

高速鉄道用 PRC 橋梁における 振幅依存効果と VBI 効果を分離可能な固有振動数同定手法の提案

大阪大学 学生員 ○井田 直宏
鉄道総研 正会員 松岡 弘大
大阪大学 正会員 貝戸 清之

1. はじめに

高速鉄道用 PRC 桁では、剛性評価においてひび割れの発生や進展が重要な指標となる場合があるが、導入プレストレスの影響により列車載荷時以外ではひび割れが閉口し、列車通過中におけるひび割れ開口時の状態把握手法の構築が課題であった。ひび割れ開口時における鉄道橋の剛性低下判定手法として松岡ら¹⁾²⁾は、列車通過時の波形から瞬間的な固有振動数の同定を可能とした Time Varying Auto Regressive with eXogeneous (TV-ARX) モデルおよびその階層ベイズ推計からなる Bayesian TV-ARX 法を提案している。この手法は、外生成分としてモード外力化された移動荷重を設定し、応答測定値から入力情報を分離しているため、加振力の影響を受けやすい共振時の鉄道橋の固有振動数の変動を高精度に推計できる。一方で、固有振動数の瞬間的な低下の原因である、ひび割れに基づく振幅依存効果と車両との相互作用 (VBI) による効果を分離できないという課題があった。

以上を踏まえ、本研究では、列車通過時の固有振動数の時間的な変動におけるひび割れ開閉による振幅依存効果と車両との相互作用依存効果を分離して同定することを目的とし、これまでランダムウォーク過程としてモデル化されていた AR 係数の時間的な変動に関数を導入した Time Varying Functional Auto Regressive with eXogeneous (TVF-ARX) モデルを構築した。また、数値計算により提案手法の妥当性を検証した。

2. TVF-ARX モデルの定式化

図-1 に TVF-ARX モデルで表現したい非線形現象の概念を図示する。列車通過時にはひび割れ開口と VBI の効果が重複し、固有振動数が低下する。これらを分離して当該区間における AR 係数の変動を同定するため、本研究ではこれまでランダムウォークとしてモデ

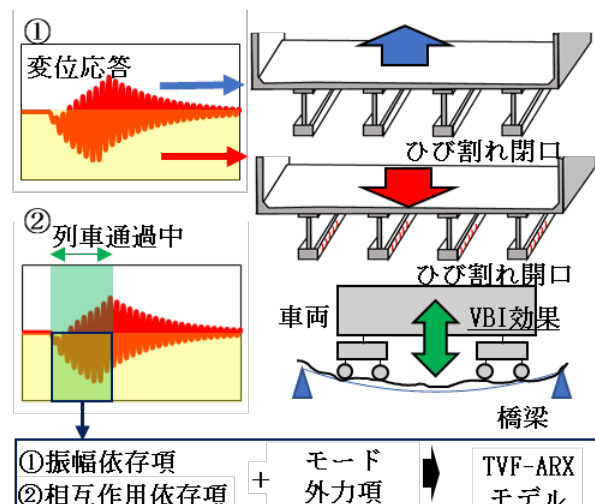


図-1 TVF-ARX モデルの概要図

ル化されていた AR 係数の時間的な変動を、ひびわれ開閉の影響を表す振幅依存項および相互作用依存項の線形結合を含む時間関数としてモデル化した。具体的には橋りょう支間中央変位 z_m が TVF-ARX モデルにより式 (1) および (2) として表現できるとした。

$$z_m = A_m \alpha + Z_m \beta_m + \epsilon_m \quad (1)$$

$$\beta_m = c + \eta z_{m-1} \delta_m + \gamma A_m^2 + v_m \quad (2) \\ (m = 1, \dots, M-1)$$

ここで $m = (1, \dots, M)$ は離散時点、 z_m は時点 m における橋梁変位応答、 $Z_m = [z_{m-1}, z_{m-2}]$ 、 $\beta_m = [\beta_{1,m}, \beta_{2,m}]^T$ は自己相関を表す AR 係数、 $A_m \alpha$ は外生変数項、 ϵ_m は観測誤差、 v_m システム誤差をそれぞれ表す。このとき、 ϵ_m と v_m は平均 0、分散 σ_ϵ^2 と Σ_v に従う互いに独立な正規分布である。 η は振幅依存項の係数ベクトル、 γ は相互作用依存項の係数ベクトルを表す。 A_m として考慮されるモード外力は静止輪重のみを考慮した。

3. 数値計算による検証

ここでは、ひび割れ開閉を梁の下側振幅に依存したモード剛性の変化としてモデル化したシミュレーションを利用し、検証を行った。本研究では、既往研究²⁾を参考に下側振幅 1mm あたり、1 次モードのモード剛性

キーワード 固有振動数、時間-周波数解析、TV-ARX モデル、ひび割れ、VBI 効果
連絡先 〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1 工学研究科 AR 棟 TEL 06-6879-7622

