

# 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

松岡 弘大<sup>1</sup>・貝戸 清之<sup>2</sup>・渡辺 勉<sup>3</sup>・曾我部 正道<sup>4</sup>

<sup>1</sup>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

<sup>2</sup>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 (同上)

E-mail: kaito@ga.eng.osaka-u.ac.jp

<sup>3</sup>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

<sup>4</sup>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 (同上)

E-mail: sogabe@rtri.or.jp

列車の急速な高速化に伴い、RC鉄道高架橋、およびその構成部材においても、共振の発生とこれに伴う構造物音への対応が必要となってきた。本研究では、構造物音の評価や予測に不可欠なRC鉄道高架橋の部材振動特性を明らかにするために、実際のRC桁式高架橋とRCラーメン高架橋のスラブ部材を対象とした列車走行試験を行い、振動特性を同定した。これにより、RC桁式高架橋では130Hz付近で中間スラブ、RCラーメン高架橋では50Hzを超える周波数帯域で同じく中間スラブの局所的な部材振動モードが存在することを確認した。さらに、これらの部材振動モードは車軸間隔との高次共振により列車走行時に卓越成分を形成することを実証的に明らかにした。

**Key Words :** *local member vibration, passing train load, dynamic properties, identification, field testing*

## 1. はじめに

鉄道橋において、列車の高速走行に起因する共振現象は極めて重要な工学的課題である<sup>1)~3)</sup>。鉄道橋の共振現象は、多数車両で編成される列車の走行荷重が周期性を有する加振源となるために、列車速度の増加とともに橋梁・高架橋(以下、高架橋)の固有振動と近接することによって発生する<sup>4)~5)</sup>。しかし、これらは列車走行時に生起する現象であるために、走行列車荷重が作用する状況の下で、高架橋の固有振動数や振動モード形といった振動特性を把握することが重要となる。

特に、高速鉄道は継続的かつ急速な速度向上を果たしており<sup>6)~7)</sup>、比較的単純な橋梁の全体1次曲げの共振現象だけでなく、より局所的で複雑な部材レベルの共振現象の発生可能性も指摘されている<sup>8)~9)</sup>。部材レベルでの共振は、部材の動的応答を増大させるだけでなく、鉄道騒音の一種である構造物音の音源となる。構造物音のエネルギーは一般的に列車速

度に対して2~3乗程度の依存性を有するために<sup>10)</sup>、列車速度が300km/h以上となる場合には部材レベルでの共振が構造物音の発生原因となることが懸念される<sup>10)~11)</sup>。したがって、これまで構造物音が問題となることが少なかった鉄筋コンクリート高架橋(以下、RC高架橋)、およびその構成部材においても構造物音への対応が必要となってきた<sup>12)</sup>。RC高架橋は、盛土に代わる連続立体構造として、高速鉄道路線で多用されていることから、RC高架橋における構造物音の顕在化は、今後の鉄道の高速化にとって深刻な問題となる。しかしながら、部材単位に着目した振動特性に関する研究は蓄積が乏しい。効率的な対策に必要な、構造物音の音源部材の振動モード形については、ほとんど解明されていないのが現状である<sup>13)</sup>。

以上の問題意識のもと、本研究では高速鉄道路線を構成するRC高架橋の列車走行時の部材振動特性と、共振速度を明らかにすることを目的とする。はじめに、未知外力作用下における振動特性の同定手

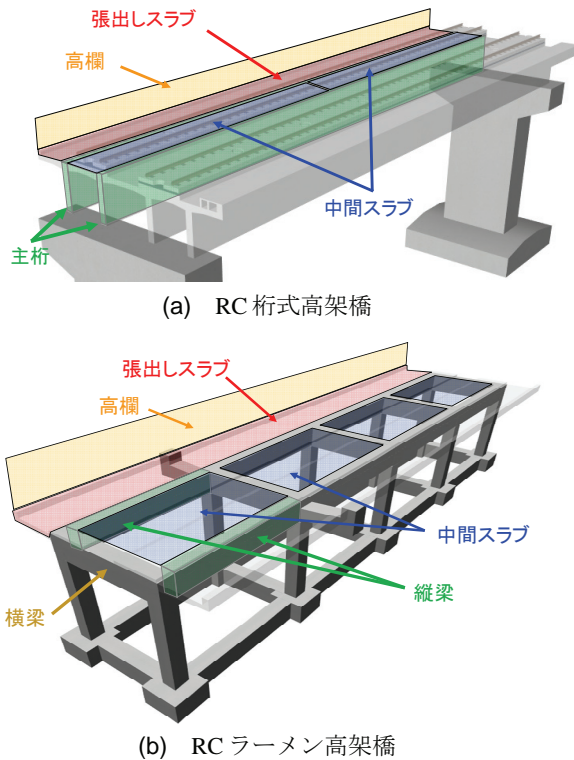


図-1 RC 高架橋と構成部材

法を列車走行時の橋梁の加速度応答に適用するとともに、その信頼性をインパルスハンマーを用いた衝撃加振試験との比較により検証する。また、走行列車荷重を加振源として用いた際に、固有振動数と振動モード形を高精度に同定するための経験的方法を提示する。さらに、同定結果を部材振動の簡易算定式、および固有値解析により算出した理論値と比較することで、振動特性の妥当性を検証したうえで、これらの部材振動モードと走行列車との共振について分析する。

## 2. 検討方法

### (1) 対象橋梁

近年建設されている高速鉄道路線では盛土代替として高架橋が多く採用されている。代表的な構造物としては RC 桁式高架橋 (図-1(a))、RC ラーメン高架橋 (図-1(b)) があげられ<sup>14)16)</sup>、本研究でもこれら2つの高架橋形式を対象とする。

当該高架橋形式には、コスト低減と施工期間の短縮を目的に、標準設計が導入されている<sup>14)16)</sup>。例えば、図-1(b)に示す当該路線の RC ラーメン高架橋では、層構造、連続径間数、背割り式とゲルバー式などの項目を、周辺環境区分、雪荷重の有無、地盤や立地などの各条件に合わせて選定する。標準設計を用いた場合でも、部材断面は満たすべき保有性能

表-1 対象橋梁の構造諸元

(a) RC 桁式高架橋

構造形式	RC2 主 T 桁式 単線高架橋
支承形式	線支承, ゴム支承
地盤種別	G4
径間長	20.00 m
幅員	6.05 m
橋脚高さ	8.00m
設計基準強度	24.0 N/mm <sup>2</sup>
ヤング係数	25.0 kN/mm <sup>2</sup>
橋梁単位重量	269.8 kN/m

(b) RC ラーメン高架橋

構造形式	3 径間 RC ラーメン形式 複線高架橋
基礎, 杭形式	連結基礎, 独立杭
地盤種別	G2
径間長	7.88+8.10+7.88 m
幅員	11.60m
柱高さ	10.00 m
設計基準強度	27.0 N/mm <sup>2</sup>
ヤング係数	26.5 kN/mm <sup>2</sup>
上部構造コンクリート単位重量	291.8 kN/m
柱コンクリート単位重量	27.0 kN/m
基礎コンクリート単位重量	44.2 kN/m

により多少変化するが、縦梁 (図-1(b)中の緑色部) や中間スラブ (青色部) は、設計を左右する列車荷重が同一であること、部材厚の決定要因である柱間隔がほとんどの RC ラーメン高架橋で 8m 程度であることから、基本的には同様の断面となる傾向にある。具体的には、中間スラブでは、部材厚 280mm の板部材が用いられている。また、張出しスラブ (赤色部) の部材厚に関しても、負担重量、張出し長によりいくつかの組合せが存在するものの、付根部で 430mm、先端部で 200mm の板部材が大多数を占める傾向にある<sup>14)15)</sup>。

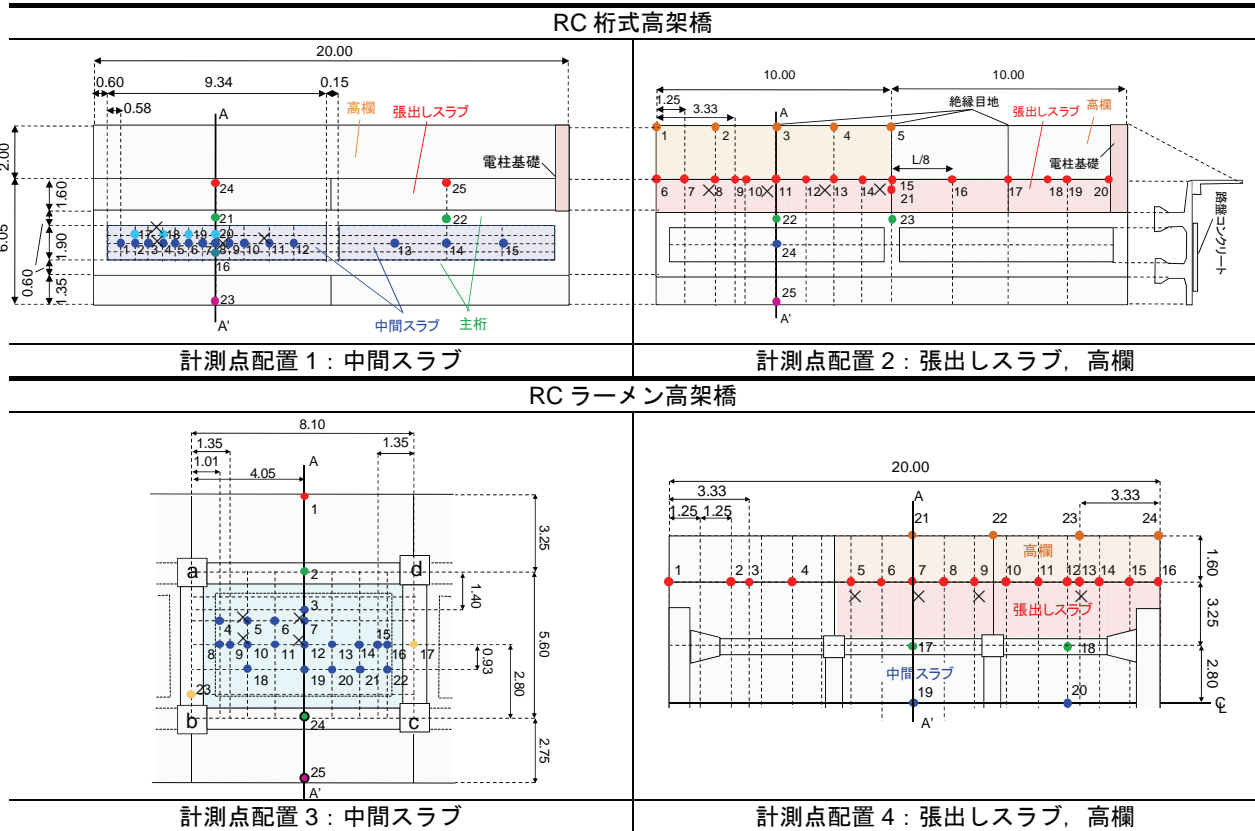
一方、図-1(a)に示す RC 桁式高架橋の標準設計では、径間長とともに桁高が変化するが、中間スラブ、張出しスラブの部材寸法は大きく変化しない。また、場所打ちによる RC 桁の最長径間が 20m であることや、橋脚建設などの経済的な理由から、RC 桁式高架橋では径間長 20m の割合が高い<sup>14)15)</sup>。

以上より、これらの高架橋の上部構造に対する振動特性を精緻に把握することで、既設の大多数の橋梁・高架橋の部材振動に関する共通の知見を獲得することができる。具体的な振動計測対象として、1) 標準的な径間長 20m の RC2 主 T 桁式の単線高架橋、2) 全長 25m の 3 径間連続 RC ラーメン形式の複線高架橋を選定し、特に部材厚が薄く、大きな動的応答が励起されやすいスラブ部材 (中間スラブ、

表-2 加振源の諸元

加振方法	加振源の諸元	加振回数
インパルスハンマーによる衝撃加振	ハンマ重量 : 5.5kg 振幅レンジ : 22kN 加振周波数範囲 : 0~500Hz 感度 : 0.22mV/N	各部材 4 点 × 3 回
走行列車荷重	車両編成 : 10 両, 16 両 最大軸重 : 13,200kg, 12,200kg 走行速度 : 156~269km/h	各部材 6~8 本

表-3 対象部材と計測点配置



● : 計測点, × : インパルスハンマーによる衝撃加振位置, 単位 : m

張出しスラブ) を中心とする部材振動に着目する。対象とした2つの高架橋の構造諸元を表-1に示す。RC 桁式高架橋は、地盤種別<sup>17)</sup>が G4 と比較的軟弱地盤に建設されており、支承にはゴム支承が採用されている。一方で、RC ラーメン高架橋は比較的堅固な G2 地盤上に建設されている。

(2) 試験方法

本研究では上述の高架橋を対象とした振動試験の加振源として、走行列車荷重を利用した(列車走行試験)。また列車走行試験結果との比較を目的にインパルスハンマーによる衝撃加振試験(インパルスハンマー試験)も併せて実施した。これらの加振源の諸元を表-2に示す。インパルスハンマー試験では、人力により対象部材に衝撃加振力を加えることで振動を励起する。1つの部材に対して加振点を4

