

走行列車の車軸加速度応答を用いた 橋梁振動特性の抽出

松岡弘大¹・貝戸清之²・徳永宗正³・渡辺勉⁴・曾我部正道⁵

¹学生会員 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻 (〒 565-0871 吹田市山田丘 2-1)
E-mail: k-matsuoka@civil.eng.osaka-u.ac.jp

²正会員 大阪大学准教授 大学院工学研究科地球総合工学専攻 (〒 565-0871 吹田市山田丘 2-1)
E-mail: kaito@ga.eng.osaka-u.ac.jp

³正会員 公益財団法人 鉄道総合技術研究所 鉄道力学研究部 (〒 185-8540 国分寺市光町 2-8-38)
E-mail: toku@rtri.or.jp

⁴正会員 公益財団法人 鉄道総合技術研究所 鉄道力学研究部 (〒 185-8540 国分寺市光町 2-8-38)
E-mail: tsutomuw@rtri.or.jp

⁵正会員 公益財団法人 鉄道総合技術研究所 鉄道力学研究部 (〒 185-8540 国分寺市光町 2-8-38)
E-mail: sogabe@rtri.or.jp

本研究では移動型モニタリングに資する基礎的検討として、走行列車の車軸加速度応答から鉄道橋の固有振動数の抽出を試みる。はじめに、実物大の列車と橋梁を利用した列車走行試験を実施し、車軸加速度の周波数特性から橋梁通過中の卓越振動数を抽出するとともに、それらの再現性と速度依存性を確認する。つぎに、車軸加速度への橋梁固有の振動成分の寄与を確認するために、卓越振動数を抽出し、橋梁の固有振動数、締結装置や車軸間隔に起因する卓越振動数、他の構造物通過時の卓越振動数と比較する。さらに、橋梁側で計測した加速度応答を用いて、橋梁のモード成分の時間的変動を分析する。その結果、本研究で利用した列車・橋梁では82Hz付近の橋梁固有の振動成分が車軸の卓越振動数の形成に寄与することを確認した。

Key Words : *running train, axle acceleration, predominant frequency, bridge, vibration properties*

1. はじめに

社会基盤施設の健全性や損傷の定量的評価を目的として、各種モニタリング技術が開発されている^{1),2)}。しかし、従来から指摘されているような、目視点検を補間し得るモニタリング技術という観点においては、実用段階に到達した技術は少なく、鉄道軌道を対象とした軌道検測車³⁾⁻⁵⁾、舗装の路面を対象とした路面性状調査車⁶⁾をあげることができる程度である。これらが実用化に至った理由は、管理の手間や費用が嵩むモニタリングシステムを対象構造物個々に分散的に配置するのではなく、機器を集約化したモニタリングシステムを移動させながら対象構造物群の状態観測を可能にした点にあると推察できる(以下、移動型モニタリングシステム)。軌道検測車は主に軌道変位を、路面性状調査車は主にひび割れ、わだち、平坦性という直接的に観測可能な物理量をモニタリングしている⁶⁾。移動型モニタリングシステムの高度化を継続的に図っていくためには、直接観測することができない、対象構造物の健全性や保有性能などの評価を目指したモニタリングシステムの開発に挑戦していく必要がある。

道路橋では橋梁の振動特性を走行車両応答より把握する試みが理論的、実証的に実施されている⁷⁾⁻¹¹⁾。一

方で、鉄道橋の場合には、曾我部等¹²⁾による橋梁通過時の列車応答を対象とした研究が存在するものの、走行列車応答から橋梁の固有振動を抽出するという視点に立脚した研究は筆者らの知る限り存在しない。これは、1) 列車・橋梁を同時に対象とした振動計測試験を実施する機会が限定的であることに加え、2) 列車・橋梁応答の同期化が困難であるために計測した列車・橋梁応答を同一時間断面で比較できないこと等が一因であると推測される。本研究では前者1)に対して、実物大の列車と橋梁を利用した列車走行試験を実施することにより営業線と同様の条件を再現し、さらに列車・橋梁の諸元を固定した上で、列車速度のみを変化させた計測を行う。また後者2)に対しても、GPS時刻装置を利用した時刻同期手法により列車・橋梁応答の同期問題の解決を図る。提案手法ではGPS時刻装置が受信する標準時刻信号を基準応答として利用することで、別々の計測システムにより収録した列車応答と橋梁応答を同期化する(付録I)。これにより、同一時間断面における列車・橋梁応答の比較分析が可能となる。

しかしながら、列車速度を制御パラメータとした実物大試験を実施し、列車・橋梁応答の同期化を達成したとしても、走行列車応答への橋梁固有の振動成分の寄

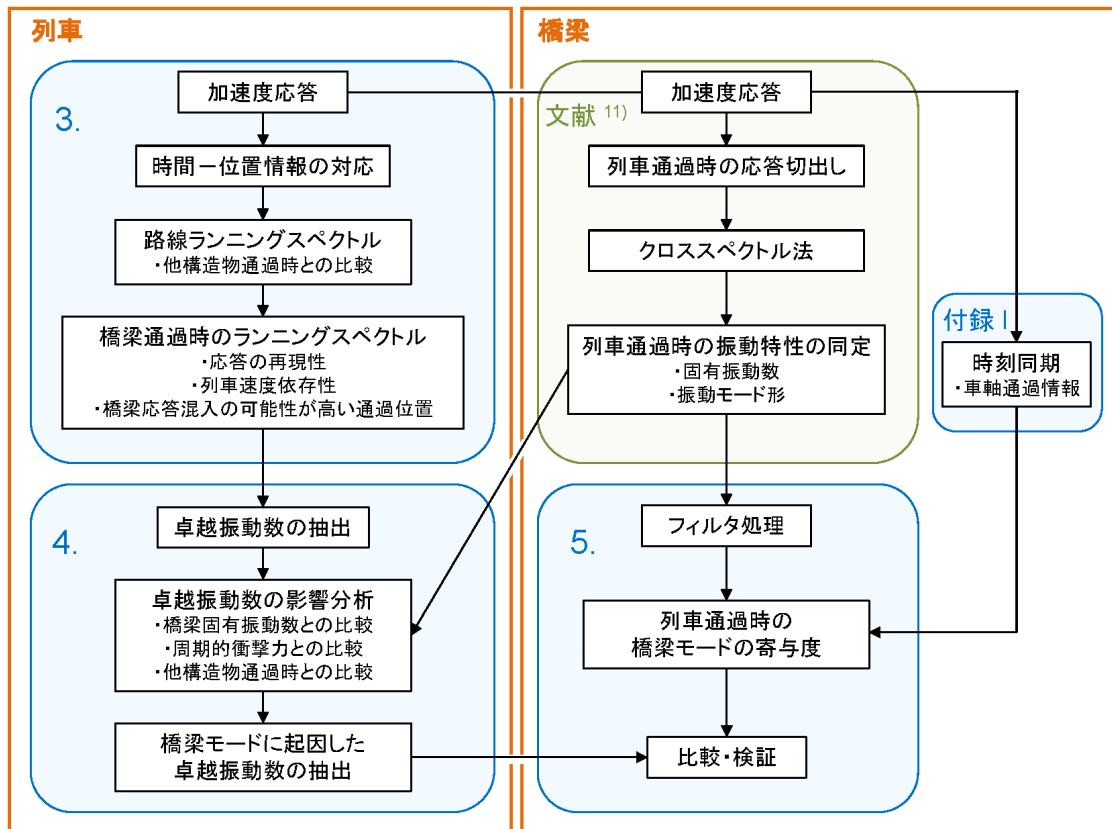
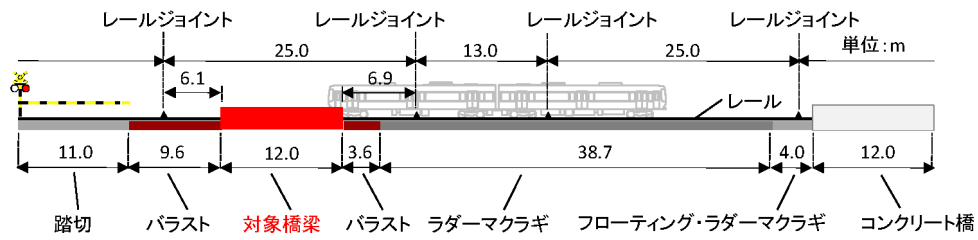


図-1 本研究の流れ

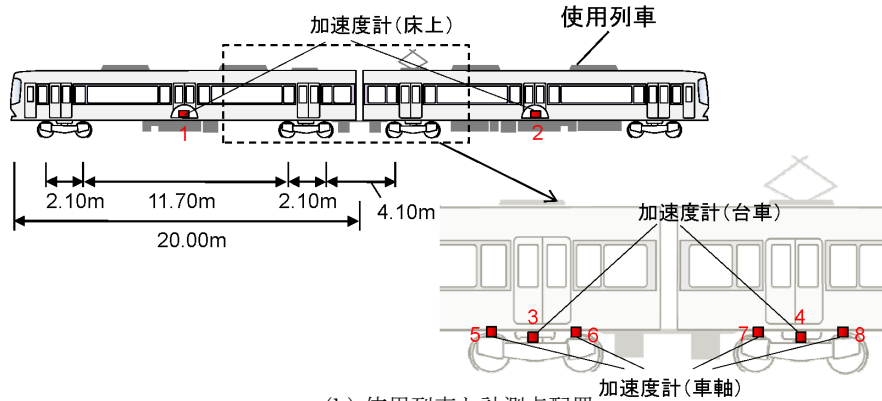
与を実証的に検証することは容易ではない。列車・橋梁間には鉄道特有の軌道や車両諸元に起因した複数の周期的振動成分が混在する。走行列車応答では特に 50Hz 以下の低周波数帯域で車軸間隔¹³⁾や締結装置間隔¹⁴⁾に起因する振動成分が卓越する。さらに、それらの周波数帯域では車軸バネや台車枠の固有振動数の影響も存在する。したがって、橋梁通過時のみを対象とした列車応答の分析では、例えば橋梁の固有振動数と同じ振動数付近に卓越成分を確認できたとしても、それらが橋梁固有の振動成分であるのか、軌道や車両諸元に起因した振動成分であるのかを実証的に判断する必要がある。このためには、様々な列車速度における列車応答と橋梁応答との比較のみならず、橋梁通過時以外の列車応答との比較など、精緻かつ多角的な検討が不可欠である。

以上の問題意識の下、本研究では移動型モニタリングシステム構築に向けた基礎的検討として、走行列車の加速度応答を用いた橋梁振動特性の抽出可能性について検討を行う。本研究の具体的な流れ(図-1)を以下に述べる。はじめに、走行列車の応答を対象とした分析を 3., 4. で実施する。3. では橋梁応答は用いずに、列車応答と路線の諸元情報のみを利用した分析を行う。具体的には時間周波数特性(ランニングスペクトル)に着目し、橋梁通過時と他の構造物通過時における列車

