

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

# 列車走行により共振する橋りょうを抽出する

高速鉄道では橋りょうの共振により大きい振動が生じる場合があります、深刻な場合には対策が必要となります。ただし、膨大な橋りょうの中から共振する橋りょうを検知するための測定にはこれまで多くの費用と労力を要していました。ここでは、これまで開発を行ってきた効率的な測定方法として、レーザーを活用した地上からの非接触での測定法、および走行する車両上で測定したデータを活用した車上からの共振橋りょうの検知手法について紹介します。



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



上半 文昭  
Fumiaki Uehan  
鉄道力学研究部長



田中 博文  
Hirofumi Tanaka  
軌道技術研究部  
軌道管理研究室  
主任研究員

## はじめに

鉄道構造物の維持管理のうち、高速鉄道橋りょうでは、通常材料劣化に加え、列車が高速で走行するという特徴に起因した独自の現象が存在します。中でも橋りょうの共振現象は、列車走行時に橋りょうで大きな振動が生じるため、乗り心地や橋りょう上の電柱や防音壁といった付帯設備への影響が懸念される場合があります<sup>1)</sup>。なお、現在では設計において高速鉄道橋りょうの共振が考慮可能な体制が整備されており、共振自体が問題となることはほとんどありません<sup>2)</sup>。ただし、既設橋りょうでは、とくに深刻な場合には大規模な対策が必要になることがあります<sup>3)</sup>。このため、一部の高速鉄道では、列車走行時の橋りょうのたわみを地上から測定し、共振発生の有無やその進行状況のモニタリングが行われています。共振橋りょうを検知するためには、1橋りょうずつ地上から列車走行時のたわみを測定する必要があり、膨大な手間と費用を要していました。ここでは、このような共振現象の発生原理について簡単に説明したうえで、このような共振が発生する高速鉄道橋りょう

(以下、共振橋りょうとよびます)を、地上から効率的に検査するとともに、走行する車両上から検知する方法について紹介します。

鉄道橋りょうの共振は、走行する車両の長さで決まる加振振動数と橋りょうの固有振動数が一致することで発生します。走行する車両の加振振動数とは、よく列車走行時の擬音で使われる「ガタン、ゴトン、ガタン、ゴトン」の周期のことで、高速鉄道では2Hz～3.5Hz程度になります(☞参照)。この周期と、高速鉄道橋りょうの固有振動数が一致する場合に、共振現象が発生します。地上から橋りょうのたわみを測定した場合、共振が発生しない一般的な非共振橋りょうでは、走行する車両の重みの分だけ下側に変位が生じます(図1)。一方、共振橋りょう

☞ 走行する車両の規則的な軸配置に起因する加振振動数は、軸配置と列車の走行速度から計算できます。支間長が25m以上の橋りょうでは、車両長(25m)が主な加振間隔となり、走行速度260km/h=72.2m/sの場合、 $72.0\text{m/s} \div 25\text{m} = 2.9\text{Hz}$ となります。

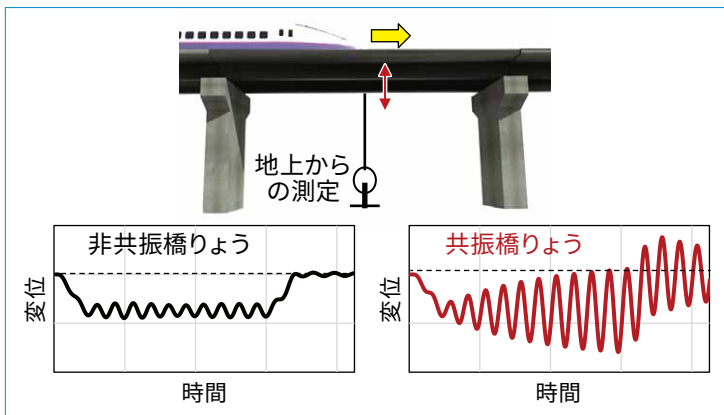


図1 非共振および共振橋りょうの地上からの測定波形の例



図2 自己振動補正機能付きレーザードップラー速度計 (UドップラーII)