点設け、加振点ごとに3回の計測を実施している。一方で、列車走行試験では、当該路線を走行する高速列車を加振源として採用した。走行列車は10両、もしくは16両の車両により編成される。スピードガンにより計測した列車の走行速度は、ほとんどの列車が約250km/hであったが、150km/h程度の列車も一部で存在した。列車走行試験は各部材でそれぞれ6~8本の走行列車を利用して実施した。

(3) 計測方法

対象部材である中間スラブ、張出しスラブを中心に計測点を多点配置した。計測点の配置状況、およびインパルスハンマーでの衝撃加振位置を表-3にそれぞれ示す。いずれも25台の加速度計により25点の計測点を設けている。本研究では、部材の高次モード成分、特に振動モード形の把握を目的として、

20 点程度を対象部材に割り当てるとともに、振幅および周波数特性を相対的に比較するために他部材にも 5 点程度の計測点を設けた。特に中間スラブは、振動モード形を面的挙動として捉える必要があるために、橋軸直角方向にも計測点を分散させて配置した。また、いずれの高架橋においても張出しスラブは、複数のスラブが連続的に組み合わされた構造となっている。これらのスラブ間は絶縁目地となっており、鉄筋などによる構造的連結はなされていない。本研究では各スラブ同士が連成して振動するモードに着目することとし、すべてのスラブに計測点を配置した。さらに騒音の発生源となる可能性を有する高欄にも計測点を 4, 5 点配置している。なお、高欄のみ線路直角方向の加速度を計測し、それ以外は鉛直方向の加速度を計測した。

列車走行に伴い、加速度振幅の増大が想定されたこと、200Hz 程度までの高次モードを同定対象としたことから加速度計として圧電型加速度計（感度：6.42pC/(m/sec<sup>2</sup>）、応答振動数：1~7,000Hz）を用いた。各点で計測された加速度応答はサンプリング周波数 2kHz で AD ボードを介してノート PC に収録される。このとき、1kHz 以上の周波数成分はアンチエイリアシングフィルターにより除去した。

#### (4) 振動特性の同定手法

本研究では、計測した加速度応答に対して、クロススペクトル法<sup>18), 19)</sup>を適用することで各部材の振動モードを同定する。手法の詳細は参考文献 19)に譲るが、読者の便宜を図るために概要を説明する。当該手法では、はじめにすべての計測点 ( $i=1,2,\dots$ )の中から 1つの計測点  $k$  を基準計測点として選定する。外力を白色雑音と仮定することで、構造物の  $n$  次固有振動数  $\omega_n$ (Hz)付近において、基準計測点  $k$  のモード振幅を 1 とする振動モード形  $\varphi_i(\omega_n)$ は、

$$\varphi_i(\omega_n) \approx \frac{A_i(\omega_n) \cdot \overline{A_k(\omega_n)}}{|A_k(\omega_n)|^2} \quad (1)$$

と近似できる。なお、式中、 $A_i(\omega)$ は計測点  $i$  のフーリエスペクトルを、 $A_k(\omega)$ は基準計測点  $k$  のフーリエスペクトルを、 $\overline{A_k(\omega)}$ は  $A_k(\omega)$  の複素共役を表す。これにより、振動モード形の候補を抽出したうえで、理論モード形を利用した MAC 検定<sup>20)</sup>に基づいて、固有振動数および振動モード形を同定することができる。クロススペクトル法は、モード減衰比を同定できない反面、振動モード形を精度良く同定できるという特徴を有している<sup>19)</sup>。一方で、高次モードまでを対象とする場合には節となる計測点が

不明確となるために、基準計測点の選定には留意が必要である。本研究では対象部材内のすべての計測点を基準計測点候補とし、同定可能なモード数と MAC 値を勘案したうえで、基準計測点を選定した。

なお、周期性を有する走行列車荷重を加振源として利用することで発生する問題点として、構造物固有の振動モードとは異なる、加振周期に起因する疑似モード<sup>20)</sup>の混入があげられる。走行列車による加振の影響により、構造物のスペクトルには、

$$f_v = v/L_v \quad (2)$$

で表される基本振動数  $f_v$  (Hz)の整数倍で卓越成分が形成されることになる<sup>1), 4)</sup>。同定に際してはこの疑似モードに留意する必要がある。なお、 $v$  (m/sec)は走行列車の速度、 $L_v$ は車両 1 両の長さ(m)、もしくは車軸間隔(m)を表す。

#### (5) 部材振動の理論的算定方法

同定結果の妥当性を検証するために、理論式、および固有値解析により固有振動数を算出し、同定結果との比較を行う。

比較的単純な 1 次モードの固有振動数は、既往の研究<sup>9)</sup>でも適用されている構造力学公式集<sup>21)</sup>の理論式に従い算出する。式(3)に張出しスラブ 1 次モードを想定した片持ち梁の固有振動数算定式を、式(4)に全体 1 次モードを想定した単純梁の固有振動数算定式を、式(5)に中間スラブ 1 次モードを想定した 4 辺単純支持、および固定支持の平板の固有振動数算定式をそれぞれ示す。

$$\omega_n = \frac{1}{2\pi\lambda^2} \sqrt{\frac{3EI \cdot g}{\rho A(\mu + 0.23)}} \quad (3)$$

$$\omega_n = \frac{1}{2\pi\lambda^2} \sqrt{\frac{48EI \cdot g}{\rho A(\mu + 0.49)}} \quad (4)$$

$$\omega_n = \frac{k\pi}{2a^2} \sqrt{\frac{EI \cdot g}{\rho \cdot h}} \quad (5)$$

ここに、 $\lambda$ は張出し長、径間長(m)、 $E$ は部材のヤング係数(kN/m<sup>2</sup>)、 $I$ は部材の断面 2 次モーメント(m<sup>4</sup>)、 $g$ は重力加速度(m/sec<sup>2</sup>)、 $A$ は部材の断面積(m<sup>2</sup>)、 $\rho$ は部材の単位重量(kN/m<sup>3</sup>)、 $\mu(=m/\rho A\lambda)$ 、 $m$ は(張出しスラブ先端の高欄重量を意味する)集中重量(kN)、 $h$ は部材厚(m)、 $k(=\alpha \times b/a)$ は長辺、短辺比率と支持条件による係数で、 $a$ は短辺長さ(m)、 $b$ は長辺長さ(m)、 $\alpha$ は支持条件に応じた係数をそれぞれ表す。なお、部材のヤング係数  $E$ 、単位重量  $\rho$ 、断面積  $A$ 、部材厚  $h$  は設計値を用いる。 $\alpha$ の詳細は文献 21)を

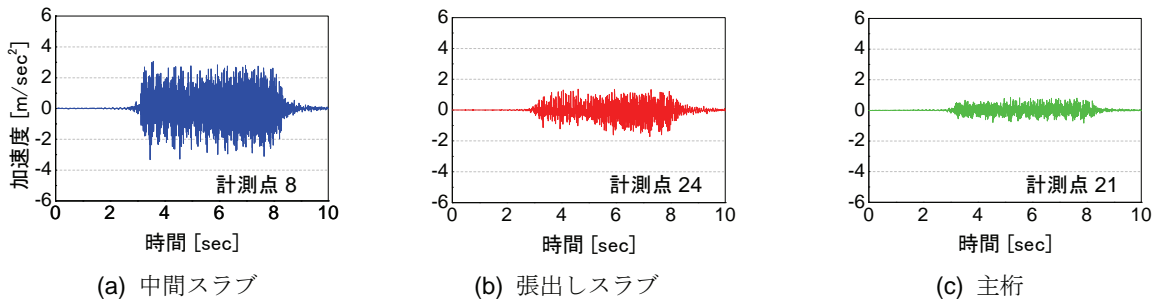


図-2 加速度応答 (RC 桁式高架橋, 走行列車: 16両編成, 262km/h, 下り)

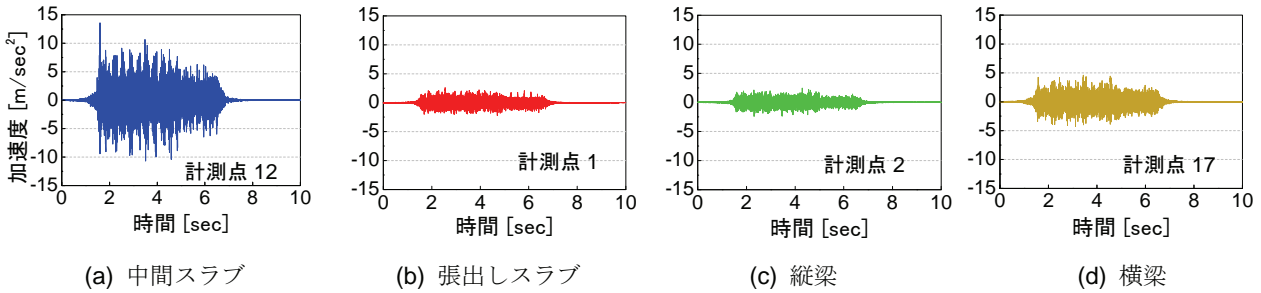


図-3 加速度応答 (RC ラーメン高架橋: 走行列車: 16両編成, 267km/h, 下り)

参照されたい。2次以上の部材振動の固有振動数の算定には固有値解析<sup>22)</sup>を用いた。本研究では、対象部材のみの簡易な有限要素モデルを作成し、固有値解析を実施した。いずれの部材も三角形シェル要素を用いてモデル化している。境界条件は、中間スラブが4辺固定支持、張出しスラブが1辺固定支持、および1辺固定、2辺単純支持とした。また、解析モデルのメッシュ分割は、対象部材の固有振動数とモード形状が再現できるように、最大でも0.4m程度としている。中間スラブでは既往の研究<sup>9)</sup>により路盤コンクリートが固有振動数に影響を及ぼすことが指摘されている。これを踏まえ、文献9)と同様に路盤コンクリートの剛性を理論式、固有値解析にそれぞれ考慮している。なお、路盤コンクリートの断面は線路方向に一様と仮定したうえで設計値から算出し、目地の影響は考慮していない。

### 3. 振動計測と振動特性の同定

#### (1) 振動計測結果

各橋梁で実施した列車走行試験結果の一例として、RC桁式高架橋(計測点配置1)で計測した加速度応答を図-2(中間スラブ:青,張出しスラブ:赤,主桁:緑)に、RCラーメン高架橋(計測点配置3)で計測した加速度応答を図-3(中間スラブ:青,張出しスラブ:赤,縦梁:緑,横梁:黄)に、それぞれ示す。図-2に示すRC桁式高架橋において、走行列車荷重により励起される最大振幅は、中間スラブで $3\text{m/sec}^2$ 程度であり、張出しスラブ、主桁と

比較して数倍大きくなっている。主桁の最大加速度振幅が $1\text{m/sec}^2$ 程度であることと比較すると、想定通り、中間スラブで大きな振動が励起されていることがわかる。また、図-3のRCラーメン高架橋における最大振幅は、中間スラブで約 $14\text{m/sec}^2$ であり、他の部材と比較して極めて大きい。一方で、板部材であることから比較的大きな振幅が予想された張出しスラブよりも、横梁の最大加速度振幅が倍程度大きくなっている。RCラーメン高架橋は複線橋であるために、列車の進行方向により主桁、張出しスラブの最大振幅は $2\sim 4\text{m/sec}^2$ の範囲で変動するが、ここで述べた基本的な傾向はいずれの列車通過時でも同様であった。なお、RCラーメン高架橋では、横梁の振幅が比較的大きいことを加味し、横梁を対象とした列車走行試験、および同定を実施したが、同定したほとんどのモードが疑似モードであったことから、記述は割愛する。

図-4、図-5にはインパルスハンマー試験により得られた加速度応答の一例として、計測点配置1のもとで計測点8付近を加振した際のRC桁式高架橋の中間スラブ(計測点8)、および計測点配置3のもとで計測点12付近を加振した際のRCラーメン高架橋の中間スラブ(計測点12)の加速度応答をそれぞれ示す。衝撃加振時に最大振幅を示し、次第に減衰していく自由振動応答を見て取ることができる。加振位置により最大振幅を示す計測点は異なるものの、全ケースで同様の傾向を確認している。

つぎに、計測した加速度応答のパワースペクトルの一例として、RC桁式高架橋の計測点配置1における計測点8のパワースペクトルとRCラーメン高

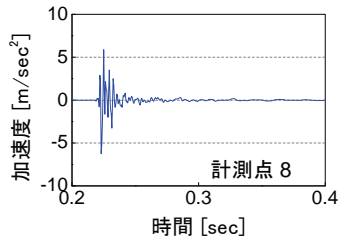


図-4 加速度応答

(RC 桁式高架橋：インパルスハンマー試験)

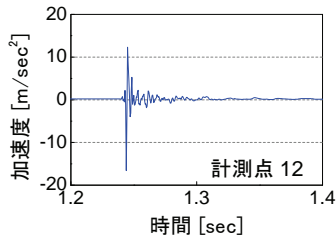
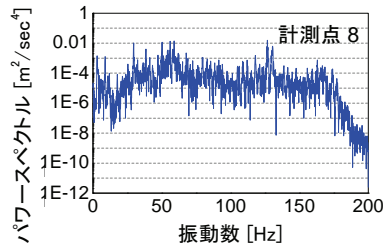
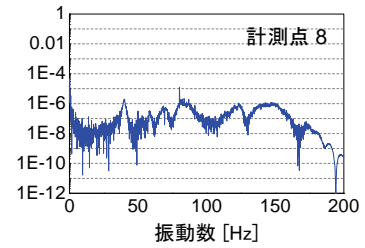


