

車上計測による共振橋りょう検知法の開発および検証

松岡 弘大* 川崎 恭平** 田中 博文*** 常本 瑞樹#

Development and Validation of Drive-by Detection Method for Resonant Bridges

Kodai MATSUOKA Kyohei KAWASAKI Hirofumi TANAKA Mizuki TSUNEMOTO

Resonance in high-speed railway bridges is one of the concerns for ride comfort and catenary damages. Countermeasures are required in severe cases. However, a huge number of on-site measurements are required detect resonance. This study develops a drive-by detection method of resonant bridges while train running. The proposed method consists of a signal processing for extracting vibration components specific to resonant bridges and a process of difference between the lead and trail vehicles. As results of a practical application, resonance of bridges was extracted and the resonant states of extracted bridges were confirmed by on-site measurement.

キーワード：車上計測，高速鉄道，共振，橋りょう

1. はじめに

膨大な数の鉄道構造物を必要最低限のメンテナンスで効率的に管理していくため、センサ等により構造物の状態を把握する構造ヘルスマモニタリングの導入が提唱され、その手法、装置、実用化が広く検討されてきた¹⁾。また、近年では、特に橋りょうなどを対象とし、より経済的かつ効率的なモニタリング手法として、走行する車両上に設置したセンサを利用し、走行した橋りょうの構造性能を間接的に評価する方法が検討されている²⁾。著者らも、高速鉄道の橋りょうおよび付帯設備の維持管理において重要となる共振が生じる橋りょう（以下、共振橋りょう）を走行する車両上で計測したデータから検知する手法を検討してきた³⁾。既存手法では、先頭および最後尾車両で計測された車体上下加速度の振幅の比を用いたが、先頭車両の振幅が小さい場合に精度が低下するなどの課題があった。本研究では、共振橋りょうの理論的な特徴を利用し、より高精度な検知手法を開発するとともに、実路線にて有効性を検証した。

提案する車上計測手法の説明に先立ち、高速鉄道橋りょうの共振現象について説明する。橋りょうの共振は、橋りょう上を走行する列車の規則的な軸配置に起因する加振振動数が橋りょうの固有振動数と近接することで生じる⁴⁾。図1に12両編成の車両が支間長50m、固有振動数2.8Hzの桁を様々な速度で通過した場合の橋りょう支間中央の鉛直変位の計算例を示す。この例では列車

速度約250km/hにおいて、車両通過により橋りょう変位が増大する共振が生じる。特に、近年では、列車速度の急速な向上や橋りょうの長支間化や低剛性化により列車の加振振動数と橋りょうの固有振動数は近接する傾向にある。これを踏まえ、共振領域まで考慮した設計体系もすでに整備されているため、橋りょうの共振現象そのものが問題となることはほとんどない。ただし、一部の高速鉄道では、共振時の振動が乗り心地に影響し、深刻な場合には対策が必要となることもある⁵⁾。また、共振橋りょうでは、橋りょう上の電柱や架線などの電車線路設備への影響が懸念される場合もあるため、適切に検知することが望ましい⁶⁾。しかし、共振橋りょうの抽出には、車両通過時のたわみ計測を地上から行うことが必要であったため、多大な労力を要していた。このような地上計測を大幅に省力化し、より効率的に共振橋りょうを管理するため、本研究では走行する車両上で計測したデータ（以下、車上計測データ）による共振橋りょう検知法を開発した。

2. 共振橋りょうの抽出手法

2.1 共振橋りょうに特有の波形

車両に入力される変位や振動のうち、共振橋りょうに特有の振動成分を明らかにするため、図2に示す理論モデルを考える。ここは、単純化のため、車両間の連結器を挟む近接する4つの車軸を一つの集中荷重としてモデル化する。橋りょうは、固有振動数 n (Hz)、支間長 L_b (m)の両端単純支持梁とし、水平位置 x (m)、時間 t (s)における鉛直変位を $z_b(x, t)$ と表す。列車速度を v (m/s)、1両あたりの車両長を L_c (m)とすると、主な加振振動数は v/L_c (Hz)となる。これが橋りょうの固有振動数 n と一致する場合に共振が生じるため、共振速度 v_{res} は、

* 鉄道力学研究部 構造力学研究室
 ** 軌道技術研究部 軌道管理研究室（現 九州旅客鉄道株式会社）
 *** 軌道技術研究部 軌道管理研究室
 # 電力技術研究部 電車線構造研究室

