_F \quad (1)$$

それぞれの不確定性評価要素の部材復元力が式(1)で示した値となるモデルパラメータの値を適用し、各ステップの計算(一期先予測)を実行する。 $\alpha_i$  の値域と確率分布(正規分布や一様分布)は、対象構造で考慮したい不確定性の程度に応じて設定する。

次に、式(1)で求められた部材復元力を示すモデルパラメータの選定方法について述べる。アンサンブルカルマンフィルタ(EnKF)を用いて観測データ(実験部材で計測した部材復元力)を取り込み、 $N$  個のアンサンブルメンバーを更新する。更新後に得られるフィルタアン

サンプル  $\{x_{t|t}^{(k)}\}_{k=1}^N$  は、部材復元力を含む状態ベクトルの事後分布を表す。このアンサンブルの中から、各不確定性評価要素が要求する部材復元力  $F_i$  を満たすアンサンブルメンバーを選定し、モデルパラメータを決定する。これにより、実データに基づいた復元力分布を活用したモデルパラメータの推定が可能となる。

以上の手続きを毎ステップ繰り返すことで、通常のHSを実施しながら、実験部材の部材復元力の不確定性を反映した地震応答評価が可能となる。

### 3. 連続桁橋を対象とした検討

#### (1) 検討概要

RC橋脚を3本有する連続桁4径間橋梁(図-1)を対象としたHSに本手法を適用した。本検討では、実際の試験

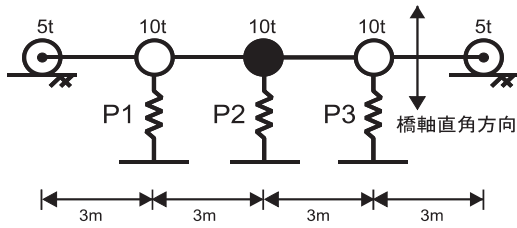


図-1 橋梁モデルと諸元

体を用いた実験ではなく、実験部材の復元力特性を数値モデル化した仮想試験体により実施する仮想HSとした。P2を仮想実験部材とし、その復元力特性は、高橋ら<sup>1)</sup>が行った縮小RC橋脚模型16体の一斉震動実験での供試体を基準に設定した。また、P1、P3を非実験部材とし、各初期パラメータの分布の平均値は高橋ら<sup>1)</sup>の実験供試体の設計計算結果を基に決定した。なお、初期パラメータの分布の平均値は実験部材の実際の最大復元力を35%程度過少評価していた。上部構造は弾性梁要素でモデル化し、各モデルパラメータは、日本道路協会出版の道路橋の耐震設計に関する資料<sup>2)</sup>と相似比を踏まえて設定し、Rayleigh減衰を仮定した。本検討では、P1とP3に応答の偏りは生じないとみなされるため、結果をひとまとめに考えることとする。入力地震動にはJR西日本鷹取駅(II種地盤)で観測された地震動に基づく、道路橋示方書<sup>3)</sup>の設計用地震動Level2地震動Type2を用い、供試体が実橋脚の1/10スケールであることから、相似則に従い時間刻みを $1/\sqrt{10}$ 倍とした。

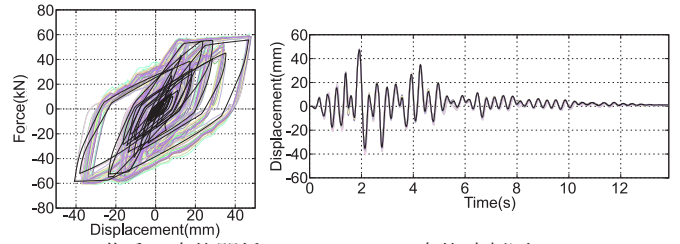
不確定性評価モデルは15個で、各モデルに対して3本ずつの不確定性評価要素を割り当てた。これら45本の不確定性評価要素の不確定性評価指標 $\alpha_i$ は、 $-1 \leq \alpha_i \leq 1$ の範囲で等間隔に振り分け、以下のように定義した。

$$\alpha_i = -1 + \frac{i-1}{22} \quad (i = 1, 2, \dots, 45) \quad (2)$$

アンサンブル数は $N = 240$ と設定し、システムノイズの共分散行列 $Q$ はCheng et al.<sup>4)</sup>の検討を参考に設定した。

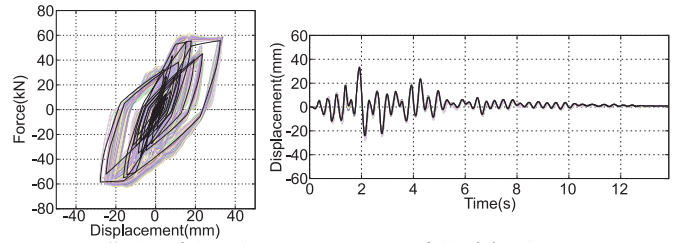
本検討で観測ノイズの分散 $R$ の算定に際し、過去の実験結果として用いたのは高橋ら<sup>1)</sup>が行った縮小RC橋脚模型16体の一斉震動実験のデータである。同一変位における部材復元力の差異を算出し、この半分を、16体の供試体が示した骨格曲線上の部材復元力のばらつき(標準偏差) $\sigma_F$ とした。この値を反映し、観測ノイズの分散 $R$ を求めた結果を以下に示す。

$$R = 3.7^2 \text{ (kN}^2\text{)} \quad (3)$$



(a)荷重-変位関係 (b)変位時刻歴

図-2 P2部材の結果



(a)荷重-変位関係 (b)変位時刻歴

図-3 P1、P3部材の結果

## (2)解析結果

実験部材(P2)および非実験部材(P1、P3)の荷重-変位関係および変位時刻歴を図-2、図-3に示す。図中では、黒線がHSモデルの実験部材および非実験部材の応答、その他が不確定性評価要素の応答を表している。ここで、不確定性評価要素が示す応答結果は、実データに基づく部材復元力のばらつきが引き起こす応答のばらつきと捉えられる。

## 4. まとめ

提案手法を用いたHSにより、実際の部材復元力の不確定性の影響が再現可能であることが示された。よって、提案手法はモンテカルロシミュレーションのV&Vのための手法としても有用な可能性があるといえる。

謝辞：本研究は、科学研究費補助金基盤研究(B)25K01316ならびに科学研究費補助金若手研究24K17340を受けて実施した。謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 高橋良和, 小林望: 縮小RC橋脚模型16体の一斉震動実験に基づく地震応答特性の定量的評価, 土木学会論文集A1(構造・地震工学), Vol. 72, No. 1, pp. 176-191, 2016.
- 2) 日本道路協会: 道路橋の耐震設計に関する資料, 丸善, 1998.
- 3) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説V耐震設計編, 2017
- 4) Cheng, M., Ruiz, M. C. L. and Becker, T. C.: Application of model updating to a large-scale hybrid simulation, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 53, pp. 1398-1415, 2024.