

車両応答計測を利用した路面プロファイル推定に基づく橋梁固有振動数の抽出

東京大学 学生会員 ○中須賀淳貴 正会員 長山智則 学生会員 王浩祺 正会員 蘇迪

1. 背景と目的 橋梁の固有振動数は、構造特性を表す重要な指標の一つであり、一般に橋梁に直接設置した加速度計等の応答から推定されるが、膨大な橋梁群に対しての適用には多大なコストを要する。そこで近年、橋梁上を走行する車両の鉛直加速度応答を観測し、計測信号に含まれる橋梁固有振動数を抽出する手法が提案されている¹⁾。路面凹凸および車両固有振動に由来する擬似ピークを区別する必要がある。本研究では、これらの問題を解決する新たな手法を用い車両応答に基づく橋梁固有振動数の推定を行った。

2. 提案手法 提案手法の概念図を図1に示す。

車両が橋梁上を走行する際、車輪位置における鉛直方向強制変位は路面凹凸によるものと橋梁振動によるものの和となる。今、前後輪は同一パスを走行すると考えられるから、前後輪の強制変位の差分を取ると路面凹凸成分のみが除去され、位相ずれのある橋梁振動成分の差分値のみが残る。これにフーリエ変換を適用し卓越成分を抽出することで、橋梁固有振動数を推定する。ここで、車輪位置の強制変位の推定には、趙ら²³⁾による路面プロファイル推定手法を用いる。路面凹凸による成分と橋梁振動成分の和がプロファイルとして推定される。遺伝的アルゴリズムに基づくハンプキャリブレーションによって車両モデルを同定したのち、カルマンフィルタに基づき路面プロファイルの推定を行うものである。しかし、この手法では橋梁固有振動数の推定が困難となる2種類の車両速度（以下、不感速度）がある。一つは前後輪が捉える橋梁振動成分が同位相となる場合で、差分により橋梁振動成分も打ち消される。もう一つは前後輪が励起する橋梁振動成分が逆位相となる場合で、橋梁振動が十分に励起されず、橋梁振動の観測が困難となる。

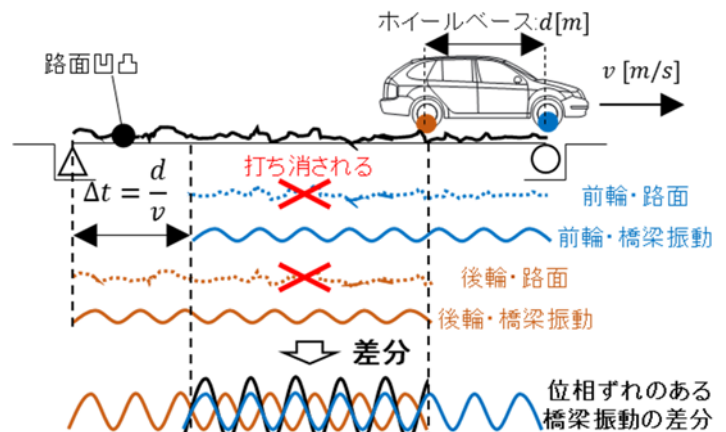


図1 橋梁固有振動数推定手法の概念図

として推定される。遺伝的アルゴリズムに基づくハンプキャリブレーションによって車両モデルを同定したのち、カルマンフィルタに基づき路面プロファイルの推定を行うものである。しかし、この手法では橋梁固有振動数の推定が困難となる2種類の車両速度（以下、不感速度）がある。一つは前後輪が捉える橋梁振動成分が同位相となる場合で、差分により橋梁振動成分も打ち消される。もう一つは前後輪が励起する橋梁振動成分が逆位相となる場合で、橋梁振動が十分に励起されず、橋梁振動の観測が困難となる。

3. 数値シミュレーションによる提案手法の妥当性の検証 橋梁-車両相互作用を考慮した線形システムの応答をニューマークβ法により計算し、橋梁上を走行する車両応答を算出した。この結果に提案手法を適用し、橋梁固有振動数の推定が可能か検証した。なお、以下では前後輪が捉えるプロファイルとして、真値である前後輪変位応答を用いた分析、および推定値であるカルマンフィルタ算出値を用いた分析を行った。1.5 Hz~10 Hz 中で最も大きなピークを推定橋梁固有振動数とし、その値が橋梁固有振動数の真値(2.21 Hz)から±10 %にある時、橋梁固有振動数の推定に成功したとする。車両および橋梁パラメータは、後に述べる車両走行実験で使用了のものと整合性のとれる数値を用いた。

図2は、10~50 km/h まで1 km/h 刻みの走行速度を仮定し、前後輪変位応答の真値/推定値を用いた際の推定橋梁固有振動数である。点線で不感速度帯も示している。これを見ると、特に41 km/h 付近の不感速度帯では、図3に示すようにプロファイル真値を用いても橋梁固有振動数の推定が困難であることがわかる。さらにプロファイル推定値を用いると、不感速度の影響が真値に比べて広がるがわかる。また、20 km/h 以下の低速領域では不感速度帯が密となること、また一般交通の妨げとなり実用的でないことを考慮し、実験的解析では特に成功率が高いと考えられる走行速度20~35 km/h について分析を行った。