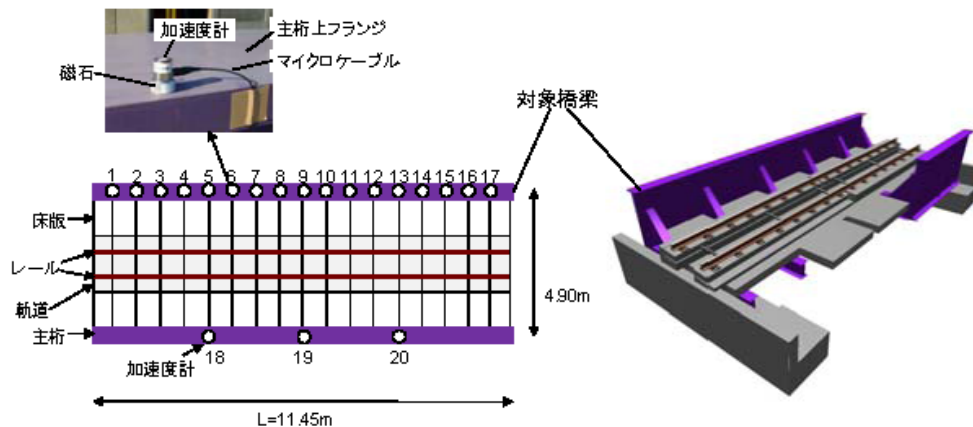
応答を比較することで基本的な列車応答性状について分析するとともに、橋梁通過時の列車応答の中でも橋梁応答が混入している可能性が高い走行時点を特定する。その結果として選出された位置(加速度応答)に焦点を絞り、4. で当該地点での卓越振動数と橋梁の固有振動数との比較を行う。この際、鉄道特有の周期的振動成分や他の構造物通過時の卓越振動数との関係についても明らかにすることで、橋梁固有の振動成分のみ起因した卓越振動数の抽出を試みる。このように走行列車応答から抽出した橋梁固有の振動成分である可能性の高い卓越振動数と橋梁応答との関係を 5. で検証する。同定された橋梁の固有振動数に基づいてバンドパスフィルタを作成し、固有振動に起因した加速度応答(固有振動数付近の周波数帯域の加速度応答)の時系列を作成する。これにより、列車通過時に橋梁で卓越する振動モードを調べ、4. で抽出された卓越振動数と比較することで検証を行う。また、橋梁の加速度応答上で、車軸が通過した正確な時点を把握するために付録 I の時刻同期を実施する。なお、本研究では鉄道特有の周期的振動成分の影響を多分に受けることが予測される 1 次たわみモードなどの低次モードだけでなく、高次モードを含めた 100Hz 程度までを検討の対象範囲とする。また、列車走行時の橋梁の固有振動に関しては、貝戸等¹⁵⁾、宮下等¹⁶⁾、松岡等¹⁷⁾による実証



(a) 実験線の概要



(b) 使用列車と計測点配置



(c) 対象橋梁と計測点配置

図-2 列車走行試験と振動計測の概要

的研究が蓄積しており、本研究でも参考文献¹⁵⁾の結果を引用する。

2. 列車走行試験の概要

本研究では、鉄道総合技術研究所内に敷設された実物大の実験線(図-2(a)に実験線の一部を記載)を利用して列車走行試験を実施した。特に、対象橋梁である下路式鋼鉄桁橋(支間長 11.45m: 図-2(c))とこれを通過する列車(図-2(b))の加速度応答をそれぞれ計測する。列車は在来線での使用車両を想定してクヤ R291-1、クモヤ R291-1 を選定し、その車両を用いた 2 両編成

とした。列車の寸法を図-2(b)に示す。自重はともに約 30t であるが、計測機器の積載により 3t 程度重量が増加している可能性がある。したがって、一軸当たりの荷重は最大で 4.1t 程度と考えられる。橋梁の概要は図-2(c)に示す通りであるが、桁高は 2.15m、自重は約 14t となっている。列車と橋梁への加速度計の配置状況は図-2(b), (c)にそれぞれ記載している。列車の加速度計は着目部位による振動応答の相違を考慮するために図-2(b)に示すように車軸、台車、床上に配置した。具体的には、1 両目の列車の後方台車と、2 両目の列車の前方台車に 1 台ずつ、これらの台車に設置された各 2 個の車軸に 1 台ずつ、両列車の床上の中央部に 1 台ずつ

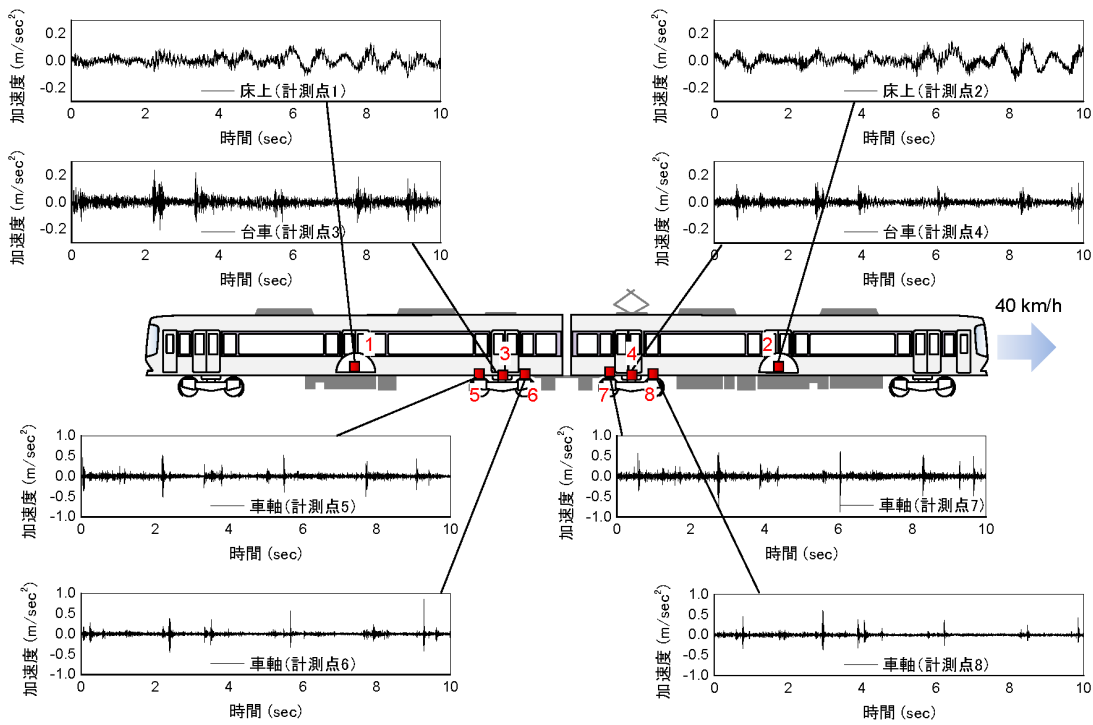


図-3 車両の加速度応答の一例 (40km/h 走行時)

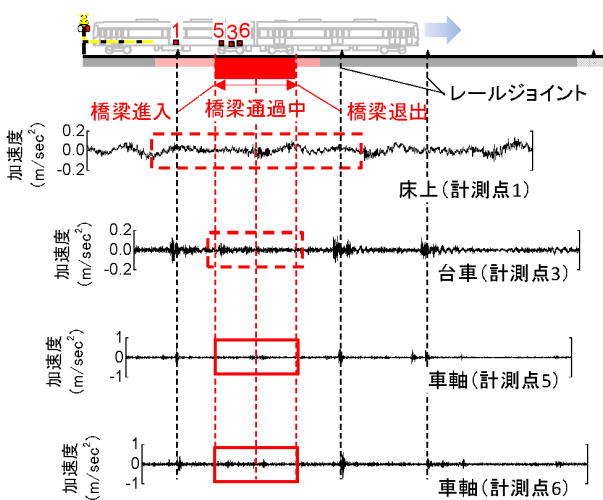


図-4 橋梁通過前後の車両の加速度応答

つ、合計 8 台を用いた。橋梁の加速度計は主に主桁の振動特性を把握するために、片側の主桁に 17 台を配置し、もう片側にはたわみモードとねじれモードの判別用に 3 台配置した。これらの加速度計はすべて上フランジ上に図-2(c)に示すように設置されている。なお、本研究では橋梁の詳細な分析を兼ねて、全 20 点の加速度計を配置しているが、固有振動数、振動モード形を同定可能であれば 4 点程度であっても問題ないと考えられる。列車側と橋梁側の計測システムではこれらの

加速度とともに、GPS 時刻装置により受信した標準時刻信号 (0~5V のパルス信号、付録 I) を収録するように初期設定している。

計測においては、列車、橋梁ともに鉛直方向の加速度に着目した。加速度計はすべて圧電型とし、列車に 8 台、橋梁に 20 台の計 28 台を用いることとした。これらの加速度計で計測した応答は、すべてサンプリング周波数 1kHz で AD ボードを介してノート PC に収録される。なお、収録用のノート PC は列車と橋梁にそれぞれ 1 台ずつ配置しており、列車に設置した 8 台の加速度応答は列車内のノート PC に、橋梁に設置した 20 台の加速度応答は橋梁側のノート PC に、それぞれ収録される。なお、計測時点では 2 つの計測システムの応答は同期化されていない。このように別々の計測システムを用いて計測した加速度応答を同期する手法は、付録 I で説明する。以上の計測条件のもとで、走行列車の加速度応答、および列車通過時の橋梁の加速度応答を計測した。列車走行試験は、橋梁を通過する際の列車速度を 10km/h から 45km/h まで 5km/h ずつ変化させて、各列車速度で数回から十数回実施した。

列車にて取得した加速度応答は路線情報を用いて位置と時間を対応させる。本研究では対象路線の位置と取得した加速度応答の時刻を関連付けるために、レールジョイントの位置情報と加速度応答に見られる衝撃応答の時刻情報を利用する。さらに、位置情報を関連付けた列車の加速度応答と、時刻同期を図った橋梁の加

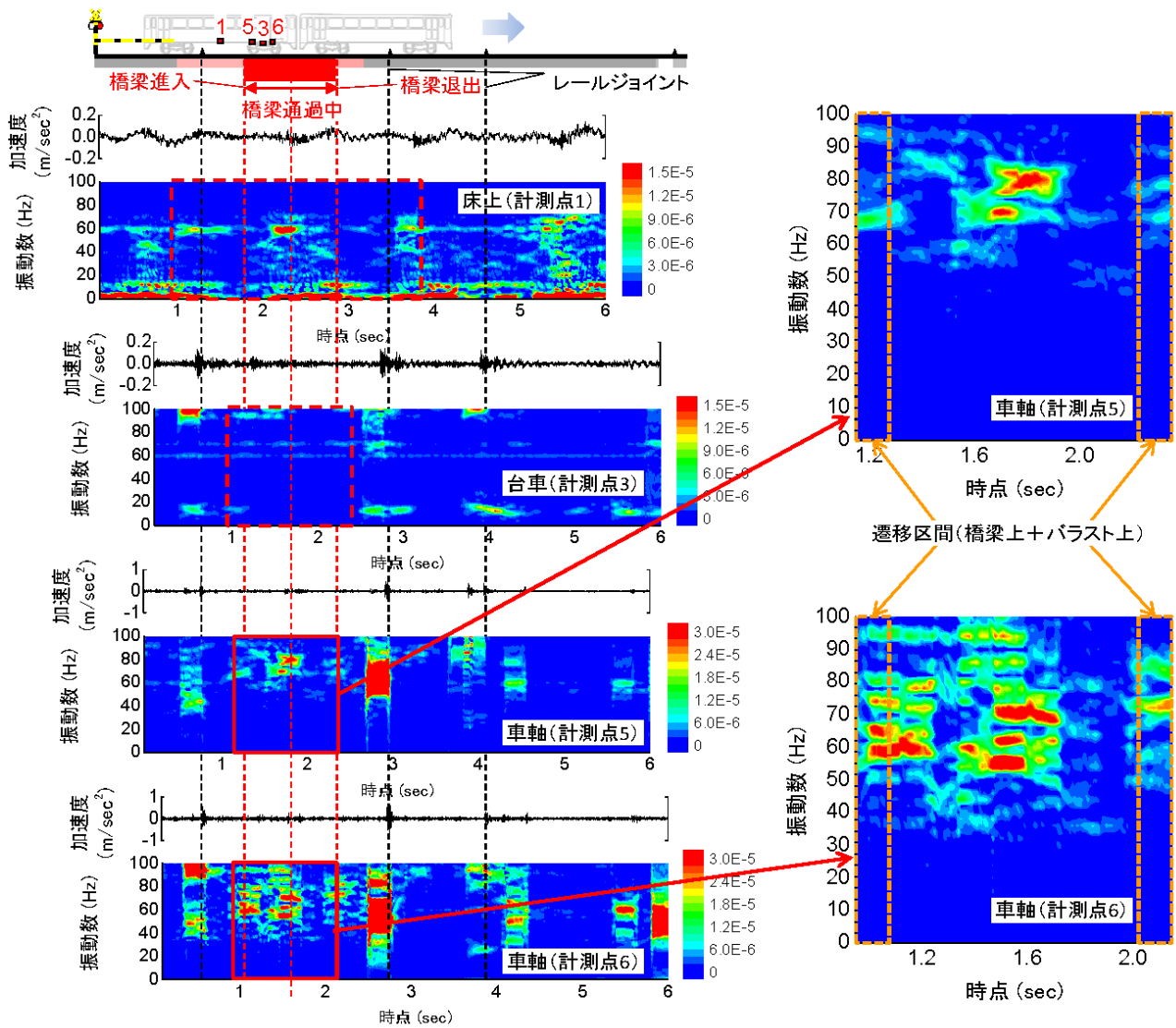


図-5 車軸応答のランニングスペクトル (40km/h 走行時)

