

軌道と床版をフローティング構造にした 低騒音鋼鉄道橋の開発

渡辺 勉* 曾我部 正道* 浅沼 潔*

Development of Silent Steel Railway Bridge Equipped with Floating Ladder Track and Floating Reinforced-Concrete Deck

Tsutomu WATANABE Masamichi SOGABE Kiyoshi ASANUMA

A number of steel railway bridges have been constructed in Japan. Thin steel members used for the bridges easily tend to vibrate and generate structure-borne noise. Accordingly, the number of constructions of steel railway bridges tend to decrease in the urban areas due to environmental aspects. Then, as a countermeasure against structure-borne noise derived by steel railway bridges, we developed a new type of the steel railway bridge equipped with a floating-ladder track and a floating reinforced-concrete (RC) deck. As a result of train running test, it became apparent that the new steel railway bridge constructed of double floating system has reduced a vibration velocity level of 10.5dB(A) at main girder webs as compared with a steel railway bridge constructed on directly fastened track.

キーワード：構造物騒音，低騒音，鋼鉄道橋，フローティング・ラダー軌道，フローティング床版

1. はじめに

鋼製の鉄道橋梁（以下、鋼鉄道橋）は、古くから多数の建設実績がある。鋼鉄道橋を用いる利点としては、鋼材が高強度であるため長スパン化が可能であること、現場架設が容易であること、工場製作により品質管理が容易であることなどが挙げられる。一方で鋼鉄道橋は、部材が薄板構造で振動しやすいため、構造物騒音が大きくなるなどの指摘もあり、鉄道橋では都市内での適用が避けられる事例も見られる¹⁾。

構造物騒音を低減する手法としては、音源となるウェブやフランジから周辺環境への騒音伝播経路を遮断する防音壁や床版スラブの設置、音源となるウェブやフランジへの防振材の添付等、既に様々なものが提案されている。これに加えて、加振源から音源まで振動を伝搬にくくする手法も提案されている。すなわち、構造物騒音を引き起こす車輪からの加振力による振動伝達を、レールと鋼鉄道橋の音源となる各部材との間で遮断する手法である。

このような背景の中、筆者らは、加振源と音源との間の振動の絶縁性能の向上を目的として、軌道と床版を防振材により弾性支持した構造（以下、フローティング構造）を有する低騒音鋼鉄道橋を開発した。本研究では、この低騒音鋼鉄道橋の構造物騒音低減効果を以下の手法により、定量的に評価することを目的とした。

- (1) 実物大橋梁模型に対してインパルス加振試験を実施して、レールから部材への振動伝達特性を把握するとともに、フローティング構造で低減効果が得られる周波数帯を明らかにする。
- (2) 実物大橋梁模型に対して列車走行試験を行い、フローティング構造による構造物騒音低減効果を明らかにする。
- (3) (2) の試験結果に対して音源解析手法⁴⁾ および騒音予測手法⁵⁾ を適用し、営業線における構造物騒音低減効果を推定する。

2. 低騒音鋼鉄道橋の概要

図1に低騒音鋼鉄道橋の概要を示す。構造形式は、都市内での適用を想定し、架道橋等で採用事例の多い下路桁形式とした。軌道構造には、防振性能に優れたフローティング・ラダー軌道を採用し^{2), 3)}、さらにその下には横桁上に設置した防振材により弾性支持された鉄筋コンクリート床版（以下、フローティング床版）を構築している。フローティング・ラダー軌道は、ラダーマクラギの線路方向の高い曲げ剛性により輪荷重の分散を図っており、併せて軌道の低ばね支持により荷重伝達低減を図っている。フローティング床版は、鉄筋コンクリート床版を防振材で支持した重量級のマス・スプリングシステムであり、主として100Hzよりも低い周波数領域の加振力伝達低減効果を図ったものである。

