データ同化を活用した ハイブリッド実験の高精度化と 構造物応答の不確実性評価

2024年度地震工学委員会 次世代地震工学融合研究チーム

植村 佳大 (京都大学大学院 工学研究科 社会基盤工学専攻)

森下 侑哉 (京都大学大学院 工学研究科 原子核工学専攻)

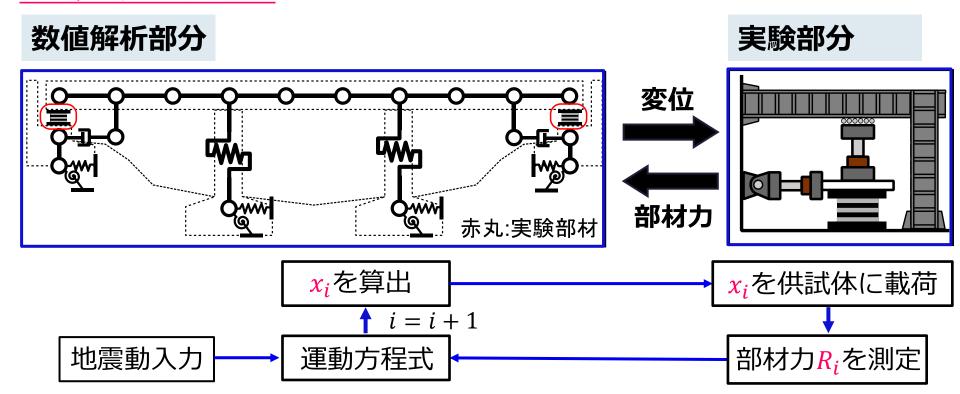
津田葉 涼太 (京都大学大学院 工学研究科 社会基盤工学専攻)

本日の発表内容

- データ同化を活用したリアルタイムハイブリッドシミュレーションの高精度化
- データ同化を活用したハイブリッドシミュレーションによる 構造物応答の不確実性評価

<u>ハイブリッド</u> シミュレーション

モデル化が困難な部材を実験的に評価し, その結果を 数値解析へ反映させて構造全体の動的応答を評価



リアルタイムハイブリッドシミュレーション (RTHS)

数値解析・実験を実時間軸で進行させ, 速度依存性を持つ部材を有する構造物の応答を評価

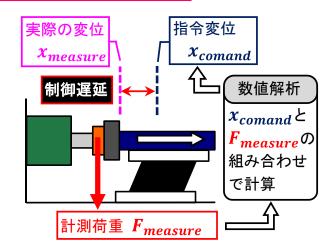
リアルタイムハイブリッドシミュレーションの課題

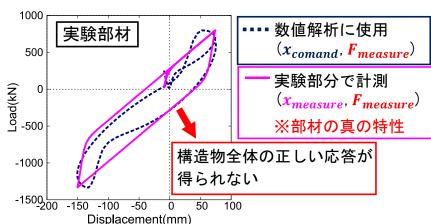
試験機の制御遅延が不可避的に発生



変位と部材力の対応関係が崩れ, 数値解析部分で認識される部材応答の 精度が低下する

大型試験機ではアクチュエータの 制御遅延が数十ミリ秒になり, <u>積分計算間隔の数倍にも及ぶことがある</u>





試験機の制御遅延に対する補償

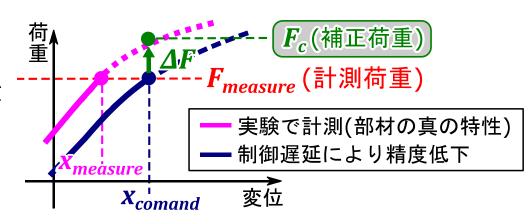
● 遅延量を想定して指令変位を補正する変位ベース補償法が一般的



● 遅延量の大きい大型試験機を用いてRTHSを行う場合,変位ベース補償単体で制御遅延を完全に補償することは困難.

荷重ベース補償法

制御遅延による荷重の計測誤差を 算定し、補正荷重を用いて 部材応答を計算



補正荷重をいかに精度よく算定するかが課題

目的

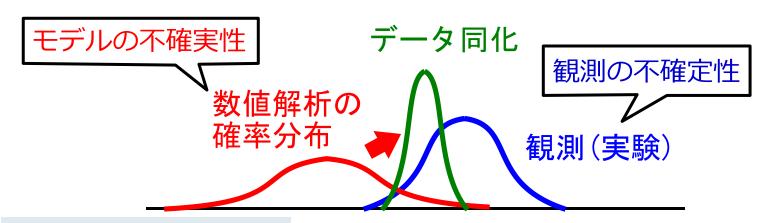
本研究の目的

大幅な制御遅延に対応可能な新たな荷重ベースの遅延補償法を提案

本研究で用いる手法 (データ同化)

観測データと数値モデルを統合して,予測精度を向上させる手法.