速度応答のそれぞれに対してランニングスペクトルを算出することで、時間周波数、位置周波数に着目した分析を実施する。ランニングスペクトルは任意時間幅の切り出し区間を一定間隔で移動させながら順次フーリエ変換して算出する。列車の位置情報から特に橋梁通過時の周波数特性に着目し、他の路線通過時との比較、応答再現性の検証、列車速度が及ぼす影響について検討する。

3. 列車加速度応答の分析

(1) 列車の加速度応答

2. の条件のもとで、列車走行試験を実施した。計測した列車応答の一例として40km/hで走行した際の各計測点(車軸、台車、床上)の加速度応答を図-3に示す。床上以外の車軸と台車の加速度応答には複数の衝撃応答を

確認できる。各列車部位の最大振幅は、車軸で 1m/sec^2 程度、台車で 0.2m/sec^2 程度、床上で 0.1m/sec^2 程度であり、車軸での加速度応答振幅が最大となっている。いずれも衝撃加振時に極めて大きな応答が励起されている。また床上の応答の周期は、他の部位と比較して明らかに長周期である。これは台車と車体間の空気バネの影響である。以上のような特徴は列車の加速度応答のみから読み取ることが可能であるが、それ以上の詳細な情報、例えば橋梁を通過している時間帯などを抽出することはできない。

つぎにレールジョイントの位置情報と加速度応答に見られる衝撃応答時刻の関係から、列車走行位置と加速度応答を対応させた(図-4)。同図では例として後方車両に設置した計測点1(床上)、計測点3(台車)および計測点5と6(ともに車軸)の加速度応答を示す。図中には路線図も記載しており、各加速度応答は橋梁

中央を通過した時点が同一直線上に位置するように配置している。また、図中の黒点線は各計測点のレールジョイント通過時点を、赤点線は橋梁への進入、橋梁中央、退出時点を示している。さらに、赤囲いは橋梁通過中であることを示している。ただし、計測点3(台車)に関しては当該台車に設置された2本の車軸(計測点5と6の車軸)のいずれかが橋梁通過中である範囲を、計測点1(床上)に関しては当該車両の4本の車軸のいずれかが橋梁通過中である範囲を、それぞれ赤色の破線による囲いにより示している。図中の黒点線と計測点3, 5, 6(車軸と台車)の加速度応答に見られる衝撃応答の対応関係から、車軸と台車の衝撃応答がレールジョイント通過時に励起されたものであることを確認できる。これらの対応関係と既知である列車速度、列車諸元から加速度応答の時刻情報と走行位置の情報を対応させることができる。

(2) ランニングスペクトル

図-5に上述の加速度応答のランニングスペクトルを示す。ランニングスペクトルの算出に際しては、0.2secの加速度応答を切り出し、それを0.01sec刻みで移動させながら順次フーリエ変換している。また、周波数分解能として2Hzを確保するために、切り出した時系列の最後に0ベクトルを追加して時間長を0.5secとしたうえで、フーリエ変換を行っている。なお、ランニングスペクトルはコンター図として示しており、青から赤に向かってスペクトル振幅が大きいことを表している。図中の黒点線、赤点線、赤囲いは図-4と同様である。

車軸(計測点5と6)のランニングスペクトルでは、レールジョイント通過時の衝撃加振により30Hzから100Hzまでの広い範囲で大きなスペクトル振幅が励起されている。さらに、そのときの卓越振動数は通過するレールジョイントによって異なることがわかる。また、路線全線を通じて30Hz以下の周波数帯域ではほとんど卓越成分を確認することはできない。台車(計測点3)でも各車軸がレールジョイントを通過した際に若干の卓越成分を確認できるが、その卓越振動数は車軸と異なり台車枠の固有振動数に近い10Hz付近が中心となっている。さらに床上(計測点1)のランニングスペクトルでは60Hz付近に常に一定のスペクトル振幅が励起されているほか、10Hz以下の低周波数帯域に卓越成分を確認することができる。車輪に作用する動的外力は、車軸から台車を介して車両に伝達される。床上のランニングスペクトルで確認される10Hz以下の卓越成分は車軸ばね、台車枠、空気バネを介して励起された車体の1次曲げの振動成分であると推測される。また床上のランニングスペクトルに70Hz以上で卓越成分が確認できないことは、高周波数帯域を低減する空気バネの

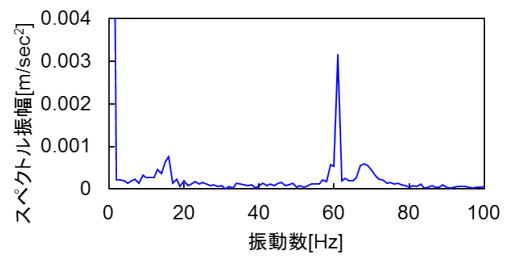


図-6 電源ノイズの影響(計測点5:列車停止時)

伝達特性に起因すると考えられる。なお、台車と床上のランニングスペクトルで常に確認された60Hzの卓越成分は、振幅レベルが小さいために顕在化した電源ノイズであると考えられる。これは図-6に示した列車停車時の車軸(計測点5)のスペクトルでも確認できる。

つぎに、橋梁通過中のランニングスペクトルに着目する。床上と車軸では、径間中央通過時に50~80Hzの範囲でいくつかの卓越振動数を見ることができる。なお、橋梁応答の影響に着目した場合、床上の加速度応答は上述したように列車構造に起因する複数のフィルターを介している(列車の各部位の固有振動が影響を及ぼす)ために、橋梁固有の振動成分を抽出することは困難であると考えられる。一方でばねを介さない車軸の加速度応答は、橋梁固有の振動成分の影響が比較的大きくなるものと予測される。各車軸の橋梁通過時に見られる卓越成分は、列車がその他の路線構造物(踏切、バラスト、ラダーマクラギ等)を通過した際には励起されておらず、橋梁に起因した何らかの振動成分が寄与している可能性を指摘できる。このことから、以降では車軸の加速度応答を中心に分析を実施する。

橋梁通過中の車軸応答のランニングスペクトルを拡大したものを図-5に示す。また、橋梁通過中のランニングスペクトルに示す遷移区間(図中の橙色破線囲み)は切り出した加速度応答に橋梁通過時以外の応答が一部混入している区間を示す。いずれの車軸でも橋梁の径間中央通過時に大きなスペクトル振幅を確認できるが、それらの振動数には車軸により若干の相違が確認できる。計測点6の前方車軸では55Hz付近、62Hz付近、70Hz付近が卓越しているが、計測点5の後方車軸では70Hz付近、80Hz付近が卓越成分している。また、計測点6の前方車軸では橋梁進入時にも60Hz付近に卓越成分を確認できる。このような相違が生じる理由は不明であるが、前方車両の後方台車の各車軸に設置した計測点7, 8でも同様の傾向が確認された。また、橋梁上の走行位置によっても卓越振動数が異なることを確認できる。特に橋梁中央通過前後では橋梁中央通過時と異なった卓越振動数が励起されている。

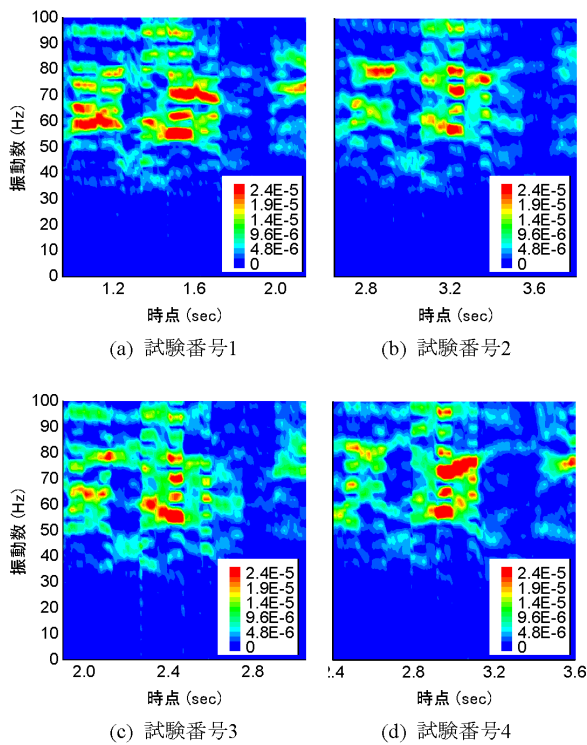


図-7 同一条件下での車軸応答の変動 (計測点 6, 40km/h)

(3) 列車条件の影響

a) 同一条件下における応答再現性

はじめに、車軸 (計測点 6) の加速度応答を対象として、同一速度・同一進行方向における周波数特性の再現性を確認する。図-7 には列車速度が 40km/h かつ同一進行方向で実施した 4 回の列車走行試験の結果 (橋梁通過中のランニングスペクトル) を示している。ランニングスペクトルを見ると橋梁中央通過時に着目した場合、いずれの試験のランニングスペクトルでも 55~75Hz の周波数帯域に 3 つの卓越成分を形成しており、さらに約 80Hz にもピークを確認できる。また、橋梁中央時点より前のランニングスペクトルでは 80Hz 付近に、橋梁中央時点より後のランニングスペクトルでは 60Hz から 80Hz 付近にそれぞれわずかな卓越成分を確認できる。一方で橋梁進入時に励起される振動成分は試験毎に多少変動することが確認できる。具体的には、試験 1 で 58Hz 付近に最も卓越した振動成分が存在するが、試験 2 では 75Hz 付近に大きな卓越成分が励起されている。さらに試験 3, 4 では 65Hz 付近にわずかな卓越成分が確認できる程度となっている。このような傾向は計測点 5 (後方車軸) や前方車両の車軸でも同様であるとともに、列車の進行方向を変化させた場合でも、橋梁中央通過時の卓越振動数に大きな変化がないことを確認している。

その他の特徴として、橋梁中央通過時の卓越振動数

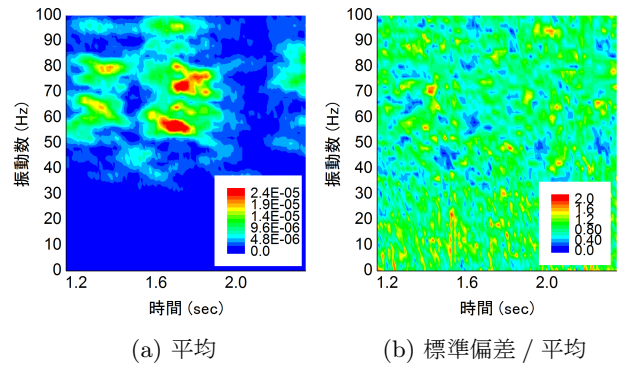


図-8 平均と変動 (計測点 6, 40km/h)

