

列車通過時加速度に基づく橋梁モード特性および変位の逆解析法

公益財団法人鉄道総合技術研究所 正会員 ○松岡 弘大
 公益財団法人鉄道総合技術研究所 正会員 上半 文昭
 公益財団法人鉄道総合技術研究所 正会員 曾我部 正道

1. はじめに

センサ等による既設鉄道橋の定量的な維持管理は重要課題であるが、作業性や経済性などから継続的なセンシングは変位や速度よりも加速度を用いることが現実的である。一方で、鉄道橋の構造性能としては列車走行時の変位、衝撃係数などが重要な指標であり、測定加速度から変位を精度よく推計する方法が必要となる。本研究では、理論解析と MCMC 法により 1 点の測定加速度に基づく変位の逆解析法を提案するとともに、実橋梁への適用を通じて、提案手法の有効性を検証する。

2. 簡易解析モデル

図-1 に走行列車を移動荷重列とした列車走行時の単純桁モデルを示す。図-1 に示す系の運動方程式を橋梁 1 次曲げモードについて解くと、位置 x 、時点 t の梁変位 u は式(1)となる。

$$u(x, t) = \sum_{k=1}^{n_v} \sum_{i=1}^4 v(t - \tau_{k,i}) u_{k,i}(x, t) \quad (1)$$

$$u_{k,i}(x, t) = \sin \frac{\pi x}{L_b} \frac{u_0}{1 - \beta^2} \cdot \left\{ \sin \bar{\omega}(t - \tau_{k,i}) - \beta e^{\alpha(t - \tau_{k,i})} \sin \omega(t - \tau_{k,i}) \right\} \quad (2)$$

ここで、 T は橋梁通過時間、 ω は固有周期、 ξ はモード減衰比、 $\bar{\omega}$ は車軸通過周期、 u_0 は径間中央に k 両目車両第 i 車軸の軸重 $P_{k,i}$ が作用した際の静的たわみ量であり、単位長質量 $\bar{m}$ 、減衰係数 c 、曲げ剛性 EI および軸重 $P_{k,i}$ から算出できる。また、 $\alpha = \xi \omega$ および $\beta = \bar{\omega} / \omega$ である。式(1)、(2)は三角関数の重ね合わせであり、1) 数値積分を介した誤差と、2) 計算負荷が小さい、という利点を有する。図-2 に径間長 35m の橋梁での理論解析と梁要素でモデル化した同橋に対する荷重列解析 (DIARIST) および相互作用解析 (DIASTARS III) ¹⁾ との比較結果を示す。共振時に車両との相互作用に起因した相違が見られるが、荷重列解析とは時刻歴および衝撃係数ともに良好に一致する。

3. 逆解析法

図-3 に逆解析手法の概要を示す。逆解析での劣決定問題回避と不確実性を考慮した推計を実現するため、本研究では MCMC 法による未知パラメータと変位応答の推計法を提案する。式(2)から未知パラメータは固有振動数 (周期)、モード減衰比、単位長質量である。提案逆解析法は理論解析モデルに誤差項 (正規分布) を加え、測定加速度を尤もよく表わすパラメータ推計値とその信頼区間を MCMC 法により推計する。サンプリングにはギブスサンプリング-MH 法を採用した。

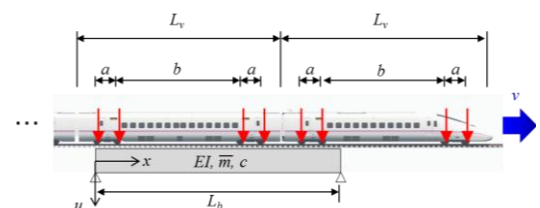
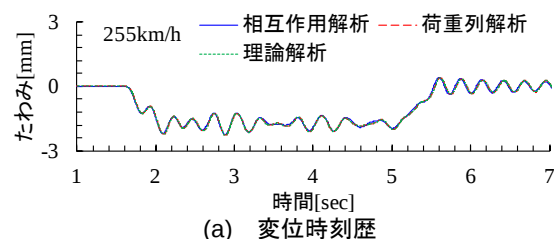
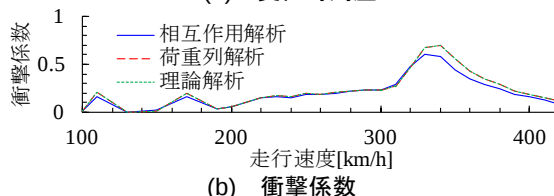