観測値に応じてシミュレーションにおけるモデルパラメータを更新

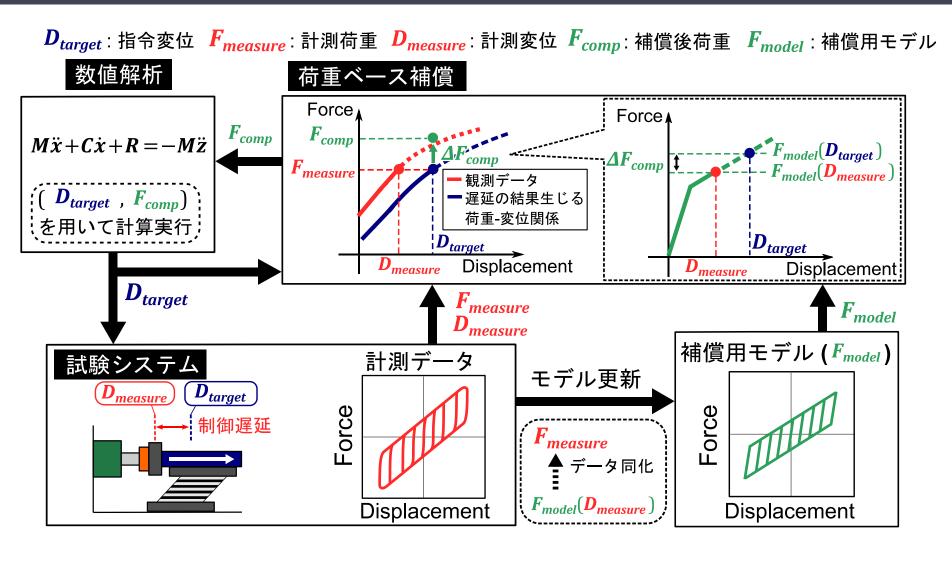


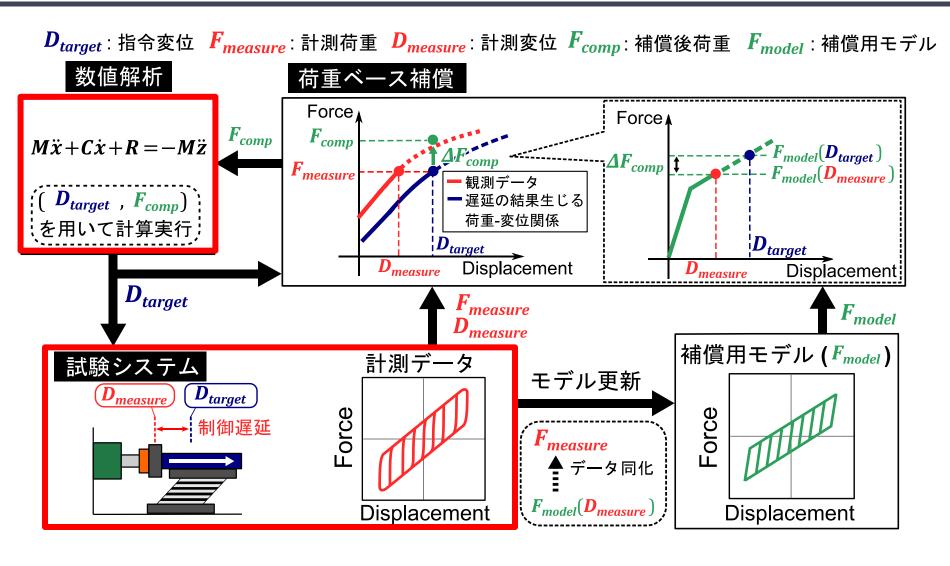
データ同化パラメータ

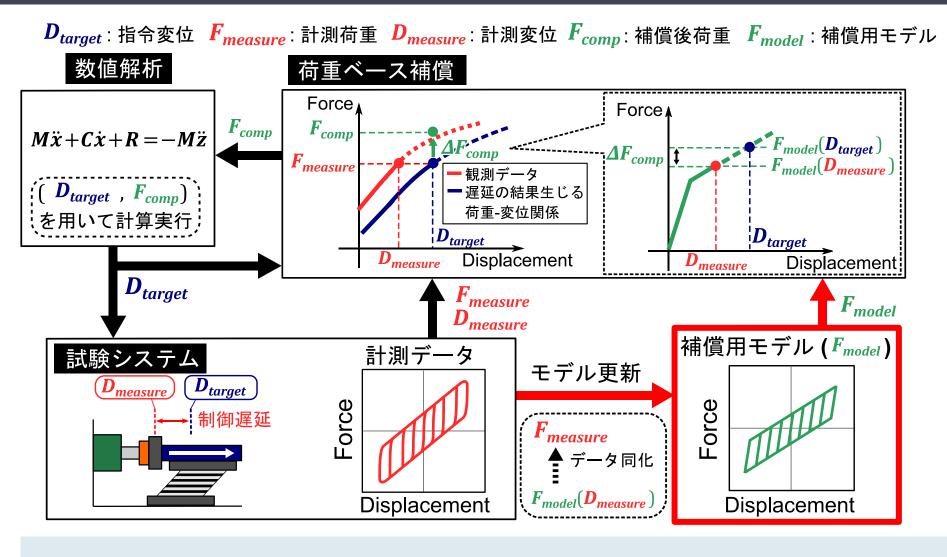