がほぼ等間隔に励起されていることがあげられる。列車は複数の車軸が規則的に配置されているために、列車速度が一定ならばレールジョイント通過に伴う衝撃応答も規則的に入力される。それらの規則的衝撃応答は 1. で述べた周期的振動成分の一つであり、スペクトル領域では等間隔の鋭い卓越成分を形成する。橋梁中央にレールジョイントが存在しないことから、近傍のレールジョイントを他の車軸が通過した際に励起された応答が伝達したものと推測される。実際に計測点 6 が橋梁中央を通過する時間帯に後方台車の車軸がバラスト部のレールジョイントを通過することを走行位置情報より確認している。図-7 の橋梁中央通過時に見られる等間隔の卓越成分もこの影響を多分に受けていると考えられる。通常、このような卓越成分は橋梁の固有振動数とは直接関係がなく、走行列車とレールジョイントに起因した応答成分である。しかし、仮にレールジョイント通過時の衝撃加振が支配的要因であるのならば、橋梁以外の構造物通過時にも橋梁中央通過時と同様の傾向が確認されると考えられるが、前節で述べたように、そのような卓越成分は観測されていない。このことから、規則的衝撃応答の影響だけでなく、橋梁通過中のみ励起される応答成分によりこれらの卓越成分が励起されていることが推察される。

図-8 には図-7 に示した車軸 (計測点 6) におけるランニングスペクトルの平均とその変動 (ここでは標準偏差を平均で除した値を変動と呼ぶこととする) を示している。同図 (a) に示した平均からは上述の各スペクトルの傾向を読み取ることができる。一方で同図 (b) からは、比較的スペクトル振幅が大きい橋梁進入時の 65Hz 付近、45Hz 付近、橋梁中央通過時の 60Hz、80Hz 付近で変動の小さい青色のコンターを確認することができ、これらの部分では安定したスペクトル振幅が得られていることがわかる。また、30Hz 以下の低周波数帯よりも 30Hz 以上の高周波数帯のランニングスペクトルの変動が小さい傾向にあることがわかる。

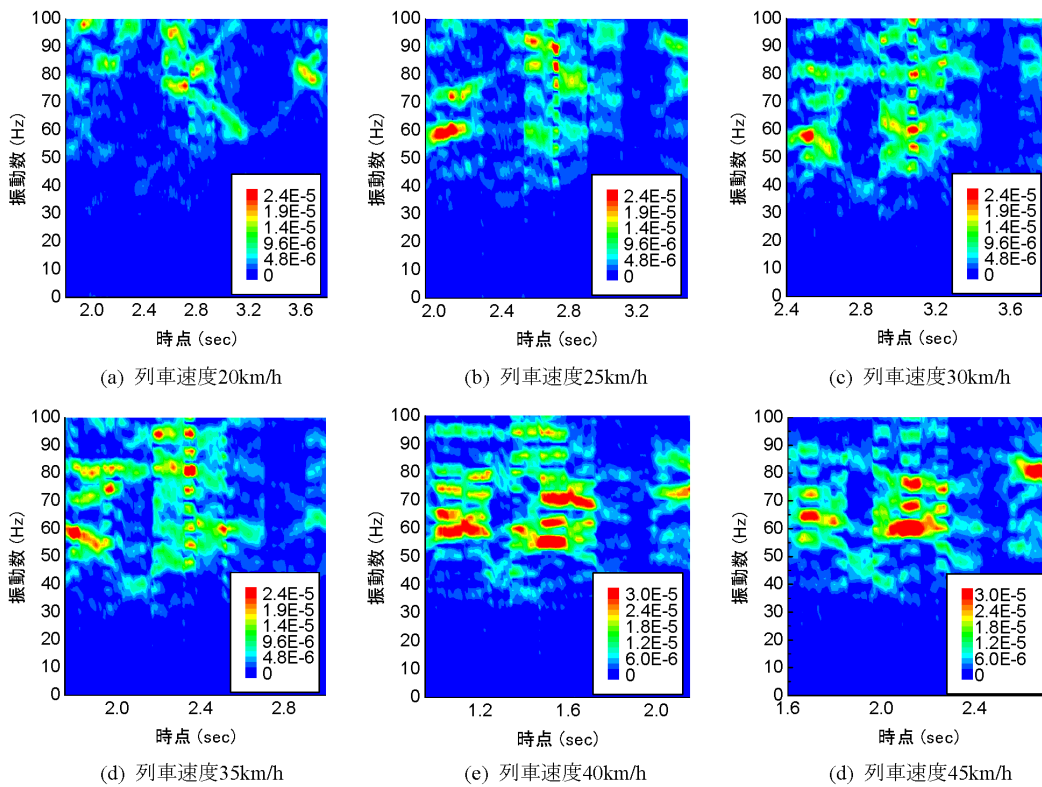


図-9 列車速度と車軸応答の卓越振動数 (橋梁通過中のランニングスペクトル, 計測点 6)

b) 列車速度の影響

図-9には列車速度を20~45km/hまで5km/h刻みに変化させた場合の計測点6(車軸)の橋梁通過中のランニングスペクトルを示す。コンター図の最大スペクトル振幅は各図に合わせて変化させている。なお、最大スペクトル振幅は列車速度の増加とともに増大する傾向にあった。いずれの列車速度であっても橋梁進入時、橋梁中央通過時、橋梁退出時に複数の卓越成分を確認することができる。はじめに橋梁中央通過時に着目すると、列車速度が25~45km/hでは規則的衝撃応答に起因する等間隔の卓越振動数を確認することができる。特に、列車速度40km/h、45km/hでは60~80Hz付近で卓越した振動成分を複数確認できる。このような規則的衝撃応答に起因した卓越振動数の間隔は、列車速度が減速することで短くなることが知られており、同図からも同様の傾向が確認できる。なお、列車速度が20km/h、もしくはそれよりも低い速度で走行した場合には、同図(a)のように等間隔の卓越振動数の影響は非常に小さくなる。ただし、同図(a)の場合でも、他と同様に75Hz付近、80Hz付近などに卓越成分が存在している。つぎに、全ての列車速度に共通する事項として、橋梁進入時に着目した場合にも規則的衝撃応答の影響が見られる。さらに、橋梁進入時とは別に50~60Hz付近に常に卓越成分が形成されていることも確認できる。最後に、規則的衝撃応答の影響があまり見られない橋

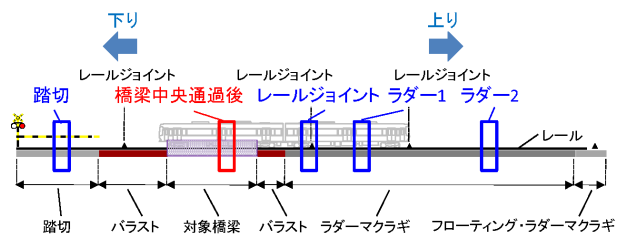


図-10 加速度応答の切り出し位置

梁中央通過後の応答では、特に列車速度が35km/h以上で60Hz、80Hz付近に卓越成分を確認することができる。このような傾向は進行方向が異なる場合も同様であった。

以上より、橋梁進入時や橋梁中央通過時の応答は**3.(3) a)**でも指摘した列車の速度に依存性を有する規則的衝撃応答に起因した卓越成分が支配的な応答成分となることが確認された。一方で、橋梁中央通過後の応答では列車の速度に依存しない卓越成分も確認された。このような応答成分と橋梁固有の振動成分の関係についてさらに詳細に検討するために、**4.**では橋梁中央通過後の応答に着目した分析を実施する。

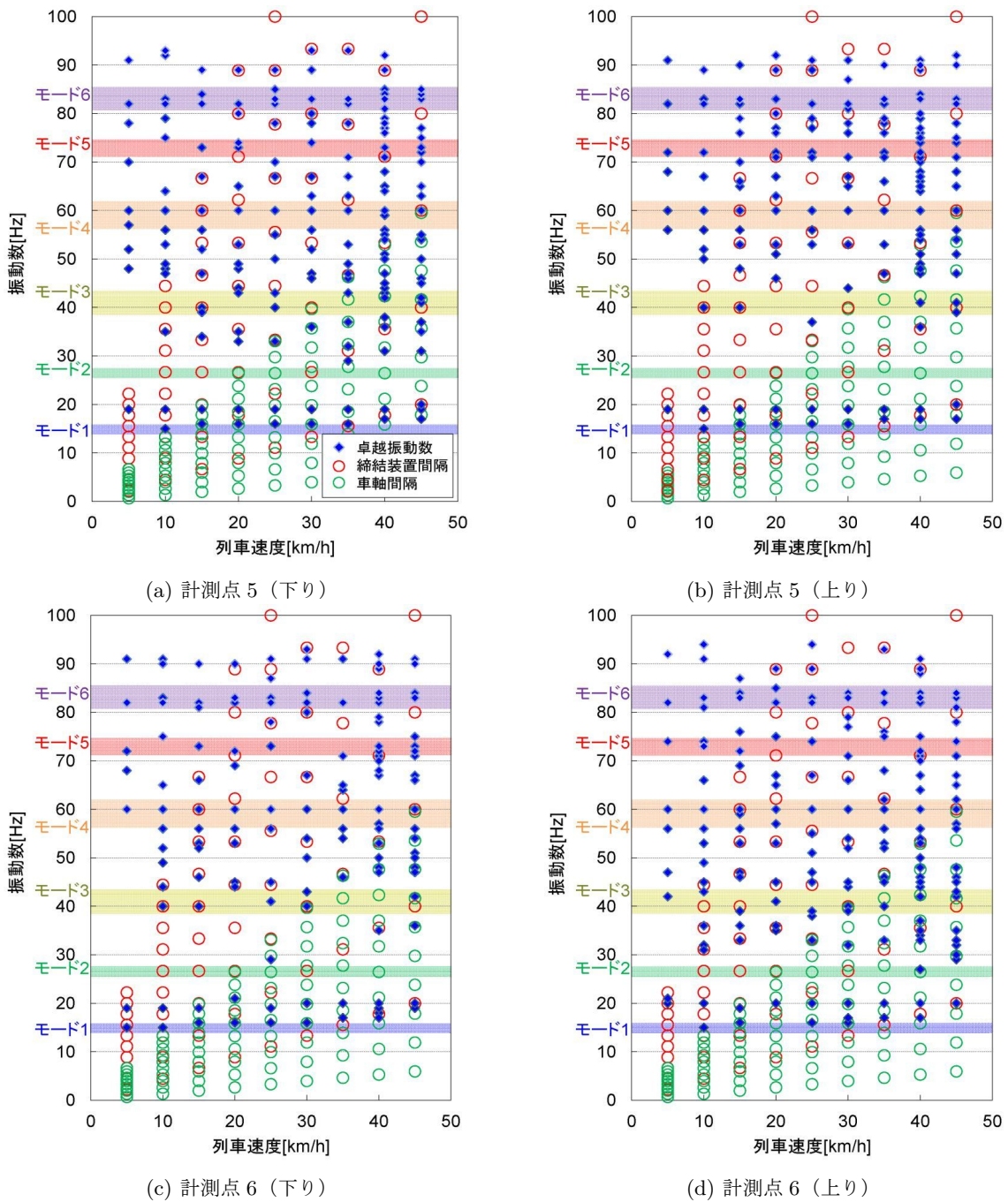


図-11 車軸の加速度応答の卓越振動数 (計測点 5, 6: 橋梁通過時)

4. 列車応答と橋梁の固有振動

(1) 橋梁通過時の車軸の卓越振動数

3. での分析結果を踏まえ、橋梁通過中の特定時点での車軸の加速度応答を抽出し、スペクトルに変換したうえで卓越振動数を抽出する。さらに、抽出した卓越振動数を橋梁の固有振動数、締結装置間隔や車軸間隔に起因する振動数、他の構造物通過時の卓越振動数と比較することで、橋梁通過時にのみ卓越し、橋梁の固有振動数と一致する卓越振動数を明らかにする。図-10には比較対象とした構造物を示している。橋梁通過中