が 0.014kN/m 低下する（本解析では最大変位 18mm 時に 2.8Hz が 2.45Hz まで低下する）ものと設定した。なお、列車速度は共振速度に近い 235km/h とし、走行列車と桁の動的相互作用を考慮したモデル（VBI モデル）²⁾ と桁上に移動荷重を載荷したモデル（ML モデル）でそれぞれ変位波形を作成した。線形時の条件、橋梁の固有振動数 2.8Hz 、モード減衰比 2%、支間長 29.2m 、単位長質量 22.2t/m 、列車軸重 130kN である。得られた波形とモード外力を TVF-ARX モデルに入力し固有振動数および各項のパラメータを推定した。

図-2 はひび割れを有するケース（VBI-crack）での入力および推定応答、図-3 は VBI-crack ケースにおける瞬間固有振動数およびパワースペクトルの推定値、および図-4 は VBI-crack と ML-crack の各解析ケース各々で推定された振幅依存項 η と相互作用依存項 γ の分布を示す。比較のために、ひび割れなしで相互作用ありのケース（VBI-no-crack）も併記した。

図-2 と図-3 より、振幅に依存して瞬間的に固有振動数が低下する挙動を高精度に推計できることを確認できる。設定通り、列車通過時に 2.4Hz 付近まで固有振動数が瞬間的に低下する。図-4 はひび割れ依存項の係数 η の事後分布を示す。相互作用の有無に依らず、ひび割れが無い場合に 0 を中心としていた η_1 の事後分布は、ひび割れがある場合に負側にシフトする。なお、 η_2 はひび割れの有無に依らずすべて 0 を中心に分布した。図-5 は相互作用依存項の係数 γ の事後分布を示す。相互作用を考慮した VBI-crack では γ_1 が正に分布するが、ML-crack では 0 を中心に分布する。これらの適用結果より、本研究で提案する TVF-ARX モデルでは、固有振動数の変動に占めるひび割れによる振幅依存効果と相互作用依存効果を分離可能であることを確認した。

4. おわりに

本研究では、既往研究でランダムウォークとしてモデル化された AR 係数を振幅依存項と相互作用依存項の線形式に置き換えた TVF-ARX モデルを提案し、シミュレーションによって提案手法の有効性を確認した。提案手法は、振幅に依存した瞬間的な固有振動数の低下挙動を高精度に推計できるとともに、導入した振幅依存項と相互作用依存項の事後分布から、固有振動数の時間的な変動に影響する 2 つの効果を分離可能であ

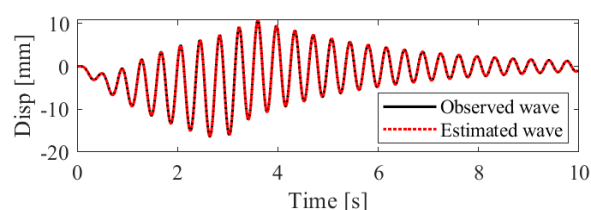


図-2 入力変位と推定変位

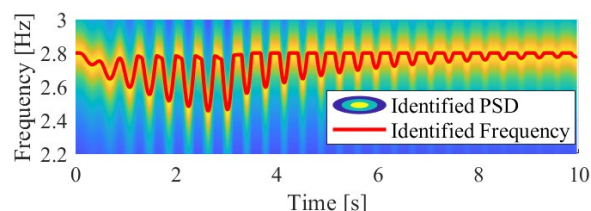


図-3 推定瞬間固有振動数

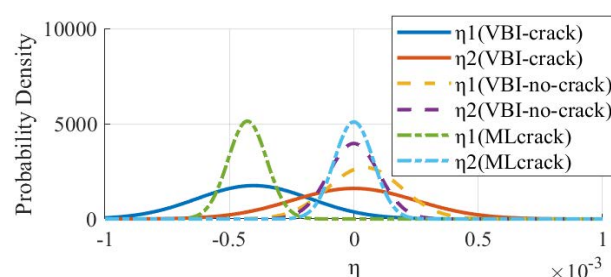


図-4 振幅依存項 (η) の事後分布

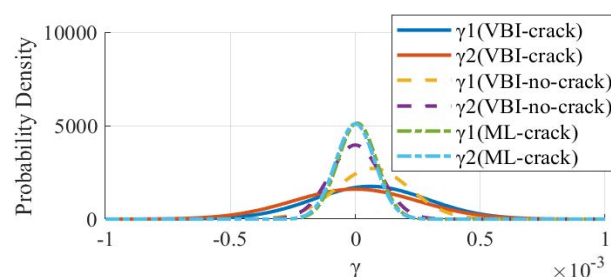


図-5 相互作用依存 (γ) の事後分布

ることを示した。今後の課題として、ひび割れ量、軌道不整等を考慮したシミュレーション波形や実測波形に適用し、本手法の有効範囲や評価精度について詳細に検討する。

参考文献

- 1) K. Matsuoka, K. Kaito and M. Sogabe: Bayesian time-frequency analysis of the vehicle-bridge dynamic interaction effect on simple-supported resonant railway bridges, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 135, No. 106373, 2020.
- 2) K. Matsuoka, M. Tokunaga, and K. Kaito: Bayesian estimation of instantaneous frequency reduction on cracked concrete railway bridges under high-speed train passage, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 161, No. 107944, 2021.