P:初期パラメータの分散共分散行列(初期状態の不確定性)

Q:システムノイズの分散共分散行列(モデルの不確実性)

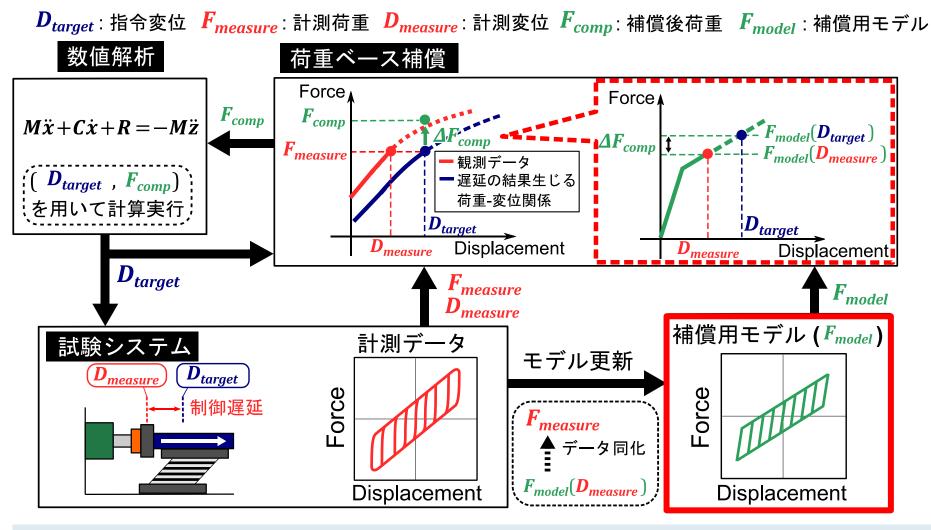
R:観測ノイズの分散共分散行列(計測値のばらつき)





