

# 橋梁の健全度評価に向けたデータ同化技術の活用に関する 基礎的検討

玉野 慶吾<sup>1</sup>・西澤 勇祐<sup>1</sup>・曾我部直樹<sup>2</sup>・岩前 伸幸<sup>3</sup>

1正会員 工修 鹿島建設株式会社 技術研究所（〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1）  
2正会員 工博 鹿島建設株式会社 技術研究所（〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1）  
3正会員 理博 鹿島建設株式会社 技術研究所（〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1）

## 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正確に把握するためには、データに基づく定量的な判断が重要となる。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。近年、計測技術に関する研究、開発により簡易で精度が高い計測技術が実用化されつつある<sup>1)</sup>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とが課題となる。これに対して、限られた計測結果から橋梁の応答を精緻に再現できる解析モデルを構築することができれば、地震後の橋梁の効果的な性能の評価や想定される地震による損傷の予測が可能となる。

本研究では、限られた計測結果から橋梁の解析モデルのパラメータを推定し、その精度を高める手法としてデータ同化技術に着目した。データ同化技術は、数値シミュレーションと計測値を融合することによって、計測値が存在しない箇所の応答を推定することや、解析パラメータの値を推定することができる技術である。松岡らは、鉄道橋を対象に、融合粒子フィルタの手法を用いて、実測データである列車走行時の加速度データをシミュレーションモデルに取り込み、解析モデルのパラメータであるヤング率とモード減衰比の推定を試みている<sup>2)</sup>。橋梁を対象とした地震時計測および解析において、このようなデータ同化技術を活用することができれば、必要最小限の計測から解析モデルの精度を高め、同モデルを用いた部材・部位の応答、損傷を定量的に分析、評価することができると考えられる。

そこで、本研究では、地震後の橋梁の健全性、損

傷の評価におけるデータ同化技術の活用に関する検討を行った。本論文では、データ同化手法の一つである粒子フィルタを応用することで、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について報告する。また、同技術を用いて解析モデルの精度を高める上で、効果的な計測項目、箇所を選定して計測計画の立案に反映させるための解析的手法に関する検討についても述べる。

## 2. データに基づく橋梁の健全度評価のコンセプト

### (1) データ同化技術と適用方針

データ同化技術は、数値シミュレーションに対して計測データを取り込む一連の方法論を指す。動的解析のように時間発展を伴うシミュレーションに対して逐次的に計測データを取り込み、モデルのパラメータを修正しながら予測を行う方法論は逐次データ同化と呼ばれ、粒子フィルタ<sup>3),4)</sup>やアンサンブルカルマンフィルタ<sup>5)</sup>等の方法がある。データ同化技術の利点は、動的なシミュレーションのモデルのパラメータとシミュレーション結果を計測された情報に応じて修正していく点である。つまり、数値シミュレーションと計測データを融合することで計測値が存在しない箇所の応答を推定することや、解析パラメータの値を推定することが可能となり、限られた計測結果から橋梁の応答を精緻に再現できる解析モデルを構築することができる。さらに、データ同化技術によって得られる推定精度を指標として、計

測項目や箇所、および計測精度をパラメータとした解析を行うことで、一定の推定精度を得る解析モデルの構築に対して必要となる最小限の計測項目を選定するなど費用対効果の高い計測計画の立案への活用が期待される。

## (2) 健全度評価に向けたフロー

図-1に、地震後を想定したデータに基づく橋梁の健全度評価のフローを示す。維持管理に解析を活用する手法は従来から検討されている<sup>6)</sup>が、本検討では、データ同化技術を積極的に取り入れることを特徴とする。まず、計測計画においては、データ同化技術によって、解析モデルのパラメータを推定する際に用いる計測値の相違が推定精度に及ぼす影響を感度解析で分析し、必要となる計測項目、箇所、頻度、精度等の計測の仕様を選定する。解析モデルとしては、例えば道路橋示方書V耐震設計編<sup>7)</sup>に示される地震時の挙動が複雑な橋の動的照査で用いられるようなフレームモデルが活用できると考えられる。計画段階では、同解析のパラメータとして設計値を用いる（以下、設計解析モデル）が、設計値はあくまで安全に設計を行うための数値であり、実構造物の特性はより安全側に乖離している可能性がある。これに対して、地震時における健全性、損傷を解析によって精度よく推定するためには、実際のパラメータを反映した解析モデルが必要となる。そこで、橋梁が供用される維持管理の段階において、得られた計測結果に基づいて、随時、同解析モデルを更新する。例えば、前述の計画に基づいて設置されたセンサによって、小～中規模の地震による橋梁の応答を計測し、その結果を用いて解析モデルのパラメータの推定、更新を行う（以下、修正解析モデル）。そして、大規模な地震が発生した時点における最新の修正解析モデルを用いて、計測された地震動を用いた再現解析を行うことで、計測されていない部位、部材を含む、健全度、損傷の定量的な評価や、補修・補強の要否とその程度に資する情報を得る。本構想は、データプラットフォームを活用したデジタルツインの構想<sup>8),9)</sup>にも連携するものでもあり、実橋と同様な特性、性能を評価できる解析モデルをデジタル空間に構築しようとするものである。