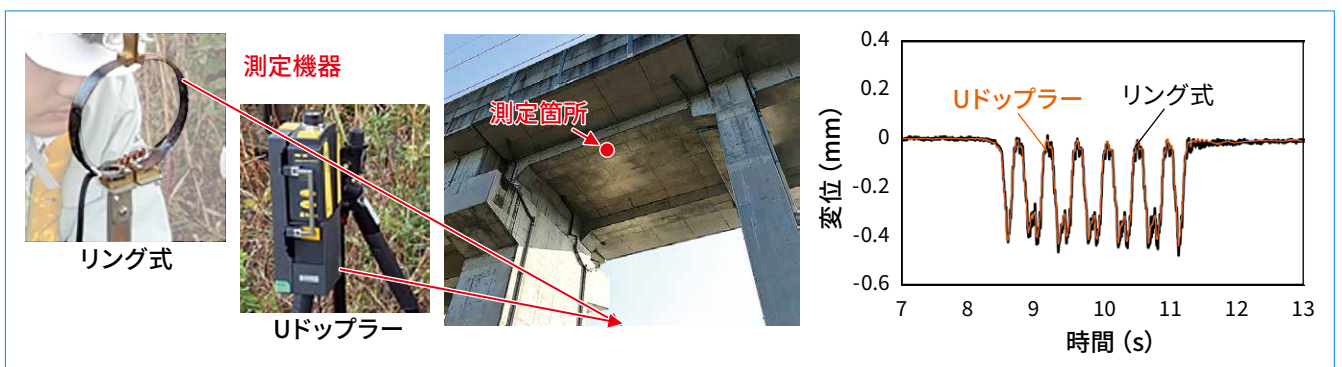


図3 UドップラーIIと既存の接触式たわみ測定法の比較

うでは、走行する車両の周期的な加振により、橋りょうの振動が列車の通過にともなって徐々に増大していきます(図1)。

### Uドップラーによる地上からの橋りょう調査

このような橋りょうの共振発生の有無、および列車走行時の橋りょうのたわみ量を測定するため、地上からのたわみ計測が実施されてきました。とくに橋りょうと地上とをピアノ線で結び、その間に導入したリング式ゲージにより変位を測定するリング式変位計は古くから知られる代表的なたわみ測定手法です。ただし、設置・撤去に高所作業車が必要になるうえ、河川上では測定できないという課題もあります。より簡便な測定方法として、レーザーに

よる非接触測定技術があります。ただし、非接触測定センサーは、センサー自体に揺れが生じると測定対象の振動を正しく測定できません。鉄道総研では、このようなセンサー自体の揺れをセンサーに内蔵した微動センサーの測定値により補正することで、高精度に対象物の振動を測定するUドップラー(UドップラーI、UドップラーII)を開発してきました(図2)。最新型のUドップラーIIでは無線通信化、小型・軽量化、ワイドレンジ化、低ノイズ化などが行われ、すべての機材を測定作業員1名で運搬できるなど、より使いやすく改良されています<sup>4)</sup>。

リング式変位計など既存のたわみ測定手法との比較による精度検証では、列車走行時の1mm以下の微小な変位でも、既存の接触式変位計と同様

の精度で測定できることを確認しています(図3)<sup>4)</sup>。また、後ほど示すように、得られた波形から共振発生の有無を判別することも可能です。すでに共振橋りょうの検査を含め、多くの構造物の検査に活用されています。

### 走行列車による共振橋りょうの検知法

Uドップラーの普及により、地上からの橋りょうたわみ測定は大幅に効率化されました。それでも検査すべき橋りょうの数は膨大です。より効率的な共振橋りょうの抽出を目的とし、近年では、軌道の高低変位(以下、軌道変位とよびます)や車体動揺上下加速度(以下、車体加速度とよびます)といった走行する車両上で測定されたデータを利用した共振橋りょうの抽出法の開