の応答は $3L/4$ 地点を中心とした 1 秒間を切り出して分析に利用した (図中の赤囲い)。 $L/2$ 点については、3.(3) で指摘したように規則的衝撃応答に起因した卓越成分が支配的であったこと、5.(1) で後述するように同定された橋梁の振動モード 6 つのうち 2 つが $L/2$ 点を節に持つことから選定しなかった。また、他構造物としてはラダーマクラギ 2 箇所 (ラダー 1, ラダー 2)、踏切、レールジョイントの合計 4 箇所 (図中の青囲い) を選出し、それぞれの当該構造物通過時の応答を切り出している。以下、はじめに橋梁通過時の各車軸における卓越振動数と橋梁の固有振動数を含む影響因子の

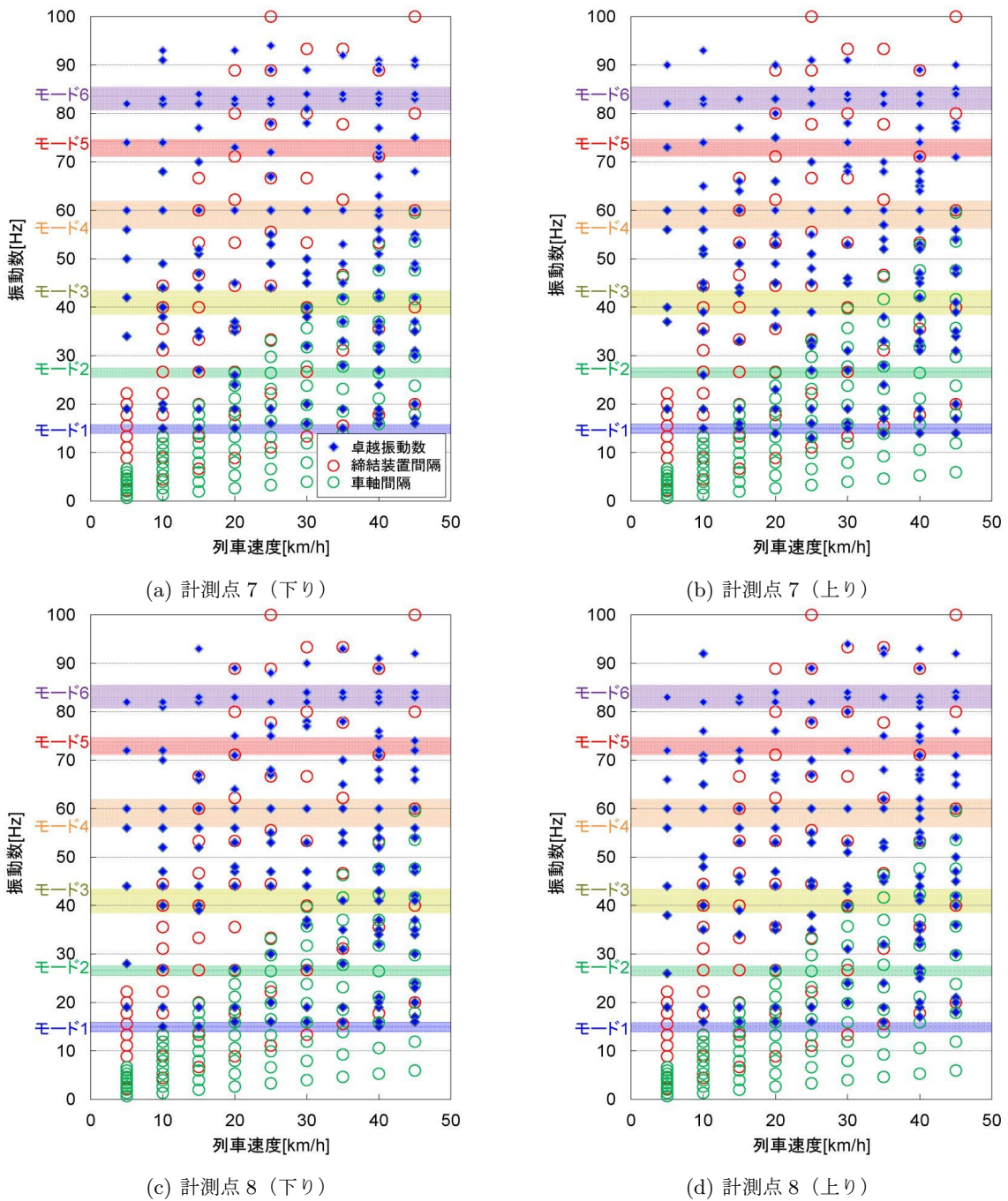


図-12 車軸の加速度応答の卓越振動数 (計測点 7, 8: 橋梁通過時)

関係について検討したうえで、つぎに他の構造物通過時の卓越振動数との比較を行う。

橋梁通過時の車軸 (計測点 5, 計測点 6) の加速度応答より抽出した卓越振動数を図-11 に青菱形で示す。同一の車軸でも進行方向によりその振幅が異なっていたために、橋梁側から踏切側へと向かう場合を下り、踏切側から橋梁側へと向かう場合を上りと定義し、それぞれを分けて記載している。なお、卓越振動数の抽出に際してはハミング窓¹⁸⁾を用いて平滑化を行っている。さらに、図中には橋梁の固有振動数をカラーバーで示している。カラーバーの振動数範囲は列車走行試験で

同定した列車走行時の固有振動数の上限と下限に対応している。固有振動数の同定については 5. で詳述する。橋梁の固有振動数の他に、車軸の加速度応答で卓越成分を形成する要因として、軌道の締結装置間隔と車軸間隔があげられる¹⁴⁾。これらの卓越振動数は、

$$f_v = \frac{V}{l} \quad (1)$$

で算出される基準振動数 f_v の定数倍となる¹⁹⁾。ここで、 V (m/sec) は列車速度、 l (m) は締結装置、あるいは車軸の間隔を表す。列車走行試験の諸元から締結装置間隔は 0.625(m)、車軸間隔は 2.1(m) となっている。基

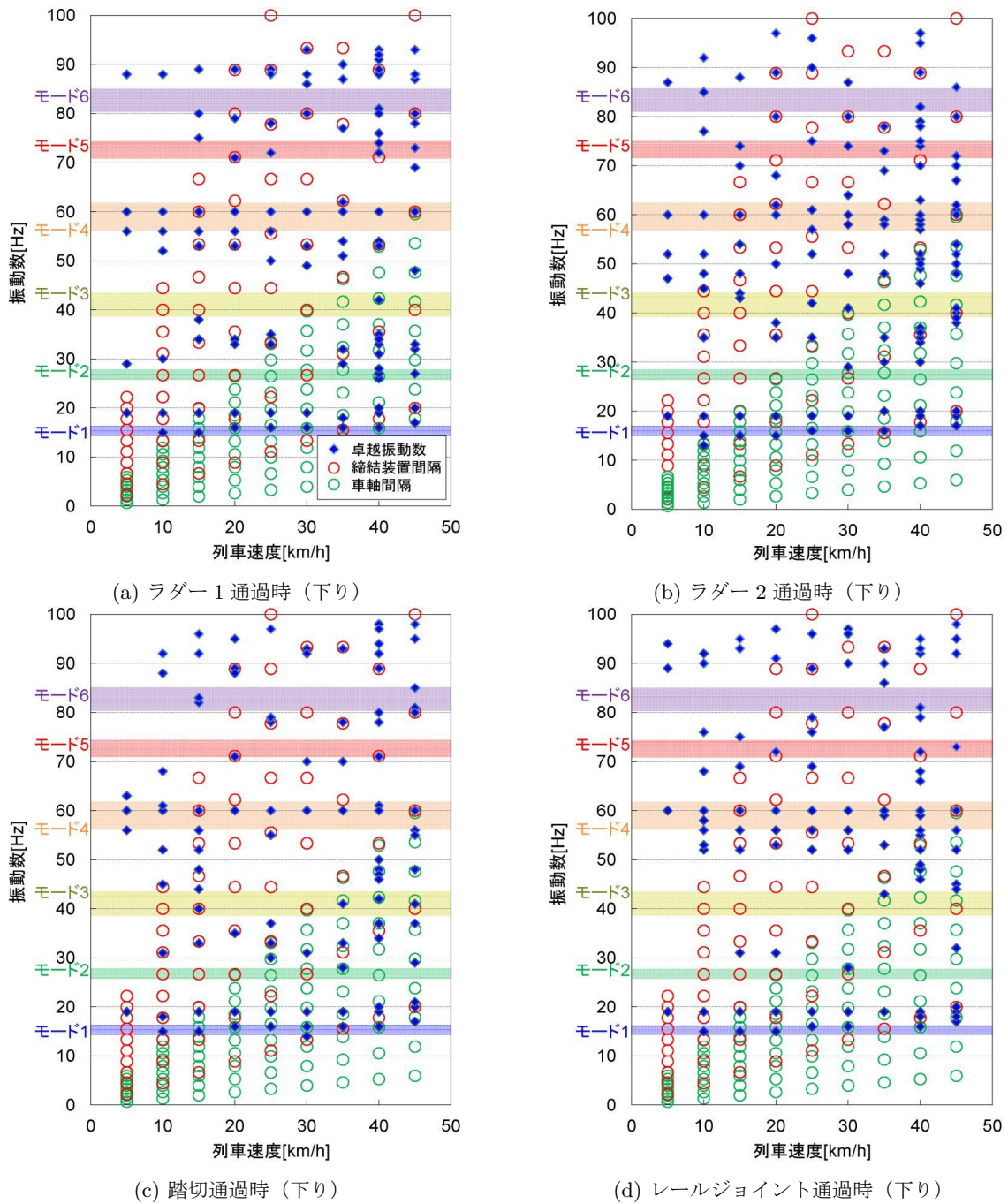


図-13 車軸の加速度応答の卓越振動数 (計測点 5: 他構造物通過時)

準振動数の 10 倍までの卓越振動数を赤丸、緑丸として図-11 にそれぞれ示している。

まず 50Hz 以下の周波数帯域に着目する。同図より、橋梁のモード 1 (15.5Hz 付近)、モード 3 (40Hz 付近) に該当する卓越振動数 (図中の青菱形) が確認できるが、それらのほとんどは締結装置間隔や車軸間隔に起因した卓越振動数 (図中の赤丸と緑丸) と一致しており、橋梁の固有振動数の寄与の有無を直接判断することはできない。また、モード 2 にあたる 26Hz 付近に卓越成分を確認することはできなかった。つぎに 50Hz 以上の周波数帯域を見た場合、橋梁のモード 4 にあたる 60Hz

付近とモード 6 にあたる 82Hz 付近ではいずれの車軸でも卓越成分が安定して励起されている。また、締結装置間隔や車軸間隔の影響が見られる卓越振動数も少ない。一方で、モード 5 にあたる 73Hz 付近では、着目する車軸や列車速度によって卓越するかどうか、一貫した傾向を確認できない。図-12 には別車両である計測点 7, 8 の車軸応答から抽出した橋梁通過時の卓越振動数を示している。モード 2 を含む 25~30Hz 付近にいくつかの卓越振動数を確認できること以外は、図-11 の計測点 5, 6 と同様の特徴を示している。なお、図-12 のモード 2 (26Hz 付近) に見られる卓越振動数も締結装

置間隔, 車軸間隔に起因する卓越成分と一致しており, 橋梁の固有振動が寄与した卓越振動数であるかは判断できない. なお, 車軸の卓越振動数と, 締結装置間隔や車軸間隔に起因する卓越振動数の間に若干の差異が存在するケースが確認できる. しかし, この原因に関しては記載した列車速度と, 実際の列車速度との間に差異があるために, 式(1)で算出した卓越振動数に影響を与えたと仮定した方が合理的であると考えられる. なお, 本研究の列車走行試験においては, 橋梁前後の2か所のジョイント通過時をマーカーとして算出した橋梁通過時の平均的な列車速度と記載した速度の差は最大で約4km/hであった.