## (3) 効果的な計測計画の立案

計測計画では、前述の通り、計測位置と計測機器の選定が重要である。計測機器は、数多くのセンサを網羅的に設置することも一つの方法であるが、コストや管理の負担が大きい。また、評価したい挙動

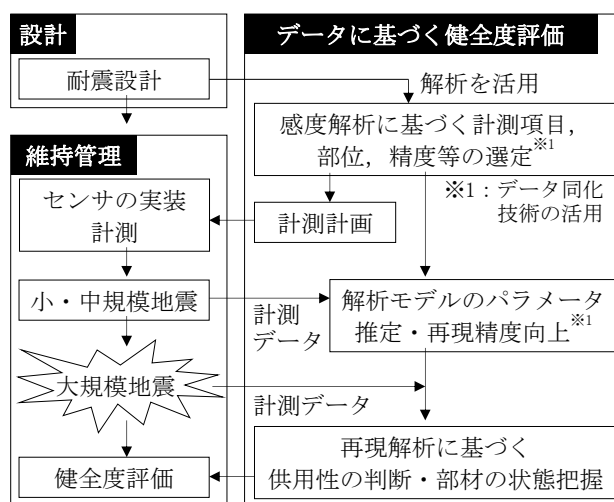


図-1 データに基づく橋梁の健全度評価のフロー

表-1 効果的な計測位置の選定に向けた概念

No.	計測位置	計測精度	推定パラメータに対する誤差	
			P1	P2
1	1 2 3 4 5 6 7	A	2%	3%
2	1     5     7	A	30%	15%
3	1 2     7	A	4%	10%
4	1 2     7	B	5%	12%

や応答を直接計測できることが理想であるが、既設橋梁における部材内部の情報や、河川内橋脚の基部等、センサの設置や視覚的な計測が難しいケースも多い。さらに、前述のように、データ同化技術を用いて解析モデルのパラメータの推定を行う場合、その推定精度に対してより効果的な計測項目を選定する必要がある。

表-1に、データ同化技術による解析モデルのパラメータの推定を前提とした、計測項目の選定を行うための感度解析の概念を示す。表中には、計測位置（No.1～7）と計測精度、コストの組合せ（A：精度、コストともに高い、B：精度、コストともに低い）によって、推定するパラメータP1、P2の推定精度を示している。No.1のケースでは、P1に対するパラメータの正解値に対して誤差が2%で、P2に対して誤差が3%で、高い精度でパラメータP1、P2を推定することができるが、7点全ての計測が必要となる。これに対して、No.2～4では、計測位置を限定、もしくは計測精度を変化させた場合のP1、P2の推定精度を示しているが、No.1に比べて計測を限定したこ

とにより、推定精度が低下している。しかし、目標とするパラメータの推定精度によっては、選択されるべき計測条件が異なることも示している。例えば、P1の誤差を5%以内で推定することが条件ならば、No.3とNo.4の計測条件が合致する。また、No.2とNo.3の結果より、P1の推定においては、計測点2の計測が効果的であることも分かる。No.3とNo.4の比較から、高価な技術Aを用いることで精度は向上するが、P1に対してはコストに見合った精度の向上とは言い難く、目標の範囲内ならば安価な技術Bで十分であると判断できる。このような感度解析を個別の橋梁に対して行うことで、健全度の評価で必要とされる解析モデルのパラメータの推定に対して効果的な計測条件を選定することができ、計測計画に反映できるものと考えられる。

