

新幹線コンクリート高架橋の振動・音響特性

上妻 雄一* 長倉 清*

An Investigation on Vibratory and Acoustical Characteristics of Concrete Bridge for Shinkansen

Yuichi KOZUMA Kiyoshi NAGAKURA

The railway bridge noise is generated by its vibration due to the wheel-rail interaction. In the vicinity of the bridge, the bridge noise often has greater contribution to the total wayside noise than other sources. Therefore, reduction of the bridge noise is an important issue for the wayside noise problem. We have investigated vibratory and acoustical characteristics of the concrete rigid-frame bridge for Shinkansen by field tests and numerical analysis to promote a better understanding of the bridge noise. In addition, we also conducted analysis for the girder concrete bridge, and confirmed the availability of the numerical analysis.

キーワード：構造物音，コンクリート高架橋，振動モード解析，境界要素法，有限要素法

1. はじめに

鉄道の構造物音は、レール・車輪表面に存在する凹凸に起因した加振力と、車両の軸通過に伴う鉛直方向荷重の変動により生じた加振力が、軌道を介してコンクリート高架橋等の構造物に伝達され、構造物の各部材が振動することによって発生する¹⁾。鉄道沿線騒音全体に対する構造物音の寄与は、一般に他の音源に比べるとやや小さいが、高架橋に隣接する箇所においては大きい場合もあり、構造物音低減が沿線騒音問題における重要な課題の1つとなっている。

筆者らは、構造物音の特性を理解する第一段階として、衝撃加振試験の結果から、新幹線のラーメン高架橋の振動特性を明らかにした。高架橋の音響特性に関しては、衝撃加振試験の結果から同定した振動モード形状と、現車走行時の振動分布の組み合わせによる境界条件を設定し、境界要素法を用いた放射音解析を行った。また、新幹線の桁式高架橋に対して、衝撃加振試験の結果に替えて、有限要素法により得られた振動モード解析結果を用いて、放射音解析を実施し、その有用性を検証した。

2. ラーメン高架橋の衝撃加振試験と振動特性

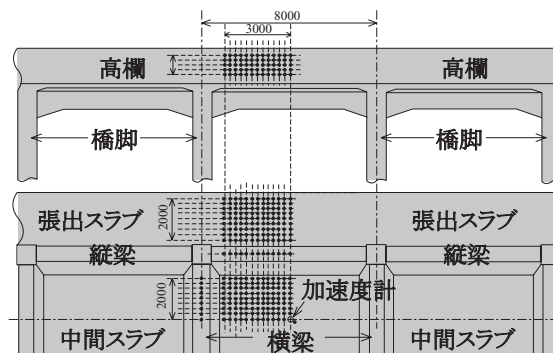
2.1 衝撃加振試験

新幹線のラーメン高架橋（3径間）における振動モードの同定を目的とし、インパルスハンマーを用いて図1(b)に示す黒丸部（321点）を衝撃加振し、中間スラブ

中央部に設置した振動加速度計の応答とハンマー加振力の間の伝達関数を求めた。なお、高架橋が橋脚間の線路長手方向とマクラギ方向において、ほぼ対称形状であるときみなし、加振範囲は3径間高架橋の中央径間1/4の領域に限定した。



(a) 打撃風景



(b) 打撃点および振動加速度計配置(単位:mm)

