

- 鉄道一般
- 車両
- 施設
- 電気
- 運転・輸送
- 防災
- 環境
- 人間科学
- 浮上式鉄道

測定波形と数値解析を合わせて 鉄道橋の振動を評価する

これまでに建設された膨大な鉄道橋を限られた技術者で適切かつ効率的に維持管理していくため、鉄道橋に加速度センサーなどを設置し、列車通過時の振動などを監視する振動モニタリングが進められています。ここでは、振動モニタリングにより得られた波形から鉄道橋の構造性能を評価するための分析手法のうち、近年、急速発達してきた統計的手法に基づく測定波形と数値解析を合わせた評価手法を解説するとともに、その適用事例を紹介します。

はじめに

鉄道橋は明治以降、継続的に整備・建設されており、10万橋を越える膨大な社会資本ストックを形成しています。これらの鉄道橋を限られたリソースで適切に管理するための技術として、振動モニタリングが注目を集めています。具体的には、鉄道橋に設置したセンサーから継続的に得られる鉄道橋の固有振動数や減衰比などの変化をチェックし、鉄道橋の劣化や損傷を早期に検知するものです(図1)。とくに近年の急速なICT技術の進歩により、安価で簡易な加速度測定システム

が実現したため、さまざまな分野で実務への応用が検討されています。ただし、鉄道橋の劣化や損傷による固有振動数や減衰比の変化は大きくないため、加速度波形に基づく推定精度が低い場合は、図1のように劣化や損傷による固有振動数の変化が、推定誤差や載荷条件(列車種別や速度)、軌道状況、環境条件(温度、湿度)などの劣化以外の変動に埋もれてしまいます。したがって、鉄道橋の状態評価精度を向上させるためには、固有振動数の推定精度向上が大きな課題となります。

ここでは、既存の測定波形の評価手



松岡 弘大
Kodai Matsuoka
鉄道力学研究部
構造力学研究室
副主任研究員
[専門分野] 車両・軌道・
構造物の動的相互作用、
構造逆解析、データ同化



上半 文昭
Uehan Fumiaki
鉄道力学研究部
構造力学研究室
室長
[専門分野] 構造力学、
地震工学、計測工学



曾我部 正道
Masamichi Sogabe
鉄道力学研究部
部長
[専門分野] 車両・軌道・
構造物の動的相互作用
解析、振動、疲労

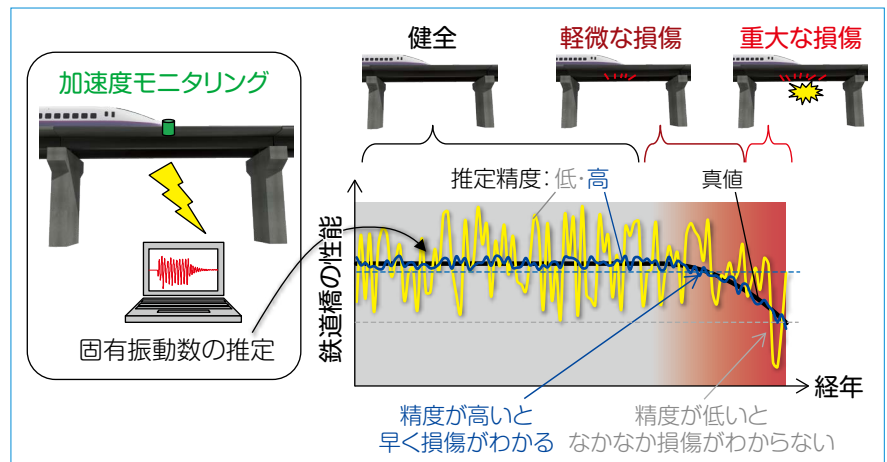
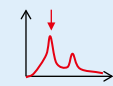