* 鉄道力学研究部（構造力学）

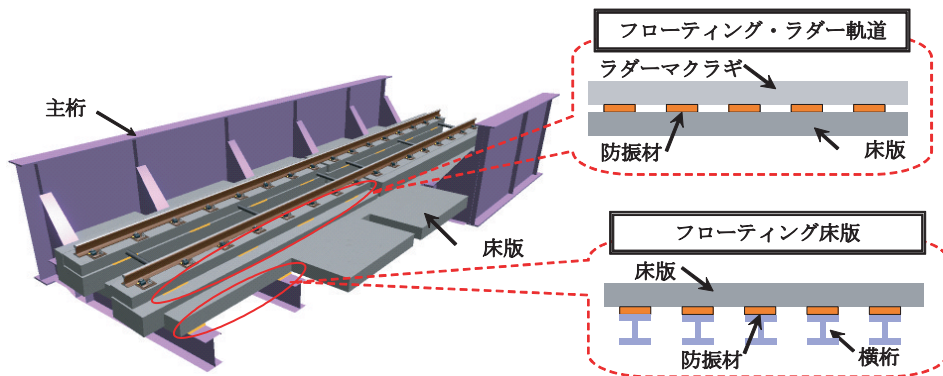
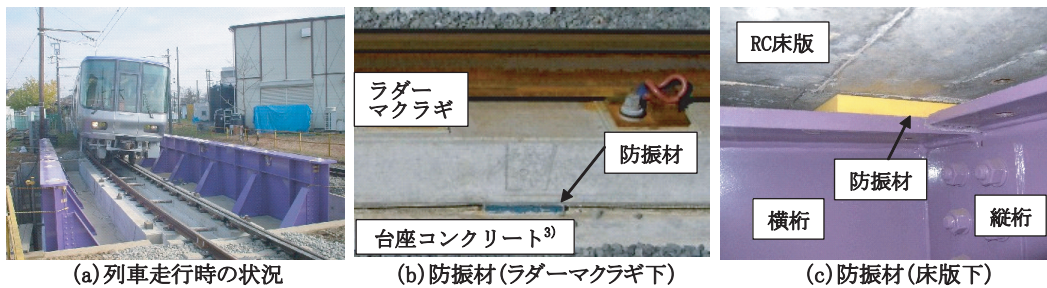


図1 軌道と床版をフローティング構造にした低騒音鋼鉄道橋の概要



(a) 列車走行時の状況 (b) 防振材(ラダーマクラギ下) (c) 防振材(床版下)

図2 実物大模型桁の列車走行時の状況および防振材の設置状況

3. 構造物騒音低減効果の確認試験

3.1 試験方法

構造物騒音低減効果の確認は、実構造物を測定することにより実証的に実施するのが現在の技術レベルでは最も定量的かつ精度の良い手法であると言える。しかしながら営業線等において、列車の走行条件、軌道や構造物の支持条件を整えること、あるいは条件変更を行うことは、一般的に困難であり、定量的な評価を行うことは列車運行上も経済上も制約が大きい。そこで本研究ではまず、実物大の模型桁を用いて構造物騒音低減効果の基本性状を把握することにした。

図2に試験線に架設した実物大模型桁の概要を示す。本模型桁の断面は、在来線を対象として桁長約35mの条件で設計されたものを、断面形状はそのままで桁長を短縮し12mとしている。軌道構造には、フローティング・ラダー軌道を敷設し、さらにその下のフローティング床版は縦桁と横桁の交差部分で防振材により弾性支持された構造である。

表1に試験ケースを、表2に材料物性値を示す。本鋼鉄道橋の構造物騒音低減効果を確認するために、ラダーマクラギおよびコンクリート床版の支持条件を変えて、インパルス加振試験および列車走行試験を行った。走行列車は標準的な在来線車両で2両編成である。なお、本模型桁は、曲線半径180mの急曲線区間に架設されており、列車の最高速度は45km/hに制限される。また、CASE1およびCASE3の試験ケースにおいてラダーマク

表1 試験ケース

| CASE | ラダーマクラギ | コンクリート床版 |
|------|---------------|-----------|
| 1 | 剛支持 | 剛支持 |
| 2 | フローティング・ラダー軌道 | 剛支持 |
| 3 | 剛支持 | フローティング床版 |
| 4 | フローティング・ラダー軌道 | フローティング床版 |