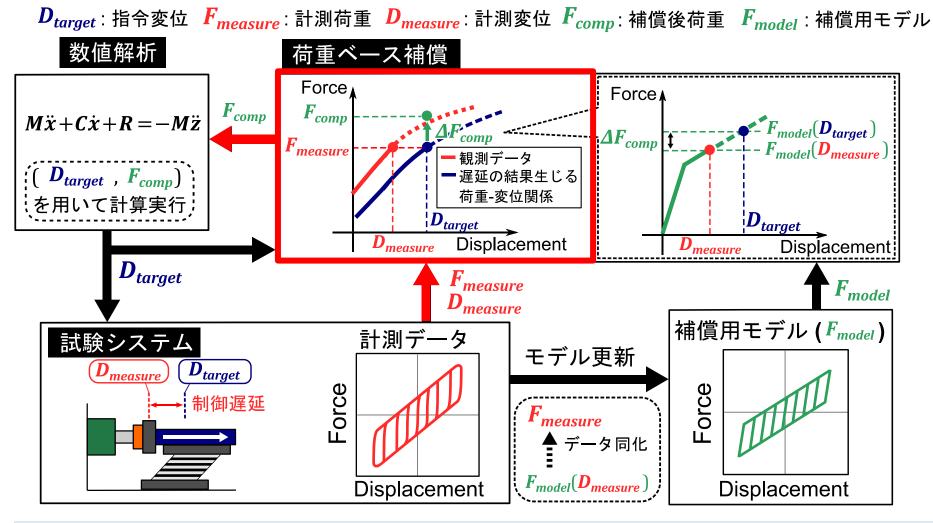


STEP1 UKFによって補償用モデルを計測データ $(F_{measure}, D_{measure})$ へ同化

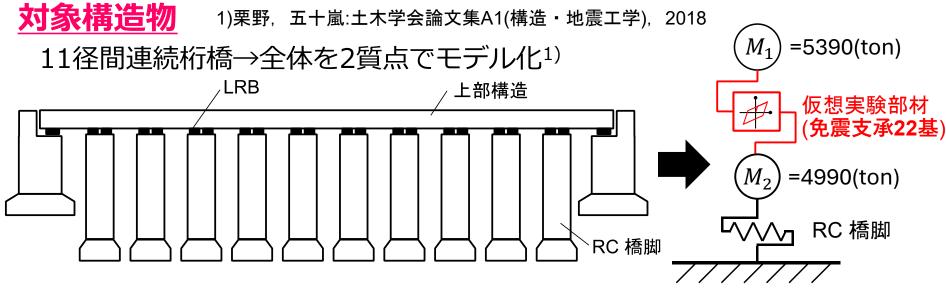


STEP2 更新された補償用モデルを用いて補償力 ΔF_{comp} を算出

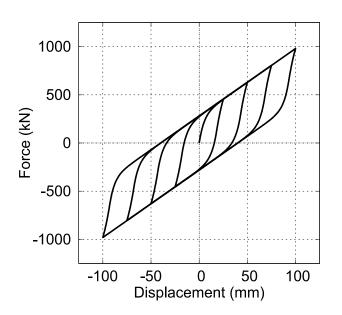
$$\Delta F_{comp} = F_{model}(D_{target}) - F_{model}(D_{measure})$$



STEP3 更新された補償用モデル・計測荷重を用いて補償後荷重 F_{comp} を算出 $F_{comp} = F_{measure} + \Delta F_{comp}$

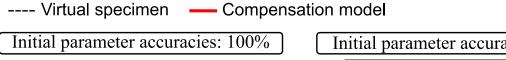


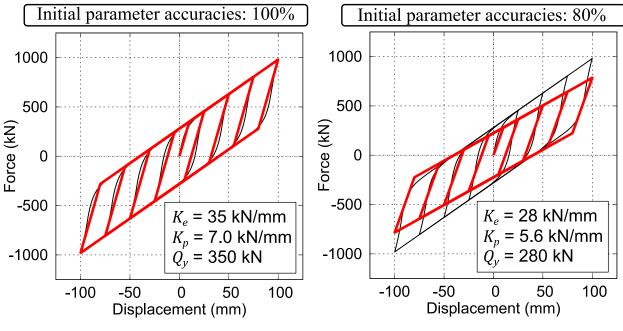
仮想実験部材の荷重-変位関係

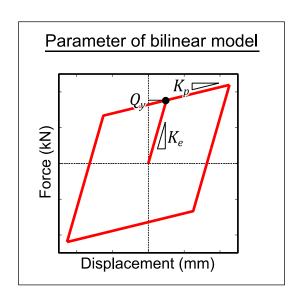


- 実大免震試験施設(E-Isolation)にて得られた LRBの載荷試験データを参考に Bouc-Wenモデルにより復元力特性を設定
- ▶ LRB1基が示す復元力を22倍して 数値解析部分へ送信

補償用モデル







試験機の動特性 100msの仮想遅延を付加 (E-Isolationでは60~80ms)

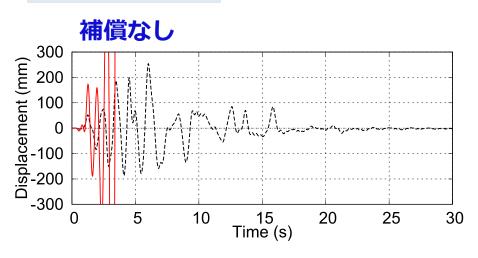
り地震動 道路橋示方書設計用地震動Level2地震動Type2を入力

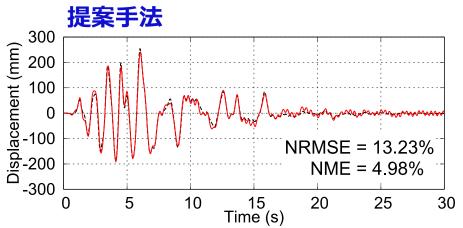
検証結果

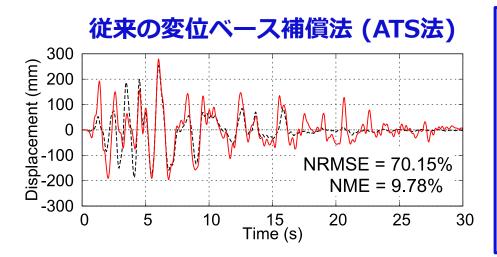
変位時刻歴

---- No time delay (Exact result)