図-1 列車走行時の単純桁モデル



(a) 変位時刻歴



(b) 衝撃係数

図-2 解析結果の比較

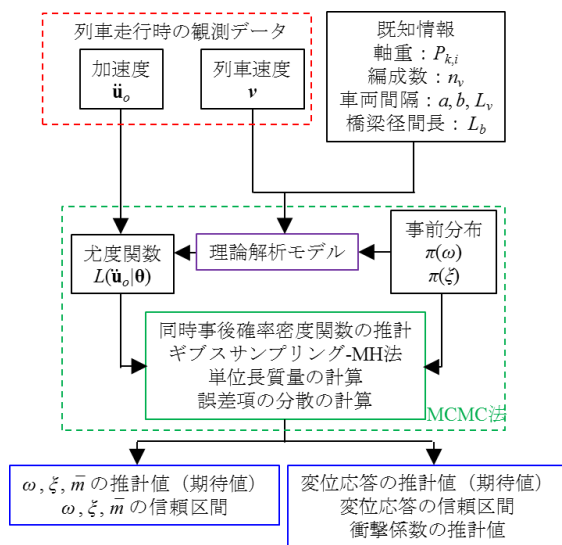


図-3 逆解析の概要

キーワード 鉄道橋, 変位推計, 逆解析, MCMC 法, 衝撃係数

連絡先 〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38 TEL 042-573-7290

4. 適用結果

提案手法の有効性を検証するため、既報告の測定加速度に提案手法を適用し、モード特性と変位を推計した。圧電型加速度計で測定された PC 箱桁橋（径間長 35m）径間中央加速度を、カットオフ周波数 20Hz の LPF に通過させ、逆解析に用いた。逆解析でのパラメータ初期値は設計値²⁾を用いた。

図-4 に測定加速度、フィルタ処理後の加速度と逆解析前後の計算加速度を示す。逆解析により測定波形に良く一致するモデルが推計されていることがわかる。

図-5 に 2 本の列車通過時からそれぞれ提案手法により推計したモード特性を示す。なお、図中には列車通過後波形から FFT により推計した値を併せて示す。逆解析で得られた固有振動数と単位長質量は FFT と比較してばらつきが小さい。また、提案手法によるモード減衰比は FFT よりも大きい。これは通過車両による付加減衰の影響だと考えられる。

図-6 に提案手法により推計した変位応答を示す。推計変位は測定変位と比較して、上側振幅を若干大きく評価するが、列車通過時の平均的なたわみ量と最小値は測定変位と良好に一致する。最大変位での誤差はいずれも 5%以下であった。

図-7 に逆解析モデルで計算した最大変位を示す。図中には 90%信頼区間を併せて示す。当該橋梁では 300km/h までの速度向上を想定すると、最大変位は 145km/h 時に期待値で 1.3mm、安全側の 90%信頼区間上限で 1.4mm と予測できる。

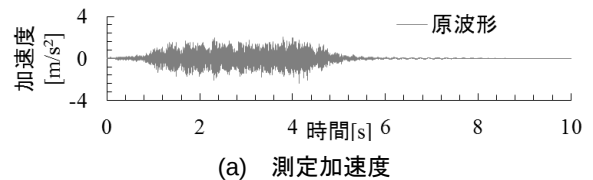
図-8 に維持管理への活用法として、逆解析モデルの固有振動数を変化させた場合の最大変位を示す。図-8 により管理目標とする最大変位量を固有振動数（設計を 1 と基準化）に対応させることができる。これにより、以後の測定では固有振動数さえ得られれば、簡易的に最大変位を予測可能であり、測定データを設計でも活用される最大変位を介して維持管理の意思決定に反映することができる。