図-5 加速度応答

(RC ラーメン高架橋：インパルスハンマー試験)

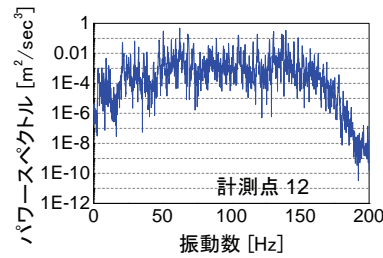


(a) 列車走行試験

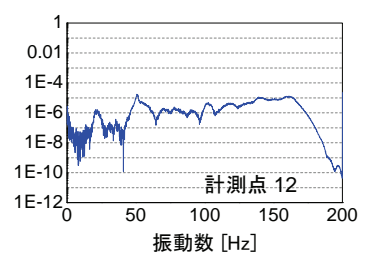


(b) インパルスハンマー試験

図-6 パワースペクトル (RC 桁式高架橋)



(a) 列車走行試験



(b) インパルスハンマー試験

図-7 パワースペクトル (RC ラーメン高架橋)

架橋の計測点配置 3 における計測点 12 のパワースペクトルを図-6、図-7 にそれぞれ示す。各図(a)の走行列車荷重は、各図(b)のインパルスハンマー加振と比較して、200Hz までのいずれの周波数帯でも大きなエネルギーを有しているとともに、インパルスハンマー加振とは異なり、連行荷重に起因する無数の線スペクトル状の卓越成分を確認することができる<sup>18),19)</sup>。

## (2) インパルスハンマー試験による同定結果

列車走行試験とインパルスハンマー試験により得られた加速度応答に対して、それぞれクロススペクトル法を適用することで、各橋梁の全体系と部材(中間スラブ、張出しスラブ、高欄)の固有振動数と振動モード形を同定した。

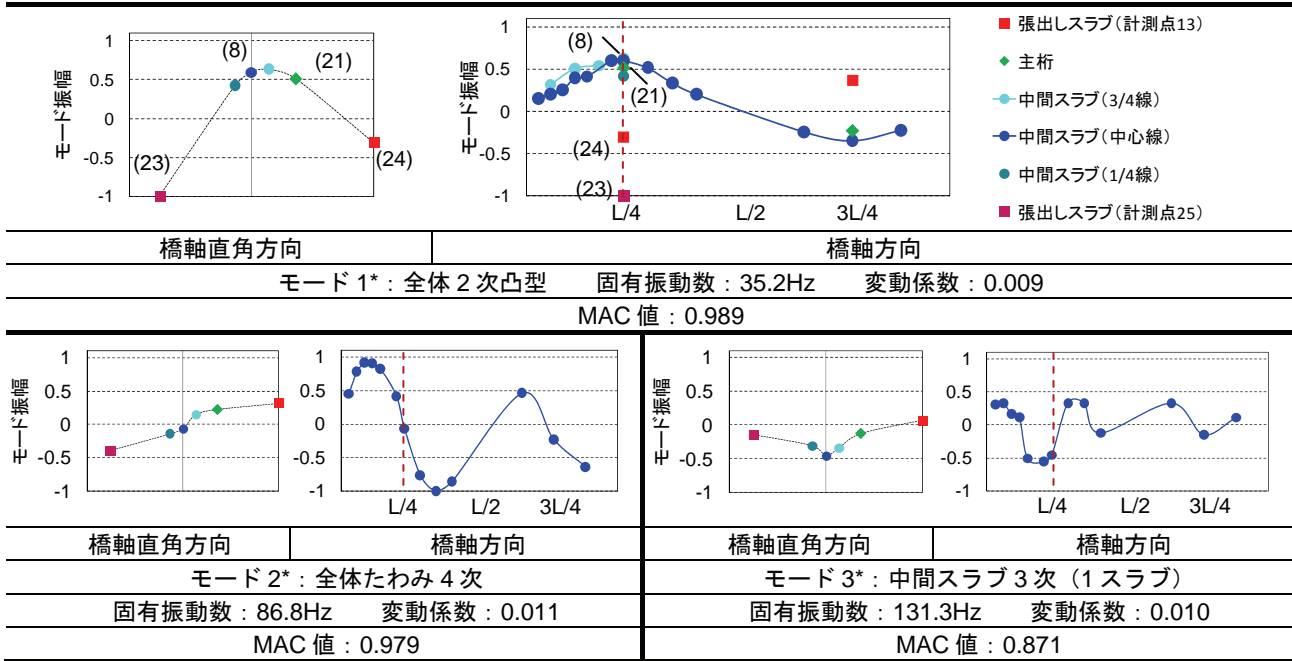
### a) RC 桁式高架橋

列車走行試験に先立って実施したインパルスハンマー試験の同定結果(固有振動数、変動係数、振動モード形、MAC 値)を表-4、表-5 に示す。なお、MAC 値は 1 に近いほど理論モード形に近い形状を有していることを意味する。各モードの振動モード形は、同時に計測を行った他部材も記載し、モード振幅の最大値が 1 となるように基準化している。同表中には橋軸方向だけでなく、橋軸直角方向として表-3 中の A-A'断面の振動モード形を記載している。また、凡例は紙面の都合上、最初のモードにのみ記載する。表-5 の高欄に対するモード振幅(橙三角)は外側への加速度を正とした線路直角方向のモ

ード振幅を表している。さらに、変動係数は全 12 回のインパルスハンマー試験の固有振動数の標準偏差を平均で除した値を表す。なお、本研究では、表-4、表-5 中に示すように、各部材で同定された振動モードをモード 1、モード 2 というように、固有振動数の低い順に、便宜的に定義して示すとともに、その後に各振動モードに対する工学的な解釈(例えば、中間スラブ 3 次など)を加えることとする。また、\*の付いている振動モードはインパルスハンマー試験と列車走行試験で同一の振動モード形が同定されている振動モードを表す。これらの表記は以降も同様とする。

中間スラブを対象とした場合では 3 種類、張出しスラブと高欄を対象した場合では 5 種類の振動モードが同定可能であった。特に、中間スラブのモード 3 (131.1Hz) は橋軸方向に梁の 6 次モードを示しているが、他の部材のモード振幅が 0 に近いことから、中間スラブのみが卓越する部材固有の振動モードであると考えられる。当該橋梁は 2 枚の中間スラブで構成されているため、中間スラブ 1 枚当たりでは梁の 3 次モードである。張出しスラブでは、モード 4 のように 9.1Hz と比較的低次であっても部材振動が励起されていることがわかる。張出しスラブは電柱基礎により桁端部の境界条件(支承条件)が不明確であったために、1 辺(主桁側)固定支持の場合の理論モードの他に、1 辺(主桁側)固定、2 辺(桁両端)単純支持の場合の理論モードも同定に用いた。同定結果では 38.5Hz のモード 8 で桁端部のモード

表-4 インパルスハンマー試験による同定結果 (RC桁式高架橋: 中間スラブ)



\*: インパルスハンマー試験と列車走行試験にて同一の振動モード形が同定されている振動モード (以降の表でも同様)

表-5 インパルスハンマーによる同定結果 (RC桁式高架橋: 張出しスラブ, 高欄)

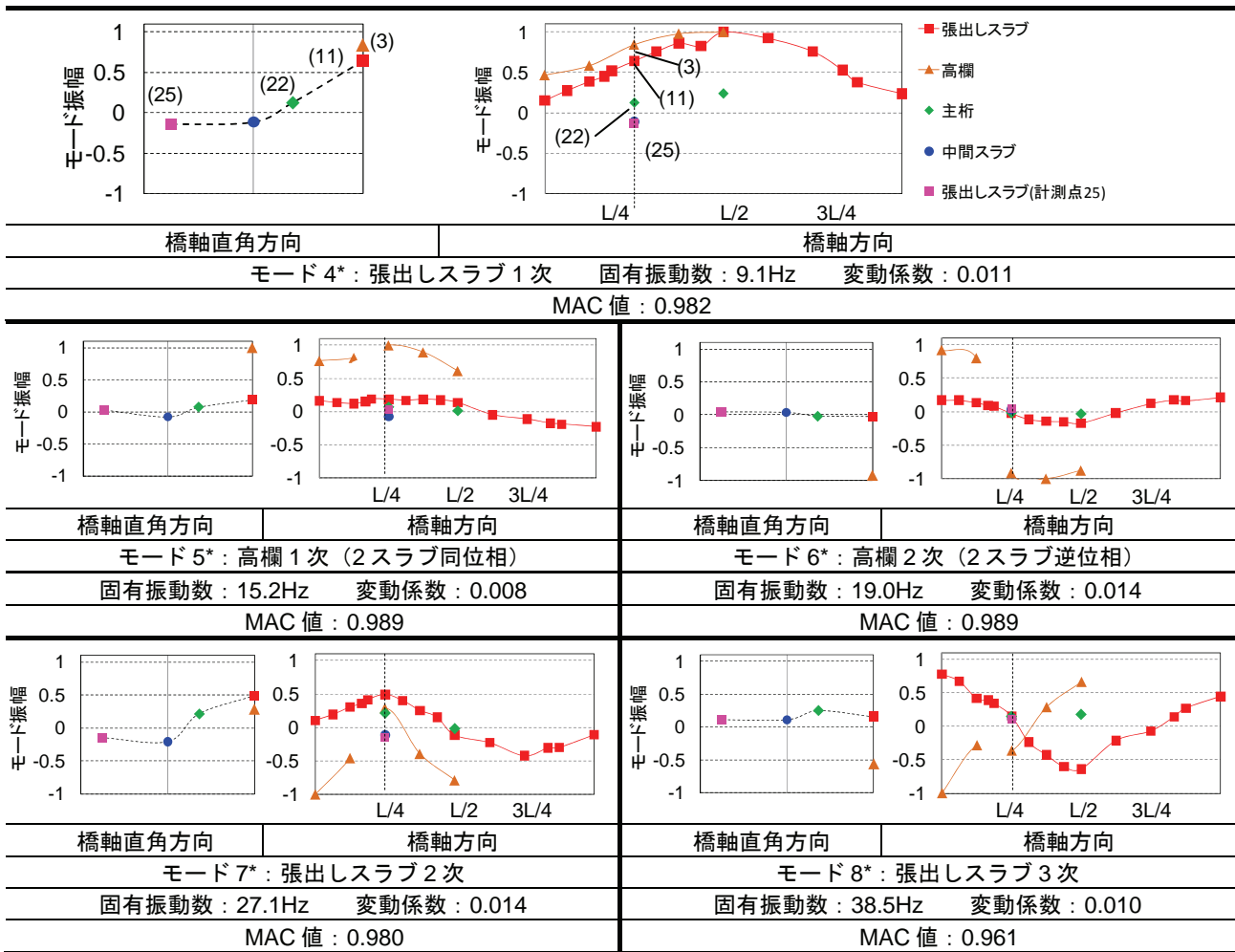


表-6 インパルスハンマー試験による同定結果 (RC ラーメン高架橋: 中間スラブ)

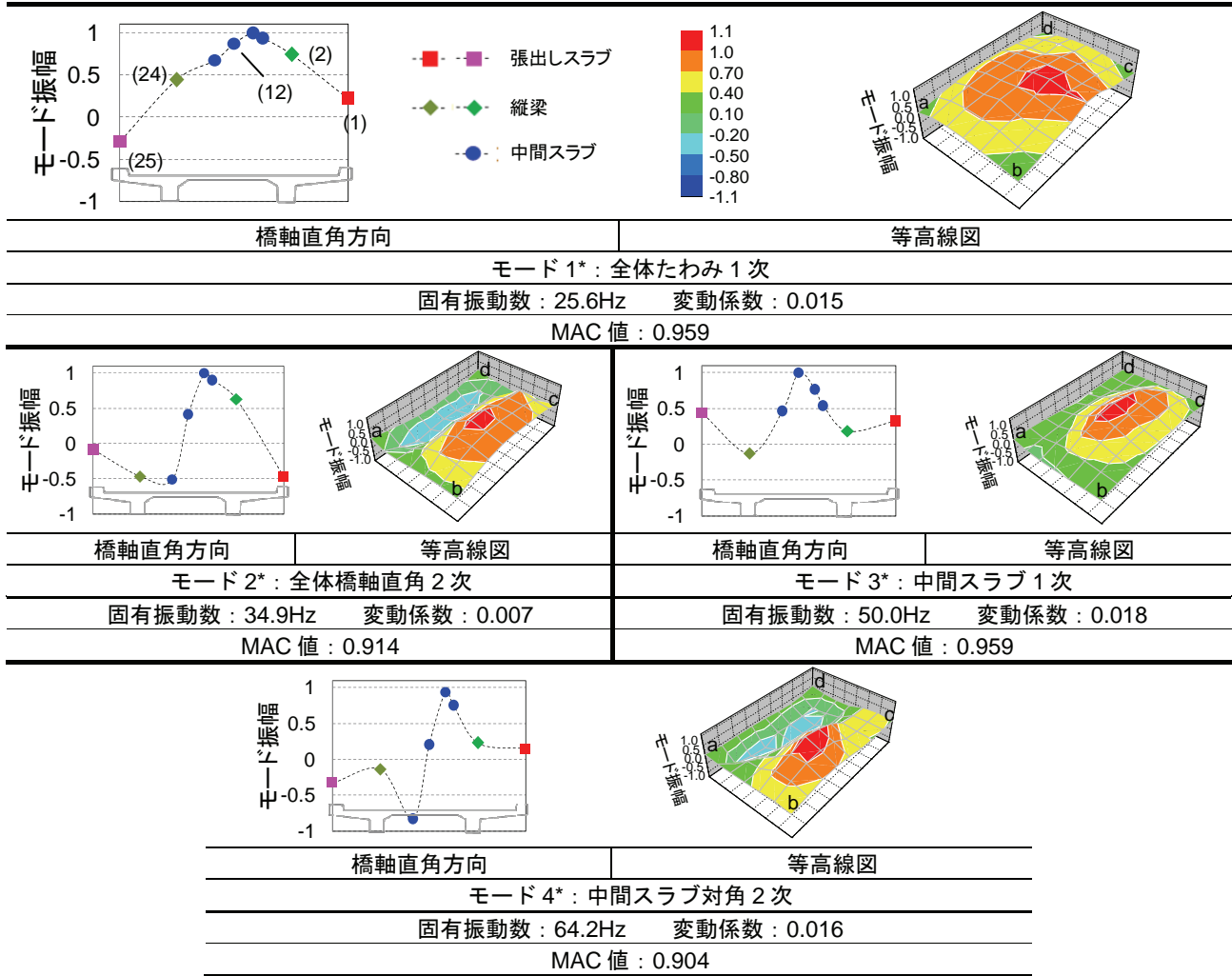


表-7 インパルスハンマー試験による同定結果 (RC ラーメン高架橋: 張出しスラブ, 高欄)