図1 鉄道橋の振動モニタリングによる性能評価の概念

表1 代表的な振動特性の推定手法

	数値解析と融合	FFT法	AR法	ERA法
原理	解析モデルの入力パラメータを修正することで推定 →図2	各周期の正弦波に分解して主要な振動数を推定 	前後データの相関から主要な振動数を推定 	システムの最小実現理論により主要な振動数を推定
入力波形	通過中	通過後	通過後	通過後

法について概説したのち、測定波形と数値解析を合わせた高精度な評価手法について紹介します。

これまでの測定波形の評価手法

固有振動数や減衰比のことを振動特性と呼びます。測定した加速度波形から振動特性を推定する場合、数値解析を利用せず、測定波形の信号処理のみを用いる方法がこれまで多く用いられてきました。表1に代表的な手法を示します。

FFT（高速フーリエ変換）法は波形を各振動数の正弦波に分解することで主要な振動数として振動特性を推定します。AR（自己相関）法は時間的に離散化された各時点のデータの相関を調べ、これを振動数に変換することで振動特性を推定します。ERA（Eigen system realization algorithm）法は時間の経過にともなう波形の変化を行列表操作により振動数に変換することで振動特性を推定します。これらの方法は入力として自由振動波形（^④参照）が必要であり、列車通過時の加速度波形に適用する場合は、通過後の残存波形を自由振動波形と見立てて推定を行うことになります。しかし、通過列車特性が推定結果に影響するため、結果がばらつくとともに、自由振動数には列車の载荷にともなって開くコンクリートのひび割れや列車質量・振動の影響など、鉄道橋の状態評価に重要な情報が含まれていないという問題がありました。

測定波形と数値解析を合わせた評価手法

上記のような問題を解決する方法として、列車通過中の測定波形と、さまざまな通過中の状態を表現できる精緻な数値解析を組み合わせたことが考えられます。具体的には、図2に示すように、鉄道橋に設置した加速度計によ

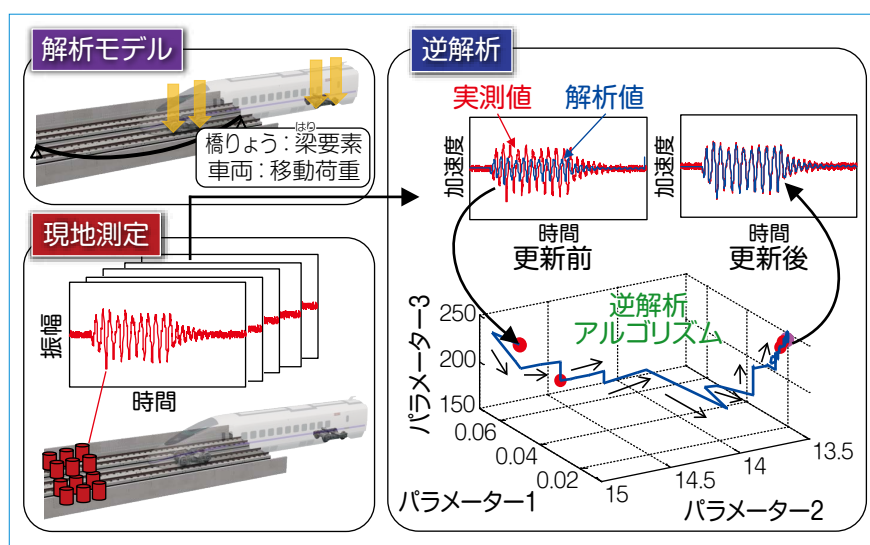


図2 測定波形と数値解析を合わせた鉄道橋の状態評価

り記録された測定波形に、数値解析で算出した波形が合うよう、数値解析モデルの入力パラメータを自動的に修正することで、鉄道橋の振動特性を推定します。このように、測定波形に合わせて数値解析モデルを修正もしくは推定する方法は、逆解析やモデルアップデート、近年では広い意味でデータ同化や機械学習とも呼ばれています。