#### (4) 解析モデルの精度向上

表-2に、PRCラーメン橋を想定した解析モデルの構成要素、パラメータの一例を示す。これらの中には、構造上、自明である断面積等のパラメータの他に、経年劣化や地震による損傷でその挙動が変化する可能性がある桁端部の支承の特性や、地盤の調査等に基づいて設定される基礎の特性等がある。また、地震時に塑性化することが想定されている橋脚基部の剛性は、橋梁の健全性を評価する上で重要な要素である。橋梁の設計時には、これらの値が設計値として設定されているが、実際の橋梁ではコンクリートや鉄筋の強度が設計で想定される基準強度と異なることや、経時的な変化や供用中の小～中規模の地震等によるひび割れの発生や材料特性の変化によって、実構造物の物性値が設計値と乖離していることが考えられる。そのため、高い再現精度で橋梁の健全度を評価するためには、供用中に計測された結果に基づいて、随時、データ同化技術を用いてこれらのパラメータを推定、更新していく必要がある。

### 3. データ同化技術の活用に関する試検討

ここでは、データ同化技術を活用することで、限られた応答による解析モデルのパラメータの推定や、同推定に効果的な計測項目の選定に関する試検討について述べる。

#### (1) 対象橋梁と解析モデルの概要

図-2に、試検討で対象としたPRC4径間連続ラーメン箱桁橋の解析モデル（節点のみ描写）を示す。

表-2 解析モデルの構成要素例

部材	諸元	モデル化
PC箱桁	・節点, 要素情報 ・重量 ・断面積, 断面定数	・解析モデル (履歴特性) ・剛性
橋脚	・節点, 要素情報 ・重量 ・断面積, 断面定数	・解析モデル (履歴特性) ・剛性
橋台	—	—
ゴム支承	—	・解析モデル (履歴特性) ・バネ定数
基礎	—	・解析モデル ・バネ定数

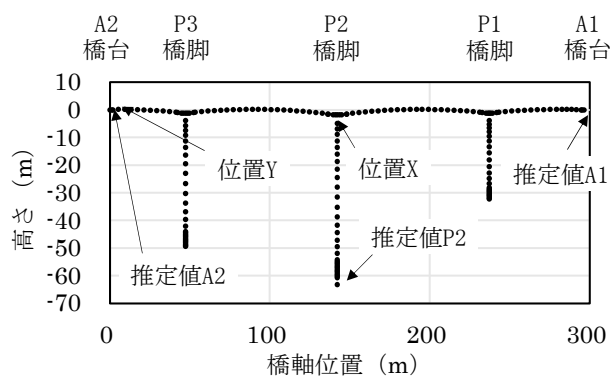


図-2 試解析モデル

同解析モデルは、文献<sup>10)</sup>に示される構造諸元を参考として作成したものである。上部工はPRC箱桁であり、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。数値積分法はNewmark $\beta$ 法 ( $\beta=1/4$ )を用いて、積分時間間隔は0.01秒とした。入力地震動は、道路橋示方書V<sup>7)</sup>に示される加速度波形II-I-1を用いた。減衰にはRayleigh減衰を適用し、各部材の減衰定数は、主桁が3%で、橋脚が5%、支承が4%で、基礎が10%とした。解析には、汎用3次元動的解析プログラムのTDAPIIIver3.12<sup>11)</sup>を使用した。

#### (2) 粒子フィルタとパラメータ推定の手順

データ同化手法には粒子フィルタと呼ばれる手法を用いた。粒子フィルタは、確率分布を独立な実現値と見なせる多数のサンプル（粒子フィルタではこれを「粒子」と呼ぶ）で近似し、それぞれの粒子がモデルに従ってどのように変化するかをシミュレ

ートすることにより、予測分布を評価することができる。一般的な粒子フィルタではフィルタリングの段階で、それぞれの粒子の観測値に対する尤度に応じてリサンプリングされた粒子によって推定パラメータの分布を近似する。ここでは、データ同化手法の有効性を検証する目的を考慮し、リサンプリングを行わないためフィルタリングに時間がかからないSIS (逐次的 Importance Sampling) <sup>12)</sup> というアルゴリズムを用いた。