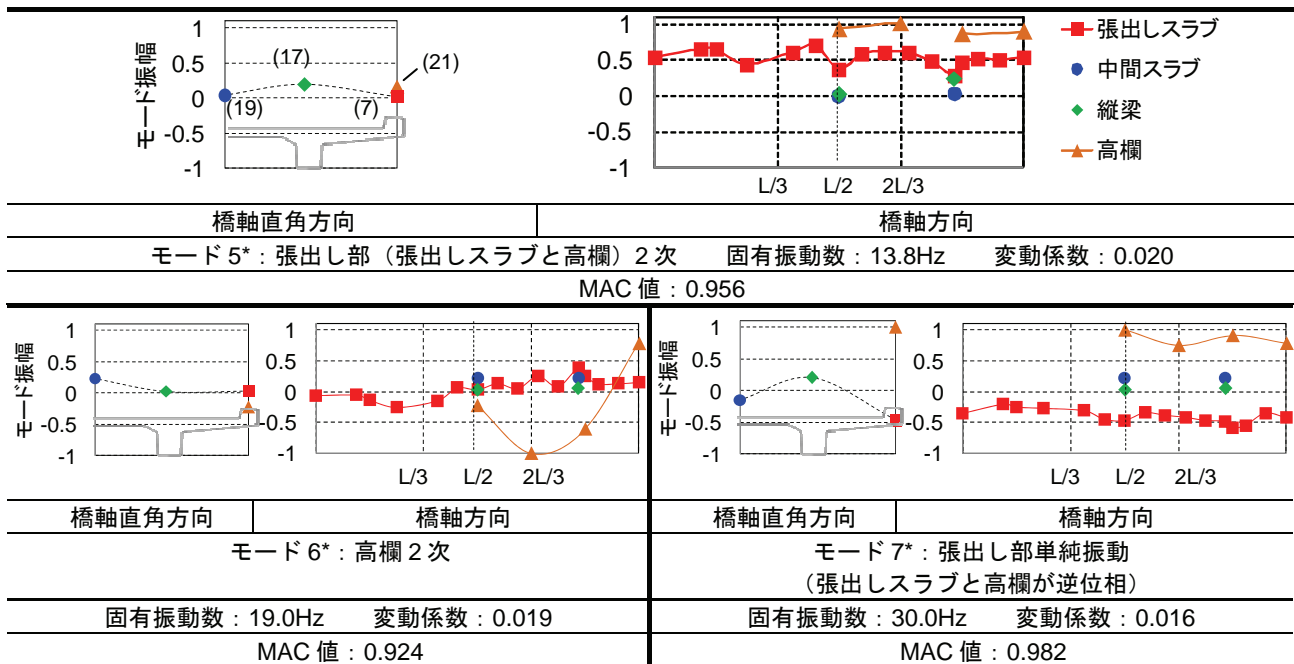




表-8 列車走行試験による同定結果 (RC 桁式高架橋 : 中間スラブ)

橋軸直角方向	橋軸方向	橋軸直角方向	橋軸方向
モード 1 : 全体たわみ 1 次		モード 2 : 全体ねじれ 1 次	
固有振動数 : 6.5Hz 変動係数 : 0.036		固有振動数 : 12.3Hz 変動係数 : 0.029	
MAC 値 : 0.998		MAC 値 : 0.993	
橋軸直角方向	橋軸方向	橋軸直角方向	橋軸方向
モード 3 : 全体たわみ 2 次 + 張出しスラブ 2 次		モード 4* : 全体ねじれ 2 次	
固有振動数 : 24.5Hz 変動係数 : 0.028		固有振動数 : 30.1Hz 変動係数 : 0.028	
MAC 値 : 0.996		MAC 値 : 0.986	
橋軸直角方向	橋軸方向	橋軸直角方向	橋軸方向
モード 5* : 全体 4 次 (橋軸直角方向 2 次)		モード 6* : 中間スラブ 3 次 (1 スラブ)	
固有振動数 : 81.3Hz 変動係数 : 0.019		固有振動数 : 131.5Hz 変動係数 : 0.035	
MAC 値 : 0.983		MAC 値 : 0.971	

※計測点配置 2 と重複したモード 7 の掲載を省略している。

振幅が大きくなっている。

### b) RC ラーメン高架橋

RC ラーメン高架橋を対象として実施したインパルスハンマー試験の同定結果 (固有振動数, 変動係数, 振動モード形, MAC 値) を表-6, 表-7 に整理する。表-6 の中間スラブは, 振動モード形を面的挙動として捉えるために等高線図で示している。等高線図は中間スラブを橋軸方向に 8 メッシュ, 橋軸直角方向に 6 メッシュで分割し, 各節点の座標と計測点が一致する場合は実測値を, それ以外では周辺の実測値で平均化することで座標値を補間している。各柱上部 (表-3 中の地点 a, b, c, d) のモード変位は 0 と仮定した。同表中には, 表-3 中の A-A' 断面のモード形をともに記載している。表-7 には, 張出しスラブと高欄の同定結果を示している。橋軸直角方向の振動モード形は表-3 に示す計測点配置 4 の A-A' 断面を切り出したものである。また, 高欄のモード振幅 (橙三角) は外側への加速度を正とした線路直角方向のモード振幅を表している。

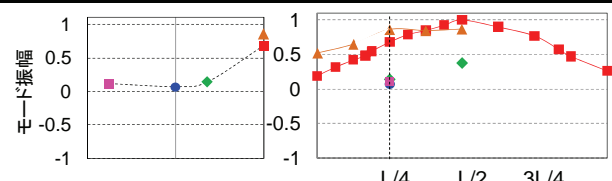
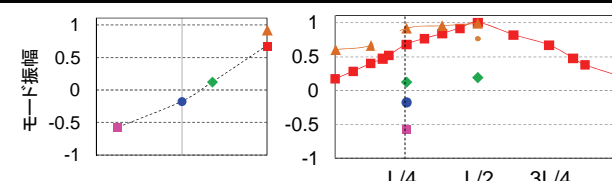
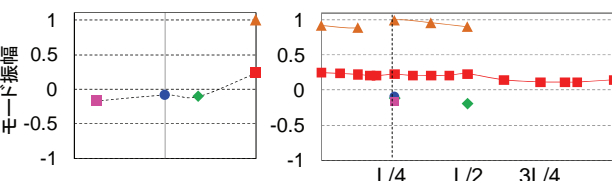
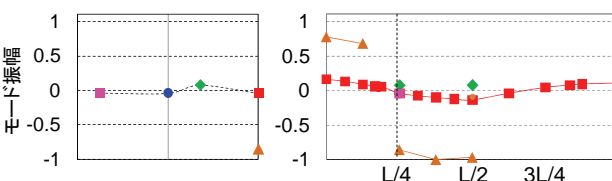
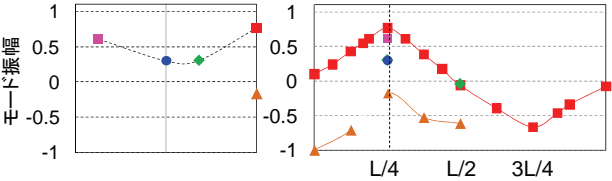
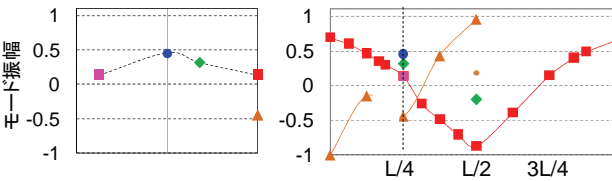
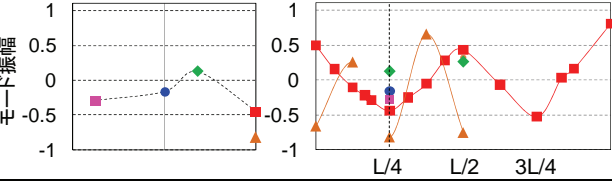
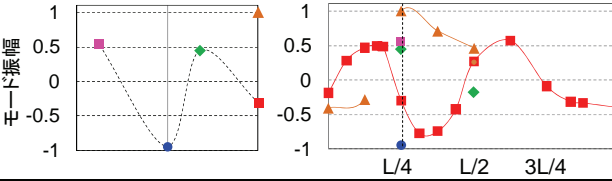
インパルスハンマー試験により当該橋梁では, 中間スラブで 4 種類, 張出しスラブ, 高欄で 3 種類の振動モードが同定可能であった。中間スラブの振動モードにおいては, モード 3 (50.0Hz) とモード 4 (64.2Hz) で, 縦梁のモード振幅が 0 に近いことから, 中間スラブのモード振幅が卓越した部材固有の振動モードと考えられる。つぎに表-7 の張出しスラブと高欄を対象とした同定結果を見ると, 各部材のモード振幅からモード 6 (19.0Hz) は高欄の部材振動モードであると考えられる。一方, モード 5 (13.8Hz) とモード 7 (30.0Hz) は, 張出しスラブと高欄とともに一定のモード振幅が励起されており, 張出しスラブと高欄を合わせた張出し部としての振動モードであると考えられる。

### (3) 列車走行試験による同定結果

#### a) RC 桁式高架橋

インパルスハンマー試験に続き, 列車走行試験に基づいて固有振動数および振動モード形の同定を行

表-9 列車走行試験による同定結果 (RC 桁式高架橋: 張出しスラブ, 高欄)

			
橋軸直角方向		橋軸方向	
モード 7*: 張出しスラブ 1次		モード 8: 全体ねじれ 1次	
固有振動数: 9.7Hz 変動係数: 0.076		固有振動数: 12.1Hz 変動係数: 0.029	
MAC 値: 0.988		MAC 値: 0.992	
			
橋軸直角方向		橋軸方向	
モード 9*: 高欄 1次 (2スラブ同位相)		モード 10*: 高欄 2次 (2スラブ逆位相)	
固有振動数: 14.9Hz 変動係数: 0.041		固有振動数: 18.6Hz 変動係数: 0.026	
MAC 値: 0.997		MAC 値: 0.995	
			
橋軸直角方向		橋軸方向	
モード 11*: 全体たわみ 2次 + 張出しスラブ 2次		モード 12*: 張出しスラブ 3次	
固有振動数: 24.4Hz 変動係数: 0.046		固有振動数: 37.6Hz 変動係数: 0.030	
MAC 値: 0.988		MAC 値: 0.990	
			
橋軸直角方向		橋軸方向	
モード 13: 張出しスラブ 5次		モード 14: 疑似 4次 (中間スラブ 3次)	
固有振動数: 52.8Hz 変動係数: 0.041		固有振動数: 131.0Hz 変動係数: 0.020	
MAC 値: 0.975		MAC 値: 0.8885	