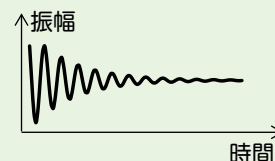
次元の呪い

逆解析は古くから研究されてきましたが、次元の呪いと呼ばれる大きな課題のため、実問題への適用は限られてきました。次元の呪いとは、同時に

推定するパラメータの数が増えると正解値以上の領域が急激に増加する現象です。これを説明するため、一から千の範囲の整数の中で1つの正解値を有するようなパラメータを考えます

④ 自由振動波形

衝撃加振後に徐々に減衰していく波形を意味します。外部からの加振の影響がなく構造物の特性を抽出しやすいことが特徴です。



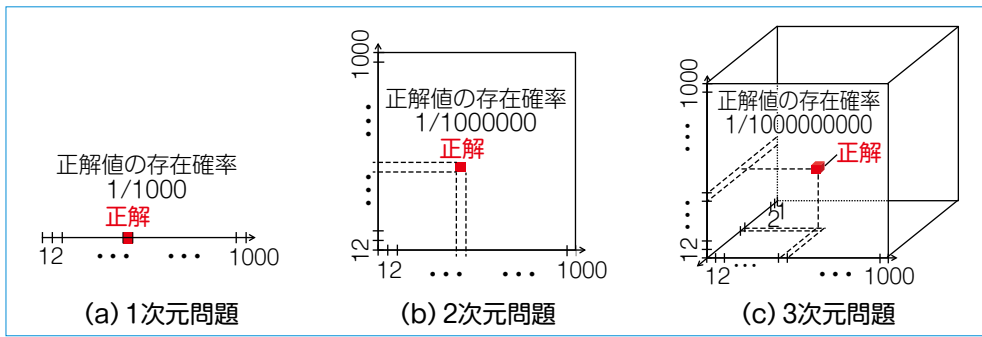


図3 パラメーターが増えると正解値の存在確率が低下する次元の呪い

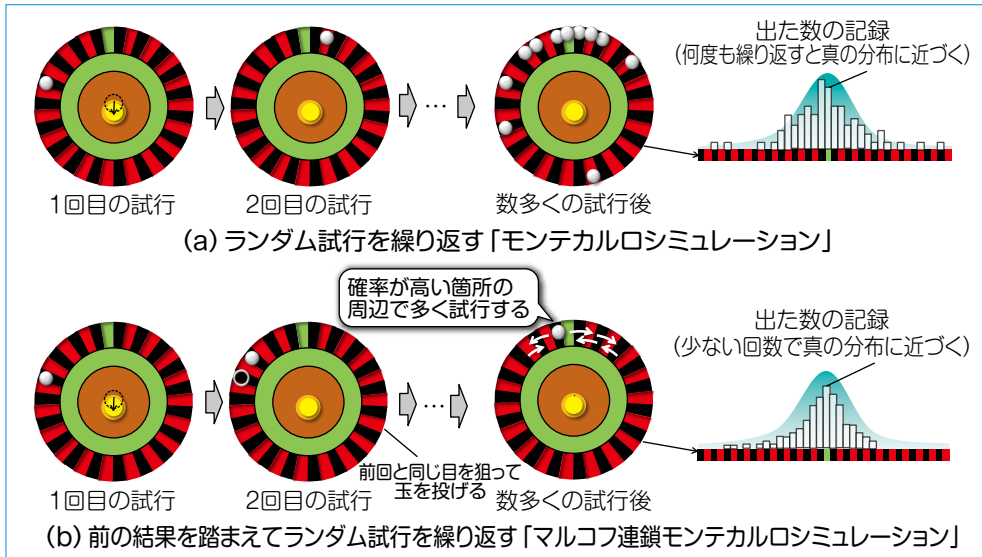


図4 芯の偏ったルーレットの確率分布をランダム試行により推定する方法

(図3 (a))。パラメーターの正解値をランダムに当てようとする正解確率は千分の1となります。ここで、パラメーターの次元を二つ三つと増やし、すべてのパラメーターの正解値を同時に当てる問題を考えます。たとえば、三つのパラメーターの正解値を同時に当てようとする正解確率は十億分の1となってしまう、やみくもに正解値を探しても、ほとんど当たらない状態になってしまいます(図3 (b))。逆解析ではこのような次元の呪いを克服するため、