図-3に、本研究で実施した解析モデルのパラメータの推定手順を示す。解析値は、全ての時刻に対して計測値との尤度を算出する。推定する解析パラメータは探索範囲を設定し、範囲内のパラメータに対して動的解析を行い、同様の手順で尤度の結果を蓄積する。蓄積された尤度の結果に基づき、解析結果が近似するパラメータを推定し、その度数分布の平均値を解析パラメータの推定値として出力する。

### (3) 双子実験の方法と検証方針

本検討ではデータ同化手法の検証方法としてよく用いられる双子実験によって、同手法の有効性を検証した。図-4に双子実験の概念図を示す。双子実験では、まず、正解となるパラメータを有する解析モデルによる解析結果と、正解と異なる設定による解析結果を求める。続いて、正解となるパラメータにより得られた応答から計測結果に相当する応答を抽出する。この時、動的解析による計算は最小単位が0.01秒(100Hz)であるため、計測結果に相当する応答としては、10Hzの計測頻度を想定して出力することとした。一般的には、この応答値に計測誤差に相当するばらつきを加えるが、本研究では簡便のため計測誤差を加えていない応答を計測値として扱うこととした。この計測値に対して前節で述べた手順で推定された解析モデルのパラメータと、同パラメ

ータの正解値との誤差を評価することで本手法の有効性を検証した。

表-3に検証ケースを示す。試解析では、計測値の点数と位置、および計測頻度をパラメータとして、表-4に示す3種類のパラメータを未知数として推定した。計測値は、各橋脚上、両橋台上、および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。解析モデルからは変位、速度、加速度等の様々な応答が得られるが、本稿では加速度を用いた。ケース1は水平成分と鉛直成分を、ケース2~4は加速度の鉛直成分の影響度が小さいことを確認した上で、水平成分のみを使用した。本動的解析の1回あたりの計算時間は数秒ではあるものの、探索範囲内で変化させたパラ