図1 ラーメン高架橋に対する衝撃加振試験

* 環境工学研究部 騒音解析研究室

特集：環境技術

2.2 ラーメン高架橋の振動特性

2.1 節により実施した衝撃加振試験で得られた中間スラブ中央部の上下方向の加振点応答としてアクセラランス（単位力あたりの振動加速度応答）を図2に示す。

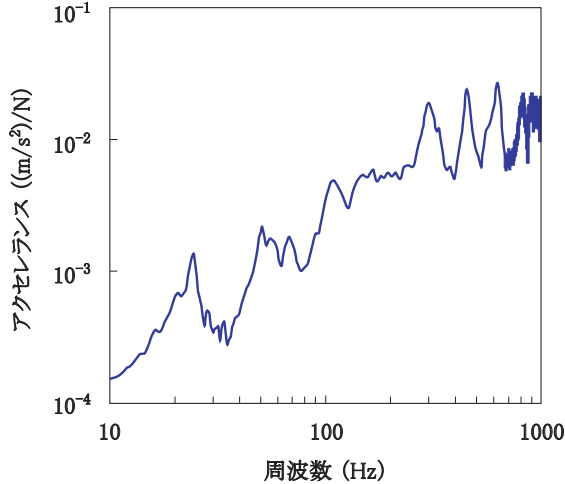


図2 ラーメン高架橋中間スラブ中央部の上下方向加振点応答

この結果は、200Hz以下の低周波数域で文献2)の衝撃加振試験結果と概ね傾向は一致している。

また、300Hz、450Hzおよび600Hz付近においてピークが明確に発現している。この傾向について、北川らによる別箇所における同様の構造のラーメン高架橋に対する測定結果では、200Hz以上の周波数域で周波数応答のピークは明確ではなく²⁾、300Hz以上の周波数域における応答ピークの有無を決定付けた要因については、今後精査を要する。

衝撃加振試験で得られた中間スラブ中央の応答とハンマー加振力との間の伝達関数から振動モードの同定を行い、得られた代表的な振動モード形状を図3に示す。以下に

代表的な振動モード形状からわかることを整理する。

図2における24Hzのピークは、高架橋のスパン全体が同位相で振動するような振動モード形状(図3(a))に対応する。

52Hz(図3(b))および108Hz(図3(c))は、中間スラブ中央部が振動の腹部となるような振動モード形状であり、52Hzは、張出スラブにおいて中間スラブと逆位相の振動を伴う。

194Hz(図3(d))および229Hz(図3(e))は、高架橋中間スラブに円環状の節を含み、張出スラブも大きく変形する振動モード形状であり、229Hzは、張出スラブのレール長手方向に振動の節部が発現する。

301Hz(図3(f))、451Hz(図3(g))および625Hz(図3(h))は、中間スラブ内を局部的に伝搬する曲げ振動に起因したモード形状とみられ、張出スラブや高欄の振動は極めて小さい。

なお、本報告の振動モード同定にあたっては、中間スラブ中央部における周波数応答ピークを中心に進めたが、実際は特に100Hz以上の周波数域において多数の振動モードが重ね合わさっていると考えられ²⁾、全ての振動モードを同定しきれていない点に注意を要する。

3. ラーメン高架橋の放射音

3.1 現車走行時の放射音・振動分布測定

ラーメン高架橋の音響特性を求めめるため、衝撃加振試験を実施した箇所に対して、現車走行時の高架橋まわりの放射音分布測定と境界要素法による放射音解析を実施した。

現車走行時の放射音は、高架橋裏面(S0H)、高架橋直下(S0)、軌道中心から12.5m地点(SD12.5)および高架橋を垂直面内で放射状に取り囲む箇所など合計13点