※CASE4が軌道及び床版をフローティング構造にした鋼鉄道橋

表2 材料物性値

| | | 材料定数・重量 |
|-----------------------|----------|---------|
| 軌道パッドばね定数 (MN/m) | | 60 |
| 防振材ばね定数 (MN/m) | ラダーマクラギ用 | 25 |
| | 床版用 | 50 |
| フローティング・ラダー軌道総重量 (kN) | | 155 |
| 床版コンクリート総重量 (kN) | | 314 |
| 鋼材総重量 (kN) | | 290 |

ラギを剛支持としているが、列車通過時のラダーマクラギの沈下量測定の結果、1.0mm程度沈下しており、完全剛支持ではない擬似的な直結軌道である。

3.2 低減効果の評価方法

軌道と床版をフローティング構造にした鋼鉄道橋の構造物騒音低減効果の評価は、インパルス加振試験では、桁部材(床版、主桁上フランジ、主桁ウェブ、主桁下フランジ)に取り付けた加速度計(リオンPV85)において、レール頭頂面を打撃した際に測定された振動加速度およびインパルスハンマ(東陽テクニカ086D50型)の加振力の時刻歴データをフーリエ変換し、振動加速度ス

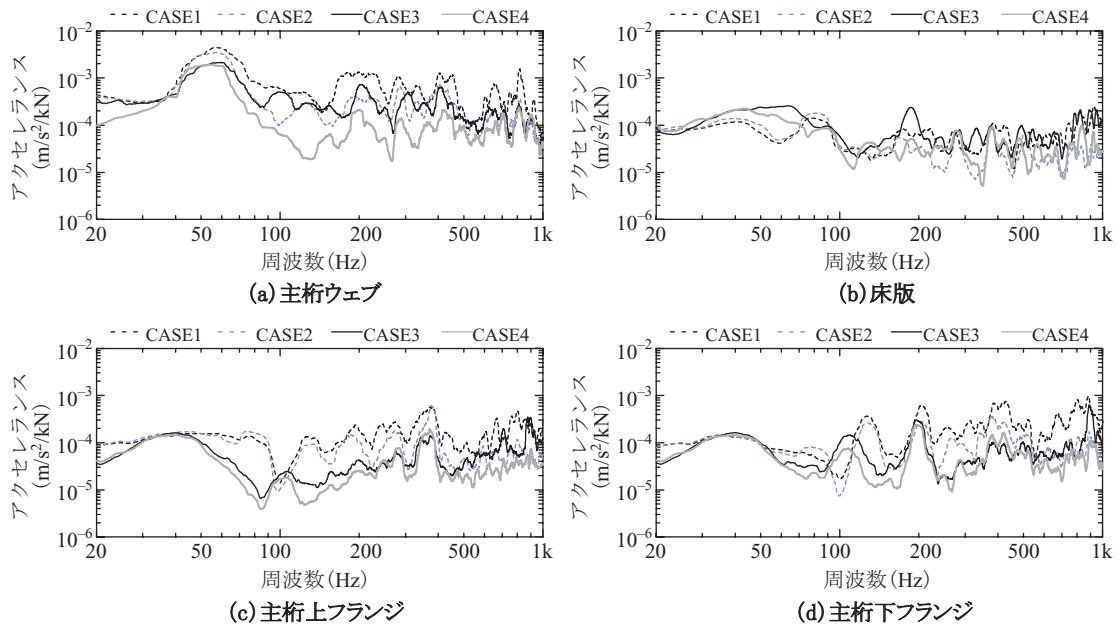


図3 インパルスハンマによる衝撃加振試験結果

ペクトルを加振力スペクトルで基準化した周波数応答関数（以下、アクセラランス）で行った。また、列車走行試験では、桁部材（床版、主桁上フランジ、主桁ウェブ、主桁下フランジ）に取り付けた加速度計（リオンPV85）より得られた振動加速度の時刻歴データから振動加速度レベル L_a を求め、式(1)に基づき、