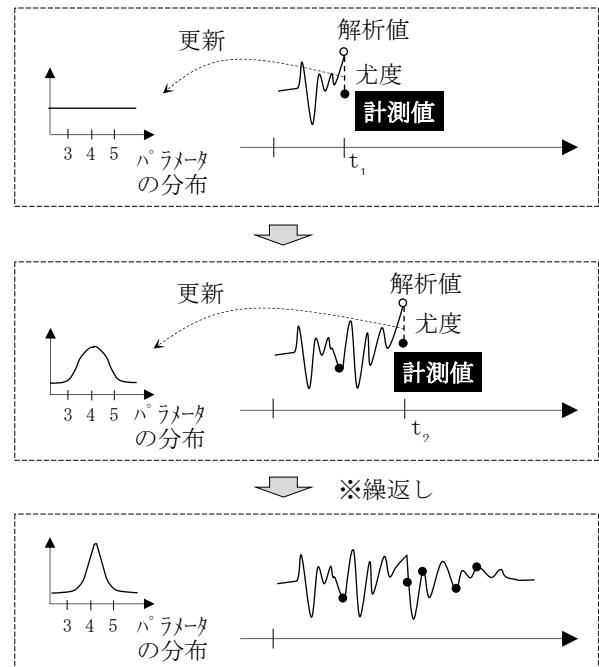


図-3 パラメータ推定の手順

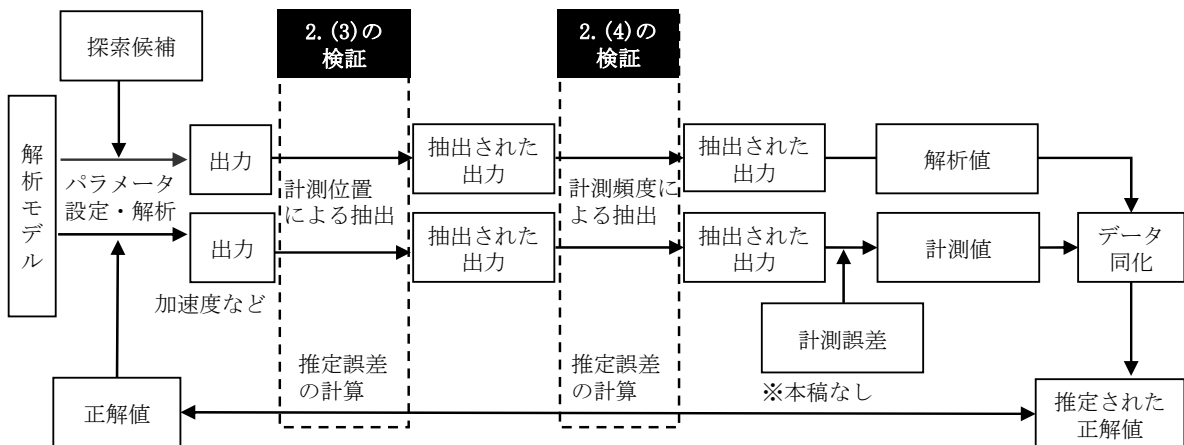


図-4 双子実験の概念図

メータによる計算回数に該当する粒子数は20,000としたため、粒子データの計算には約35時間を要した。計測頻度としては10Hzと100Hzの2パターンとした。

#### (4) パラメータの推定結果

図-5に動的解析に用いた入力地震動の加速度波形を、図-6に計測点における応答加速度の一例を示す。応答加速度は、A1橋台上の上部工で橋軸方向の値である。応答加速度は7秒程度から最大値を示し、12秒以降は収束していく傾向であった。つまり、7秒程度までに広範囲な大きさの応答に対する結果と、それに対する粒子データが蓄積される特徴を有している。

図-7にパラメータ毎の推定結果を、表-5にパラメータの推定誤差の一覧を示す。推定結果は、縦軸がパラメータの値で、横軸が解析上の経過時間である。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確認した。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その推定精度を高めることができると考えられる。次に、計測点を1箇所限定したケース2とケース3では、誤差が大きくなった。特にP2に対しては経過時間とともに正解値から乖離する傾向を示しており、パラメータを推定できていないといえる。このため、P2に対するパラメータ推定は、ケース2、3で設定した計測値のみでは不十分であると考えられる。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、計測点と未知パラメータの位置に近いA2の誤差が1割程度向上するだけでなく、A1橋台の支承に関連する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可能性が示唆された。

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、図-5からケース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ることで、推定精度が向上したためであると考えられる。これらの結果か

表-3 検証ケース

解析ケース	計測値		未知パラメータ
	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	10Hz	3種類 (P2,A1,A2)
ケース2	上部工の1点(位置X)の加速度	同上	同上
ケース3	上部工の1点(位置Y)の加速度	同上	同上
ケース4	同上	100Hz	同上

表-4 未知パラメータと数値実験の条件

未知パラメータ	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	$3.1 \times 10^6 \sim 3.5 \times 10^7 \text{kN/m}^2$	$5.0 \times 10^2 \sim 5.0 \times 10^4 \text{kN/m}$	$5.0 \times 10^2 \sim 5.0 \times 10^4 \text{kN/m}$