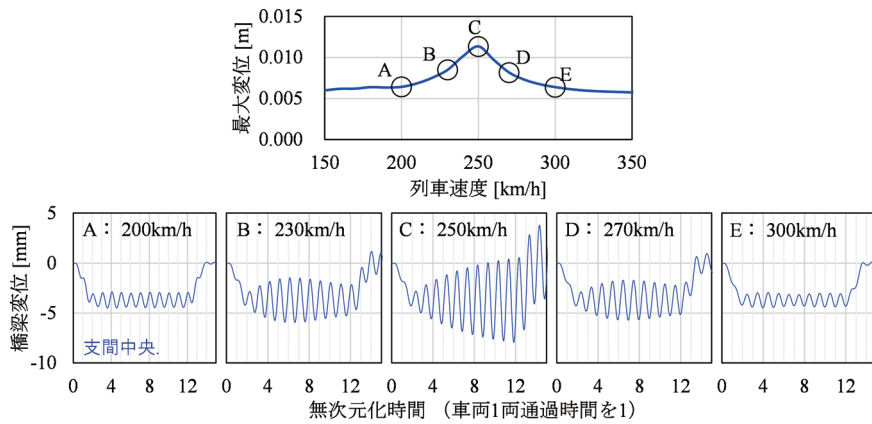


図1 高速鉄道橋りょうの共振現象の計算例（支間長 50m, 固有振動数 2.8Hz, 12 両編成）

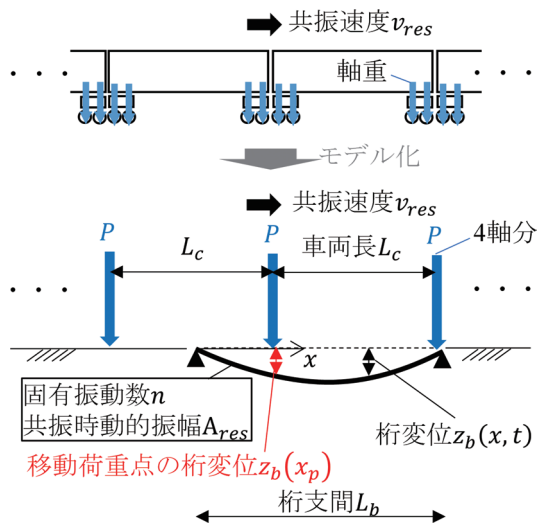


図2 理論分析用の共振橋りょうモデル

次の式 (1) で表される。

$$v_{res} = n \cdot L_c \tag{1}$$

ここで、走行速度は共振速度、橋りょうは定常状態にあるとして、この状態で新たに橋りょうを通過する荷重 P の位置での橋りょう変位に着目する。この集中荷重の梁への進入時点を 0 とする時間を t_p 、集中荷重作用位置を x_p とすれば、式 (1) から次の式 (2) が得られる。

$$n = \frac{v_{res}}{L_c} = \frac{x_p}{L_c \cdot t_p} \tag{2}$$

$(0 < x_p \leq L_b)$

一方、変位 $z_b(x, t)$ は、式 (3) に示す通り、移動荷重の位置に対応して生じる準静的な応答成分 $z_{b,s}$ と、梁の固有振動に起因した動的応答成分 $z_{b,d}$ により構成される。

$$z_b(x, t) = z_{b,s}(x, t) + z_{b,d}(x, t) \tag{3}$$

このうち、準静的応答成分 $z_{b,s}$ は、後述の通り、差分処理によって除去されるため、ここでは動的応答成分 $z_{b,d}$ に着目する。動的応答成分 $z_{b,d}$ をモード分解により、位置と時間の関数に分解したうえで、共振橋りょうの主成分である 1 次たわみモードのみを考慮すれば式 (4) となる。

$$z_{b,d}(x, t) \approx \xi_{1,d}(t) \sin\left(\frac{\pi x}{L_b}\right) \tag{4}$$

また、定常状態の仮定から、モード変位 $\xi_{1,d}$ は、式 (5) により表現できる。

$$\xi_{1,d}(t) = A_{res} \sin(2\pi n t + \theta_{res}) \tag{5}$$

なお、 A_{res} は共振時の梁の動的応答振幅である。また、 θ_{res} は共振状態においては変位応答と加振力の位相が $\pi/2$ ずれるため $\theta_{res} = \pi(1 - L_b/L_c)$ となる。