— Time delay = 100 (ms)





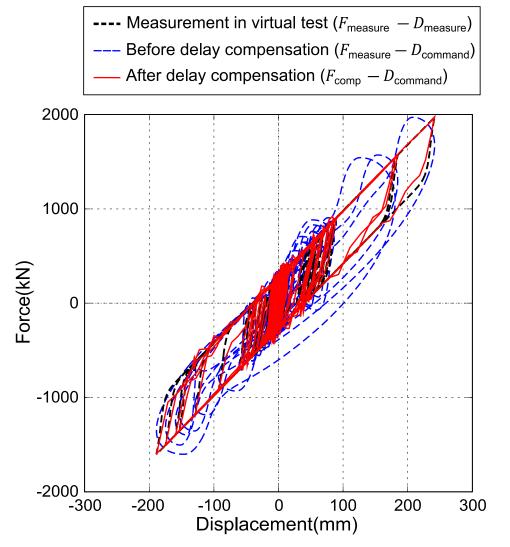


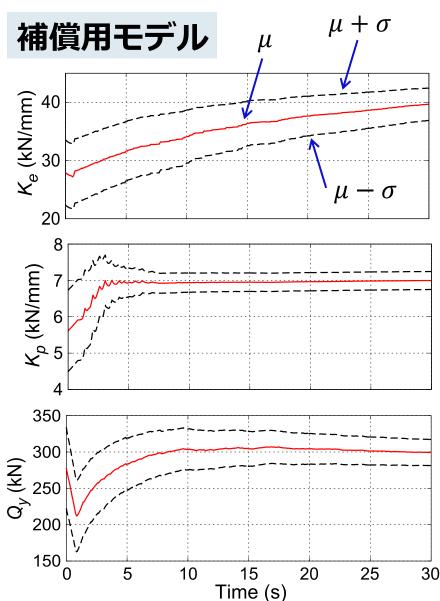
誤差指標
$$NRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{N} (d_k^{exact} - d_k)^2}{\sum_{k=1}^{N} (d_k^{exact})^2}} \times 100$$

$$NME = \frac{|d^{exact}|_{max} - |d|_{max}}{|d^{exact}|_{max}} \times 100$$

検証結果

補償後荷重





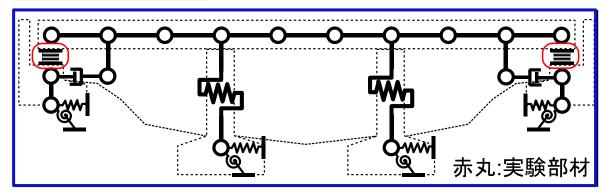
- RTHSにおける試験機の制御遅延の問題に対し, データ同化を活用した新たな荷重ベース補償法を提案した.
- 100msという大幅な制御遅延下において, 従来の変位ベースの遅延補償法と比較して高精度な補償が実現できた.

● 現状の検討では簡易的な仮想RTHSによる検証に留まっているため、 今後は実機を用いた提案手法の有効性検証ならびに様々な試験体に 対する適用を実施する必要がある。

ハイブリッドシミュレーション

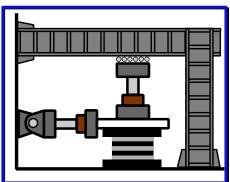
モデル化が困難な部材を実験的に評価し, その結果を数値解析へ反映させて構造全体の動的応答を再現する手法

数値解析部分

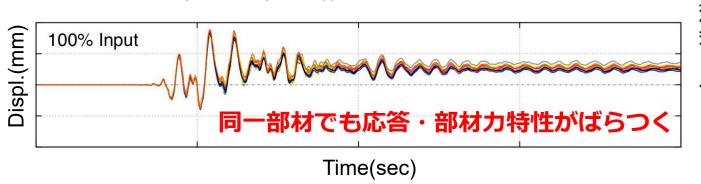


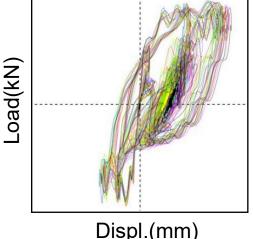






縮小RC橋脚模型16体の一斉震動実験に基づく地震応答特性 の定量的評価 (高橋ら(2009))