5. おわりに

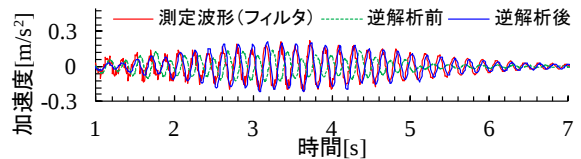
本研究では鉄道橋の重要な構造性能である列車通過時の変位や衝撃係数を 1 点の測定加速度から推定するため、理論解析モデルと MCMC 法に基づく逆解析手法を提案した。測定加速度への適用を通じて、提案手法が高精度に列車通過時の最大変位を推計できるとともに、固有振動数と最大変位を関連付けることで、測定が容易な固有振動数に基づき、最大変位が管理できる可能性を提示した。

参考文献

- 1) 曾我部正道, 松本信之, 藤野陽三, 涌井一, 金森真, 宮本雅章: 共振領域におけるコンクリート鉄道橋の動的設計法に関する研究. 土木学会論文集, Vol.724, pp.83-102, 2003.
- 2) 松本光矢, 曾我部正道, 谷村幸裕, 渡辺勉: 開床式高架橋の動的特性と高速鉄道への適用性に関する研究, 鉄道力学論文集, pp.70-76, 2009.

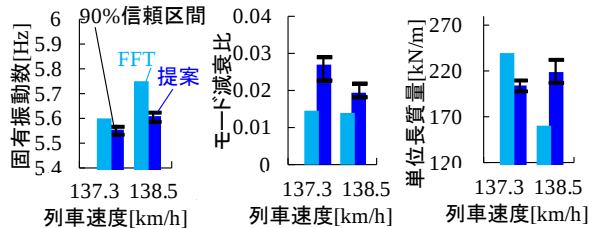


(a) 測定加速度



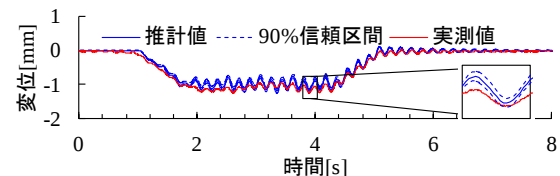
(b) フィルタ処理および逆解析前後の加速度

図-4 逆解析前後の加速度の比較

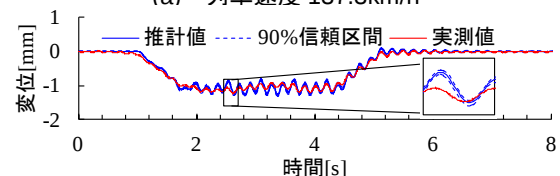


(a) 固有振動数 (b) モード減衰比 (c) 単位長質量

図-5 逆解析によるパラメータ推計結果



(a) 列車速度 137.3km/h



(b) 列車速度 138.5km/h

図-6 加速度に基づく変位推計結果

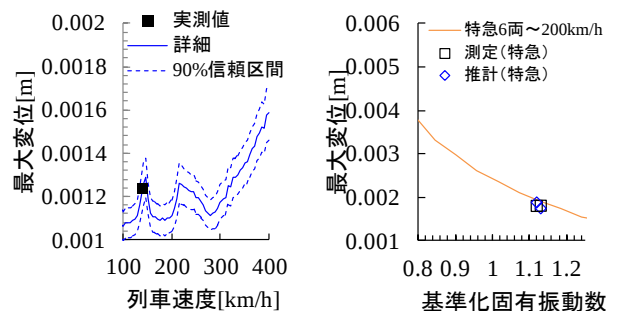


図-7 逆解析結果に基づく最大変位と列車速度の関係

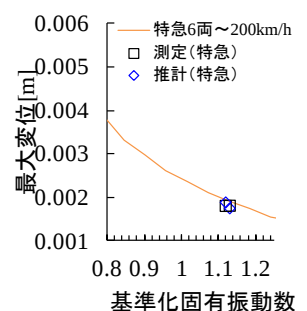


図-8 逆解析結果に基づく最大変位と固有振動数の関係