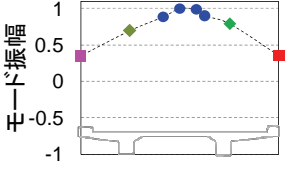
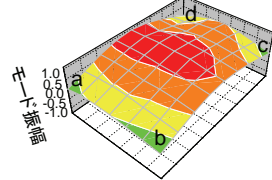
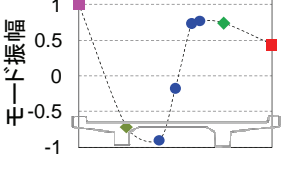
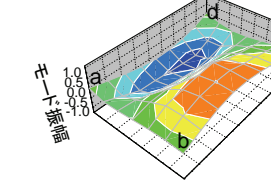
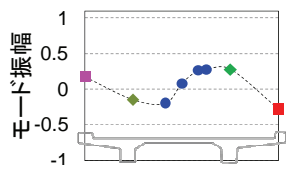
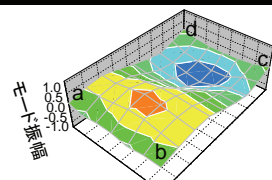
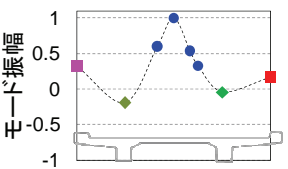
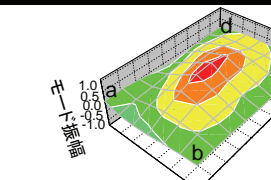
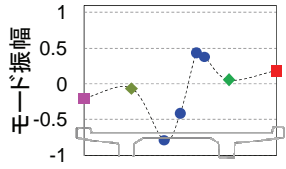
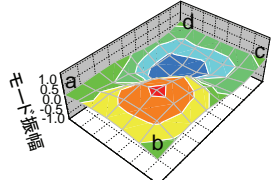
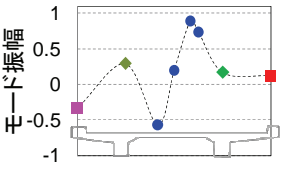
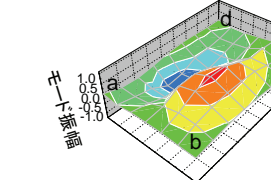
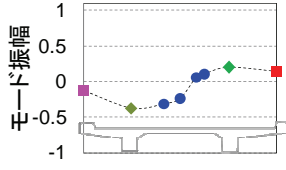
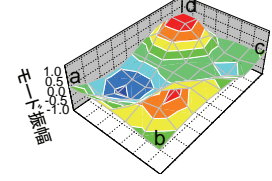
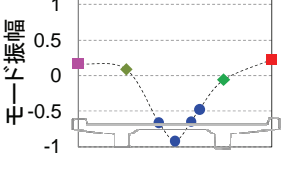
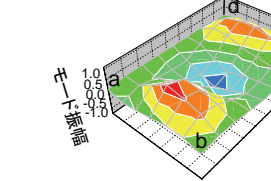
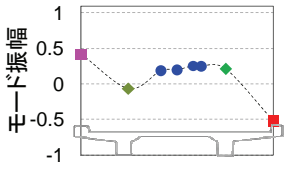
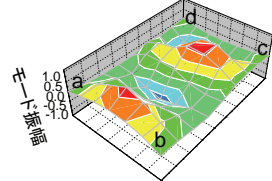
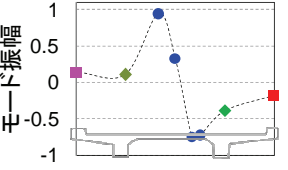
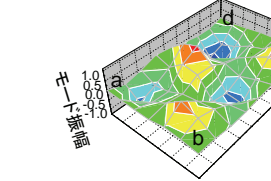
※計測点配置 1 と重複したモード 1 の掲載を省略している。

った。RC 桁式高架橋の同定結果を表-8、表-9 に整理する。なお、計測点配置 1 と計測点配置 2 でそれぞれ実施した 7 回、および 6 回の試験において、走行列車の速度や進行方向等との間に有意な相関は確認できなかった。また、モード 1 とモード 7 はいずれの計測点配置でも同定されたが、重複するために、一方の表にのみ記載している。

列車走行試験では、計測点配置 1 で 7 種類、計測点配置 2 で 9 種類の振動モードをそれぞれ同定することができた。表-8 に示す中間スラブの同定結果を見ると、他部材との関係から 131.5Hz のモード 6

が中間スラブのモード振幅が卓越した局所的な振動モードであることがわかる。先述したように、本橋が 2 枚の中間スラブで構成されているために、各スラブの 3 次モードであると考えられる。なお、各スラブの 1 次、2 次モードが同定できなかった理由としては、中間スラブのアスペクト比があげられる。当該橋梁の中間スラブは橋軸直角方向に比べ橋軸方向に長い形状を有しているために、両方向でモード形の半波の長さが大きく異なる 1 次、2 次モードは励起されにくく、同定には至らなかったと考えられる。この他にも、インパルスハンマー試験では同定

表-10 列車走行試験による同定結果 (RC ラーメン高架橋: 中間スラブ)

			
橋軸直角方向	等高線図	橋軸直角方向	等高線図
モード 1*: 全体たわみ 1 次		モード 2*: 全体橋軸直角 2 次	
固有振動数: 20.8Hz 変動係数: 0.067		固有振動数: 33.1Hz 変動係数: 0.063	
MAC 値: 0.984		MAC 値: 0.94	
			
橋軸直角方向	等高線図	橋軸直角方向	等高線図
モード 3: 全体たわみ 2 次		モード 4*: 中間スラブ橋軸 1 次	
固有振動数: 43.0Hz 変動係数: 0.117		固有振動数: 50.2Hz 変動係数: 0.042	
MAC 値: 0.972		MAC 値: 0.968	
			
橋軸直角方向	等高線図	橋軸直角方向	等高線図
モード 5: 中間スラブ対角 2 次		モード 6*: 中間スラブ橋軸直角 2 次	
固有振動数: 60.6Hz 変動係数: 0.031		固有振動数: 63.6Hz 変動係数: 0.049	
MAC 値: 0.986		MAC 値: 0.912	
			
橋軸直角方向	等高線図	橋軸直角方向	等高線図
モード 7: 中間スラブ橋軸, 橋軸直角 2 次		モード 8: 中間スラブ橋軸 3 次	
固有振動数: 72.1Hz 変動係数: 0.015		固有振動数: 93.7Hz 変動係数: 0.032	
MAC 値: 0.812		MAC 値: 0.948	
			
橋軸直角方向	等高線図	橋軸直角方向	等高線図
モード 9: 中間スラブ橋軸 4 次		モード 10: 中間スラブ橋軸 3 次, 橋軸直角 2 次	
固有振動数: 120.8Hz 変動係数: 0.028		固有振動数: 161.1Hz 変動係数: 0.035	
MAC 値: 0.877		MAC 値: 0.805	

できなかった 30Hz 以下の低次モードが同定可能であった。これは、図-6 のパワースペクトルに見られる両試験のエネルギー特性の相違、図-2、図-4 の加速度応答に見られる加振回数、および振動継続時

間の相違、に起因すると考えられる。

張出しスラブ、高欄においても、インパルスハンマー試験と同様に 9.7Hz (モード 7) と比較的 low 次で張出しスラブの部材振動モードが励起されてい

表-11 列車走行試験による同定結果 (RC ラーメン高架橋: 張出しスラブ, 高欄)

橋軸直角方向	橋軸方向	橋軸直角方向	橋軸方向
モード 11: 張出し部単純振動 (張出しスラブと高欄が同位相)		モード 12*: 張出し部 2 次	
固有振動数: 11.5Hz 変動係数: 0.089		固有振動数: 13.4Hz 変動係数: 0.056	
MAC 値: 0.997		MAC 値: 0.970	
橋軸直角方向	橋軸方向	橋軸直角方向	橋軸方向
モード 13*: 高欄 2 次		モード 14*: 張出し部単純振動 (張出しスラブと高欄が逆位相)	
固有振動数: 20.8Hz 変動係数: 0.018		固有振動数: 26.2Hz 変動係数: 0.092	
MAC 値: 0.942		MAC 値: 0.984	
橋軸直角方向	橋軸方向	橋軸直角方向	橋軸方向
モード 15: 各張出しスラブ 1 次			
固有振動数: 41.3Hz 変動係数: 0.016			
MAC 値: 0.918			

※計測点配置 1 と重複したモード 1 の掲載を省略している。

る。また、14.9Hz (モード 9) と 18.6Hz (モード 10) は各部材のモード振幅から、高欄の部材振動モードであると考えられる。37.6Hz (モード 12)、52.8Hz (モード 13) と振動数が高くなることで端部のモード振幅が大きくなっていることがわかる。他方で、131.0Hz (モード 14) は、中間スラブのモード振幅を勘案すると、張出しスラブの部材振動モードではなく、中間スラブの部材振動 (モード 6) に追従した疑似モードであると考えられる。以上の傾向はいずれの列車走行試験でも確認された。なお、次項の RC ラーメン高架橋を含め、振動モードの同定に際しては、走行列車荷重の影響に留意する必要がある。それらの詳細と対応策については 4. (1) で説明するが、本章に示す列車走行試験の同定結果は、後に提示する対応策を経て算出していることを断わっておく。

#### b) RC ラーメン高架橋

RC ラーメン高架橋を対象とした列車走行試験の

同定結果を表-10、表-11 に整理する。なお、計測点配置 3 と計測点配置 4 でそれぞれ実施した 8 回、および 6 回の試験において、同定結果と走行列車の速度や進行方向の列車諸元との間に有意な相関は確認できなかった。また、いずれの計測点配置でも同定されたモード 1 は表-10 に記載し、表-11 では省略している。

列車走行試験では、計測点配置 3 で 10 種類、計測点配置 4 で 6 種類の振動モード形をそれぞれ同定可能であった。中間スラブでは、インパルスハンマー試験と同様に、50.2Hz (モード 4) 以上の周波数帯で部材の局所的な振動モードが同定されている。また、インパルスハンマー試験では同定できなかったモード 3 (全体たわみ 2 次: 43.0Hz) や、モード 7 (中間スラブ橋軸、橋軸直角 2 次: 72.1Hz) 以上の高次モードを同定可能であった。特に高次モードは複雑なモード形状を有するために、低次モードと比較して MAC 値が低下する傾向にあった。これに

配慮して、高次モードの同定では理論モード形との一致性を表す MAC 値の閾値を下げている。

張出しスラブと高欄でも、インパルスハンマー試験と同様にモード 13 (20.8Hz) で高欄の 2 次モードが同定されている。その他に張出しスラブと高欄が連動した張出し部の振動モードも同定されている。当該橋梁の張出しスラブと高欄は 3 枚のスラブにより構成されている。モード 11 からモード 14 までの比較的低次の振動モードでは 3 枚のスラブが連動した振動モードとなっているが、モード 15 では 3 枚のスラブが隣り合うスラブとそれぞれ逆位相で振動するモードが同定されている。

#### (4) 同定結果の比較

列車走行試験とインパルスハンマー試験の同定結果を比較する。はじめに、表-4 から表-11 に示した各橋梁の同一振動モード形に対する固有振動数(表中に\*印で記載)に着目する。両試験による差異は RC ラーメン高架橋のモード 1 (全体たわみ 1 次) が最大で、約 20% (両結果の差を平均で除した値) となっている。なお、RC 桁式高架橋では最大でも 15% 程度であった。列車走行試験で同定した固有振動数の方が概ね低い値であることから列車質量の影響が考えられるが、いずれにしても顕著な差異はみられない。さらに、張出しスラブと高欄のみに着目すれば、その差は最大でも 10% 程度である。張出しスラブと高欄で固有振動数の差が小さい理由として、当該部材に走行列車の輪荷重が直接作用しないことがあげられる。固有振動数の変動係数に着目した場合、インパルスハンマー試験ではいずれの橋梁でもほとんどのモードで変動係数が 2% 程度となっている。一方で、列車走行試験における変動係数は 2~8% 程度であり、インパルスハンマー試験ほどの安定性は得られないことがわかる。また、RC ラーメン高架橋では列車走行試験の場合、変動係数が 10% を超える振動モードも存在する。RC ラーメン高架橋については、複線橋であったこと(加振箇所が進行方向により異なる)、採用した走行列車の速度に 100km/h 以上の差が存在したことなどが影響していると考えられるが、原因を完全に説明できるような規則性は確認できなかった。

つぎに、振動モード形に着目する。対象としたいいずれの橋梁でも、同定可能なモード数は明らかに列車走行試験の方が多い。MAC 値に着目した場合、両試験でともに同定された振動モードの MAC 値は、列車走行試験で同定された場合の方が大きく、走行列車荷重を用いた方が理論モード形に近い振動モー

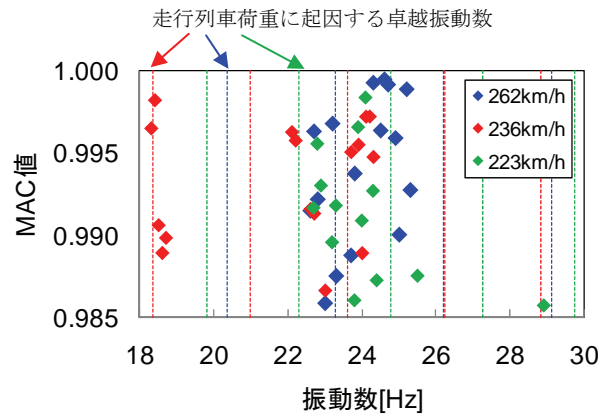


図-8 加振周期が振動特性の同定に及ぼす影響 (RC 桁式高架橋)

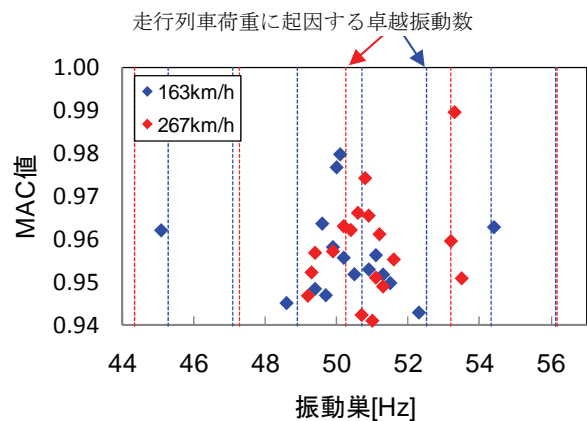


図-9 加振周期が振動特性の同定に及ぼす影響 (RC ラーメン高架橋)

