第 I 部門　　RC 橋脚模型を用いたデータ同化ハイブリッド実験に基づく地震応答の不確定性評価法の提案

京都大学大学院工学研究科　学生員　○出口　結希夫
京都大学大学院工学研究科　正会員　　上田　知弥
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　正会員　　高橋　良和

1. 背景

ハイブリッド実験（以下 HS）は，数値解析と構造実験を組み合わせた手法である．実験部材の載荷結果を同期し，モデル化が困難な部材の挙動を数値解析に取り込むことで，精度向上が見込まれる．しかし HS で得られる部材復元力には不確定性を有し、それが構造物応答に及ぼす影響は予測できない．そこで尾西ら [1]は，HS で得られた部材復元力に対してデータ同化を行うことで HS 結果の不確定性評価を行う，データ同化ハイブリッド実験（以下データ同化 HS）という手法を提案した．しかし，データ同化 HS は仮想実験への適用にとどまっている．

そこで本研究では，実供試体を用いたデータ同化 HS を実施することで，ハイブリッド実験結果の不確定性を評価し，本手法を確立させることを目指す．

2. 提案手法

(1) データ同化ハイブリッド実験

尾西ら [1]が提案したデータ同化 HS の概要を**図-1** に示す．本手法は，アンサンブルカルマンフィルタ（EnKF）を用いて副産物的に得られる構成則パラメータの分布を，部材復元力の不確定性評価に活用する．HS の計測復元力F_{hs}と，初期ばらつきを与えたM個のアンサンブルメンバ(以下メンバ)による予測値の差を基に，数値モデルの構成則パラメータを逐次更新しパラメータ分布を取得する．

データ同化 HS において，部材復元力の不確定性を評価するモデルを不確定性評価モデル，その構成要素を不確定性評価要素(以下要素)と呼ぶ．データ同化で得たメンバのパラメータ分布を各要素に割り当て，地震動を入力する．各要素では，荷重のばらつきを考慮した異なる目標復元力F_gを設定し，復元力が最も近いメンバのパラメータへ更新を行う．各要素の応答を比較し，HS 実験部材における復元力の不確定性を評価する．

(2) anchor 要素の導入と構成則パラメータの更新

各要素のF_gがF_{hs}を中心に分布するようにさせるため，本研究では anchor 要素を導入する．anchor 要素は，F_gを計算する際，ばらつきの中心となる要素であり，その平均復元力F_{ma}がF_{hs}に近くなるように設定する．

EnKF では乱数を用いるため，外れ値となる復元力を示すメンバによりF_mの値が異常値となり，計算が不安定になることがある．そのため，以下の手順で外れ値となるメンバを除外する．まず，anchor 要素について復元力の上下 1%のメンバを除外する．続いて，残ったメンバから平均復元力F_{ma}を再計算し，F_{hs}との差を計算する．差が許容誤差を超えている場合は，許容誤差以下となるか，残存メンバ数が要素数 n と等しくなるまでF_{hs}との差が最も大きい復元力を有するメンバを除外する．他の要素では同様に復元力の上下 1%のメンバを除外した後，anchor 要素と同じメンバを抽出する．以上の手順により全要素で共通の構成則パラメータに基づく不確定性評価を行う．

(3) 目標復元力F_g^iの算出手順

i 番目の要素における目標復元力F_g^iを次式で定義する．

$$F_g^i = F_m + \alpha_i sign(F_m)\sqrt{R}\frac{|F_m|}{F_{ref}} \quad (1)$$

ここで，α_iは$-1 \le \alpha_i \le 1$の範囲で要素ごとに異なる値を等間隔に与える係数，$\sqrt{R}$は観測ノイズの標準偏差，F_{ref}は規格化荷重（固定値）である．なお，anchor 要素では$i = 1$，$\alpha_1 = 0$とし，$F_g^1 = F_m(=F_{ma})$となる．式（1）より，各要素で異なる復元力特性を与えることができる

3. 検討概要

高橋・小林 [2]の一斉震動実験を参考に作成した RC 供試体を用いて HS を実施し，その計測復元力F_{hs}を用いてデータ同化 HS を行った．HS の解析モデルを**図-2** に示す．入力地震動は，一斉震動実験において平均的な挙動を示した No.15 供試体のフーチング上の計測加速度を用いた．

データ同化 HS では，不確定性評価モデル 45 個に対し，各 1 個の不確定性評価要素を割り当てた．数値モデルの復元力特性は**図-3** に示す OpenSees の Hysteretic モデルを

Yukio DEGUCHI, Keita UEMURA, Tomoya UEDA and Yoshikazu TAKAHASHI
deguchi.yukio.73s@st.kyoto-u.ac.jp