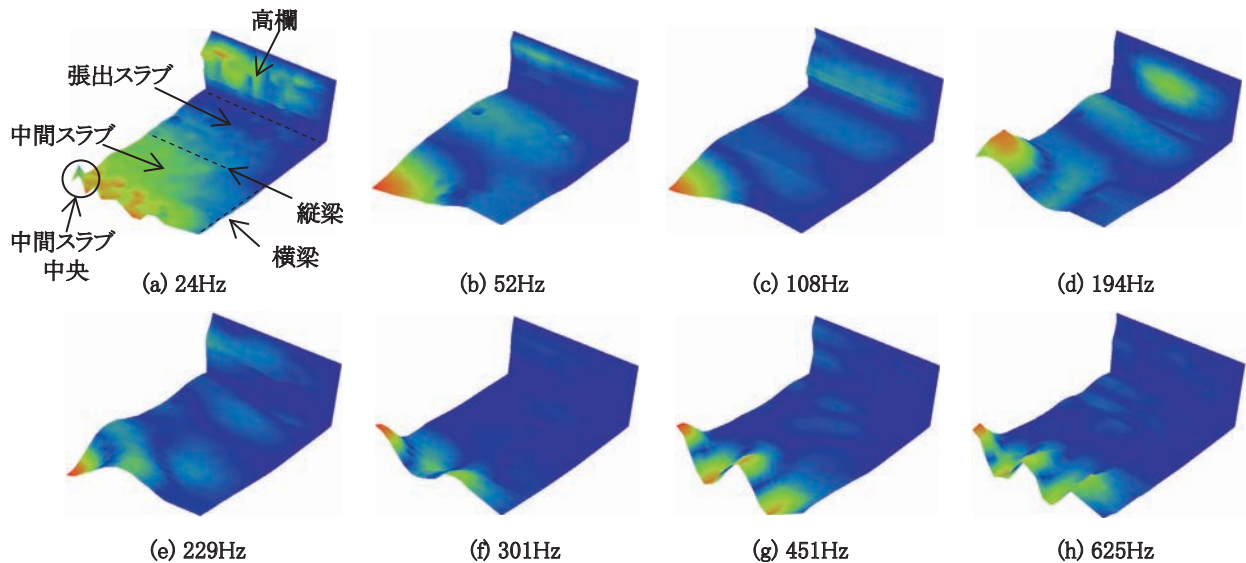


図3 ラーメン高架橋の振動モード形状の例

で測定した(図4)。

また、放射音解析における高架橋の振動境界条件は、2.1節で述べた衝撃加振試験の実測結果と、現車走行時の高架橋上8点の振動分布測定(図5)から与えた。

測定対象列車は、本測定の目的が構造物音の評価であるため、他の音源パワーレベルが小さくなる低速走行列車(時速約70km/h、下り線走行)とした。

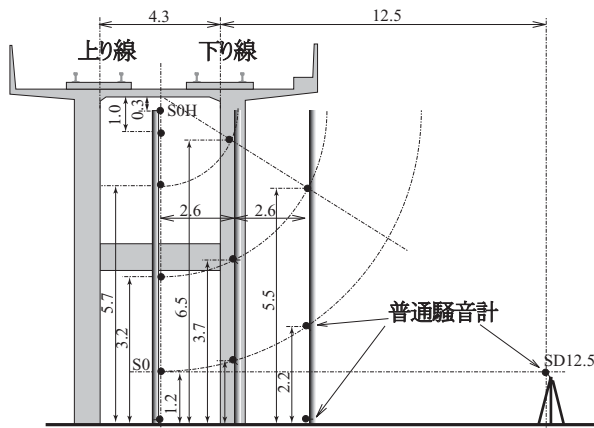


図4 現車走行測定騒音計配置(単位:m)

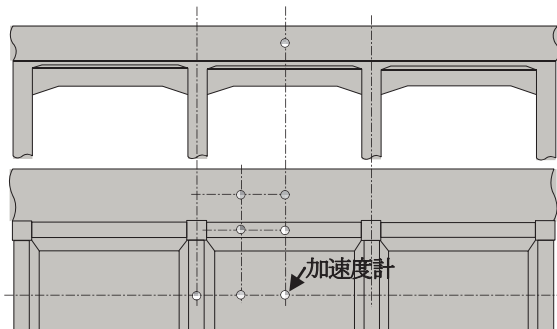


図5 現車走行測定振動加速度計配置

3.2 境界要素法による放射音解析方法

放射音解析は、図6に示す解析モデルを用いて、SYSNOISE⁴⁾をソルバーとして境界要素法にて行った。なお、衝撃加振試験の測定範囲を3径間高架橋の中央径間1/4の領域としたため、解析モデルも1/4カットモデル