$$L_v = L_a - 20 \log(2\pi f) + 46 \quad (1)$$

振動加速度レベルを振動速度レベル L_v に変換して評価することとした⁴⁾。ここで、 f は1/3オクターブバンド中心周波数である。

構造物音の音源となるのは、一般に主桁、縦桁および横桁のウェブやフランジであると考えられる。そこで別途加速度計（リオンPV85）を20個アレイに配置（格子状に高密度配置）して、モードの腹となると推定されている箇所をインパルスハンマ（東陽テクニカ086D50型）で加振し、各部材の振動モードを分析した。具体的には、基準点と各測定点とのクロススペクトルから振動モードの候補をストックし、各候補のフーリエ振幅と位相に基づきモード図を作成した。

なお、騒音の評価は沿線に設置した騒音計を用いて行うことも考えられるが、本模型桁は桁架設にあたり地盤を3m程度掘削して桁を架設しており、床版裏（桁下）および模型桁から離れた位置での騒音については、ピット内での反響音が含まれると考えられる。またピットから外への音の伝播経路についても通常とはかなり異なった条件であるといえる。したがって、列車走行試験では軌道中心から12.5m地点の騒音測定も行ったが、本構造形式の構造物騒音低減効果の評価をするにあたっては対象外とすることとした。

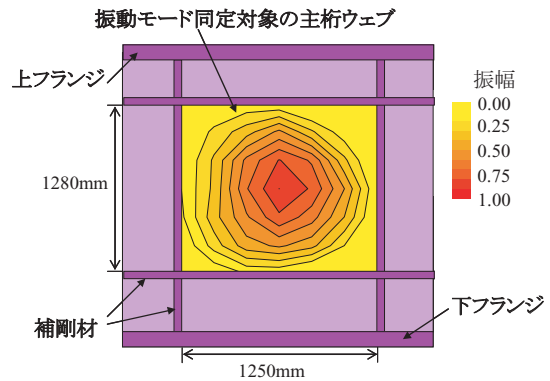


図4 主桁ウェブの50Hz付近の振動モード

3.3 インパルス加振試験結果

図3にインパルスハンマでレール頭頂面を打撃した際の加振力に対する主桁ウェブ、床版、主桁上フランジ、主桁下フランジのアクセラランスを示す。

主桁ウェブのアクセラランスは、50Hz付近にピークがあり、剛支持構造のCASE1と比較して、CASE3およびCASE4で低減効果があることがわかる。また、その他の周波数帯でも各ケースで低減効果があるが、その中でもCASE4の低減効果が最も大きかった。

図4に主桁ウェブの振動モード分析結果を示す。アレイ配置した加速度計から50Hz付近の振動モードは主桁ウェブの一次モードであることがわかった。

床版のアクセラランスは、CASE1と比較して、CASE2ではおよそ150Hz以上、CASE4では190Hz付近で低減効果があることがわかる。CASE3では、低減効果は見られず、30～80Hz、200Hz付近でアクセラランスが増加していることがわかる。