ここで、式 (5) を式 (4) に代入し、定義域 $0 < x_p < L_b$ の範囲で、式 (2) により時間 $t = t_0 = x_p / (L_c n)$ に変換すれば、共振状態の梁を通過する荷重位置 x_p における梁の動的応答成分 $z_{b,d}(x_p)$ は定義域 $0 < x_p < L_b$ で式 (6) となる。

$$z_{b,d}(x_p) \approx A_{res} \sin\left(2\pi \frac{x_p}{L_c} + \theta_{res}\right) \sin\left(2\pi \frac{x_p}{2L_b}\right) \tag{6}$$

$(0 < x_p \leq L_b)$

式 (6) から、共振橋りょうを通過する車両の荷重位置で計測される橋りょうの変位は、車両長 L_c に等しい波長の波と橋りょう支間長の 2 倍 ($2L_b$) に等しい波長の

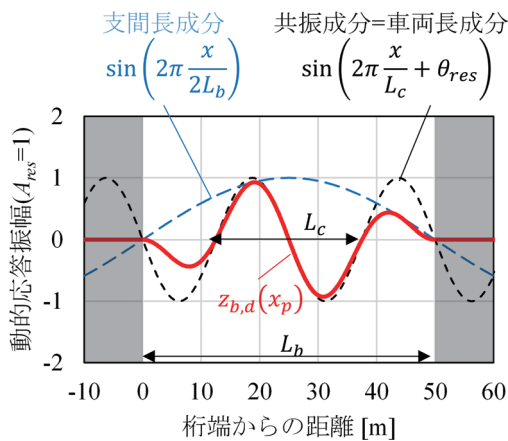


図3 理論により算出した共振橋りよの荷重位置における動的応答波形の例（支間長 50m）

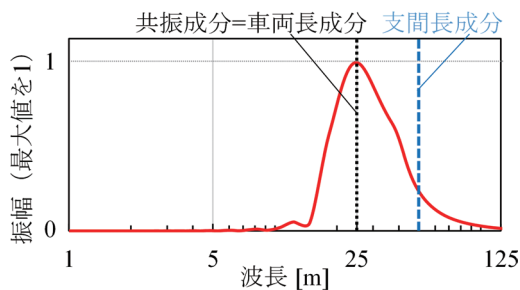


図4 理論により算出した共振橋りよの荷重位置における動的応答スペクトルの例（支間長 50m）

波の掛合せとなる。図3および図4は、支間長 50m および車両長 25m とした場合に式 (6) で算出した荷重位置における共振橋りよの動的応答成分の波形およびスペクトルを示す。理論波形（実線）は、車両長に対応した波（黒点線）の最大振幅が支間長に対応した半正弦波（青破線：支間長成分）に合わせて増減する特徴を示す。また、図4から共振橋りよの荷重位置の動的応答成分は、橋りよ固有振動に対応した車両長成分が主成分であることがわかる。

以上に示した共振橋りよに特有の波形を、車両上のセンサで計測される軌道の高低変位（以下、軌道変位）や車体上下加速度（以下、車体加速度）から抽出することで共振橋りよを検知する。なお、軌道変位を計測する場合には、上記の共振橋りよに特有の成分が直接観測される。また、車体加速度の場合には車両のばね・ダンパの影響を受けるが、共振橋りよ特有の波形の振動数は概ね 2Hz 以上となる。これは、多くの高速鉄道車両の車体上下振動モードが存在する 1Hz 程度よりも高周波であるため、軌道変位として導入された図3の成分は車体加速度としても観測される⁷⁾。