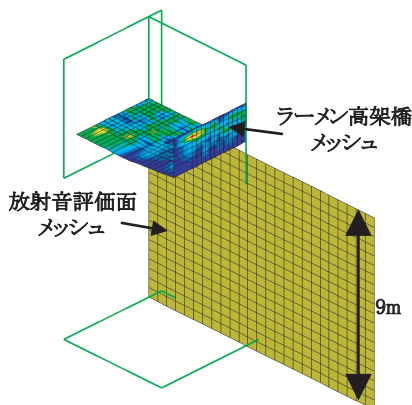


図6 境界要素モデル

とし、各切断面には対称境界条件(完全反射条件)を与えた。また、地面による反射を再現するため、地表面高さにも対称境界条件を設定した。

高架橋の境界要素メッシュは、衝撃加振試験における加振点位置(図1(b))に対応するよう作成した。この結果、適切に音場の状態を記述できるとされる、音波1波長あたり6要素を含む解析周波数($f=c/6l$)は、メッシュサイズ $l(=0.25m)$ と音速 $c(=340m/s)$ の関係から、226Hzとなる。

高架橋モデルの各要素 i における j 方向の振動変位 $u_{ij}(\omega)$ は、1次～ M 次の固有モードの線形結合から表現できるといふ考え方³⁾に基づいて、式(1)のように与えられる⁴⁾。

$$u_{ij}(\omega) = \sum_{k=1}^M \xi_k(\omega) \Phi_{ijk} \quad (1)$$

ここで、 ω は角周波数、 $\xi_k(\omega)$ は振動変位 $u_{ij}(\omega)$ の中に k 次の固有モード成分がどの程度含まれているかを示すモードの刺激係数、 Φ_{ijk} は要素 i における j 方向の k 次固有モード変位である。

各振動モードの刺激係数 $\xi_k(\omega)$ は、測定または数値解析により振動モード形状 Φ_{ijk} と振動データ $u_{ij}(\omega)$ が既知であれば、これらを式(1)に代入し、連立方程式から得られる。

ここでは、振動モード形状は2.1節の衝撃加振試験結果(最大モード次数 $M=57$ ($\sim 700Hz$))を、振動データは3.1節の現車走行測定結果(振動データ点数 $N=8$)を用いた。連立方程式を解く際、振動データ点数が最大モード次数より少ないため、特異値分解⁴⁾を使用した。

以上の手順により得られた各固有モードの刺激係数 $\xi_k(\omega)$ と振動モード形状を、式(1)に代入することで、高架橋モデル全要素の法線(n)方向振動速度 $v_{n,i}(\omega)$ が式(2)のように求まり、これらを振動の境界条件として設定した。

$$v_{n,i}(\omega) = \sum_{k=1}^M i\omega \xi_k(\omega) \Phi_{n,ik} \quad (2)$$

3.3 現車走行時の放射音測定結果と解析結果の比較

現車走行時の放射音および境界要素法による解析結果について、図4の高架橋裏面(S0H)、高架橋直下(S0)および12.5m地点(SD12.5)における騒音の周波数分布を図7に示す。

高架橋裏面(S0H:図7(a))および高架橋直下(S0:図7(b))では、解析結果と測定結果が示す傾向は概ね一致する。

一方、12.5m地点(SD12.5:図7(c))では、ほぼ全ての周波数域で測定結果が解析結果を上回る。これは、測定結果には構造物音だけでなく、他スパンからの放射音や防音壁から回り込んだ転動音などの車両下部騒音の寄与も含まれている等の影響が考えられる。図8および図9に、現車走行測定および境界要素法による解析から得られた高架橋まわりの放射音分布を示す。図8および