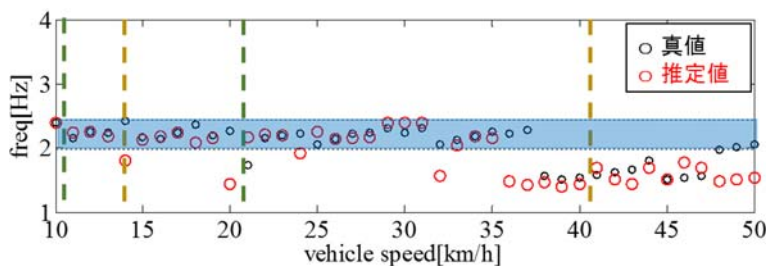


図2 プロファイル真値/推定値を用いた際の
推定橋梁固有振動数

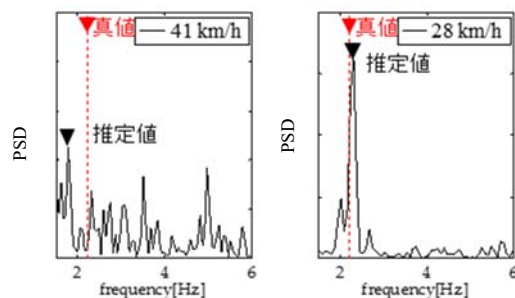


図3 プロファイル真値を用いた時の
前後輪プロファイル差分値 PSD
(左は車両速度＝不感速度)

4. 車両走行実験による提案手法の妥当性の検証

以上の分析をもとに、実橋梁に本手法が適用できるか実験的検証を行う。使用した車両および橋梁を図4に示す。対象橋梁は千葉県君津市の月毛橋であり、既往の調査から橋梁固有振動数の真値は 2.16 Hz であることが確認されている。



図4 計測を行った橋梁および計測車両

図5は、車両速度と推定橋梁固有振動数の分布を示している。なお車両の1次固有振動数である 1.5 Hz に見られるピークを除いた時の推定橋梁固有振動数も同時に示している。ここで、走行速度の計測には GPS を利用し、橋梁走行時間帯の平均速度を用いている。この時、全体でおよそ 65 %の確率で橋梁固有振動数の推定に成功している。図6に成功した一例を示す。さらに、車両速度 25~30 km/h、30~35 km/h の速度区分でスペクトルの平均化を行うことで、橋梁固有振動数の推定に成功した。

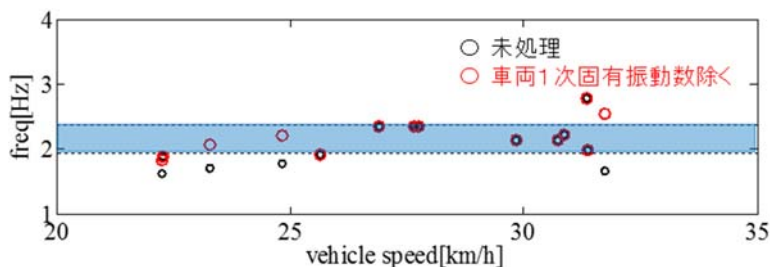


図5 車両速度と推定固有振動数の分布

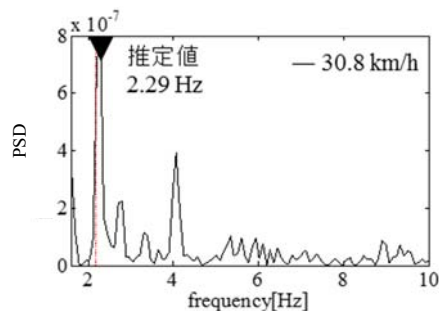


図6 30.8 km/h における差分値 PSD

5. まとめ 車両応答に基づく橋梁固有振動数の新たな推定手法を提案した。異なる車両による計測や複数回計測によるスペクトルの平均化を行うことで、推定のロバスト性や精度の向上が期待される。

謝辞：君津市管理課小平氏・内藤氏に貴重なご助言を賜りました。ここに深く謝意を示します。本研究の一部は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の「SIP インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」(管理法人：JST)によって実施されました。

参考文献 1) Reksowardojo 他：Bridge natural frequency estimation by extracting the common vibration component from the response of two vehicles, 第70回土木学会年次学術講演会。2) 趙ほか：複数観測量に基づく車両応答型路面プロファイル推定手法の開発, 第70回土木学会年次学術講演会。3) Zhao 他：Robustness improvement of vehicle modeling and Kalman filter-based road profile estimation, 第72回土木学会年次学術講演会

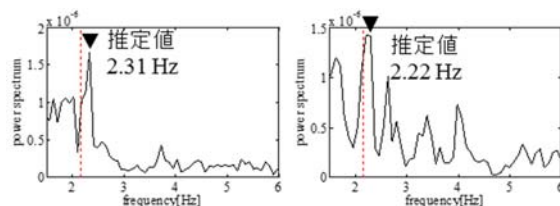


図7 スペクトルの平均化による効果
(左：25~30 km/h, 右：30~35 km/h)