主桁上フランジのアクセラランスは、CASE1と比較し

特集：鉄道力学

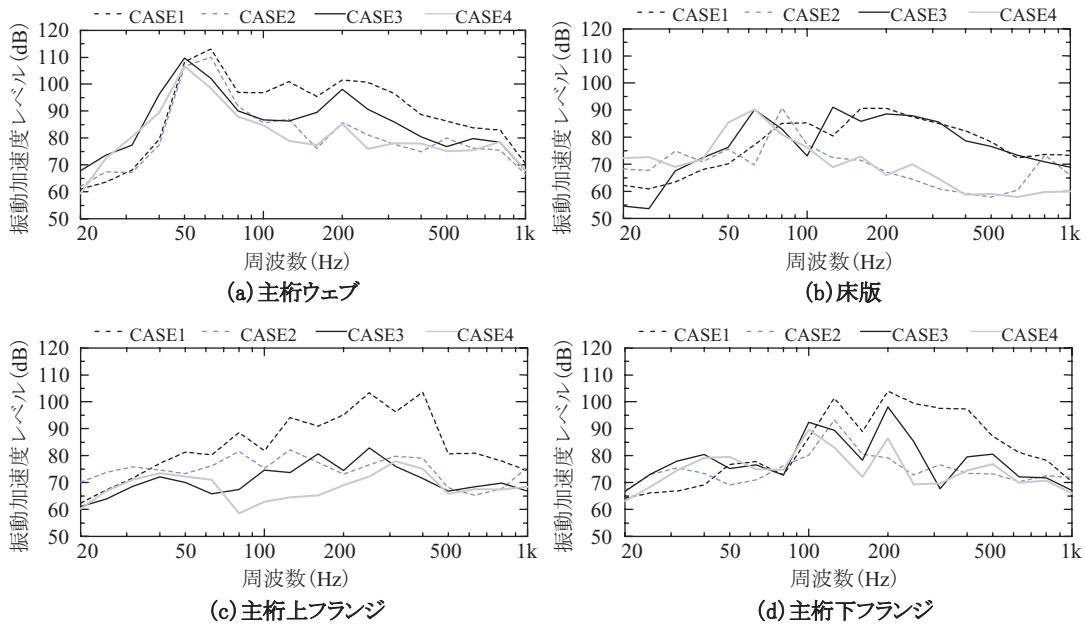


図5 列車通過時の1/3オクターブ振動加速度レベル（列車速度約40km/h）

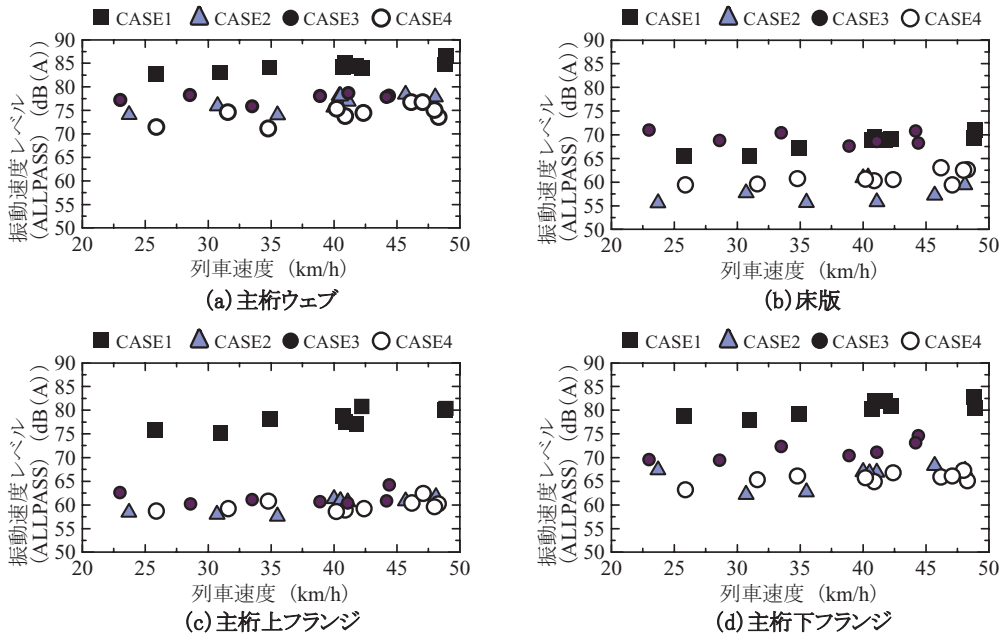


図6 列車速度と振動速度レベル（A特性補正あり，オールパス値）との関係

て、CASE2では400Hz以上、CASE3では50Hz～600Hzで低減効果があることがわかる。CASE4ではCASE2とCASE3の低減効果を包含する形で低減効果が得られることがわかる。

主桁下フランジのアクセラランスは、CASE1と比較して、CASE2では200Hz以上、CASE3およびCASE4ではおよそ100Hz以上で低減効果があることがわかる。