特集：環境技術

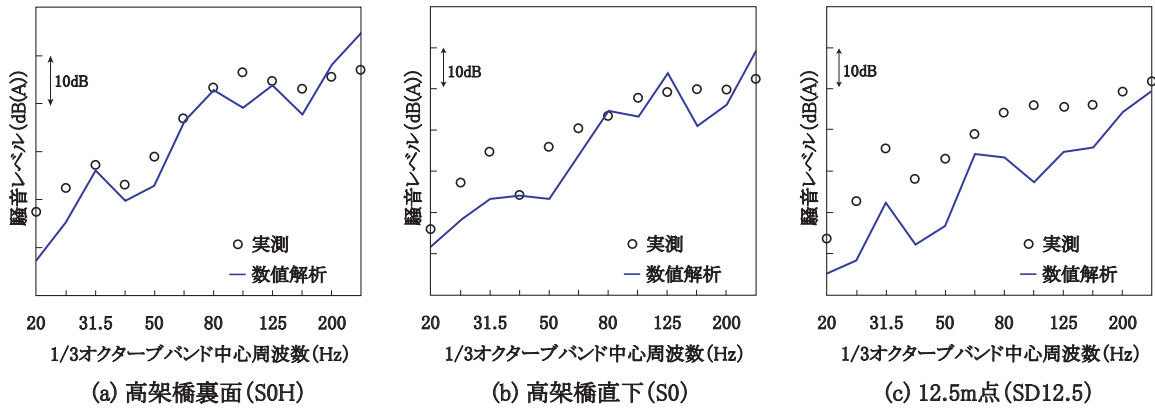


図7 現車走行時の放射音測定結果および解析結果

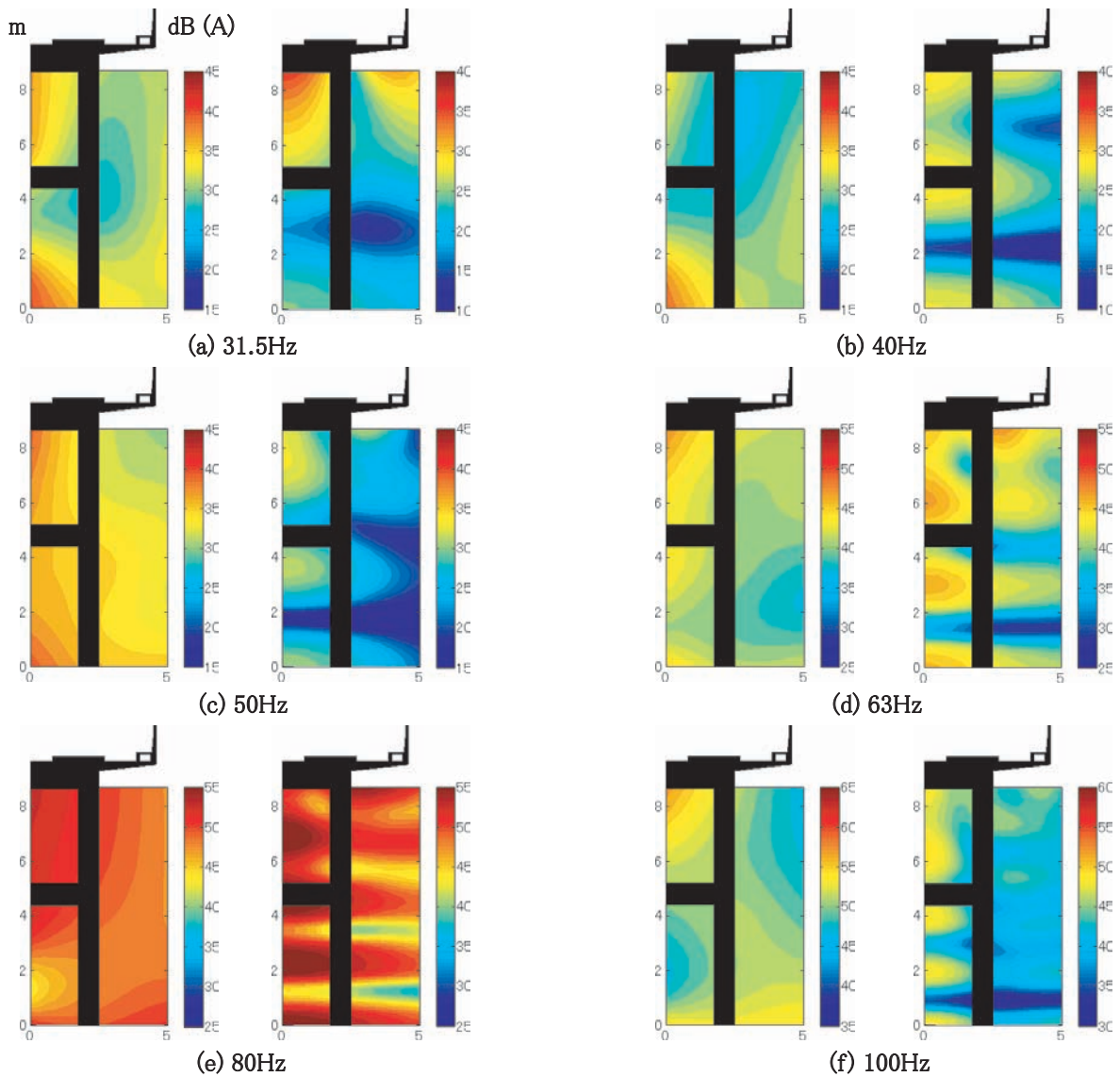


図8 ラーメン高架橋まわりの放射音分布図(31.5Hzバンド～100Hzバンド, 左:実測, 右:数値解析)