ド形を励起可能であることがわかる。なお、RC ラーメン高架橋の全体たわみ 1 次である表-6 のモード 1 (25.6Hz) と表-10 のモード 1 (20.8Hz) では張出しスラブの位相が異なっていたが、これは本研究で採用したクロススペクトル法が比例減衰を仮定していることに起因すると考えられる。実際に固有振動数での張出しスラブ(計測点 25)の位相を確認すると、インパルスハンマー試験で  $-102.69^\circ$ 、列車走行試験で  $-85.31^\circ$  と近い値を示していることがわかる。

## 4. 同定結果の信頼性

### (1) 走行列車荷重の影響

本章では、2. (4) で指摘した、走行列車荷重を用いた振動特性の同定に関する留意点として、走行列車の加振周期が同定結果に及ぼす影響を明らかにし、経験的に獲得した対応策を述べる。式(2)で表される基本振動数の整数倍では、構造物固有の振動と

表-12 振動数の比較

橋梁	対象	同定結果 (Hz)	理論値 (Hz)	部材長 (m)	$E$ (kN/m <sup>2</sup> )	単位重量 $\rho$ (kN/m <sup>3</sup> )
RC 桁式高架橋	全体たわみ 1 次	6.5	6.1	$\lambda=19.1$	2.65E+7	24.5
	張出しスラブ 1 次	9.7	13.9	$\lambda=1.9$		
RC ラーメン高架橋	全体たわみ 1 次	20.8	16.1	$\lambda=8.1$		
	中間スラブ	50.2	49.0	$a=5.6$ $b=8.1$		
	張出しスラブ	11.5	11.1	$\lambda=1.9$		

※ヤング係数  $E$ , 単位重量  $\rho$  は設計値を用いている.

は別に, 走行列車荷重の周期性に起因する振動数成分が卓越する. この卓越振動数において構造物の振動モードが存在しないにもかかわらず周期的な強制加振により振動モード形と類似したモード形状が励起された場合, クロススペクトル法では, これを振動モードとして抽出してしまう. 各橋梁における加振源の周期性に起因した疑似モードの影響を図-8, 図-9 にそれぞれ示す. 図-8 には, 計測点配置 1 で計測した速度の異なる 3 つの列車走行試験におけるモード 3 (全体たわみ 2 次+張出しスラブ 2 次) の MAC 値の分布を示している. 一方で, 図-9 には, 計測点配置 3 で計測した速度の異なる 2 つの列車走行試験のモード 4 (中間スラブ 1 次) の MAC 値の分布を示している. また, 同図中には式(2)で算出される走行列車荷重に起因する卓越成分を列車ごとにそれぞれ点線 (図-8, 青: 262km/h, 赤: 236km/h, 緑: 223km/h) (図-9, 青: 163km/h, 赤: 267km/h) で示している.

まず, 図-8 の RC 桁式高架橋を用いて説明する. 図中に赤で示す 236km/h で列車が走行したケースに, 加振周期の影響を見ることができる. 当該ケースでは, いずれの列車速度の場合でも MAC 値が高くなっている 24Hz 付近の他に, 18.4Hz 付近でも MAC 値が高い振動数帯が存在する. 式(2)より算出される基準振動数 2.62Hz の 7 倍に当たる 18.36Hz と一致していることから, 加振振動数の卓越により疑似的に励起された振動モードであると考えられる. さらに, 列車速度が 236km/h のケースでは, 24.0Hz の MAC 値よりも 18.4Hz の MAC 値の方が大きいため, MAC 値最大を条件に振動モードを決定した場合, 後者が固有振動数として同定され, 同定精度が低下する. 図-9 に示す RC ラーメン高架橋でも同様の現象が見て取れる. 図中に赤で示す 267km/h で列車が走行した場合は, 振動モードと考えられる 50~51Hz 付近の他に, 53Hz 付近にも MAC 値が高い振動数が存在する. 53Hz 付近は式(2)より算出される基準振動数 2.96Hz の 18 倍に当たる. 列車速度が 267km/h の場合, 50Hz 付近の MAC 値よりも 53Hz 付近の MAC 値の方が大きいため, MAC 値最大を

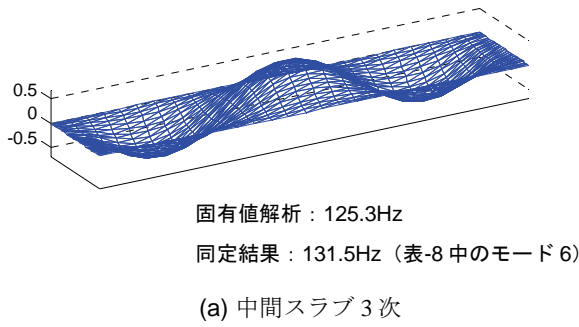
条件に振動モードを決定した場合, RC ラーメン高架橋でも固有振動数の同定精度が低下してしまう.

そこで本研究では, 速度の異なる複数の列車走行試験結果を利用し, 列車の走行速度が変化しても MAC 値の分布が大きく変動しない振動モードのみを構造物固有の振動モードとして同定することとした. なお, 前述したように 3. (3) の同定結果はこのような手順を踏んで算出している.

## (2) 理論値との比較

列車走行試験より同定した各橋梁の振動特性を理論値と比較する. 式(3), 式(4), 式(5)より算出した各橋梁の全体 1 次たわみ, 中間スラブ 1 次, および張出しスラブ 1 次モードの固有振動数を表-12 に示す. なお, 中間スラブは部材振動の 1 次モードが同定できていないために省略した. RC 桁式高架橋の全体 1 次たわみモードでは, 同定結果に理論値が良く一致している. 張出しスラブでは同定結果の方が約 35%低くなっているが, 表-9 のモード 7 (張出しスラブ 1 次) を見ると径間中央の主桁のモード振幅が 0.4 程度となっており, 端部固定の境界条件が正確に成り立っていない可能性が考えられる. RC ラーメン高架橋の中間スラブ, および張出しスラブでは同定結果に理論値がよく一致しており, 同定結果の理論的妥当性を確認できる. 一方で, 全体 1 次たわみモードでは, 境界条件を単純支持で算出しているために, 理論値が若干低い値となっている. なお, 境界条件を固定とした場合でも約 30Hz となり, 全体たわみ 1 次では対象径間のみならず, 隣接する径間, および柱の剛性の影響が大きいためと考えられる.

つぎに, 各橋梁の中間スラブと張出しスラブの 2 次以上の部材振動モードを対象として, 同定結果と固有値解析結果を比較する. RC 桁式高架橋では中間スラブ 3 次モードと張出しスラブ 2 次モードを例として図-10 に示す. また, RC ラーメン高架橋では中間スラブ 3 次モード, 5 次モード, および張出しスラブの 2 次モードを例として図-11 に示す. 図-10(a)に示した RC 桁式高架橋の中間スラブ 3 次モードは, 固有振動数, および振動モード形ともに表-8



固有値解析 : 28.4Hz  
同定結果 : 24.4Hz (表-9中のモード11)

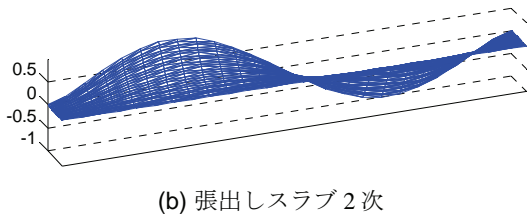
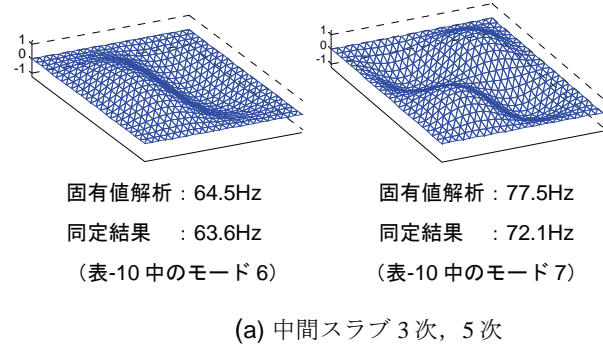


図-10 固有値解析結果 (RC 桁式高架橋)



固有値解析 : 13.8Hz  
同定結果 : 13.4Hz (表-11中のモード12)

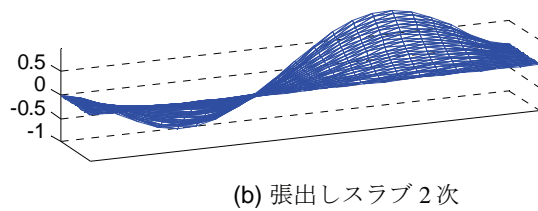


図-11 固有値解析結果 (RC ラーメン高架橋)

に示したモード 6 (中間スラブ 3 次) とほぼ一致している。また、同様に図-10(b)に示した張出しスラブ 2 次モードは、表-9 に示したモード 11 (全体 2 次+張出しスラブ 2 次) に近い値となっており、固有値解析結果と整合的な振動モードが同定できていることがわかる。さらに、RC ラーメン高架橋においても、図-11(a)に示した中間スラブの固有値解析結果は、固有振動数、および振動モード形ともに表-10 に示したモード 6 (中間スラブ橋軸直角 2 次)、モード 7 (中間スラブ橋軸、橋軸直角 2 次) とほぼ一致しているとともに、図-11(b)に示した張出しスラブ 2 次モードは、表-11 のモード 12 (張出し部 2 次) とほぼ一致していることが確認できる。

なお、本研究で用いた簡易なモデルではすべての固有値解析結果と同定モードが一致しているわけではない。これに対して、列車走行や他部材までを含めた、より詳細な有限要素モデルを用いた動的解析によって現象再現性に対する検討を別途実施している。それらにおいては、固有値解析結果と同定結果が一致することを確認しているが、本研究の範疇を超えるために、別の機会に発表したいと考える。

## 5. 走行列車と振動モード

### (1) 列車走行時の卓越モード

列車の走行に伴い卓越成分を形成するような振動モードを明らかにするために、列車走行試験より同定した各振動モードとパワースペクトルを比較する。

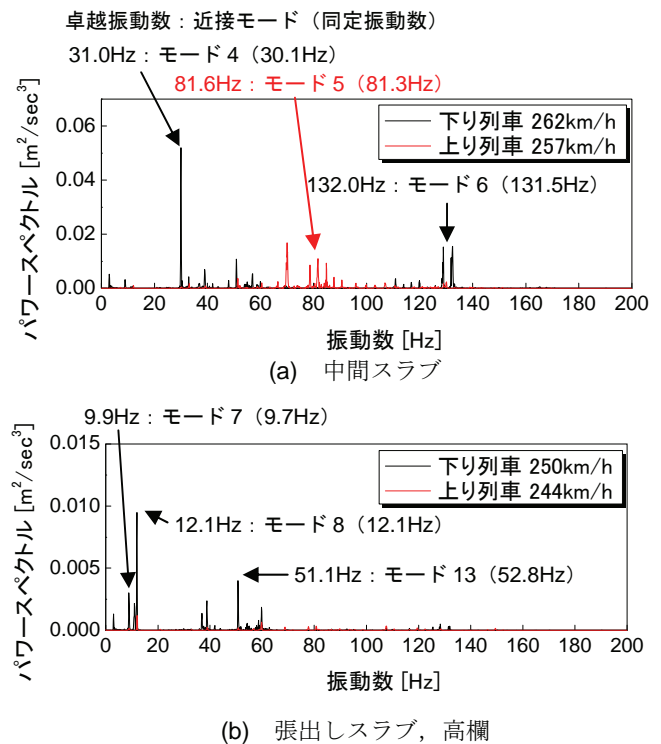


図-12 列車通過時のパワースペクトル

### a) RC 桁式高架橋

図-12 に RC 桁式高架橋の各部材における上りと下り列車通過時のパワースペクトルを示す。図-12(a)は、中間スラブの卓越成分を検討するために、計測点配置 1 で中間スラブ上の計測点 4, 6, 8, 10 および 12 のパワースペクトルの平均値を、図-12(b)は、張出しスラブ、高欄の卓越成分を検討するために、計測点配置 2 で張出しスラブ上の計測点