構造物応答 (部材特性) の不確実性評価

従来 手法 構造物を数値モデル化し、そのモデルパラメータを確率的に ばらつかせるモンテカルロシミュレーションを用いることが一般的

「平均的な構造物応答」が精緻にモデル化されていることを前提



モデルの再現性が確保されていない場合, 得られる不確実性は仮想的なものに過ぎない

ハイブリッドシミュレーション

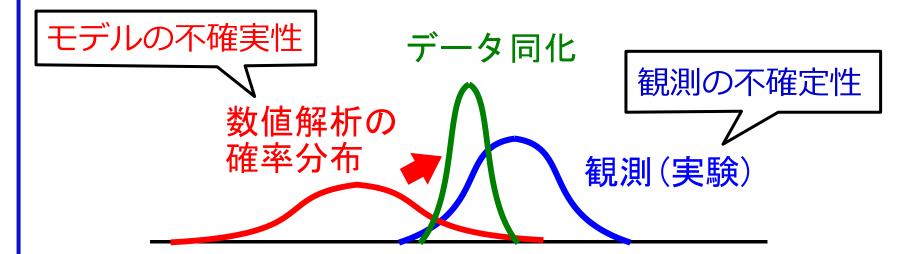
モデル化が困難な部材を扱えるが,部材特性の不確実性が構造物応答に 与える影響を評価できない

ハイブリッド実験の枠組みを拡張し、モデル化困難な部材を有する構造物応答の不確定性を評価可能な新たな手法の提案

データ同化

観測データと数値モデルを統合して,予測精度を向上させる手法.