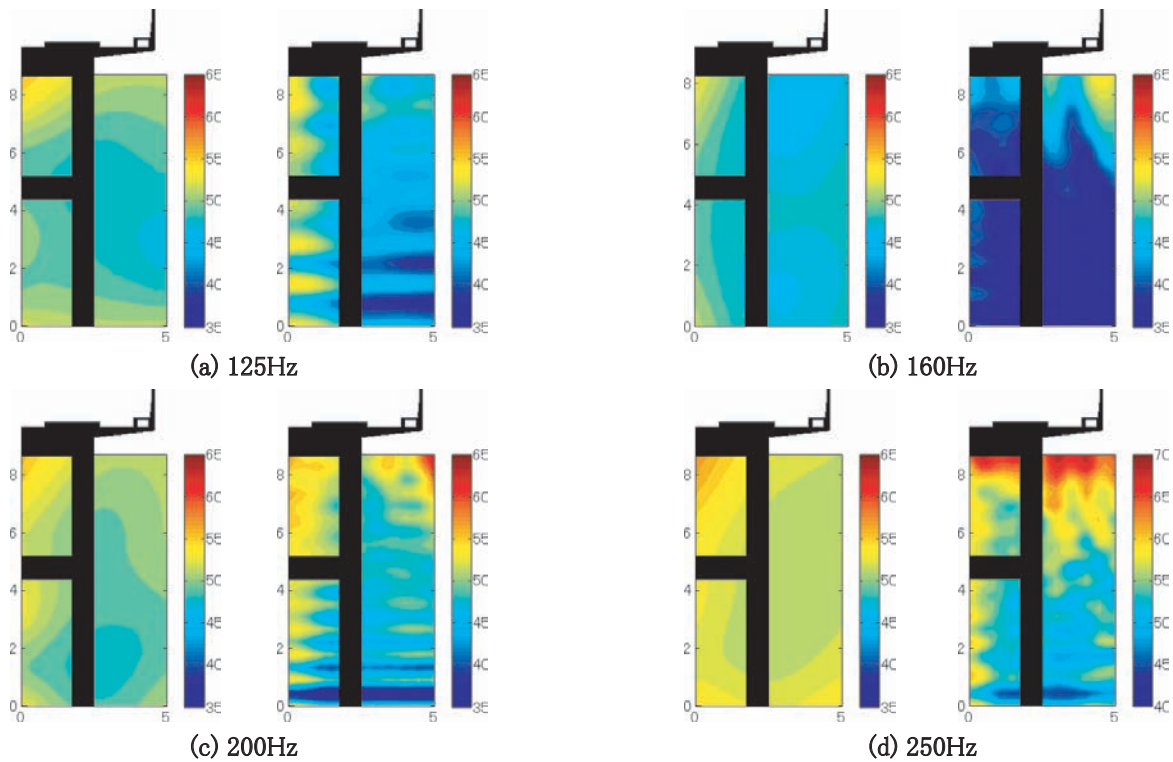


図9 ラーメン高架橋まわりの放射音分布図（125Hzバンド～250Hzバンド，左：実測，右：数値解析）

図9からわかることを以下に整理する。

測定結果と解析結果の騒音レベルのオーダーは、ほぼ一致する。

ただし、張出スラブや高欄に着目すると、数値解析では160Hzバンド以上の周波数域において音の放射が強いという結果が得られている。この点については測定結果と異なり、今後精査を要する。また、測定結果と解析結果ともに63Hzバンド以下の周波数域において、中間スラブ直下の地表付近で騒音レベルが高くなる傾向にある。これは高架橋裏面と地面との間で共振に起因した現象が発生している可能性を示唆している。

4. 桁式高架橋に対する放射音解析

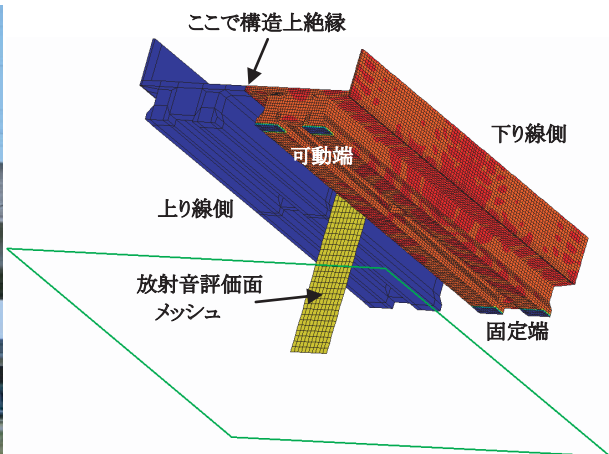
4.1 放射音解析の概要

前章までに示した、構造物の振動モードと実車走行時の構造物振動の組み合わせによる境界条件を適用した構造物音の解析手法の妥当性を検証するため、図10(a)に示す新幹線の桁式高架橋に対して解析を実施した。

前節では、衝撃加振試験から得られる振動モード形状を使用した。ここではそれに替わるデータとして、NX NASTRANをソルバーとした有限要素法による500Hz以下の振動モード解析の結果を用いた。