ただし、車上計測データには共振橋りよ特有の成分のほか、レール凹凸や橋りよの準静的応答成分など、

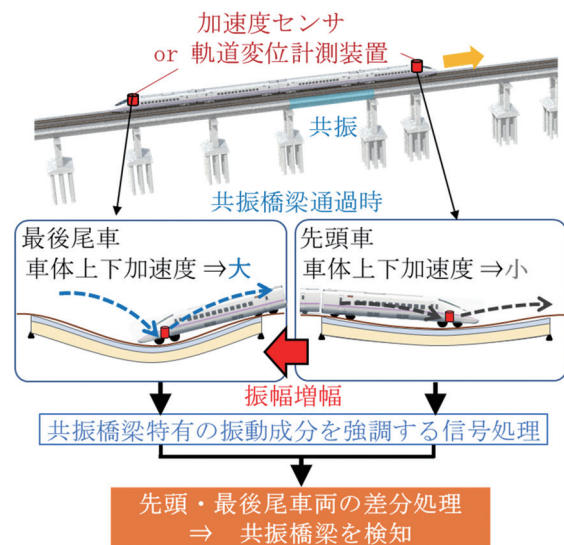


図5 共振橋りよの抽出手順とその概念

さまざまな成分が含まれている。これらの影響を相殺し、より高精度に共振橋りよを抽出する手法を次節で示す。

2.2 車上計測データからの抽出手法

本手法は、先頭および最後尾車両で計測された車体上下加速度もしくは軌道変位に対するフィルタおよび包絡線による信号処理と、先頭車両と最後尾車両の計測波形の差分処理での二つの処理で構成される。

信号処理は、車上計測波形の様々な成分から図3の共振橋りよに特有の成分を強調するため、①波長 25m 近傍を通過帯とするバンドパスフィルタ処理、②波形のピーク間をつなぐ包絡線処理、により構成される。①によりさまざまな成分を含む車上計測波形から図3に実線で示す共振橋りよ特有の成分の抽出を行う。つぎに②により図3の実線から破線で示す橋りよ支間長に対応した成分を推定する。②の包絡線処理は、抽出される波形を長波長化し、波としての評価から振幅量の評価へと評価指標を変換する。長波長化は次に示す差分処理時の位置同期誤差の影響を低減できる。

信号処理を行っても、軌道変位の波長 25m 成分や橋りよの準静的な変形は除去できない場合がある。このため、得られたピークが共振に起因するか否かを判断できない。そこで、先頭および最後尾車両の二つの車上計測波形に上記処理を行ったうえで、③最後尾車両の計測波形から先頭車両の計測波形を差し引く差分処理により、共振以外の成分を相殺する。この差分処理された波形を包絡線差分と呼ぶ。図5は、先頭と最後尾車両の計測波形の差分処理による共振橋りよ成分抽出の概念を示している。橋りよの動的応答は列車通過とともに成長するが、先頭車両通過時には動的応答はほとんど励起されていない。一方、橋りよの準静的な変形や、静的