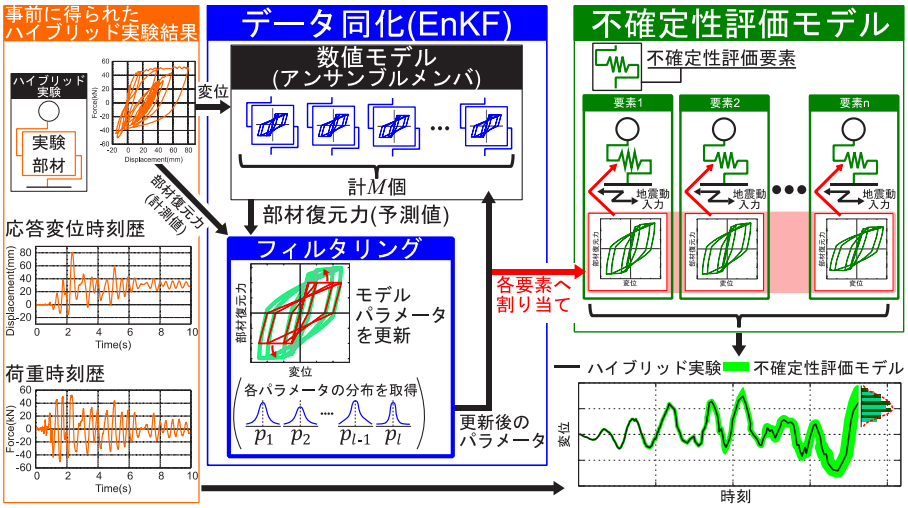


図-1 データ同化ハイブリッド実験の概要

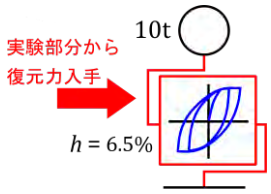


図-2 解析モデル

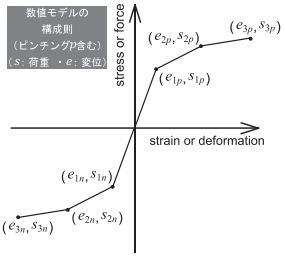


図-3 各要素の復元力特性

用い，状態ベクトルを次式で表す．なお，初期値は正負交番載荷実験での各変曲点のデータを用いた．

$$\{x_t\} = \{s_{1p}, e_{1p}, \cdots, e_{3n}, p_x, p_y\} \quad (2)$$

データ同化では，アンサンブル数は$N = 1000$とした．さらに，観測ノイズRは一斉震動実験 16 体の骨格曲線のばらつきより$R = (3.7\text{kN})^2$とした．

EnKF では処理に乱数を用いていることから，結果に差が生じる．そのため，同一のF_{hs}を用いてデータ同化 HS を 10 回行い，anchor 要素の応答と HS での応答を比較することで，妥当性を検討する．

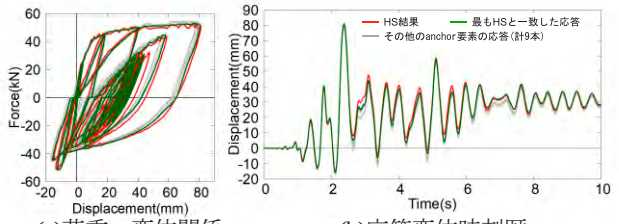
4. データ同化ハイブリッド実験結果

(1) anchor 要素とハイブリッド実験の応答

データ同化 HS を 10 回行った際の anchor 要素と HS の荷重―変位関係と応答変位時刻歴を**図-4** に示す．すべての試行回において赤線で示す HS 結果を追えており，提案手法が有効であることが確認された．

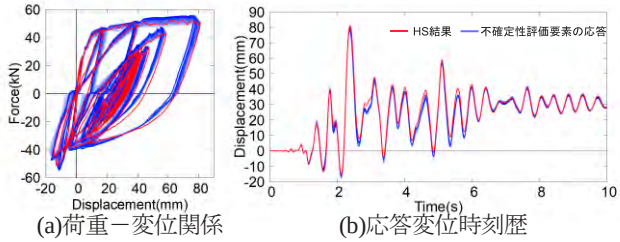
(2) データ同化ハイブリッド実験の結果

図-4 において，緑線で示す anchor 要素の応答が HS と最もよく一致した．このケースにおける不確定性評価要素の荷重－変位関係と応答変位時刻歴を**図-5** に示す．図より，不確定性評価要素の応答が赤線で示す HS の応答を含んでいる．本手法により荷重のばらつきを導入した結果，変位応答にもばらつきが生じ，通常の HS では得られない応答の変動係数や標準偏差を得られることを確認した．一方，最大応答変位の標準偏差は，一斉振動実験の結果(3.05mm)に対し，本検討では 1.13mm で，変位のばらつきは小さい結果となった．一斉振動実験は 2 方向加振であったのに対し，今回の HS は 1 方向加振であることが要因の一つであると考えられる．しかしながら，本手法の妥当性に関して，今後の検討が必要である．



(a)荷重－変位関係　(b)応答変位時刻歴

図-4 anchor 要素の応答比較(10 ケース間)



(a)荷重－変位関係　(b)応答変位時刻歴

図-5 不確定性評価要素の応答(1 ケース分)

5. まとめ

実供試体を用いてデータ同化 HS を実施し，HS の応答を再現できることを確認した． また，HS での実験部材の部材復元力の不確定性を評価可能であることを示し，提案手法の有効性を確認した．

謝辞：本研究は科学研究費補助金基盤研究(B)25K01316 と基盤研究(B) 26K01034 の助成で実施した．謝意を表する．

参考文献

1) 尾西宥紀，植村佳大，津田葉涼太，高橋良和：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実験手法の構築に向けた基礎的研究，第 28 回橋梁等の耐震設計シンポジウム講演論文集，pp.385-392，2025.

2) 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.