以上から, 車軸や進行方向により抽出される卓越振動数の分布に若干の相違が見られるものの, いずれの場合においても橋梁のモード1(15.5Hz付近)やモード4(60Hz付近), モード6(82Hz付近)で安定した卓越成分が確認された. これらの卓越振動数では橋梁の固有振動が寄与している可能性があげられる. ただし, モード1(15.5Hz付近)では締結装置間隔, 車軸間隔の影響が介在している可能性は否定できない. 特にこれらの振動モードに着目し, 励起されている卓越成分が橋梁の固有振動に起因したものであるかどうかを検証するためには橋梁以外の他の構造物通過時の応答と比較することが重要である(すなわち, 他の構造物でも同じ卓越振動数が確認できるのであれば, 締結装置間隔や車軸間隔の影響とほぼ断定できる).

(2) 他構造物通過時の車軸の卓越振動数

図-10に青囲いで示したラダーマクラギ(ラダー1, ラダー2), 踏切, レールジョイント通過時の加速度応答に対して, 橋梁通過時の場合と同様に卓越振動数を抽出した. 例として計測点5(下り)の結果を図-13に示す. 先ほど橋梁の固有振動が寄与している可能性が考えられた振動モードを確認する. モード1(15.5Hz付近)ではいずれの構造物通過時でも橋梁通過時と同様に安定して卓越成分が抽出されている. また, いずれの場合でも締結装置間隔, 車軸間隔に起因した卓越振動数と一致していることから, これらは橋梁に起因した卓越成分ではなく締結装置間隔, 車軸間隔に起因した卓越成分であると考えられる. つぎにモード4(60Hz付近)を見てみるといずれも安定して卓越振動数が励起されており, こちらも橋梁の固有振動に起因した卓越成分ではなく, 車軸にて定常的に励起されている振動成分であることがわかる. この要因に関しては60Hzという振動数から, 電源ノイズである可能性が最も高いと推察できる. 一方で, モード6(82Hz付近)はラダー2通過時と踏切通過時でわずかに卓越成分が確認されているものの, ほとんどの場合で卓越成分を確認

することはできない. このことから82Hz付近の卓越振動数は橋梁通過時にもみ励起される, 橋梁のモード6の固有振動に起因した卓越成分であると考えられる. なお, モード6(82Hz付近)では締結装置間隔や車軸間隔の影響も見られない. 以上の結果はいずれの車軸, 進行方向でも確認された. 本節の分析により橋梁のモード6が橋梁通過中の車軸で卓越成分を形成していることが確認された. この結果を踏まえ, 5.では車軸が通過した際の橋梁側の加速度応答でもモード6が卓越しているか否かを検証する.

5. 橋梁加速度応答の分析

(1) 橋梁の振動特性の同定

当該橋梁の固有振動数と振動モード形はクロススペクトル法によって参考文献¹⁵⁾で明らかにされている. まず, その振動特性について述べておく. 振動特性の同定結果の例として, 列車が40km/hで走行した場合の固有振動数と振動モード形を図-14に示す. 本研究では100Hzまでの橋梁の振動モードに着目して6つの振動モード(振動数が低い順に便宜的にモード1からモード6と呼称する)を同定した. 図-14より, 列車通過中であっても, モード1, モード2, モード3, モード6は計測点9(L/2)付近が, モード4とモード5は計測点5(L/4)および計測点13(3L/4)付近が, それぞれ腹となる振動モードが同定されていることがわかる. モード1, モード3, モード6はいずれも同じ梁の1次たわみモードを示しているが, モード1が橋梁全体の1次たわみモードで, それ以外は部材レベルの振動モードに誘因された疑似モード²⁰⁾であると考えられる(疑似モードの存在については参考文献¹⁷⁾を参照されたい. また, 本研究においては疑似モードの要因となっている部材を特定していないことを断っておく). なお, 列車走行時の橋梁応答から同定した橋梁の振動特性の妥当性を検証するために, 当該橋梁を対象としてインパルスハンマー試験も同時に実施している. インパルスハンマー試験ではモード1とモード2の2モードを同定することが可能であった. 両試験結果を比較すると, 固有振動数の差はいずれも5%程度であるとともに, 同様の振動モード形を示すことを確認している. また, 図-15には列車速度を5km/h~45km/hとした場合の固有振動数を示している. いずれの試験でも対象とした6モードが同定可能であるとともに, 固有振動数に列車速度との依存関係を見て取ることはできない. また, モードにより固有振動数のばらつきが異なることを確認できる. 各モードの変動係数(標準偏差を平均で除した値)はモード1が最大で約4%であった. なお, 列車走行時の橋梁の固有振動数は車両重量の影

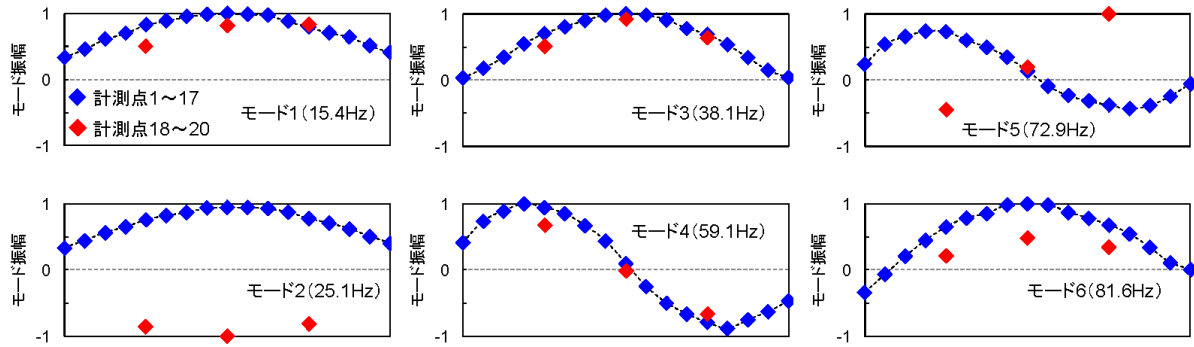


図-14 列車走行時の振動特性 (列車速度 40km/h)

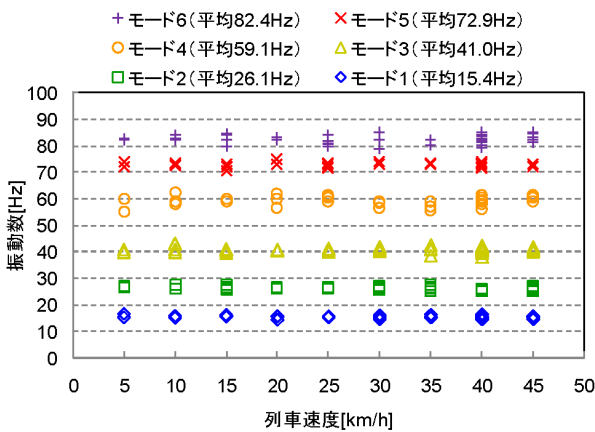


図-15 固有振動特性と列車速度

響で見かけ上低下すると考えられるが、図-15 に示した固有振動数は列車走行時の加速度応答から同定されていることから、すでに車両重量の影響を含んだ値であると考えられる。以上に示したインパルスハンマー試験との比較や、列車速度の相違に基づく振動特性の変動の詳細については、参考文献¹⁵⁾を参照されたい。

(2) 列車通過時の橋梁の固有振動

走行列車荷重を用いることで、橋梁の6つの振動モードを同定できた。しかしながら、走行列車荷重は定常的な入力荷重ではないために、卓越モードも時々刻々と変動するものと考えられる。また、橋梁の加速度応答中には、締結装置間隔、車軸間隔に起因する規則的衝撃応答も混入するために、列車走行位置(時間)によって橋梁固有の振動応答の振幅が大きく励起されている時点とそうでない時点が存在すると考えられる。本節では車軸の通過に伴う列車走行中の固有振動応答の振幅の変動を把握し、車軸の加速度応答で確認された卓越成分との関係を分析する。

図-16には例として列車が40km/hで走行した場合(図-3の列車通過時)の各モードの応答振幅の時間的

変化を計測点9 ($L/2$)、および計測点13 ($3L/4$) についてそれぞれ示している。なお、各時点の応答振幅として、列車通過時の橋梁の加速度応答に各モードの固有振動数を中心とした通過帯域を有するバンドパスフィルタ²¹⁾を用いることで、固有振動に起因した応答を抽出した。なお、バンドパスフィルタのカットオフ周波数は固有振動数を中心とした上下5%に設定している。さらに対象時点を中心とした0.05秒分のRMSにより、若干の平滑化を施している。また、同図中には各車軸が計測点設置地点 ($L/2$, $3L/4$ 地点) を通過した時点を矢印で示すとともに、各車軸の橋梁進入から退出までの区間を併せて示している。特に加速度計を設置した4つの車軸の記号は赤で示すとともに計測点番号も記載している。これらはGPS時刻装置を用いた同期手法により同期された列車応答から逆算した。さらに同図の上方には橋梁固有の応答振幅と時間軸を共有させた時系列応答をともに記載している。

列車が橋梁を通過することですべてのモードの応答振幅が増大している。ともに示した加速度応答でも列車の通過に起因して振幅の増大と複数の衝撃応答を確認できるが、衝撃応答が車軸の通過と一対一に対応しているわけではない。列車の進入や退出時の衝撃応答も振幅の増大に寄与していると考えられる。一方で応答振幅と車軸通過時点を見ると、車軸通過時には応答振幅が大きく励起される場合が多いことがわかる。また、各モードの応答振幅を比較すると、車軸の通過によりその振幅は変化するものの、計測点9 ($L/2$ 地点) と計測点13 ($3L/4$ 地点) でモード2 (緑) とモード6 (紫) が相対的に大きな応答振幅を有する傾向にある。なお、両計測点を比較すると計測点13 ($3L/4$ 地点) では計測点9 ($L/2$ 地点) と比較してモード4 (橙) の応答振幅が若干大きくなっている。これはモード4が計測点13 ($3L/4$ 地点) を腹、計測点9 ($L/2$ 地点) を節とする振動モード形を有するためであると考えられる。モード5 (赤) も同様の振動モード形を有するが時間に

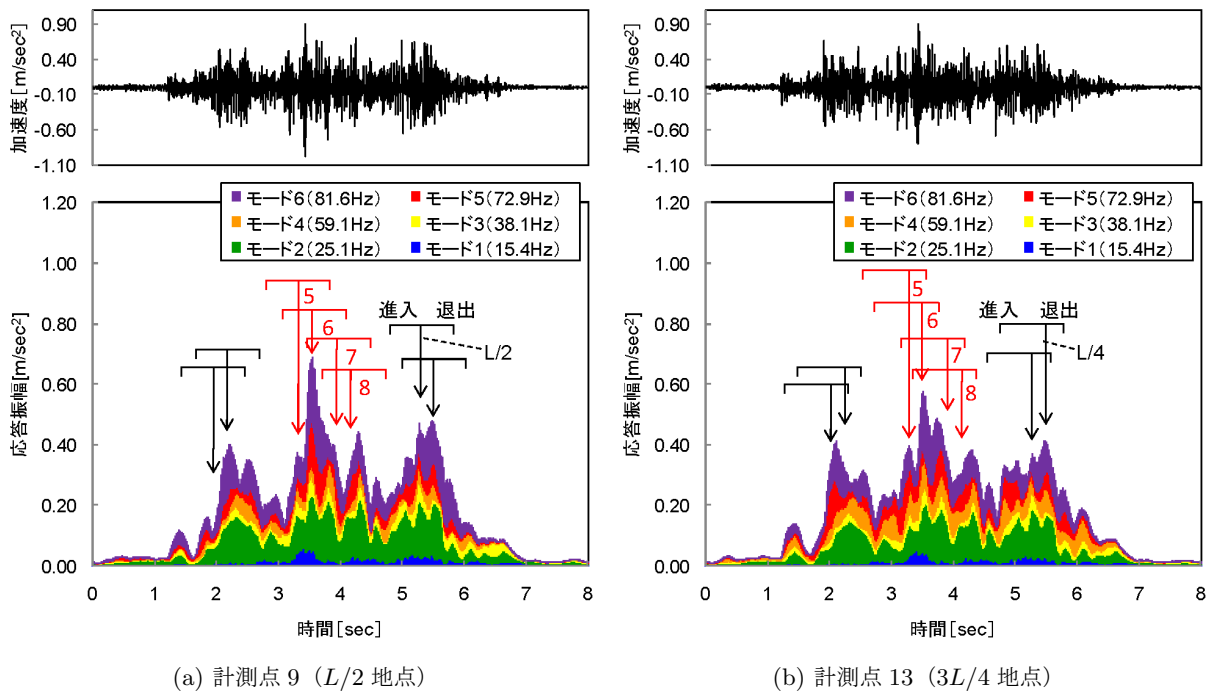


図-16 列車走行時の橋梁固有の振動成分の応答振幅

よっては計測点9の方が大きな応答振幅を有している。これはバンドパスフィルタの裾野部分に式(1)で示した規則的加振に起因した卓越成分が混入していることに起因すると考えられる。実際にカットオフ周波数を固有振動数を中心とした上下2%に設定した場合に、計測点13の応答振幅が常に大きくなることを確認している。