膨大な計算量への対応と効率的なパラメーター推定手法が必要不可欠です。

乱数によるパラメーター推定方法

計算量については、近年の急速な計算機性能の向上により、ある程度克服されつつあります。一方で、パラメーター推定手法については、より効率的な手法が必要とされています。ここでは、逆解析を可能とする効率的なパラメーター推定方法として、ベイズ推定法(☞参照)の一つである「マルコフ連鎖モンテカルロシミュレーション」について簡単に紹介します。

ある確率分布に従う乱数を発生させて計算を行うことを「モンテカルロシミュレーション」といいます。さらに、前回発生させた乱数の結果を踏まえて、次の乱数を発生させることを「マルコ

フ連鎖モンテカルロシミュレーション」と呼びます。ここでは、芯が偏ったルーレットを例にモンテカルロシミュレーションとマルコフ連鎖モンテカルロシミュレーションについて説明します。芯の偏ったルーレットでは出る目にも偏りが生じます。どの目が出やすいか知りたい場合に、何度もルーレットを回しボールを投入することが考えられます。何度も試行することでほかよりも出やすい目が分布として得られます。これがモンテカルロシミュレーションに相当します。ただし、何度も何度も試行するには手間と時間が掛かります。

より効率的にほかよりも出やすい目を求めるために、以下のような方法を考えます。まず、玉を投げ入れるディーラーはある程度の確率で狙った目に玉を投げることができることを「マルコ

☞ ベイズ推定法

ベイズ推定は、測定データとモデルの一致度を表す尤度を使って、未知パラメーターを推定します。ベイズ推定はパラメーターを確率分布として扱うことができ、決定論では対応できない推定問題へ適用が可能です。