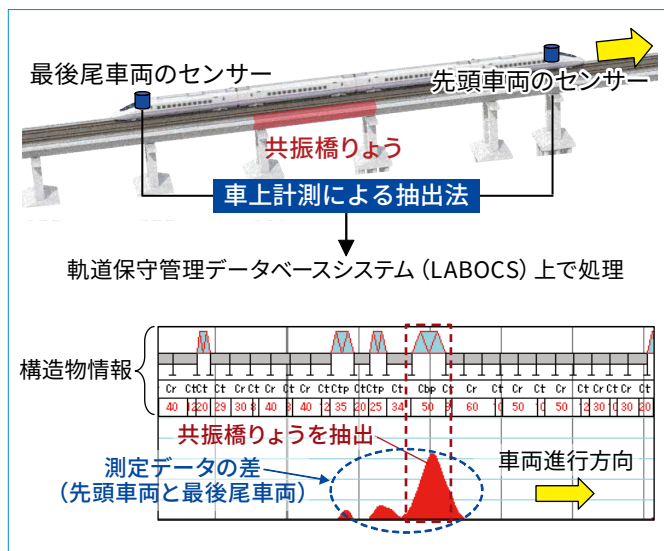


図4 走行列車の車上計測による共振橋りょうの検知法

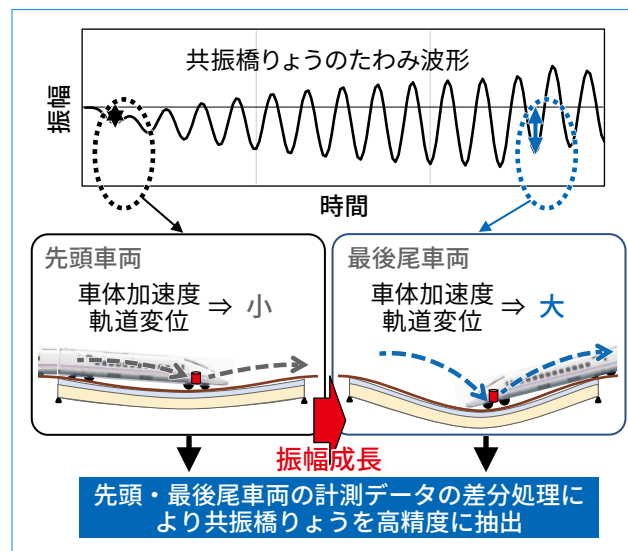


図5 先頭と最後尾車両の差による共振橋りょう抽出の原理

発を進めてきました(図4)。

走行する車両上で測定されたデータには、橋りょうの共振による成分以外にも、静的な軌道変位(☞参照)や車両の重さにより生じる橋りょうの変形、測定ノイズなど、さまざまな成分が含まれています。これらの中から、橋りょうの共振に起因した成分のみを抽出するため、以下に示す波形処理および、先頭と最後尾車両の差分で構成される共振橋りょうの抽出法を提案しました。

橋りょう上を通過する車両では、共振に起因する橋りょうの振動が、波長25mの波として観測されることが理論的にわかっています。そのため、共振橋りょうを抽出するための準備として、①波長25m付近の振動成分のみを抽出するフィルター処理を行います。その後、先頭と最後尾車両の観測デー

タの差分処理をより高精度に行うために、②波形のピーク間をつなぐ包絡線処理を行います。ただし、波形処理だけでは、共振によるものか、他の成分の影響か、を判断できないため、先頭と最後尾車両の二つの計測データに上記処理(①、②)を行ったうえで、③最後尾車両から先頭車両を差し引く差分処理により、橋りょうの共振以外の成分を相殺します(図5)。共振橋りょうの振動は列車の通過にともなって徐々に成長するため、共振による橋りょうの振動は、先頭車両に比べ最後尾車両が通過する際により大きくなります。一方、共振以外による橋りょうの変形や静的な軌道変位などは、先頭と最後尾車両の通過時で変化しないため、この差分処理により、共振に起因した振動以下の成分を相殺することができます。

以上に示した走行車両上で測定されたデータによる共振橋りょうの抽出法を、多くの鉄道事業者が軌道の保守に活用している軌道保守管理データベースシステム「LABOCS」<sup>5)</sup>上に実装しました。これにより、提案手法で算出される差分波形とLABOCS上に整備

された橋りょうデータと比較しながら、共振橋りょうを抽出できます。実際には、共振橋りょうが存在する場合には、橋りょう支間長と同じ長さのピークが差分波形に現れるため(図4)、卓越成分の大きさとその長さにより共振の判定を行います。

### 新たな検知法による調査事例

実路線において提案手法の有効性・実用性を検証するため、実際の高-speed鉄道路線を走行する車両上で測定された軌道変位および車体加速度に提案手法を適用し、共振橋りょうの抽出を行いました。なお、ここでは検証のために、軌道変位および車体加速度の両方のデータへの適用を行っていますが、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を適用できます。車体加速度は両先頭車両の両先頭台車直上の車体床上で、軌道変位は台車搭載型の慣性正交軌道検測装置<sup>6)</sup>により両先頭車両の両先頭から二番目の台車中心位置で、それぞれ計測されました。最高速度は260km/hです。

提案手法を適用した結果、800連以

☞ 車両通過していない場合の軌道変位は、静的な軌道変位とよばれます。一方で、車両上で計測される車両通過時の軌道変位は動的な軌道変位とよばれます。ここでは、橋りょうの変形や共振の影響を含まないレールのゆがみなどを静的な軌道変位とよんでいます。