アクセラランスの大きさを部材レベルで見ると、主桁ウェブのアクセラランスが他の部材に比べて大きいことがわかる。特に主桁ウェブの一次固有振動数に相当する50Hz付近が最も大きいのが、CASE4では、この周波数帯域でアクセラランスが大きく低減していることが明らかになった。

3.4 列車走行試験結果

3.4.1 振動加速度レベルによる比較

図5に列車通過時（列車速度約40km/h）の主桁ウェブ、床版、主桁上フランジ、主桁下フランジの1/3オクターブバンド振動加速度レベル（A特性補正なし）を示す。同図の振動加速度レベルの大きさを部材レベルで比較すると、インパルス加振試験と同様に、主桁ウェブの振動加速度レベルが最も大きく、主桁ウェブの振動が支配的であることがわかる。

主桁ウェブの振動加速度レベルを見ると、剛支持構造のCASE1に比べて、80Hz以上でCASE2, 3, 4の低減効果があることがわかる。フローティング床版を有する

CASE3, 4はCASE1でおよそ60Hz付近だったピークが低周波数側へシフトし、ピーク振動加速度レベルも小さくなっていることがわかる。CASE2とCASE4がおよそ150Hz以上の帯域でほぼ同程度の振動加速度レベル、CASE2とCASE3がおよそ100Hz以下の帯域でほぼ同程度の振動加速度レベルであることから、主桁ウェブにおけるフローティング床版による低減効果はおよそ150Hzより低い周波数帯域、フローティング・ラダー軌道による低減効果は、およそ100Hzより高い周波数帯域となっていることがわかる。図4のアクセラランスと比べると、どの部材においても500Hz程度までの振動加速度レベルがピークとなる周波数帯や各ケースの値の大小関係の傾向が良く似ていることが明らかとなった。

3.4.2 振動速度レベルによる比較

図6に列車速度と桁部材の振動速度レベルのオールパス値 (A特性補正あり) との関係を示す。ここでの振動速度レベルは、列車通過時に得られた振動加速度レベルから求めているが、振動速度は、次の式(2)に示すように、

$$W = \sigma \rho c \bar{v}^2 S \quad (2)$$

放射音パワー W (W/m) に直接関連するパラメータであるため、構造物騒音の評価に対して適切な指標であると考えられる。ここで、 σ は音響放射効率、 ρ は空気密度 (kg/m³)、 c は空気中の音速 (m/s)、 \bar{v} は振動速度実効値 (m/s) A特性補正あり、 S は単位長さあたりの音響放射面積 (m²/m) である。図6の振動速度レベルを部材レベルで比較すると、アクセラランスおよび振動加速度レベルと同様に主桁ウェブの振動速度レベルが最も大きく、主桁ウェブが騒音に対しても支配的であることがわかる。以下、主桁ウェブを中心に述べる。

主桁ウェブの振動速度レベルを見ると、列車速度約40km/hで剛支持構造のCASE1に比べて、CASE2で7.5dB(A)、CASE3で6.1dB(A)、CASE4で10.1dB(A)の低減効果が得られた。このように、フローティング構造を採用すると、鋼橋の構造物騒音に大きく寄与する主桁ウェブの振動速度レベルで大幅な低減効果が得られることがわかった。

床版の振動速度レベルについては、列車速度約40km/hでCASE1に比べて、CASE2およびCASE4で5~8dB(A)の低減効果が見られるが、CASE3は同程度または増加しているものも見られる。これは、剛支持床版でもともと固定されていたものが、床版の拘束が弱まったために振動しやすくなった結果であると考えられる。