(3) 列車速度と橋梁の固有振動

つぎに橋梁固有の応答振幅と列車速度の関係について検討する。本研究では前節の結果を踏まえ、特に図-16に赤矢印で示した4つの車軸が各計測点を通過した際の応答振幅に着目し分析した。

前節と同様にバンドパスフィルタにより応答振幅を算出するとともに、算出した橋梁固有の応答振幅の時系列から各車軸が通過した時点を抽出することで、各車軸通過時の各計測点での応答振幅を求めた。算出結果の例として、列車の計測点8(前方車両後方台車の前方車軸)が橋梁の計測点13(3L/4地点)を通過した時点での各モードの応答振幅と列車速度の関係を図-17に示す。列車の走行速度が同様である場合でもそのばらつきは非常に大きい、走行速度の上昇とともに各モードの応答振幅は増大傾向にあることがわかる。

ばらつきが大きい応答振幅と列車速度の関係を俯瞰的に把握するために、列車速度ごとに各モードの応答振幅の平均を算出した。なお、各モードの応答振幅を比較するために固有振動数の二乗で除して変位に変換した値を示している。図-18には、例として、計測点9

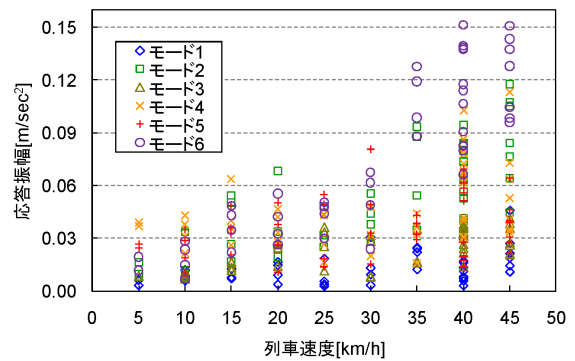
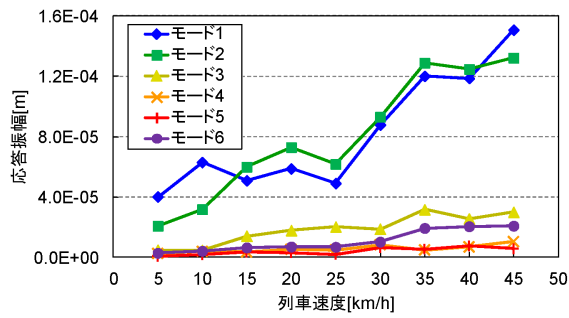
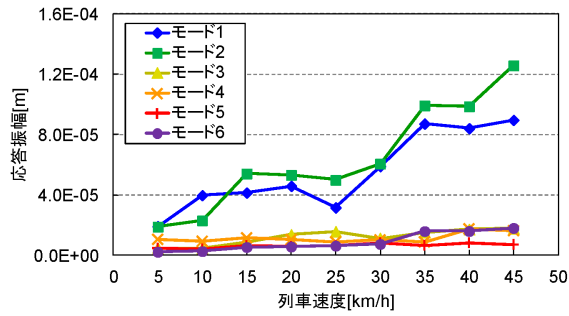


図-17 車軸通過時の応答振幅と列車速度(計測点13)

(L/2) および計測点13(3L/4)の算出結果を記載している。広く理解されているとおり、低次モードであるモード1、モード2が相対的に大きな固有応答振幅を有していることが確認できる。一方で高次モードについて見た場合、特に35km/h以上の列車速度ではモード3、モード6が比較的大きな応答振幅を有していることがわかる。特にそれらの傾向は各モードの腹となる計測点9(L/2地点)で顕著となっている。なお、その他の車軸通過時でも、応答振幅は試験毎のばらつきが非常に大きいものの、上記の傾向は同様であった。橋梁通過中の列車の車軸応答と比較すると橋梁通過中にのみ卓越成分が確認されたモード6(82Hz付近)は、列車走行時に橋梁振幅でも高次モードの中では卓越する傾向にあるとともに、列車速度の増加とともにその応答振幅は大きくなる傾向が明らかとなった。モード6が



(a) 計測点 9 (L/2 地点)



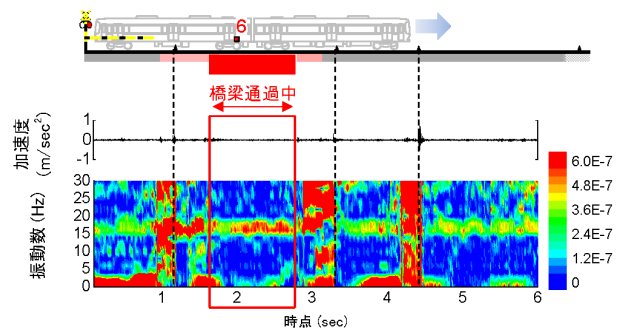
(b) 計測点 13 (3L/4 地点)

図-18 橋梁固有の振動成分の応答振幅と列車速度

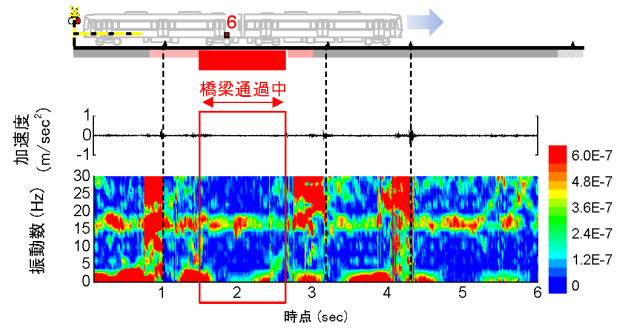
車軸が通過した際の橋梁で比較的大きな振幅を有するという結果は 4. と整合的であり、橋梁通過中の車軸応答における 82Hz 付近の卓越成分が橋梁固有の振動に起因するものであることを裏付けている。なお、橋梁に着目した分析ではモード 1 からモード 3 の各モードでも大きな応答振幅が確認された。モード 2, モード 3 については、ほとんどの場合で車軸の加速度応答中に卓越成分を見ることができない。これはモード 2 は 1 次ねじれモードであるために列車が通過する軌道上ではモード振幅が極めて小さいことが原因と考えられる。一方で、モード 1 に関しては、卓越成分自体は確認されているものの、他の構造物通過時でも卓越成分が確認されたこと、締結装置間隔や車軸間隔に起因した卓越振動数と一致することから、本研究の分析ではたとえ橋梁の固有振動の寄与が存在したとしてもそれを判断できなかった。これについて次節でもう少し詳しく説明する。

(4) 留意事項

今後、走行列車による移動型モニタリングを用いて低次モードの同定も視野に入れる場合には、モード 1 のように車軸応答中に卓越振動数として単純には現れない成分についても詳細な分析を実施していく必要がある。本研究のモード 1 に関して、固有振動の寄与を判断できなかった理由は締結装置間隔や車軸間隔に起因した卓越成分と固有振動数が一致したためである。こ



(a) 試験 1



(b) 試験 2

図-19 車軸応答における橋梁モード 1 (15.5Hz 付近) のスペクトル振幅 (計測点 6, 40km/h)

こで、車軸応答の低周波数帯域について詳細に分析するために、列車が 40km/h で走行した際の計測点 6 の 30Hz 以下のランニングスペクトルを改めて図-19 に示す。なお、図-19 のスケールは 3. の図-5 とは異なることに留意されたい。同図 (a), (b) とともにレールジョイント通過時点で大きなスペクトル振幅が励起されているほか、固有振動数 (15.5Hz) 付近で常に卓越成分を形成していることがわかる。この周波数帯域では定常的な振動源が存在することが示唆され、実際に車軸間隔に起因する卓越振動数が理論上 15.9Hz に存在した。つぎに、この 15.5Hz 付近のスペクトル振幅の時間的変動に着目する。まず同図 (a) を見ると、15.5Hz 付近のスペクトル振幅は赤囲いで示した橋梁通過中において、他の構造物通過時よりも大きく卓越する傾向にあることがわかる。このように橋梁通過時にスペクトル振幅が増大している場合には、モード 1 と車軸間隔に起因する振動数が一致し、振幅が増大したものと考えられる (したがって、モード 1 の振動成分が車軸応答中に含まれている可能性を示すことができる)。しかし一方で、同図 (b) では橋梁通過時以外でも同程度、もしくはそれ以上のスペクトル振幅が同じ周波数帯域で励起されるケースも存在する。このように他の構造物通過時でも同様の現象が確認される場合には、橋梁通過中の 15.5Hz 付近のスペクトル振幅が周辺の周波数領域と

比較して卓越しているからといって、その要因を橋梁固有の振動成分であると断定できない。このような問題を解決するためには、対象とする周波数帯域に影響を及ぼす因子とその影響量を明らかにし、それらの影響を差し引いたうえで、橋梁通過時にスペクトル振幅の有意な増加が存在するか否かを検証する必要がある。このような分析の方向性として、1) より高度な分析手法を利用する方法論の高度化と、2) 加速度応答のみならず速度応答や変位応答、音圧など、他の指標を複合的に利用する観測技術の高度化が考えられ、これらは今後具体化する移動型モニタリングの形式により異なると考えられる。すなわち、前者は営業列車を利用するような廉価で簡易な移動型モニタリング、後者は計測専用車両を利用するような詳細な移動型モニタリングである。本研究では、今後、営業列車を利用した廉価で簡易な移動型モニタリングシステムの構築を目指して、系列データの因子や相関を考慮したモデル²²⁾⁻²⁶⁾による分析を進めていく。

6. おわりに

本研究では、列車・橋梁応答を対象とし、特に列車応答への橋梁固有の振動成分の寄与について実物大試験線を利用して実証的な検討を実施した。これにより、本研究で対象とした列車・橋梁、および速度範囲では、橋梁の一部の固有モードが橋梁通過時の列車の車軸加速度応答上で卓越成分の形成に寄与していることが明らかとなった。以下に本研究で得られた知見を述べる。

- 1) 橋梁を含む実物大試験線を走行する列車の車軸、台車、床上の加速度計測、およびランニングスペクトルによる時間周波数分析を実施し、走行列車の車軸において橋梁通過時でのみ卓越する振動成分が存在することを確認した。
- 2) 走行列車の車軸で橋梁通過中にのみ励起される振動成分は、対象とする車軸や橋梁上の走行位置によりその振幅、卓越振動数が異なることを確認した。
- 3) 橋梁通過中の卓越振動数に着目した分析により、列車の車軸応答では50Hz以下で締結装置間隔、車軸間隔の影響が大きいこと、車軸、進行方向によって卓越振動数が大きく変化しないことを確認した。
- 4) 橋梁通過中と他構造物通過中の卓越振動数の分布を比較することにより、モード6(82.4Hz)が橋梁通過中の車軸加速度の卓越成分形成に寄与していることが判明した。また、それらの卓越成分は列車の速度や進行方向、着目する車軸に依らず安定して励起されることを確認した。
- 5) フィルタ処理によって算出した列車走行中の橋梁の各モードの応答振幅と列車の車軸通過時点を比較