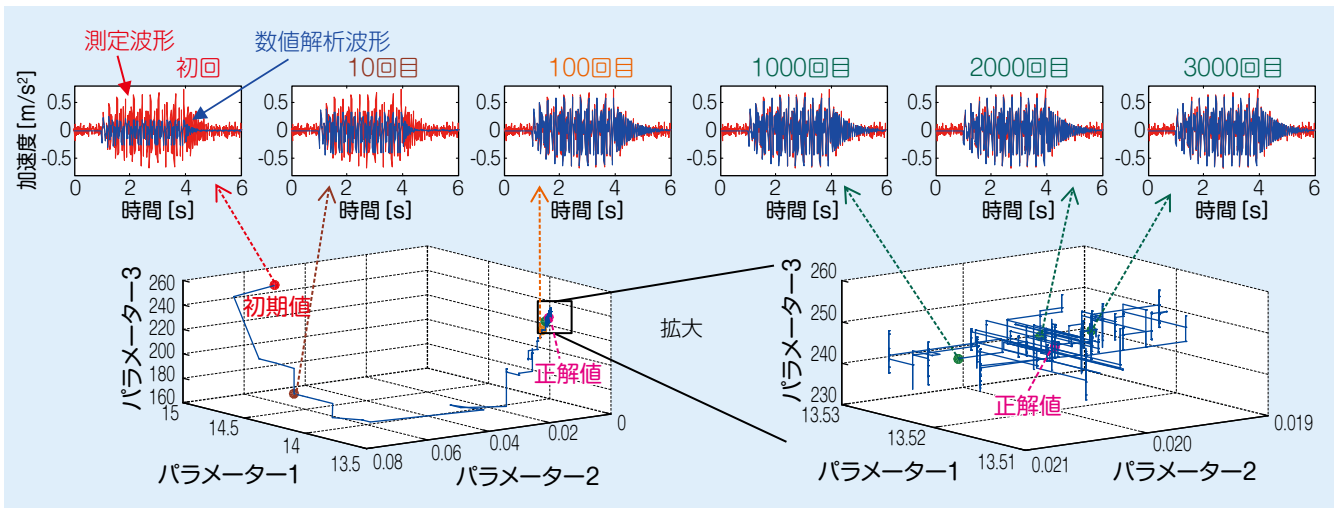


図5 マルコフ連鎖モンテカルロシミュレーションにより修正される数値解析モデルのパラメーター

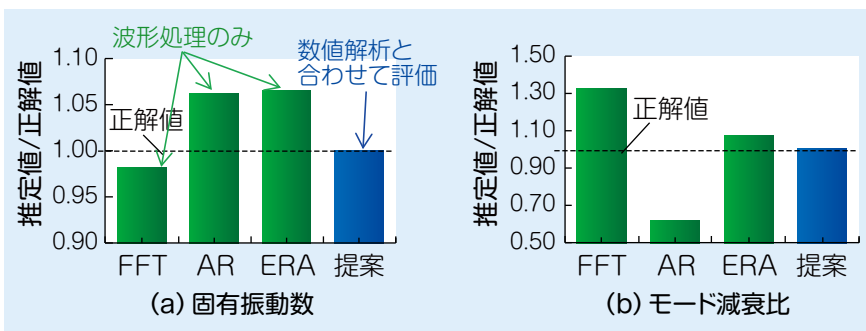


図6 数値解析モデルのパラメーター推定精度

で一度ルーレットを回し、ここで出た目を記録します。次は前回出た目を狙って玉を投入します(図4(b))。これにより、次の玉は前回と同じ目、もしくはその近くに落ちることになります。近くに落ちる場合には、芯の傾きにより出やすくなっている方向に行く確率が高いため、これを繰り返すことで徐々に最も出やすい目の周辺に収束します。これがマルコフ連鎖モンテカルロシミュレーションに相当します。出やすい目の周辺に玉を重点的に投げ入れることができるため、ランダムに繰り返すよりも格段に速く出やすい目の分布を知ることができます。

列車通過波形を利用した逆解析

マルコフ連鎖モンテカルロシミュレーションの利用例として、鉄道橋で測定した加速度波形に合わせて、数値解析モデルの入力パラメーターを推定

した事例を紹介します。図2のモデルを対象とし、鉄道橋の固有振動数を含む3つのパラメーターを推定します。

ここでは、正解値とは異なるパラメーター値を初期値として与えた数値解析モデルを用意し、数値解析モデルで算出した列車通過時の加速度波形が測定加速度波形に合うようパラメーターを推定します(図5左)。はじめはパラメーター値が異なることで測定と数値解析で加速度波形が大きく異なりますが、マルコフ連鎖モンテカルロシミュレーションを繰り返すことで、100回目には正解値に近いパラメーター値に収束しています。また、収束後は正解値に近い領域で付加したノイズに起因したパラメーターのばらつきが推計が行われます(図5右)。

列車通過時の測定波形と数値解析モデルを合わせた評価手法の精度を従来の波形処理手法と比較しました(図6)。

従来の波形処理手法では列車の加振周期や列車速度のばらつきなどに起因して正解値との誤差が生じますが、数値解析を合わせて評価することで、これらの誤差を抑制できるため、固有振動数などのパラメーターの推定精度を向上させることができます¹⁾。

おわりに

ここでは、測定波形と数値解析を合わせる逆解析技術について紹介するとともに、鉄道橋の解析パラメーターの推定例を紹介しました。急速に発展するICT技術の活用を用いた現場との通信やセンサーのリモート制御、スーパーコンピュータでの並列計算技術が普及することで、振動モニタリングの実用化が促進され、列車通過時の振動波形はより身近なものになると思われます。得られる測定波形だけでは見えない部分を数値解析により適切に補うことで、効率的な維持管理に資する情報を提供していきたいと考えています。[RRR]

文献

- 1) 松岡弘大, 曾我部正道, 上半文昭, 渡辺勉: 列車通過時の単点加速度と梁の動力学モデルを用いた鉄道橋の動特性及び変位のベイズ推計, 土木学会論文集A1(構造・地震工学), Vol.72, No.3, pp.420-439, 2016