4. 構造物騒音低減効果の推定

4.1 推定方法

平成7年に環境庁より「在来鉄道の新設又は大規模改良に際しての騒音対策の指針について」が示された。こ

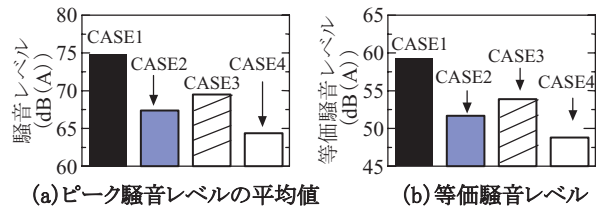


図7 ピーク騒音レベルの平均値および等価騒音レベルの推定結果

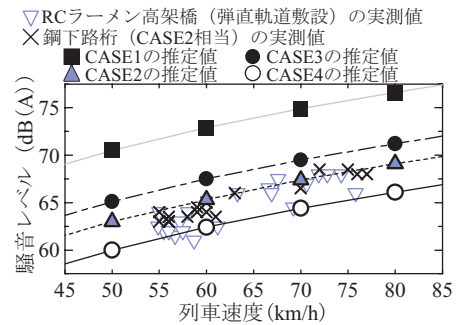


図8 軌道中心から12.5m地点における各ケースのピーク騒音レベル(平均値)の推定値と在来線における実測値

の中で、在来鉄道の新設又は大規模改良に際しての沿線環境への影響評価にあたって、等価騒音レベルによる評価を基本とすることが適当であると述べられている⁵⁾。等価騒音レベルは、騒音の発生頻度や継続時間を含めた評価を行うことが可能であり、鉄道のみならず道路交通など広く用いられている物理的な指標である。そこで、本研究においても、ピーク騒音レベルによる評価と合わせて、等価騒音レベルによる評価も行うこととした。ここで、本研究における試験結果および文献6を参考に、鋼鉄道橋の構造物騒音に大きく寄与する主桁ウェブの振動速度に着目し、音源解析手法⁴⁾等を用いてピーク騒音レベルおよび等価騒音レベルを推定し、各ケースの評価を行うこととした。ここで、式(2)に示したように放射音パワーは、一般に、部材の音響放射面積に影響を受けるため、本形式の鋼鉄道橋で一番面積の大きな主桁ウェブ(1.25m×1.28m)を用いて評価することは妥当であると考えられる。

騒音レベルの推定に当たり、推定条件を以下に示す。まず、構造物騒音パワーは、列車速度の3乗則に比例するものとし、測定で得られた主桁ウェブの振動速度レベルを在来線の営業速度を考慮した列車速度50, 60, 70および80km/hに換算する。次に式(3)より、主桁ウェブからの放射音パワーレベルを求める⁴⁾。

$$L_w = 10 \log(W/W_0) \quad (3)$$

ここで、 W_0 は音響パワーの基準値 $W_0=10^{-12}$ (W) である。さらに、音源を有限長線音源で近似したる在来線の騒音予測手法⁷⁾を参考に、ピーク騒音レベルおよび等価騒

特集：鉄道力学

音レベルを推定する。ピーク騒音レベルについては、推定条件として測定で得られた振動速度レベルをすべてそれぞれの列車速度に換算しているため、それぞれの列車速度におけるピーク騒音レベルの平均値となる。また、等価騒音レベルについては、軌道中心から12.5m地点における単発騒音暴露レベルをもとめ、列車長120m(20m車両で6両編成)、列車運転本数を180本として推定した。

4.2 推定結果

図7に上記の仮定条件の下でのピーク騒音レベルの平均値および等価騒音レベルの推定結果を示す。同図に示すように、ピーク騒音レベルの平均値については、剛支持構造のCASE1に比べて、CASE2では7.5dB(A)、CASE3で5.4dB(A)、CASE4で10.5dB(A)の低減効果があり、等価騒音レベルについては、CASE1に比べて、CASE2では7.6dB(A)、CASE3で5.4dB(A)、CASE4で10.4dB(A)の低減効果があることが推定された。