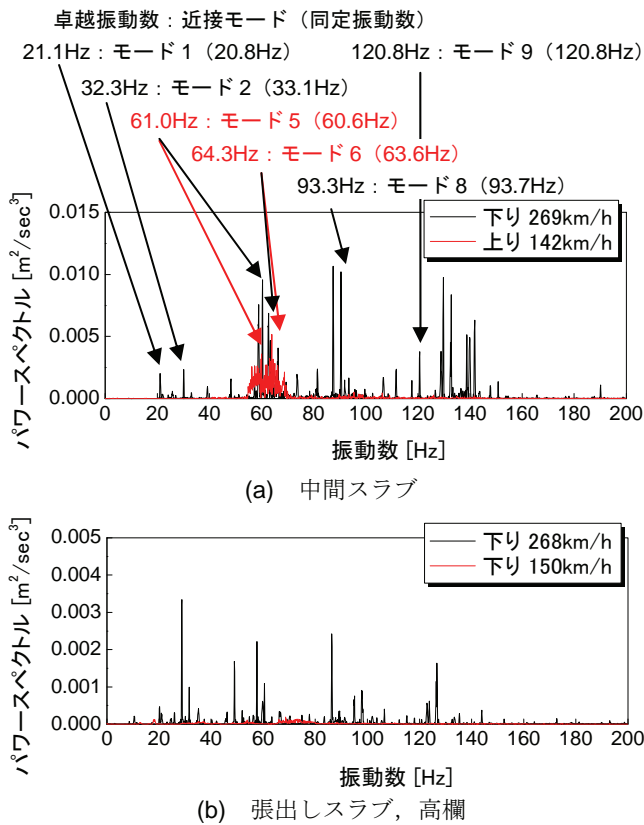


図-13 列車通過時のパワースペクトル

1, 3, 5, 6, 11 および 15 のパワースペクトルの平均値を示している。また、主要な卓越振動数に近接する振動モードを併せて記載している。なお、紙面の都合上、複数の計測点のパワースペクトルを平均として各図に記載しているが、各計測点のパワースペクトルをそれぞれ確認した場合でも、以下に述べる考察結果が変わらないことを確認している。

対象橋梁は下り線に位置するために、直接荷重が作用する中間スラブでは、下り列車通過時と上り列車通過時の卓越振動数の分布が大きく異なっている。一方で、直接荷重が作用しない張出しスラブでは進行方向の違いはスペクトル振幅にのみ現れ、卓越振動数の分布自体は同様である。加振源である走行列車に起因する卓越振動数が存在するため、同定した振動モードによりすべての卓越成分を説明できるわけではないが、複数のケースにおいては列車走行時の主要な卓越成分に構造物固有の振動が寄与していることがわかる。さらに、中間スラブでは部材振動モードが同定されている 131.5Hz に近接する 132Hz で、張出しスラブでは部材振動モードが同定されている 9.7Hz に近接する 9.9Hz で、ともに卓越成分を確認することができる。

b) RC ラーメン高架橋

図-13(a)には、RC ラーメン高架橋における

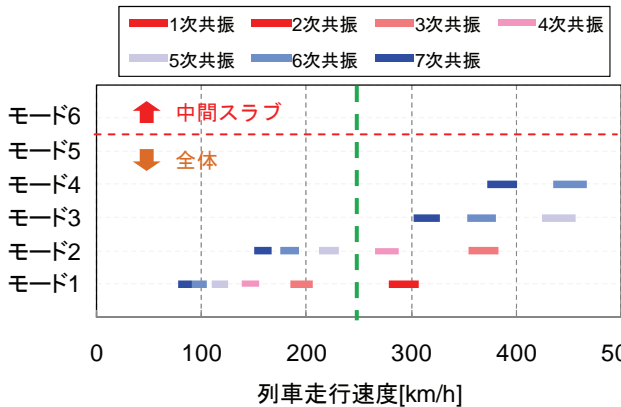
269km/h の下り列車通過時、および 142km/h の上り列車通過時のパワースペクトルを示す。なお、中間スラブでは列車の進行方向の変化に起因するスペクトルの変化がほとんどないことを確認している。一方で、張出しスラブと高欄では、対象とした部材が下り側であったために、上り列車が通過した場合と比較して、下り列車が通過した際にはスペクトル振幅が数倍になることを確認した。そこで、図-13(b)には下り方向へ向かう 268km/h、と 150km/h の列車通過時のパワースペクトルを示している。図-13(a)は、特に中間スラブの卓越成分を検討するために、計測点配置 3 で中間スラブ上の計測点 5, 7, 8, 12, 16 および 19 の加速度パワースペクトルの平均値を、図-13(b)は、特に張出しスラブ、高欄の卓越成分を検討するために、計測点配置 4 で張出しスラブ上の計測点 1, 4, 7, 11, 16 および 24 のパワースペクトルの平均値を示すとともに、卓越振動数に近接する振動モードを併せて記載している。

いずれの部材も列車の走行速度が速い方がパワースペクトル振幅が大きい。図-13(a)の中間スラブは、どの速度でも 60Hz 付近で卓越成分を形成しており、その振動数からモード 5 (中間スラブ対角 2 次) とモード 6 (中間スラブ橋軸直角 2 次) の寄与が考えられる。142km/h の場合、60Hz 付近が唯一の卓越成分であるが、269km/h の場合では 90Hz, 130Hz 付近など高振動数帯で多くの卓越成分を確認できる。特にモード 8 (中間スラブ橋軸 3 次) の寄与が考えられる 93.3Hz では高いスペクトル振幅を有している。中間スラブでは高次モードの寄与の他に、低次にも一定のスペクトル振幅を有したピークを確認できる。これらの卓越振動数ではモード 1 (全体たわみ 1 次), モード 2 (全体橋軸直角 2 次) といった全体モードの寄与が考えられる。速度応答や変位応答に換算する場合は振動数で除するために、このような低次の卓越成分も重要となる。一方で、列車走行時の張出しスラブ、高欄におけるパワースペクトル(図-13(b))では、前節で同定した固有振動数に近接するような卓越振動数は確認できなかった。また、約 60Hz や約 90Hz の卓越成分は中間スラブを対象としたパワースペクトルでも確認できることから、対象橋梁の列車通過時の振動では中間スラブや全体振動の影響が大きいことがわかる。

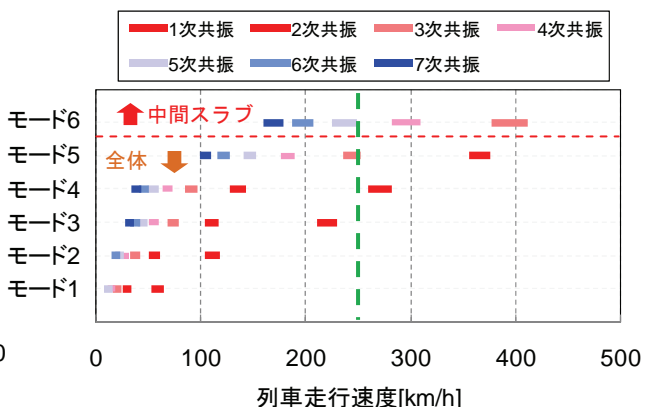
(2) 部材振動モードの共振速度

今後の高速化の状況によっては同定した振動モードで共振、および共振に起因する構造物音の発生が懸念される。本節では各橋梁で同定した各振動モー

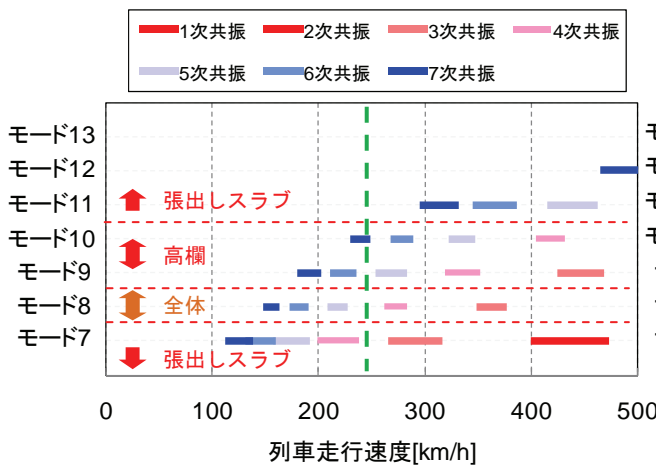




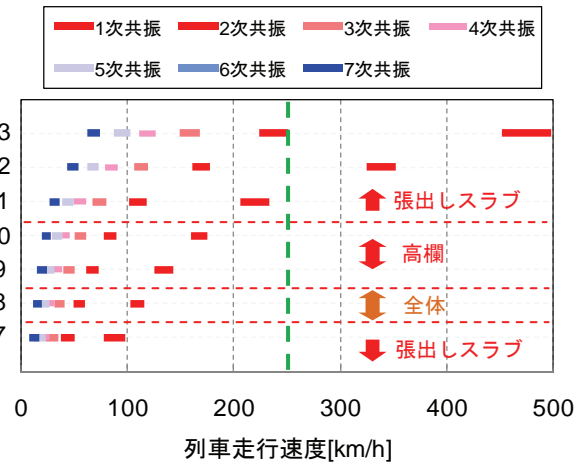
(a) RC 桁式高架橋：中間スラブ



(a) RC 桁式高架橋：中間スラブ



(b) RC 桁式高架橋：張出しスラブ，高欄  
図-14 各振動モードの共振速度（車両間隔）



(b) RC 桁式高架橋：張出しスラブ，高欄  
図-15 各振動モードの共振速度（車軸間隔）

ドの共振速度を式(2)に基づき算出し、高速化に際して留意が必要な振動モードを明らかにする。

a) RC 桁式高架橋

図-14 には同定した RC 桁式高架橋の固有振動数から算出した各振動モードの共振速度を示している。なお、同定した固有振動数には変動係数で表されるばらつきが存在する。これを考慮し、共振速度を固有振動数±標準偏差の区間として算出した。7次共振までの共振速度を図中に示す。L<sub>v</sub>は車両長 25m を用いた。なお n 次共振速度は 1 次の共振速度を次数 n で除すことで算出でき、任意の加振から次の加振までの間に n 波の固有振動が励起される速度を表す。RC 桁式高架橋においては 500km/h までに 1 次共振が発生するような振動モードは存在しないことがわかる。図-14(a)のモード 1（全体たわみ 1 次モード）が 280km/h～300km/h で、図-14(b)のモード 7（張出しスラブ 1 次モード）が 400km/h～470km/h で、いずれも 2 次共振の発生が懸念される。固有振動数が 131.5Hz のモード 6（中間スラブ 3 次）と固有振動数が 51.1Hz のモード 13（張出しスラブ 5 次）では 500km/h までに 7 次以下の共振が発生しないことがわかる。

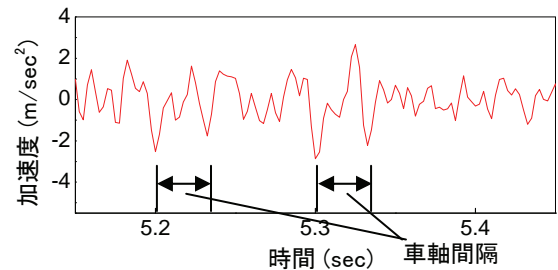
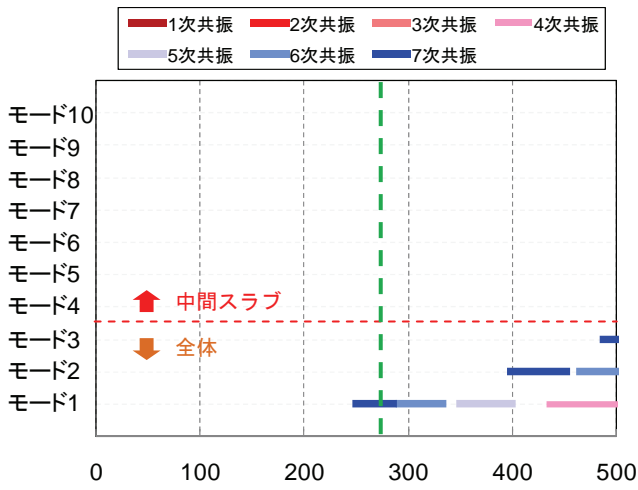
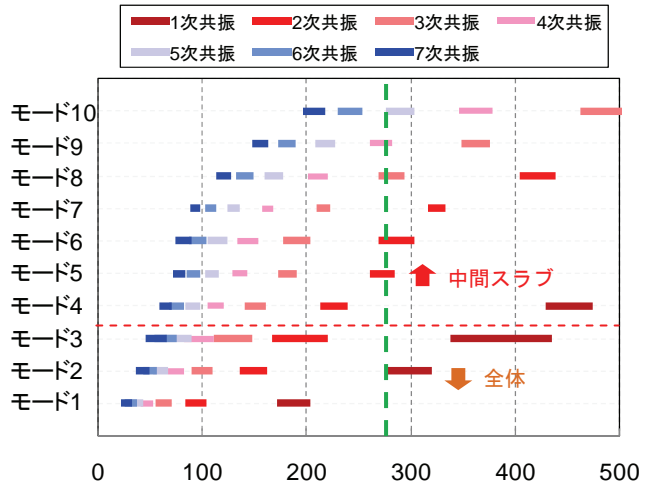