することにより、車軸が橋梁を通過した際に橋梁のモード6の応答振幅が増大することを確認した。

- 6) 締結装置間隔や車軸間隔の影響により、橋梁のモード1をはじめとした50Hz以下の低次モードの抽出は本研究の分析では困難であった。

以上に示したように、走行列車の車軸加速度応答に含まれる橋梁固有の振動成分の抽出可能性を実証的に示した。しかしながら、実用化を見据えた場合には克服すべき課題が山積していることも事実である。本研究の結果は対象とした列車・橋梁、および速度範囲における一事例であり、橋梁の径間長、種別や軌道の状態、台車や車軸の種別や状態などが異なった場合に対して直接適用できるものではない。汎用的な知見を獲得するためには、計測事例を増やしていくとともに、本研究の結果を反映するような解析モデルの作成、およびパラメトリック解析による影響因子の感度分析を並行して実施していく必要がある。検討対象とする構造物について、これまでの研究から列車高速走行時における50Hz以上の橋梁固有モードで高次共振が発生することが実証的に確認されている¹⁷⁾。比較的高周波数帯での橋梁振動の卓越は走行列車による移動型モニタリングに適していると考えられることから、文献¹⁷⁾で対象としたRC高架橋に対する適用性を今後検討していく。

謝辞: 本研究の一部は日本学術振興会「特別研究員奨励費」、および国庫補助を受けて行われた。ここに記して感謝の意を表する。

付録 I 列車・橋梁応答の同期手法

通常、複数の振動計測システムのデータを同期させるためには、単純なオン・オフ信号を基準信号として、それぞれのシステムに基準信号を収録する方法が採用される。しかしながら、本研究で利用する実物大の列車・橋梁応答の計測では、基準信号用の有線ケーブルによる接続はもちろんのこと、無線通信による接続も通信距離の関係から困難となる。そこで、本研究ではGPS時刻装置を利用することで、別々の計測システムで収録した列車応答と橋梁応答を同期させる手法を構築する。これにより、橋梁通過中の列車応答と同時刻の橋梁応答を比較分析することが可能となる。

本研究ではGPS時刻装置に着目し、これを基準信号として採用する。GPS時刻装置は、原子時計を内部に搭載したGPS衛星から発信される標準時刻信号を暗号化したパルス信号(0Vと5Vの矩形波: 図-20)として出力する装置である。現在、市販されているGPS時刻装置が出力する標準時刻情報の精度は、GPS衛星から標準時刻を受信している時には標準時刻との誤差は

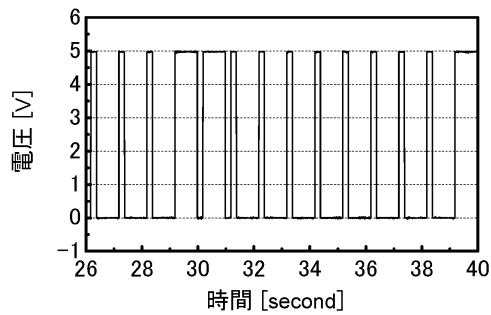


図-20 GPS 時刻装置の出力パルス信号

± 0.1 μ sec の範囲内であり、非受信時の誤差はその± 1ppm の範囲内である。

GPS 時刻装置が出力する標準時刻情報を利用した同期手法の説明を単純化するために、2つの振動計測システム A, B で収録したデータを同期させる場合を考える。もちろん、2つ以上のシステムを同期する場合であっても同様の考え方を適用することできる。両計測システムの各 1ch を GPS 時刻装置のパルス信号の入力用として割り当てる。計測システム A で収録したパルス信号の離散データを x_i ($i = 1, 2, \dots, N_A$)、計測システム B で収録したデータを y_j ($j = 1, 2, \dots, N_B$) と表す。つぎに、システム A の離散データ x_i に対して連続する任意の $T + 1$ 個 ($T + 1 \leq \min(N_A, N_B)$) の離散データを指定し、区間 $[i^*, i^* + T]$ ($1 \leq i^* \leq N_A - T$) を基準パルス信号と考える。この基準パルス信号をシステム B で収録したパルス信号に対して、 $j = 1$ から区間 $[j, j + T]$ ($1 \leq j \leq N_B - 1$) ごとに順次重ね合わせて、それらの誤差が最小となる j^* を算出する。具体的に記述すると、

$$j^* = \operatorname{argmin}_j \left\{ \sum_{k=0}^T (x_{i^*+k} - y_{j+k})^2 \right\} \quad (\text{I.1})$$

となる。ただし、 arg は式 (I.1) の右辺を最小にする j を指定する記号である。これは最小二乗法で両者の誤差が最小となる点を探索しているに過ぎない。以上の方法により、システム A と B のパルス信号 x_i^* と y_j^* は同期し、任意の x_i と $y_{\{i-(j^*-i^*)\}}$ が同期化されたデータとなる。なお、設定した任意区間 $[i^*, i^* + T]$ に対応するパルス信号がシステム B で収録されていない場合には同期化を図ることができない。このため、振動計測に際しては、計測対象とする振動現象の前後時間的な余裕を取って計測を行っておくことが望ましい。また、プログラミング上では、両システムで収録した GPS 時計のパルス信号の時系列データは PC 画面上に表示され、視覚的に任意区間 $[i^*, i^* + T]$ を設定することが可能であり、式 (3) による最適化が自動的に実施されるようになっている。

参考文献

- 1) 例えば, Los Alamos Laboratory: A Review of Structural Health Monitoring Literature: 1996-2001, LA-13976-MS, 2004.
- 2) 長山智則, B. F. Spencer, Jr., 藤野陽三: スマートセンサを用いた多点構造振動計測のためのミドルウェア開発, 土木学会論文集 A, Vol.65, No.2, pp.523-535, 2009.
- 3) 石井博典, 藤野陽三, 水野裕介, 貝戸清之: 営業列車の走行時の車両振動を用いた軌道モニタリングシステム (TIMS) の開発, 土木学会論文集 F, Vol.64, No.1, pp.44-61, 2008.
- 4) 須永陽一, 佐野修, 井出寅三郎: 高速新幹線における短波長軌道狂いの検出法, 鉄道総研報告, Vol.13, No.5, pp.11-16, 1999.
- 5) 水野裕介, 片岡慶太, 松本好弘, 長山智則, 藤野陽三: 鉄道営業列車による移動体センシングの加速度応答を用いた位置同定と軌道変位の検出, 土木学会論文集 F, Vol.66, No.3, pp.360-365, 2010.
- 6) 青木一也, 小田宏一, 児玉英二, 貝戸清之, 小林潔司: ロジックモデルを用いた舗装長寿命化のベンチマーキング, 土木技術者実践論文集, 土木学会, Vol.1, No.1, pp.40-52, 2010.
- 7) Yang, Y. B., Lin, C. W. and Yau, J. D.: Extracting bridge frequencies from the dynamic response of a passing vehicle, *Journal of Sound and Vibration*, No.272, pp.471-493, 2004.
- 8) Yang, Y. B. and Chang, K. C.: Extracting bridge frequencies from the dynamic response of a passing vehicle enhanced by the EMD technique, *Journal of Sound and Vibration*, No.322, pp.718-739, 2009.
- 9) Yang, Y. B. and Chang, K. C.: Extracting bridge frequencies from the dynamic response of a passing vehicle: Parametric study, *Journal of Engineering Structures*, No.31, pp.2448-2459, 2009.
- 10) 朝川皓之, 長山智則, 藤野陽三, 西川貴文, 秋本隆, 和泉公比古: 一般車両の走行時動的応答を利用した舗装路面の簡易状態評価システムの開発, 土木学会論文集 E1, Vol.68, No.1, pp.20-31, 2012.
- 11) 山本亨輔, 大島義信, 杉浦邦征, 河野広隆: 車両応答に基づく橋梁のモード形状推定法, 土木学会論文集 A1, Vol.67, No.2, pp.242-257, 2011.
- 12) 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.82-102, 2003.
- 13) 原恒夫, 吉岡修, 神田仁, 舟橋秀麿, 根岸裕, 藤野陽三, 吉田一博: 新幹線走行に伴う沿線地盤振動低減のための高架橋補強工の開発, 土木学会論文集, No.766/I-68, pp.322-338, 2004.
- 14) 西垣拓也, 須永用位置, 瀬川祥: 軸箱加速度による短波長領域の軌道狂いの評価, 第 10 回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, 日本機械学会, pp.173-176, 2003.
- 15) 貝戸清之, 松岡弘大, 渡辺勉, 曾我部正道, 藤野陽三: 走行列車荷重下における鉄道橋桁の動的応答の特性とその利用, 土木学会論文集 F, Vol.66, No.3, pp.382-401, 2010.
- 16) 宮下剛, 石井博典, 藤野陽三, 庄司朋宏, 関雅樹: レーザ計測を用いた鋼鉄道橋の高速走行により発生する局部振動の把握と列車速度の影響, 土木学会論文集 A, Vol.63, No.2, pp.277-296, 2007.
- 17) 松岡弘大, 貝戸清之, 渡辺勉, 曾我部正道: 走行列車荷重を利用した RC 鉄道高架橋の部材振動の同定と動的挙動の把握, 土木学会論文集 A1, Vol.67, No.3, pp.545-564, 2011.
- 18) 小林一行: MATLAB ハンドブック, 秀和システム, 2008.

- 19) Fryba, L.: *Vibration of Solids and Structures under Moving Loads*, Noordhoff International, 1972.
- 20) モード解析ハンドブック編集委員会: モード解析ハンドブック, コロナ社, 2000.
- 21) 池原雅章, 島村徹也: MATLAB マルチメディア信号処理 上, 培風館, 2004.
- 22) 姜興起, 金明哲: ベイズ統計データ解析, 共立出版, 2010.
- 23) Primiceri, G. E.: Time varying structural vector autoregressions and monetary policy, *Review of Economic Studies*, Vol.72, pp.821-852, Northwestern University, 2002.
- 24) 加藤比呂子, 石黒真木夫: 多変量時系列モデルによる経済システムの動的解析, *統計数理*, Vol.45, No.2, pp.301-318, 1997.
- 25) 樋口知之: 非経済時系列データの季節調整法について, *統計数理*, Vol.45, No.2, pp.319-328, 1997.
- 26) 北川源一郎: 時系列解析入門, 岩波書店, 2005.

(2011. 11. 24 受付)

IDENTIFICATION OF THE VIBRATION PROPERTIES OF BRIDGE USING THE AXLE ACCELERATION RESPONSE OF A RUNNING TRAIN

Kodai MATSUOKA, Kiyoyuki KAITO, Munemasa TOKUNAGA, Tsutomu WATANABE
and Masamichi SOGABE

In this study, the authors attempted to extract the vibration characteristics of a railway bridge from the axle acceleration response of a running train, in order to provide fundamental information for movable monitoring. Firstly, a passing train test was conducted using actual trains and bridges, to extract predominant frequency, which can be observed only when a train passes a bridge, from the frequency characteristics of axle acceleration, and their repeatability and speed dependency were checked. Then, the extracted frequency and the natural frequency of the bridge were compared to identify the predominant mode and clarify the effects of train speed and direction, etc. on natural frequency. In addition, using the acceleration response measured at a bridge, the variation in the components of the predominant mode of the bridge was analyzed. As a result, it was found that the natural frequency of the bridge around 82Hz contributes to the development of the predominant frequency of the train axle.