図8に軌道中心から12.5m地点における各ケースのピーク騒音レベル(平均値)の推定値と在来線における実測値(騒音計リオンNL04で測定)を示す。同図は、図7で得られた推定値の検証のために、構造形式が本模型桁と類似し、支持条件がCASE2と同等の在来線の鋼鉄道橋の実測値と比較を行ったものである。ここで、在来線騒音は、転動騒音や主電動機ファン騒音などが考慮すべき主要な音源として挙げられる¹⁾。しかし、実測を行った区間が直線区間であることや鋼鉄道橋の構造物騒音の寄与率が転動騒音を上回る事例も報告されていることなどから⁴⁾、実測値には主桁ウェブが構造物騒音に大きく寄与しているものと推察される。したがって、推定値には主桁ウェブの影響のみ考慮されているが、推定値の信頼性を評価する一つの指標にはなりうると考えられる。CASE2の推定値と実測値を比較するに、推定値はある程度信頼性があることを確認することができた。さらに、参考として、弾直軌道が敷設されたRCラーメン高架橋(鋼下路桁から起点側へ100m程度の位置、直線区間)の実測値も図8に示した。これにより、本研究で開発した軌道と床版をフローティング構造にした鋼鉄道橋により、弾直軌道が敷設されたRCラーメン高架橋と同等、もしくはそれ以下のレベルにまで構造物騒音を低減できる可能性があることがわかった。

5. まとめ

鋼鉄道橋の構造物騒音対策として、フローティング・ラダー軌道とフローティング床版を用いた新しい構造形式の鋼鉄道橋を開発した。本研究で得られた知見は以下の通りである。

(1) 実物大模型桁のインパルス加振試験により、剛支持

構造と比較して軌道と床版をフローティング構造にした場合では、主桁ウェブのアクセラランスのピーク値を低減できることがわかった。また、およそ100Hz以上ではフローティング・ラダー軌道、50Hz～100Hzではフローティング床版の低減効果が得られ、軌道と床版をフローティング構造にした場合ではそれらを包含する形で低減効果が得られることがわかった。

- (2) 実物大模型桁のインパルス加振試験により、アクセラランスが最も大きくなる部材は、主桁ウェブであることを確認した。また、主桁ウェブの卓越周波数はおよそ50Hzであり、これはアレイ配置した加速度計を用いたモード分析によりウェブの一次の固有振動数であることがわかった。
- (3) 実物大模型桁の列車走行試験により、構造物騒音と密接な関係にある主桁ウェブの振動速度レベルの低減効果を定量的に評価した。剛支持構造に対して、フローティング・ラダー軌道では7.5dB(A)、フローティング床版では6.1dB(A)、軌道と床版をフローティング構造にした場合では10.1dB(A)の振動速度レベルの低減効果を確認した(列車速度約40km/h)。
- (4) 騒音予測手法と上記列車走行試験結果に基づき、軌道中心から12.5m地点におけるピーク騒音レベルおよび等価騒音レベルを予測した。剛支持構造に対して、軌道と床版をフローティング構造にした場合では、ピーク騒音レベルで10.5dB(A)、等価騒音レベルで10.4dB(A)の低減効果が得られると推定した(列車速度70km/h換算)。

なお、本研究は、国土交通省の補助金を受けて実施した。

文献

- 1) 善田康雄他：現場技術者と設計者のための実用騒音・振動制御ハンドブック，pp.681-692，エヌ・ティー・エス，2000
- 2) 奥田広之，浅沼 潔，松本信之，涌井一：フローティング・ラダー軌道の耐荷性能と環境性能の評価，鉄道総研報告，pp.9-14，Vol.17，No.9，2003
- 3) 涌井 一，松本信之，奥田広之，浅沼 潔：フローティング・ラダー軌道の性能と用途，新線路，pp.24-26，Vol.56，No.5，2002
- 4) 半坂征則，杉本一朗，長倉 清，間々田祥吾：鋼構造物騒音の部材ごとの寄与度解析および対策材料の検討，鉄道総研報告，pp.21-26，Vol.21，No.2，2007
- 5) 環境庁在来鉄道騒音指針検討会：在来鉄道の施設又は大規模改良に際しての騒音対策の指針について，1995
- 6) 小芝明弘，阪本謙二，内藤 繁，志村雄三：制振鋼板を用いた低騒音鋼橋の研究，鉄道総研報告，pp.27-34，Vol.7，No.2，1993
- 7) 北川敏樹，長倉 清，緒方正剛：在来鉄道における騒音予測手法，鉄道総研報告，pp.41-46，Vol.12，No.12，1998