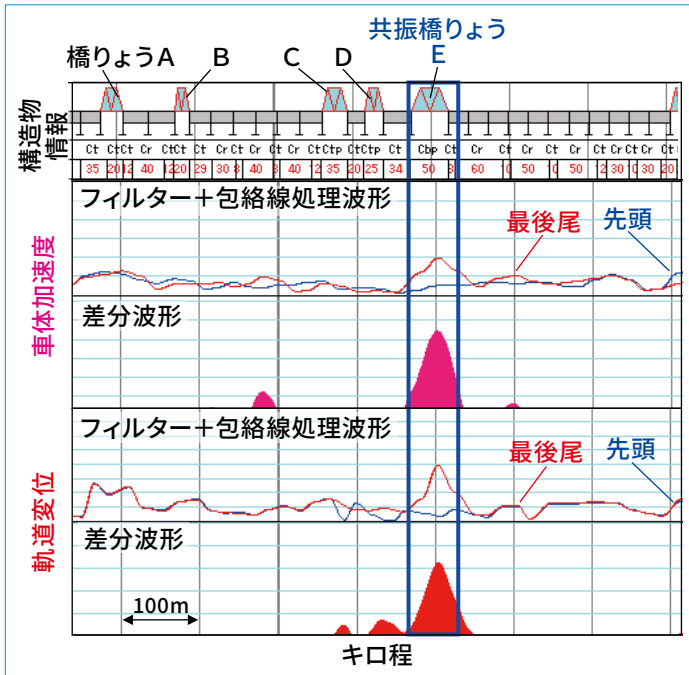


図6 実路線における共振橋りょうの抽出例

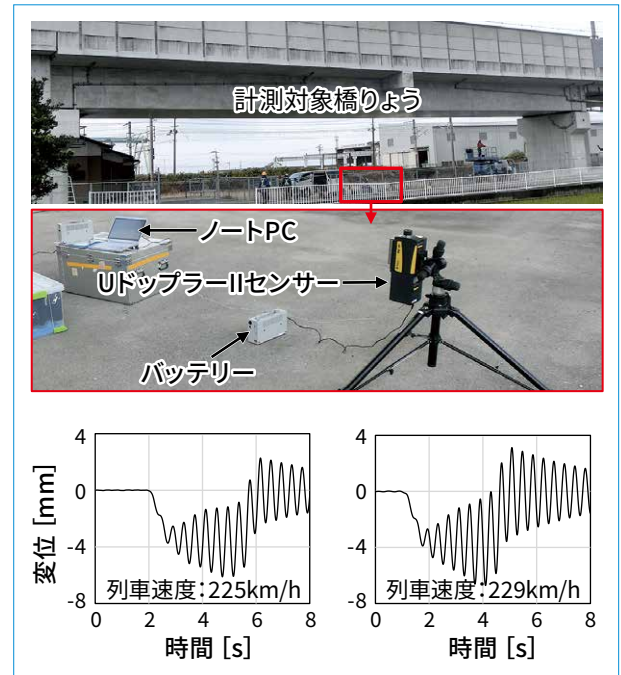


図7 抽出された橋りょうEの地上計測

上の橋りょうの中から、30連以上の橋りょうが共振橋りょうとして抽出されました。図6は先頭と最後尾車両で測定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しています。図中には先頭と最後尾車両で測定した車体加速度および軌道変位のそれぞれに対して、フィルター処理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と最後尾車両の差分処理を行った差分波形を示します。AからEまでの5連の橋りょうがありますが、車体加速度および軌道変位のいずれの差分波形でも、橋りょうEの位置で支間長とほぼ同じ長さのピークが形成されており、橋りょうEが共振状態であると判定できます。

この橋りょうEのたわみを先ほど説明したUドップラーIIを利用し、地上から測定した結果を示します(図7)。2つの列車通過時の変位測定結果は、列車の走行にともない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ます(図7)。なお、橋りょうEを含めて7橋りょうで地上からのたわみ計測

を実施し、いずれの橋りょうも実際に共振状態にあることを確認しています。

### おわりに

ここでは、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地上および車上から効率的に抽出する方法について、それぞれ紹介しました。Uドップラーによる地上からのたわみ測定は、すでに多くの現場で活用されています。現在では長距離型Uドップラーによる長大橋の非接触検査手法の開発も進めています。走行する車両上での測定データによる共振橋りょうの抽出法についても、すでに一部の高速鉄道で活用されています。ただし、車上計測データによる橋りょうの性能評価の研究は、まだまだ始まったばかりであり、発展の余地が残されています。今後は、橋りょうの共振現象だけでなく、さまざまな構造物の異常や橋りょうのたわみを車上から計測する手法について開発を進めていきます。RRR

### 文献

- 1) 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.17, No.9, pp.35-40, 2020
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 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