

データ同化技術を活用した橋梁の健全度評価に関する解析的検討

鹿島建設(株) 正会員 ○西澤勇祐 玉野慶吾 曾我部直樹 岩前伸幸

1. はじめに

地震後における橋梁の健全性や損傷を迅速かつ的確に把握するためには、データに基づく定量的な判断が効果的である。そのためには、地震時の橋梁の応答を網羅的に計測することが必要となるが、数多くのセンサを設置して連続した計測を行うことはコストや管理の負担が大きい。これに対して、本研究では、限られた計測結果から橋梁の応答や損傷を評価することを目的として、データ同化技術に着目している¹⁾。本報では、データ同化手法の一つである粒子フィルタを活用することで、4 径間連続ラーメン橋を対象とした解析モデルのパラメータを限られた応答から推定する試み、および合理的な計測計画の立案を目的とした感度解析を行った事例について報告する。

2. 解析概要

橋梁の健全性評価におけるデータ同化技術の有効性を検証することを目的として、RC4 径間連続ラーメン箱桁橋の解析モデルを用いた解析的検討を行った。図-1 に対象とした解析モデル、表-1 に推定の対象としたパラメータを示す。解析モデルは、既往の文献²⁾に示される構造諸元を参考に作成した。上部工は PRC 箱桁で、下部工は柱式橋脚、基礎工は P1、P3 橋脚が大口径深礎、P2 橋脚が直接基礎である。支承は A1 橋台、A2 橋台ともに積層ゴム支承である。解析モデルでは、主桁については全断面有効とした剛性を有する線形梁要素、橋脚については降伏剛性を有する線形梁要素、基礎と支承には線形バネ要素を適用した。なお、解析には、汎用 3 次元動的解析プログラム³⁾を使用した。

本研究で適用したデータ同化手法は、粒子フィルタと呼ばれる手法であり SIS⁴⁾というアルゴリズムを適用した。解析では、まず、推定する解析パラメータの探索範囲を設定した上で範囲内のパラメータに対して動的解析を行い、逐次、全ての時刻に対して計測値と解析値の尤度の結果を蓄積する。蓄積された尤度の結果に基づき、各時刻において解析結果が近似するパラメータを推定し、全時刻を対象とした度数分布の平均値を各パラメータの推定値として出力した上で正解値に対する誤差を評価した。

表-2 に解析ケースを示す。計測値は、P1、P2、P3 の各橋脚上、A1、A2 の両橋台上、および 4 径間の各支間中央位置の計 9 点における上部工の加速度応答を最多の計測点（ケース 1）とし、ケース 2 では P2 橋脚上の計測点（位置 X）のみを、ケース 3 では A2 橋台上の計測点（位置 Y）のみを設定した。ケース 4 は、ケース 3 に対して計測頻度を 10 倍となる 100Hz とした。

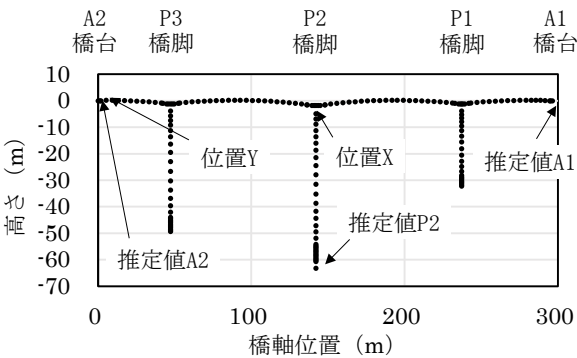


図-1 解析モデル

表-1 推定対象とするパラメータ

推定 パラメータ	P2	A1	A2
	P2橋脚基部(塑性ヒンジ区間)の剛性	A1橋台の支承バネの剛性	A2橋台の支承バネの剛性
正解値	$3.1 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$	$4.3 \times 10^3 \text{ kN/m}$	$5.4 \times 10^3 \text{ kN/m}$
探索範囲	$3.1 \times 10^6 \sim 3.5 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$	$5.0 \times 10^2 \sim 5.0 \times 10^4 \text{ kN/m}$	$5.0 \times 10^2 \sim 5.0 \times 10^4 \text{ kN/m}$

表-2 解析ケース

解析 ケース	計測値		推定 パラメータ
	点数および位置	計測頻度	
ケース1	上部工の9点の加速度(水平,鉛直成分)	10Hz	3種類 (P2,A1,A2)
ケース2	上部工の位置Xの加速度(水平成分)	同上	同上
ケース3	上部工の位置Yの加速度(水平成分)	同上	同上
ケース4	同上	100Hz	同上

キーワード 健全度評価, データ同化技術, 計測計画, 粒子フィルタ
連絡先 〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1 鹿島建設(株)技術研究所 TEL042-485-1111