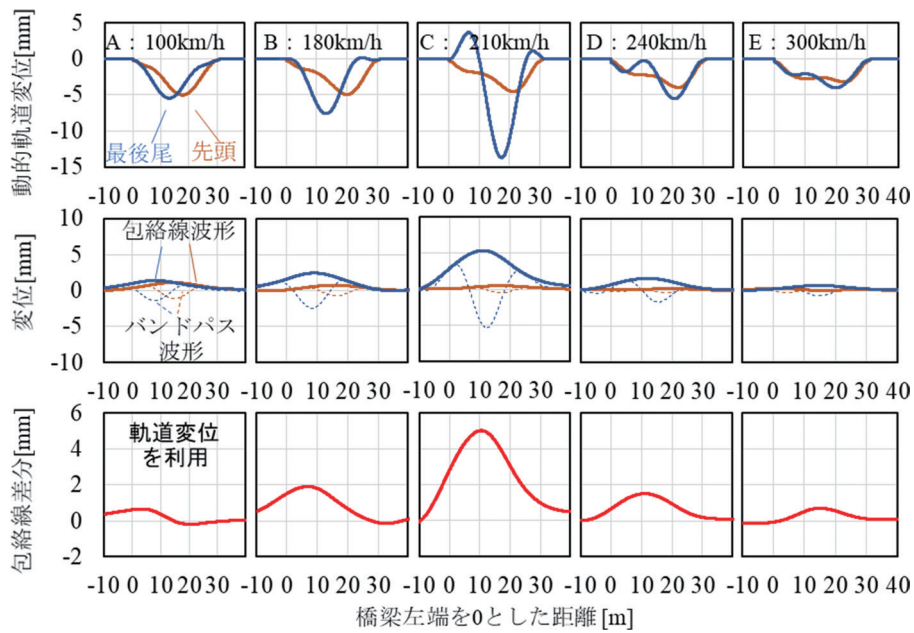


図6 軌道変位への提案手法の適用結果（支間長 30m, 固有振動数 2.3Hz, 8 両編成）

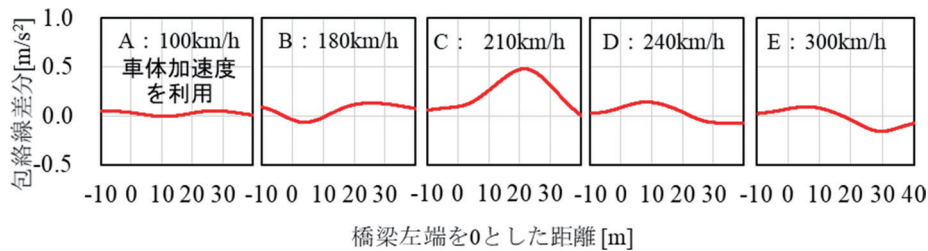


図7 車体加速度への提案手法の適用結果（支間長 30m, 固有振動数 2.3Hz, 8 両編成）

な軌道変位などは、先頭および最後尾車両通過時ではほぼ変化しない。したがって、最後尾車両の計測波形から先頭車両の計測波形を差し引く差分処理により、共振に起因した振動成分以外を相殺できるため、共振橋りょうのみを高精度に抽出することができる。

より具体的には、以下の二つの条件を仮定して車上計測データから共振橋りょうを抽出する。

- ・包絡線差分に卓越成分（ピーク）が存在する
- ・ピークspanが橋りょう支間長と概ね一致する

以上に示した共振橋りょうの抽出手法を、すでに多くの鉄道事業者が軌道の保守管理に利用している軌道保守管理データベースシステム「LABOCS」⁸⁾上に実装した。これにより、LABOCS上に整備された橋りょうデータと比較し、提案手法で算出される包絡線差分に橋りょう支間長と同じspanのピークが存在すれば、当該橋りょうを共振橋りょうとして抽出できる。また、橋りょうデータをはじめとした設備データは多くの場合にすでに各鉄道事業者のLABOCS上に整備されているため、本手法の導入に際して新たなデータベースの構築等は不要である。

3. 数値解析による検証

ここでは、車両を1両あたり6自由度、単純支持桁を3次曲げモードまでの3自由度でモデル化した2次元相互作用シミュレーションの結果を利用し、提案手法の有効性について検証した。なお、シミュレーション方法については文献9、10を参照されたい。

図6および図7に支間長30m、固有振動数2.3Hzの橋りょうを対象にシミュレーションで計算した軌道変位および車体加速度への同手法の適用結果を示す。列車は8両編成、列車速度は100、180、210、240、300km/h（それぞれA、B、C、D、E）とした。営業車両でのセンサ位置に合わせ、車体加速度は先頭車両第1台車および最後尾車両第2台車中心直上の車体床上の加速度を、軌道変位は先頭車両第2台車および最後尾車両第1台車中心直下の桁変位を対象とした。車上センサの橋りょう進入を横軸の0としている。

図6は同図Cの共振時において最後尾の軌道変位のみが増大すること、バンドパスフィルタ処理と包絡線処理により共振に特有の振動成分が抽出されることを示

す。また、先頭と最後尾の差分処理により、卓越スパンが支間長となる卓越成分が形成される。したがって、卓越成分の有無と卓越スパンと支間長を条件に、共振橋りょうを検知可能であると考えられる。

図7の車体加速度を用いた場合も、おおむね同じ傾向が見られる。ただし、車両のばね-ダンパーシステムの影響により位相遅れが生じ、共振時に最後尾で形成されるピークの位置が、桁の終点方にシフトする点に留意する必要がある。以上より、提案手法により車上計測データから共振橋りょうを検知できることがわかる。なお、数値解析では、上記の基本的な例のほか、桁支間長、桁減衰比、静的軌道変位、測定ノイズ、先頭・最後尾の位置ずれなどの影響について検討し、日本の高速鉄道の軌道管理状態であれば、20mから70mまでの支間長で提案手法が適用可能であることを確認している⁷⁾¹⁰⁾。