(a) 解析対象とした桁式高架橋



(b) 解析モデル

図10 桁式高架橋

特集：環境技術

解析対象の桁式高架橋は、両端で支持され、一方は固定端、もう一方は可動端（レール長手方向と上下方向）である。したがって、解析モデル（図10(b))における支持部相当の節点に対しても、実物と同じ拘束条件を設定した。また、上り線側の桁は下り線側の桁と結合していないため、全境界面に対して振動速度を0とした。

また、3章のラーメン高架橋と同様に、地面による反射を再現するため、地表面高さにも対称境界条件を設定した。

比較のための現車走行時の構造物振動と放射音は、新幹線車両が速度160km/hで下り線を走行した際の振動加速度計（図11：V1～V5）および普通マイクロホン（図11：S0H, S0）の測定結果を用いた。

4.2 現車走行時の放射音測定結果と解析結果の比較

図11の普通マイクロホン設置箇所における騒音の周波数分布の実測結果および計算結果を図12に示す。

高架橋裏面（S0H：図12(a))および高架橋直下（S0：図12(b))のいずれも、解析結果と測定結果が示す傾向は概ね一致する。この結果は、コンクリート高架橋の形式によらず、高架橋の振動モード形状などの境界条件が適切に与えられれば、境界要素法を用いた放射音解析が構造物音の予測における有効なツールの1つになり得ることを示している。