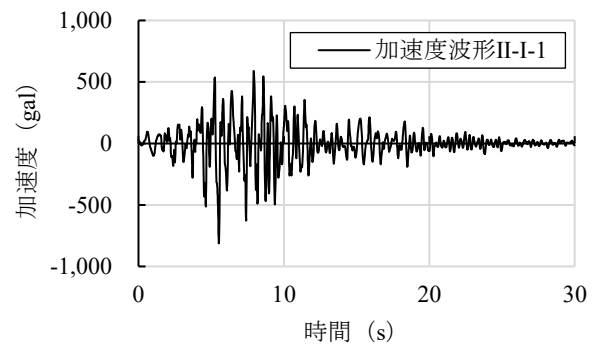


図-5 動的解析に用いた加速度波形

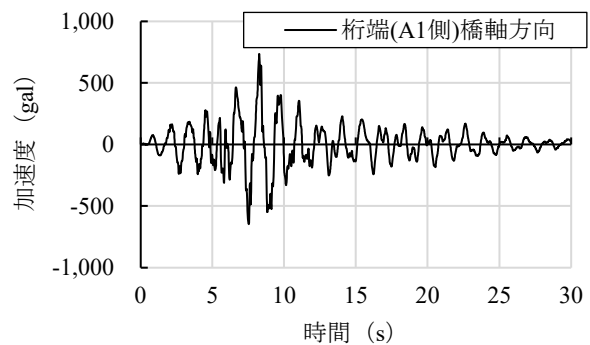


図-6 計測点の応答加速度の例

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は有効となることが示唆された。

以上のことから、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。

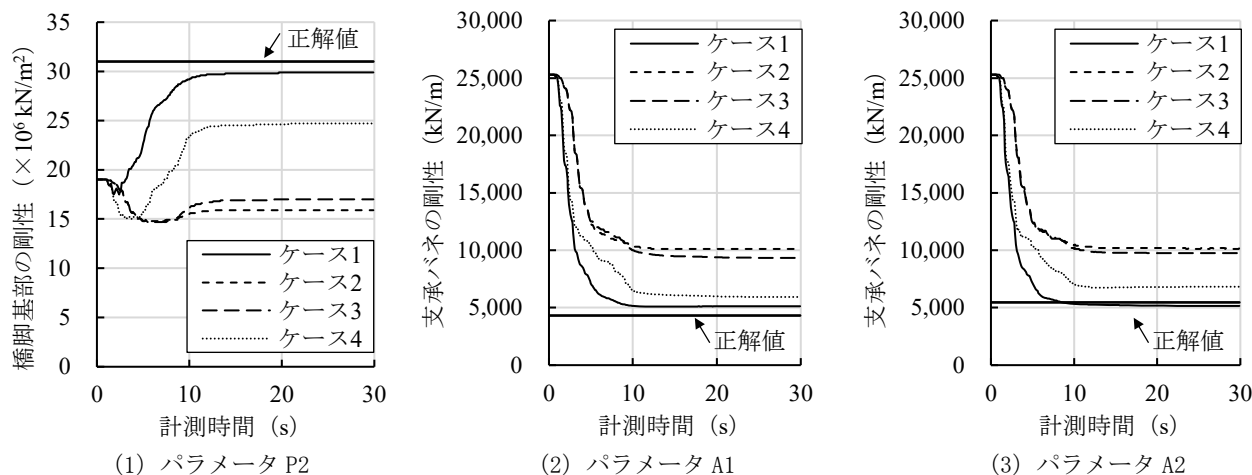


図-7 パラメータの推定

表-5 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%

#### 4. 結論

本研究では、橋梁の地震後における健全性の評価におけるデータ同化技術の有効性を検証するために、同手法の一つである粒子フィルタを応用することで、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を実施した。設計モデルによる動的解析を対象に試解析を実施した結果、同技術を活用することで、限られた計測結果から橋梁の応答を精緻に再現できる解析モデルを構築できる可能性を確認した。

本論文で示した結果は、限られた条件によるものであり、推定する解析モデルパラメータを変えた場合の適用についても検証が必要である。また、今回は、線形モデルによる動的解析結果を対象としたが、大規模な地震に対する実橋の損傷を評価する上では、非線形モデルへの適用が不可欠となる。今後、これらの課題を踏まえた上で、計測と解析に基づく地震後の橋梁の健全度評価や、想定される地震による損傷予測の迅速性、精度の向上に繋げていきたい。

#### 参考文献

1) 国土交通省：点検支援技術性能カタログ令和3年10月，2021.

2) 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定，土木学会論文集A1，Vol.69，No.3，pp.527-542，2013.

3) Gordon, N. J., Salmond, D. J. and Smith, A.F. M.: Novel approach to nonlinear / non-Gaussian Bayesian state estimation, *IEE Proceedings F*, Vol.140, pp.107-113, 1993.

4) Kitagawa, G.: Monte Carlo filter and smoother for non-Gaussian nonlinear state space models, *Journal of Computational and Graphical Statistics*, Vol.5, pp.1-25, 1996.

5) Evensen, G.: Sequential data assimilation with a non-linear quasi-geostrophic model using Monte Carlo methods to forecast error statistics, *Journal of Geophysical Research*, Vol.99, pp.10143-10162, 1994.

6) 土木学会：コンクリート構造物の設計と連成型性能評価法—時空間性能評価技術の未来予想図II—，コンクリート技術シリーズ125，2020.

7) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説（V 耐震設計編），2017.

8) 土橋浩，長田隆信：インフラデータプラットフォームの活用インフラマネジメントから防災情報システムへ，AI・データサイエンス論文集，pp.17-24，2020.

9) 伊佐政晃，茂呂巧実，金治英貞：阪神高速サイバーインフラマネジメントの取り組みと価値創造の可能性，AI・データサイエンス論文集，pp.252-260，2020.

10) 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.

11) アーク情報システム：TDAPIII理論説明書バージョン3.12，2020.

12) 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.