4. 実路線での検証

4.1 適用対象データ

実路線における提案手法の有効性・実用性を検証するため、実際の高速鉄道路線の車上で計測された車体加速度および軌道変位に提案手法を適用し、共振橋りょうの抽出を行った。ここでは検証のために、両方のデータへの適用を行っているが、実際には車体加速度か、軌道変位のいずれかの車上計測データがあれば本手法は適用可能である。

車体加速度は両先頭車両の前台車直上の車体床上で、軌道変位は台車装架型の慣性正矢軌道検測装置¹¹⁾により両先頭車両の後台車中心位置で、それぞれ計測された。これらはいずれも乗り心地や車体動揺の管理もしくは軌道状態の管理のためにすでに営業車両に搭載されているものであり、提案手法の適用に際して新たな設備投資は行っていない。また、提案手法をLABOCS上に実装したため、包絡線差分のピークスパンと橋りょう支間長との一致などは、すでにLABOCS上に構築済みの設備データと合わせて確認可能である。

計測を行った際の車両編成数は6両、最高速度は260km/hである。当該路線のうち、トンネル区間や走行速度が200km/h以下となる停車駅付近の低速区間を除いた橋りょう区間約20kmに提案手法を適用した。

4.2 共振橋りょうの検知結果

図8に先頭および最後尾車両で計測された車体加速度および軌道変位に提案手法を適用した結果の一例を示す。図中には先頭および最後尾車両で計測した車体加速度および軌道変位のそれぞれに対して、バンドパスフィルタおよび包絡線処理を行った波形、およびこれらの波形について先頭および最後尾の差分処理を行った差分波

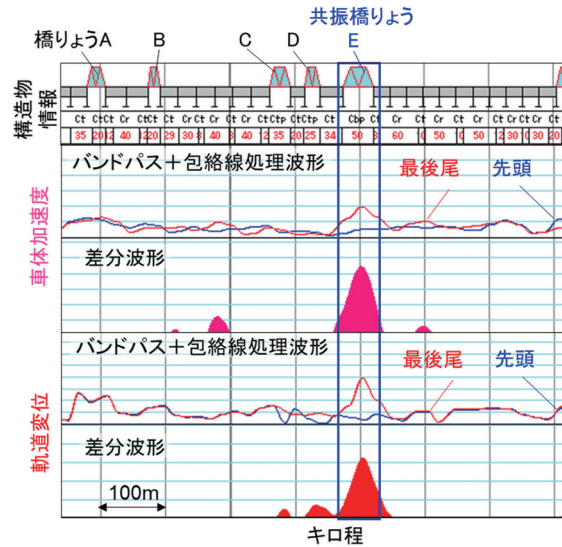


図8 実路線への適用結果の例（列車速度 230km/h）

形を示す。図中の区間にはAからEまでの5連の橋りょうが存在するが、車体加速度および軌道変位のいずれの包絡線処理波形においても、図中の囲いで示す橋りょうEの位置において、赤線で示す最後尾車両の波形が卓越する傾向を示す。したがって、橋りょうEでは橋りょうの共振による動的応答増幅が生じていることが推察される。この傾向を踏まえ、包絡線差分では橋りょうEの位置で支間長とほぼ同じスパンのピークが形成される。なお、当該区間走行時の列車速度は約230km/hであった。したがって、橋りょうEは列車速度230km/h程度で共振状態にあると判定できる。提案手法を適用した結果、橋りょうEと同様に30以上の橋りょうが共振橋りょうとして抽出された。なお、橋りょうE以外の箇所でも差分波形に小さな卓越成分を確認できるが、これらは卓越振幅が小さいうえ、橋りょう支間長と卓越スパンが一致していないため、橋りょうの共振以外の影響であると判断できる。

4.3 地上計測による検証

抽出した橋りょうの共振状態を検証するため、地上から列車通過時の橋りょうの変位計測を実施した。

図9に、地上からの計測状況を示す。橋りょうEでは、自己振動補正機能付きレーザードップラー速度計であるUドップラーII¹²⁾を利用し、支間中央下面に反射シールを設置したうえで、桁下から非接触で列車通過時の橋りょうの鉛直変位を計測した。

図10に列車通過時の変位計測結果を示す。列車の通過に伴って変位振幅が増大する共振橋りょう特有の波形を確認できる。また、列車速度も車上計測で共振橋りょうと判定された際の230km/hに近く、車上計測データにより抽出された橋りょうが実際に共振状態であること