観測値に応じてシミュレーションにおけるモデルパラメータを更新

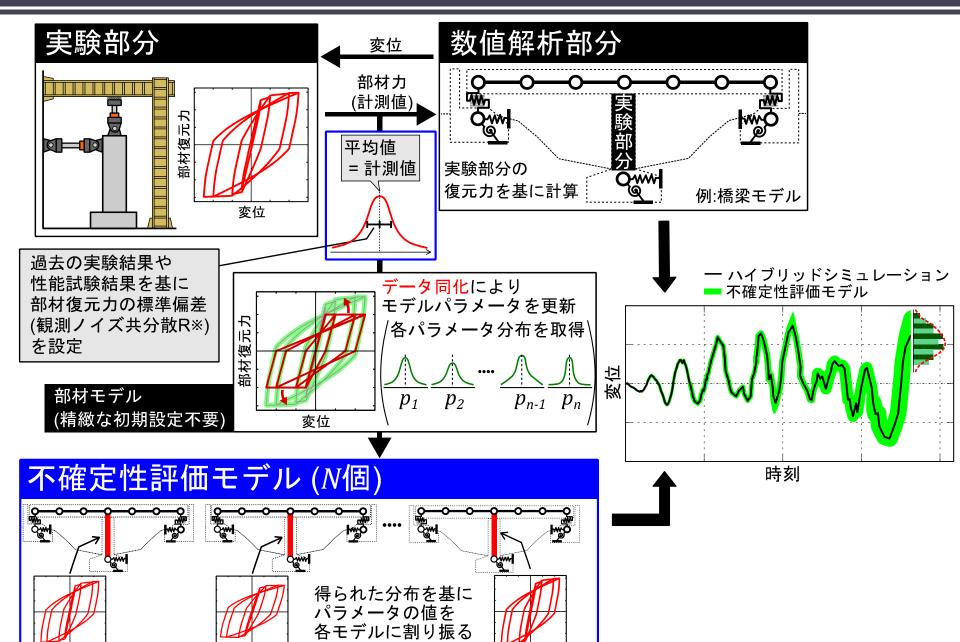


データ同化パラメータ

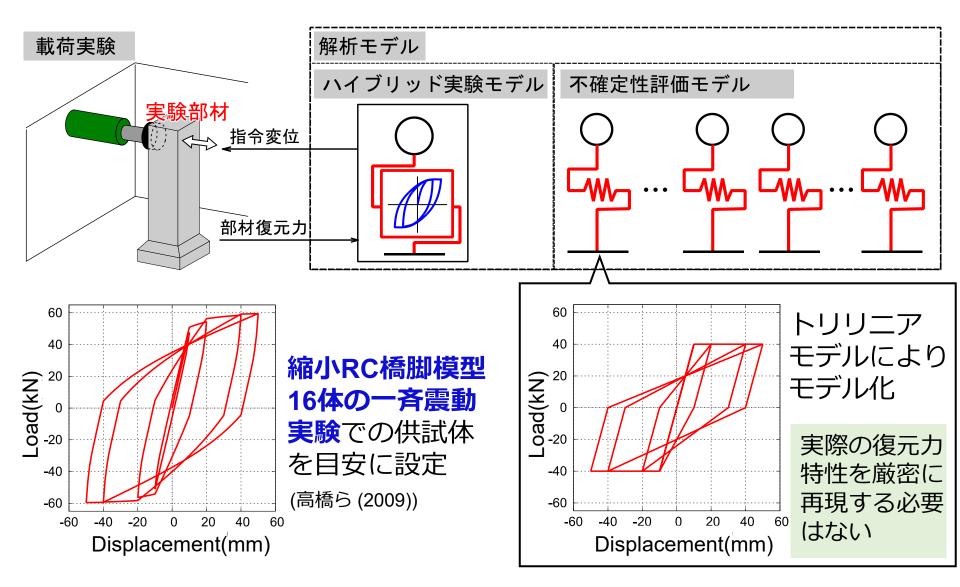
P:初期パラメータの分散共分散行列(初期状態の不確定性)

Q: システムノイズの分散共分散行列(モデルの不確実性)

R:観測ノイズの分散共分散行列(計測値のばらつき)



手法検証 (仮想ハイブリッドシミュレーション)

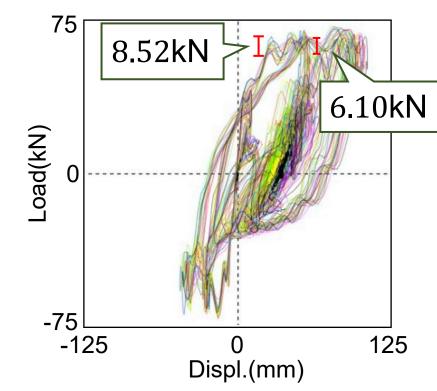


 $<u>データ同化パラメータ</u> Cheng et al.が検討に用いた<math> extbf{\textit{P}}$ および $extbf{\textit{Q}}$ を参考に決定

手法検証 (仮想ハイブリッドシミュレーション)

実際の計測データを用いたRの算定方法





同一変位における 部材復元力の差異を算出

この半分を標準偏差とみなす $\sigma = 3.7$ [kN]

R=3.7² [(kN)²] と決定

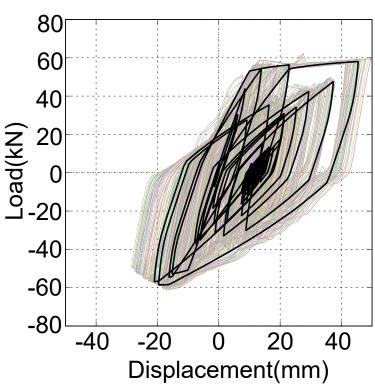
1) 高橋良和,小林望:縮小RC橋脚模型16体の 一斉震動実験に基づく地震応答特性の 定量的評価, 2009

入力地震動

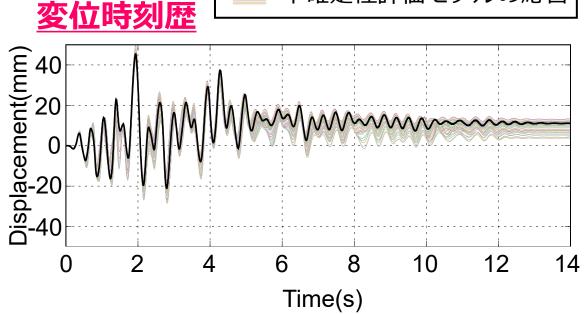
JR西日本鷹取駅(II種地盤)で観測された地震動に基づく, 道路橋示方書設計用地震動Level2地震動Type2 $\left(\frac{0.01}{\sqrt{10}}$ 秒刻み $\right)$