図-16 列車走行時の加速度応答（計測点 6）

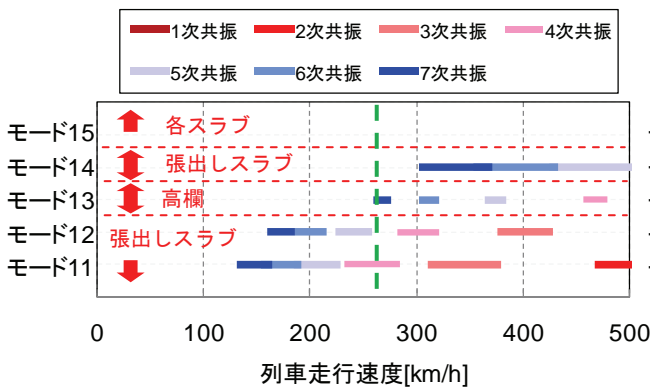
一方で、図-12 では比較的高次の部材振動モードでも列車通過時に卓越成分を形成している。このような高次モードでは、車両間隔のみならず車軸間隔といった、より高周期の荷重間隔との共振の影響が危惧される。列車通過に起因する最も高周期の荷重間隔として、車軸間隔 2.5m で算出した共振速度を図-15 に示す。RC 桁式高架橋のモード 6（中間スラブ 3 次）、およびモード 13（張出しスラブ 5 次）は、ともに 240km/h 付近がそれぞれ 5 次、および 2 次の共振速度に該当する。また、図-12 で上り列車通過時にのみ卓越成分を形成したモード 5（全体 4 次）も 250km/h 付近が 3 次共振速度であり、走行列車の車軸間隔との共振により卓越した可能性を指摘



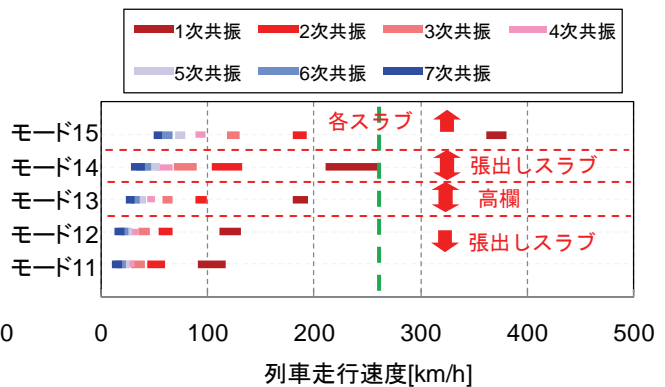
(a) RC ラーメン高架橋：中間スラブ



(a) RC ラーメン高架橋：中間スラブ



(b) RC ラーメン高架橋：張出しスラブ，高欄  
図-17 各振動モードの共振速度（車軸間隔）



(b) RC ラーメン高架橋：張出しスラブ，高欄  
図-18 各振動モードの共振速度（車軸間隔）

できる。なお、台車間隔についても同様の分析を実施したが、高周波数帯の部材振動モードとの低次（1次，2次）共振の発生は確認されなかった。

共振中の加速度応答の例として、計測点配置2で、列車の通過速度がモード13（張出しスラブ5次）の2次共振速度に近い250km/hで通過した際の計測点6の加速度応答を図-16に示す。加速度振幅から列車車輪の通過を読み取ることができる。同じ台車の前の車輪が通過してから後の車輪が通過するまでの間隔に2波の振動を確認することができ、実際に2次共振が発生していることがわかる。

b) RC ラーメン高架橋

図-17には同定したRC ラーメン高架橋の固有振動数から算出した共振速度を示している。なお、前項と同様に変動係数を考慮して、区間として算出した共振速度を7次共振まで示すとともに、 $L_v$ として車両長25mを用いている。図-17(a)のモード1（全体たわみ1次）では約430~500km/hで4次、図-17(b)のモード11（張出し部単純振動）では約470~500km/hで2次の共振の発生が予測されるが、特

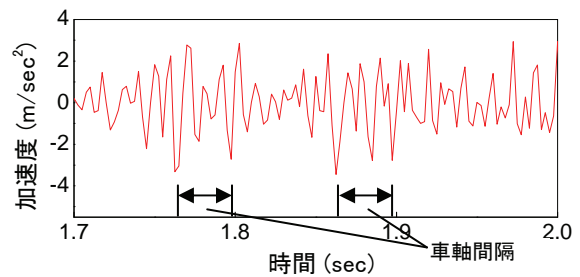


図-19 列車走行時の加速度応答（計測点5）

に中間スラブでは部材振動の固有振動数が50Hz以上であるために、RC ラーメン高架橋でも500km/hまでに7次以下の共振が発生しないことがわかる。

つぎに、車軸間隔による加振周期との共振の関係を述べる。車軸間隔を2.5mとして共振速度を算出した結果を図-18に示す。図-18(a)から、RC ラーメン高架橋の中間スラブでは200km/h以上の列車速度となることで、多数の部材振動モードで2次，3次共振の発生が懸念される。実際に、図-13(a)で卓

卓越成分を形成したモード 5 (中間スラブ対角 2 次), モード 6 (中間スラブ橋軸直角 2 次), モード 8 (中間スラブ橋軸 3 次), モード 9 (中間スラブ橋軸 4 次) の各モードでは, 列車通過速度の 269km/h が, それぞれ 2 次から 4 次の共振速度となっている. 一方で, 張出しスラブ, 高欄を対象とした図-18(b)を確認すると, 本試験で用いた列車の通過速度である約 260km/h はモード 14 (張出し部単純振動) の 1 次の共振速度に近接している. しかし, 図-13(b)ではモード 4 の固有振動数である 26Hz 付近に卓越成分を確認することはできない.

共振時の加速度応答の例として, 計測点配置 3 において, 列車がモード 5 (中間スラブ対角 2 次) の 2 次共振速度に近い 269km/h で走行した場合の計測点 5 の加速度応答を図-19 に示す. 加速度振幅の大きさから列車車輪の通過が読み取れるとともに, 同じ台車の前の車輪が通過してから後の車輪が通過するまでの間隔に 3 波の振動を確認することができ, 実際に 3 次共振が発生していることがわかる.

## 6. おわりに

本研究では, これまで未解明であった列車走行時の RC 高架橋部材の動的挙動を把握し, 振動特性の同定を行った. 具体的には, 代表的な RC 鉄道高架橋である RC 桁式高架橋と RC ラーメン高架橋のスラブ部材を中心として, 列車走行試験を実施し, 計測した加速度応答を用いた振動特性の同定を行った. その結果, 共振や構造物音の検討に必要な 200Hz 程度までの局所的な部材振動モードを同定するに至った. 本研究により得られた知見を具体的に以下に示す.

- 1) 列車走行試験は, インパルスハンマー試験と比較して, 多くの振動モードを同定できるとともに, MAC 値の高い振動モード形が励起されることを確認した. なお, 固有振動数の変動係数は最大 10%程度とインパルスハンマー試験と比較して若干大きくなることに留意する必要がある.
- 2) 走行列車荷重に起因する疑似モードを MAC 値の比較に基づく提案手法により除外することで, 列車走行時の応答からクロススペクトル法により部材振動特性を同定できることを確認した.
- 3) 列車走行時の RC 桁式高架橋では, 約 130Hz で中間スラブの 3 次モード, 約 9Hz で張出しスラブの 1 次モード, 約 25Hz で張出しスラブと橋梁全体の連成 2 次モードなどの振動モードが励起

- されるとともに, 多くの振動モードは単純なシェルモデルを用いた固有値解析結果と一致した.
- 4) 列車走行時の RC ラーメン高架橋では, 50Hz 以上の周波数帯域で中間スラブの各部材振動モードが励起されるとともに, 中間スラブの部材振動モードは固有値解析と比較的よく一致するが, 境界条件などが複雑な張出しスラブでは大きく乖離する振動モードも確認された.
  - 5) RC 桁式高架橋の部材振動モードと走行列車に関しては, 列車速度が 240km/h 程度で, 車軸間隔と中間スラブ 3 次モードや張出しスラブの 5 次モードとの 2~5 次共振の発生が懸念される. また, 列車走行時のパワースペクトルから車軸間隔との共振が懸念される振動モードで卓越成分が形成されることを確認した.
  - 6) RC ラーメン高架橋の部材振動モードと走行列車に関しては, 列車速度が 260km/h 程度で, 車軸間隔と中間スラブ対角 2 次や中間スラブ 4 次モードとの 2~4 次共振の発生が懸念される. また, 列車走行時のパワースペクトルから車軸間隔との共振が懸念される振動モードが卓越成分を形成することを確認した.

一方で, 今後の課題を以下に述べる. 第一に, 本研究では, 標準設計に基づいて建設された 2 種類の高架橋を対象とすることで, 高速鉄道路線を構成する大半の高架橋の部材振動特性に関する知見を得た. しかしながら, 現在, 少数ではあるが, さらに低剛性の RC 鉄道高架橋の建設も進められており, 今後, このような特殊橋梁の部材振動特性を把握していくことが重要となる. 第二に, 本研究で得られた列車走行時の振動特性と騒音計測結果の比較がある. これにより, 実証的に構造物音を励起する振動モード形を特定することで, 効率的な対策方法を検討することが可能となる. また, 並行して数値計算<sup>13)</sup>によるメカニズムの解明を進めることで, 今後のさらなる列車高速化における構造物音の発生予測と対策の必要性を議論することも重要である. 第三に, 本研究で同定した振動モードを再現する有限要素モデルの構築に際しては, 固有振動数や振動モード形の他に, モード減衰比が重要な指標となる. 本研究で採用したクロススペクトル法では, モード減衰比を同定することが困難であることから, ERA<sup>23)</sup>法など, より高度な同定手法の適用により, 各振動モードのモード減衰比を把握することも重要な課題である.

謝辞: 本研究の一部は文部科学省「若手研究者の自立的研究環境整備促進」事業により大阪大学グロー

バル若手研究者フロンティア研究拠点で実施された。

## 参考文献

- 1) Fryba, L.: *Vibration of solids and structures under moving load*, Noordhoff International, 1972.
- 2) (財)鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説—コンクリート構造物, 丸善, 2004.
- 3) 松浦章夫: 新幹線橋りょうにおける橋桁の鉛直たわみの許容限度, 鉄道技術研究報告, No.894, pp.1-46, 1974.
- 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) 宮下剛, 石井博典, 藤野陽三, 庄司朋宏, 関雅樹: レーザー計測を用いた鋼鉄道橋の高速走行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.
- 6) 後藤晴夫: 山梨リニア実験線でリニア車両の牽引走行試験を開始, 土木学会誌, Vol.82, No.2, pp.44, 1997.
- 7) 高速鉄道研究会: 新幹線—高速鉄道の技術のすべて, 山海堂, 2003.
- 8) 渡辺勉, 曾我部正道: RC ラーメン高架橋の衝撃係数に関する解析的検討, 鉄道総研報告, Vol.24, No.4, pp.11-16, 2010.
- 9) 原田和洋, 杉崎光一, 貝戸清之, 曾我部正道: 鉄道橋の動的応答における部材振動性状の簡易同定法, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.3, pp.13-18, 2008.
- 10) 長倉清: 鉄道騒音問題の現状と展望, 日本音響学会誌, Vol.64, No.10, pp.624-628, 2008.
- 11) 長倉清: 構造物音の特性と低減対策, *JREA*, Vol.50, pp.51-53, 2007.
- 12) 飯田雅宣: 転動音・構造物音を予測する, *Railway Research Review*, Vol.67, No.7, pp.10-13, 2010.
- 13) 渡辺勉, 曾我部正道, 後藤恵一, 浅沼潔: 構造物音評価のための RC ラーメン高架橋の振動性状評価法, 鉄道力学論文集, 土木学会, Vol.14, pp.136-143, 2010.
- 14) 小笠原忠雄: 山陽新幹線(岡山—博多間)技術のすべて, 鉄道界評論社, 1975.
- 15) 国鉄新幹線建設局ほか: 東北新幹線(大宮—盛岡間)技術のすべて, 鉄道界評論社, 1982.
- 16) 原恒雄: 東海道新幹線の高速化技術発展の足跡, 運輸と経済, Vol.63, No.12, pp.32-44, 2003.
- 17) (財)鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説—耐震設計, 丸善, 1999.
- 18) 松岡弘大, 貝戸清之, 杉崎光一, 渡辺勉, 曾我部正道: 走行列車荷重を利用した振動モニタリングによる開床式高架橋の振動特性の同定, 応用力学論文集, 土木学会, Vol.12, pp.983-994, 2009.
- 19) 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.
- 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) (社)土木学会: 構造力学公式集, 博栄社, 1986.
- 22) 小松敬治: 機械構造振動学, 森北出版, 2009.
- 23) 長山智則, 阿部雅人, 藤野陽三, 池田憲二: 常時微動計測に基づく非比例減衰系の非反復構造逆解析と長大吊橋の動特性の理解, 土木学会論文集, No.745, pp.155-169, 2003.

(2011. 2. 16 受付)

## IDENTIFICATION OF HIGH-ORDER LOCAL VIBRATION PROPERTIES OF RC VIADUCT UNDER THE PASSING TRAIN LOADS

Kodai MATSUOKA, Kiyoyuki KAITO, Tsutomu WATANABE and Masamichi SOGABE

As trains are getting faster rapidly, it is necessary to adjust RC railroad viaducts and their components for coping with structure noise. In this study, the authors conducted a train running test to grasp the vibration characteristics of the slabs of actual RC beam viaducts and RC rigid frame viaducts, in order to clarify the vibration characteristics of the components of RC railroad viaducts, which are necessary for evaluating and predicting structure noise. Then, it was found empirically that an RC beam viaduct has a vibration mode of the intermediate slab around 130Hz, and this mode becomes remarkable when a train passes. It was also revealed that in the case of an RC rigid frame viaduct, several vibration modes of the intermediate slab are excited in the frequency range over 50Hz and the second-order mode of the middle slab becomes significant around 60Hz when a train passes.