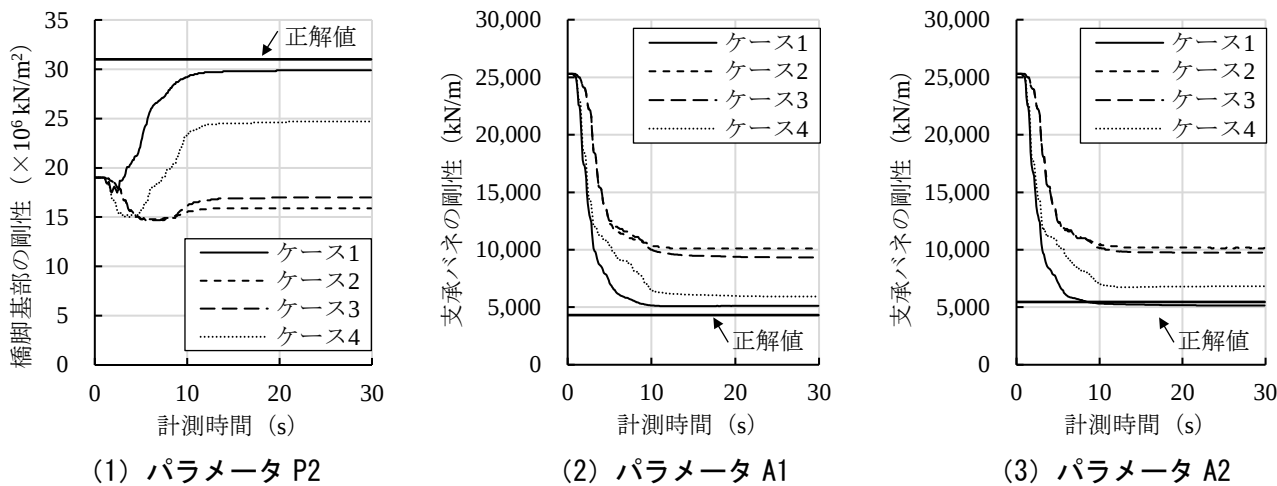


図-2 パラメータの推定結果

3. 解析結果

図-2に解析上の経過時間に対するパラメータの推定結果、表-3に解析終了時における推定誤差の一覧を示す。

ケース1では、3つのパラメータが、いずれも時間の経過とともに比較的精度よく正解値に漸近する傾向を示した。このことから、線形の解析モデルによる動的解析においては、本手法を用いることで推定する解析パラメータが複数であったとしても、十分な計測結果が確保できれば高い推定精度を確保できると考えられる。

計測点を1箇所に限定したケース2とケース3では、誤差が大きくなった。特にP2に対しては解析終了時の推定結果が初期値よりも正解値から乖離する傾向を示しており、十分な精度を確保できていない。このため、P2に対してケース2、3で設定した計測値のみでは不十分であると判断される。一方、支承バネ値のA1、A2は正解値に近づく傾向があり、特に計測点を橋の中央付近である位置Xから桁端の位置Yに変更したケース3では、正解値との誤差が縮小した。このとき、計測点と位置に近いA2の誤差が1割程度向上するだけでなく、反対側の橋台に位置するA1の誤差も同様に1割程度向上した。これについては、橋軸方向の震動に対してA1、A2の応答に類似性があることが要因である可能性が考えられるが、何れにしても推定するパラメータに応じて効果的な計測位置が存在することが示唆された。

ケース4では、ケース3に対して計測頻度を10Hzから10倍にあたる100Hzに増加した。ケース3の結果と比較すると、すべてのパラメータに対して正解値との誤差が大きく改善した。特にP2に関しては、ケース2、3と比較しても大きく正解値に近づく傾向が確認できる。これは、計測頻度の増加に伴いパラメータの推定回数が増えたためであると考えられる。このことから、計測位置を限定する代わりに、計測機器の性能を高める選択肢もパラメータの推定において有効となる可能性がある。

4. おわりに

本研究では、4 径間連続ラーメン橋の線形モデルを対象として、データ同化技術を用いた応答に基づく解析モデルのパラメータの推定方法の有効性を検証した。その結果、データ同化技術を活用することで橋梁の応答を精緻に評価できる解析モデルのパラメータの推定と、同推定に効果的な計測計画の立案が実現できる可能性が示された。今後は、非線形性を有する解析モデルを対象として同手法の有効性の検証を行う予定である。

参考文献

1) 玉野ら：橋梁の健全度評価を目的としたデータ同化技術の活用法に関する検討，第 78 回年次学術講演会（投稿中）
2) 土木学会：土木学会コンクリート標準示方書に基づく設計計算例 [道路橋編]，コンクリートライブラリー117，2005。
3) アーク情報システム：TDAPⅢ理論説明書バージョン 3.12，2020。
4) Doucet, A., Godsill, S. and Andrieu, C.: On sequential Monte Carlo sampling methods for Bayesian filtering, Statistics and Computing, Vol.10, pp.197-208, 2000.

表-3 推定誤差の一覧

解析 ケース	計測点		正解値に対する誤差		
	箇所	頻度	P2	A1	A2
ケース1	9	10Hz	3.6%	19.1%	5.7%
ケース2	1 (位置X)	10Hz	48.6%	134.0%	86.2%
ケース3	1 (位置Y)	10Hz	45.1%	117.1%	78.7%
ケース4	1 (位置Y)	100Hz	20.5%	37.6%	25.4%