図9 抽出した橋りょうEの地上計測状況

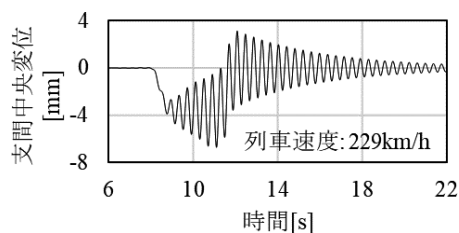


図10 橋りょうEの地上計測結果

を確認できる。なお、提案手法により抽出した橋りょうのうち橋りょうEを含めて7橋りょうで地上計測を実施しており、いずれも実際に共振していることが確認できている。

5. まとめ

本研究では、高速鉄道における橋りょうおよび橋りょう上の付帯設備の維持管理における一つの着眼点となる共振発生の有無を、高速走行する車両上で計測されたデータ（軌道変位および車体加速度）から効率的に判別する手法を開発した。また、実路線の車上計測データに適用し30以上の共振橋りょうを抽出するとともに、地上計測結果とも整合することを示した。

提案手法はすでに複数の高速鉄道路線で活用されており、共振橋りょうの管理および電車線路設備の点検効率化に寄与している。ただし、実路線への適用においては想定以上の位置ずれや列車すれ違いなど、適用が難しい場合が一部に存在した。現在、これらの課題を解決し、より高精度かつ自動抽出可能なシステムにするべく改良を進めている。また、提案手法の適用範囲外である支間長10m程度の短支間長の共振検知に対しても高いニーズが存在する。現在、提案手法のフィルタ通過帯を短支間橋りょうの共振に合わせて変更することで、手法の適

用範囲拡大を図っている。これらの結果については、別の機会に順次報告したい。

文献

- 1) Fujino, Y., Siringoringo, D.M., Ikeda, Y., Nagayama, T. and Mizutani, T., "Research and implementations of structural monitoring for bridges and buildings in Japan," Engineering, Vol.5, No.6, pp.1093-1119., 2019.
- 2) Yang, Y.B., Yang, J.P., Zhang, B. and Wu, Y., "Vehicle Scanning Method for Bridges," Wiley, 2019.
- 3) 松岡弘大, 渡辺勉, 上半文昭: 車上計測による共振橋梁の検知手法, 鉄道総研報告, Vol.33, No.8, pp.35-40, 2019
- 4) 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, No.724/I-62, pp.83-102, 2003
- 5) 松岡弘大, 徳永宗正, 荻原裕貴, 築嶋大輔, 後藤恵一: 列車通過時における高速鉄道PRC桁の動的応答に対する支点追加補強の効果と適用範囲, 土木学会論文集A1(構造・地震工学), Vol.76, No.3, pp.523-541, 2020
- 6) 常本瑞樹, 松岡弘大, 後藤恵一, 薄広歩, 以倉慶子: 列車通過時の高架橋振動による電車線路設備損傷の低減対策, 鉄道総研報告, Vol.34, No.9, pp.35-40, 2020
- 7) 松岡弘大, 川崎恭平, 田中博文, 常本瑞樹: 高速鉄道車両の車体上下加速度を利用した車上からの共振橋梁の検知手法, 土木学会論文集A1(構造・地震工学), Vol.77, No.1, pp.146-164, 2021
- 8) 田中博文: 軌道保守管理データベースシステムLABOCS(ラボックス)の機能紹介と新バージョンのリリース, 新線路, Vol.69, No.7, pp.24-26, 2015
- 9) Matsuoka, K., Kaito, K. and Sogabe, M., "Bayesian time-frequency analysis of the vehicle-bridge dynamic interaction effect on simple-supported resonant railway bridges," Me-chanical Systems and Signal Processing, Vol.135, No.106373, 2020.
- 10) Matsuoka, K., Tanaka, H., Kawasaki, K., Somaschini, C. and Collina, A., "Drive-by methodology to identify resonant bridges using track irregularity measured by high-speed trains," Mechanical Systems and Signal Processing, Vol.158, No.107667, 2021.
- 11) 坪川洋友: 車両からの軌道検測技術, 計測と制御, Vol.56, No.2, pp.105-110, 2017
- 12) 上半文昭: 鉄道構造物の遠隔非接触検査技術の開発, 実験力学, Vol.17, No.4, pp.281-289, 2018