5. まとめ

新幹線のラーメン高架橋に対して衝撃加振試験を実施し、高架橋の振動モードの同定を行った。また、衝撃加振試験から得られた振動モード形状と現車走行時の高架橋振動測定結果の組み合わせによる振動境界条件を境界要素法解析モデルに与えて放射音解析を行い、現車走行

時の放射音測定結果との比較、評価を行った。その結果、250Hzバンド以下の周波数域で測定結果と解析結果は概ね一致した。

また、新幹線の桁式高架橋に対して、有限要素法による振動モード解析結果と現車走行時の高架橋振動測定結果の組み合わせによる振動境界条件を与えた境界要素法による放射音解析を行い、測定結果と解析結果は概ね一致した。

以上に示した異なる形式のコンクリート高架橋に対する解析結果から、振動モード形状と構造物に対する加振力が適切に与えられれば、境界要素法を用いた放射音解析が、250Hzバンド以下の周波数域では構造物音の予測における有効なツールの1つとなる見通しを得た。

今後は、本報告の手法を応用し、構造物音の現象解明の深度化や予測手法の確立を進めていく予定である。

謝辞

本報告の現車走行測定を実施するにあたり、多大なる御協力をいただいた西日本旅客鉄道株式会社技術部および東日本旅客鉄道株式会社研究開発センター先端鉄道システム開発センターの関係者に感謝の意を表す。

文献

- 1) Thompson, D.J.: Railway noise and vibration, Elsevier, pp. 125-173, pp. 363-365, 2009.
- 2) 北川敏樹, 長倉清: 鉄道コンクリート高架橋の振動解析, 日本機械学会第19回環境工学総合シンポジウム2009講演論文集, pp.86-88, 2009
- 3) 長松昭夫: モード解析入門, コロナ社, 1993
- 4) LMS SYSNOISE, Revision 5.6 User's Manual, LMS, 2003.

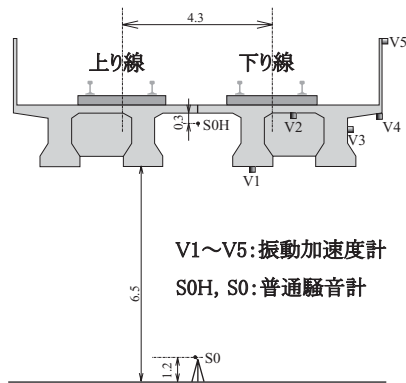
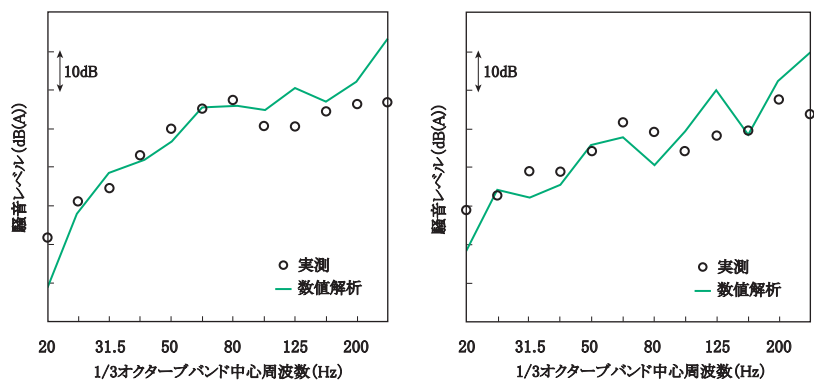


図11 現車走行測定機器配置 (単位：m)
※V2のみ長手方向スパン長の1/4の位置に設置、その他はスパン中央に設置



(a) 高架橋裏面(S0H) (b) 高架橋直下(S0)

図12 現車走行時の放射音測定結果および解析結果