検証結果

荷重-変位関係

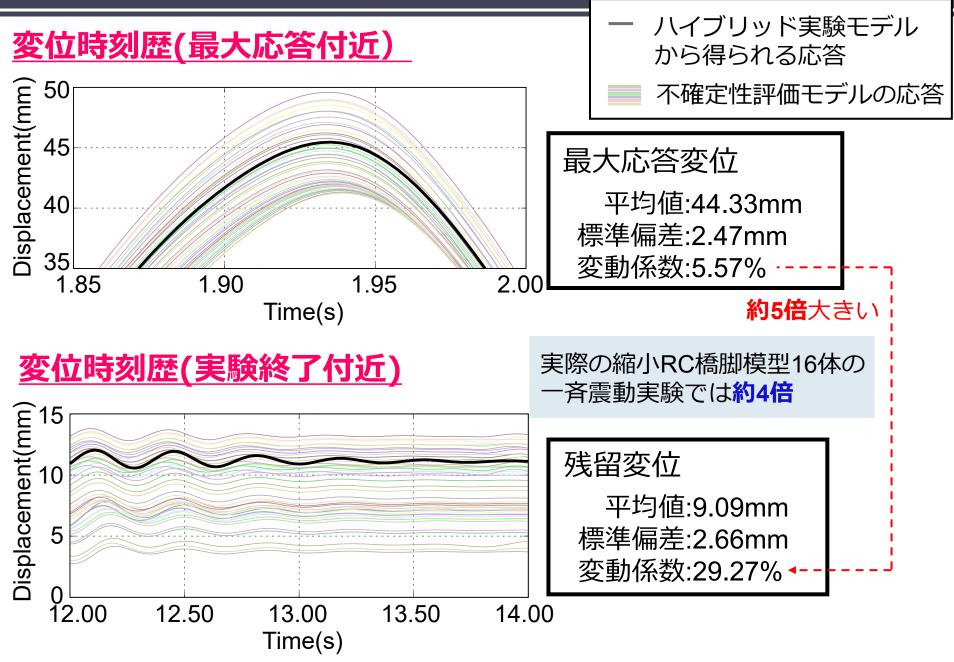


- 一 ハイブリッド実験モデル から得られる応答
 - 不確定性評価モデルの応答

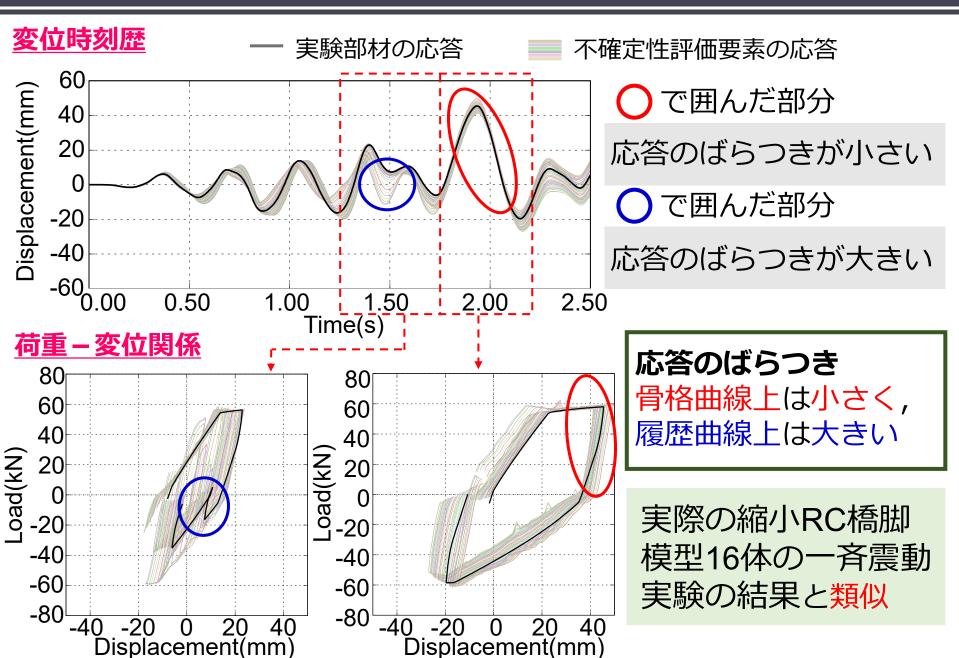


- 不確定性評価モデルの応答のばらつきの範囲内に ハイブリッド実験から得られる応答が含まれる
- 部材復元力のばらつきが引き起こす応答のばらつきを評価可能

検証結果



検証結果



● データ同化を活用し、部材復元力の不確定性を評価可能な 新たなハイブリッド実験手法を提案した.

◆本研究で行った仮想ハイブリッドシミュレーション結果と同傾向の結果が、既往の実験的検討でも得られており、 提案手法を適用したハイブリッド実験により、 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を示した。