

数値計算による 構造物音を含む 在来鉄道騒音の予測



伊戸川 絵美*



石川 聡史***



柳沼 謙一**



清水 満*

在来線沿線において、構造物音が卓越する鋼鉄道橋に対する構造物音対策は重要な課題である。しかし、鋼鉄道橋から発生する構造物音を含めた沿線騒音の定量的な予測・評価手法は整備されていないのが現状である。

今回、関東近郊の在来鉄道において構造物音調査および振動測定を実施し、鋼鉄道橋の主要振動部位の振動と、振動に伴って放射される構造物音の関係について調べた。その後、測定結果より鋼鉄道橋での振動から構造物音を予測する手順を考案し、時間領域有限差分法による構造物音を含めた在来線騒音予測手法を構築した。

その結果、概ね3dB以下の精度で予測できることが分かった。さらに、同一構造形式の測定箇所でも実施した検証測定においても、同様の精度で予測できることを確認した。

●キーワード：数値計算、構造物音、在来鉄道騒音、FDTD法

1. はじめに

在来線沿線では構造物音が卓越する鋼鉄道橋（以下、鋼橋）において苦情が多発しているため、鋼橋に対する構造物音対策は重要な課題となっている。構造物音発生を抑制する騒音対策工については、従来から開発が進められているところではあるが、有効な騒音対策工を提案するうえで必要な、鋼橋から発生する構造物音を含めた沿線騒音の定量的な予測・評価手法は整備されていないのが現状である。

今回、関東近郊の在来鉄道において、上路鋼I桁（以下、I桁①：図1）、上路鋼箱桁（以下、箱桁①：図2）、平地（図3）を対象に構造物音調査および振動測定¹⁾を実施した。測定結果より、鋼橋の主要振動部位の振動と振動に伴って放射される構造物音の関係について調べた。つぎに、鋼橋での振動から構造物音を予測する手順を考案し、時間領域有限差分法（Finite Difference Time Domain method：FDTD法）による構造物音を含めた在来線騒音予測手法を構築した。

また、本予測手法の妥当性を確認するために実施した同一構造形式の上路鋼I桁（以下、I桁②）および上路鋼箱桁（以下、箱桁②）における実測値と予測値の比較、検証結果についても併せて報告する。

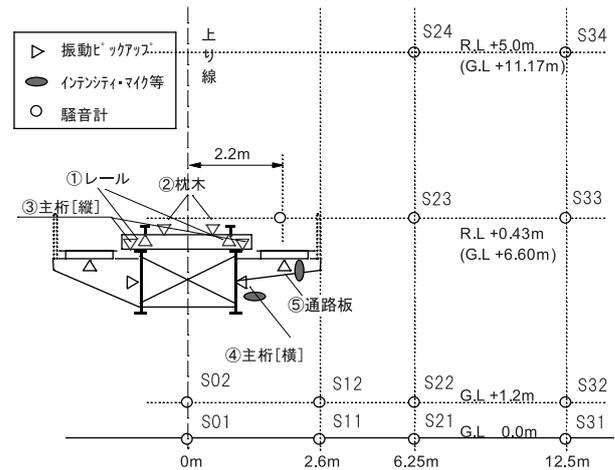


図1 I桁①における観測点位置

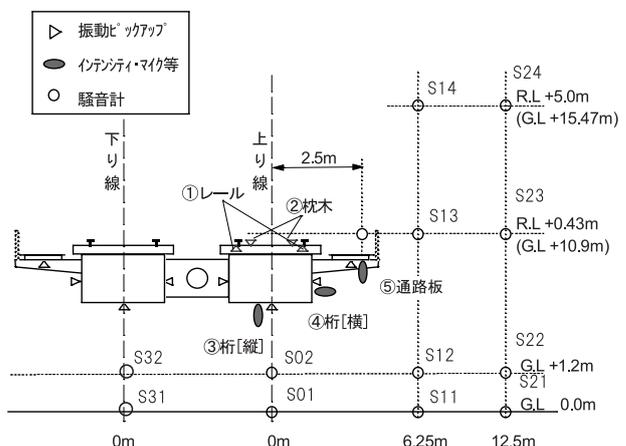


図2 箱桁①における観測点位置

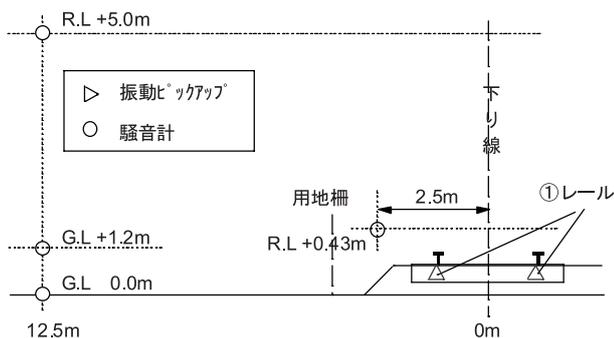


図3 平地における観測点位置

2. 構造物音調査および振動測定

2.1 調査概要

関東近郊の在来鉄道において実施した調査の概要を示す。調査箇所は、図1～3に示すように、関東近郊の在来鉄道の路線から、I桁①、箱桁①、平地区間を対象に、レール継目音の影響が少ない調査箇所を選定した。

調査においては、列車走行時と人工的な加振源を使用した場合の2つのケースにおいて測定を行い、構造物の振動によって放射される騒音の放射パワーを推定した。

2.2 調査方法

2.2.1 レール加振試験

図4に示すとおり、ハンマー打撃によりレールを加振し、各測定点での騒音、振動、音響インテンシティを計測した。レール打撃点からの放射音の影響を避けるため、ハンマー打撃箇所を防音ボックスで囲み、レールからの放射音の低減を試みた。これにより、レール振動に起因した構造物音を把握するとともに、主たる構造物の振動と放射音の関係を推定した。



図4 レール加振試験

2.2.2 列車走行に伴う騒音振動調査

列車走行時における各測定点で騒音、振動、音響インテンシティを計測した。また、車両機器音と転動音の影響を除去するために、後日、平地区間で同一列車を対象とした車両騒音（車両機器音と転動音）を計測し、鋼橋での沿線騒

音からエネルギー的に差し引くことで、構造物音を推定した。

なお、無道床の鋼橋区間とバラスト軌道の平地区間では軌道条件が異なるため、図5に示すとおり、両調査区間の軌道面上にスピーカを設置して同じパワーの試験音を放射し、車両機器音と転動音の軌道構造による伝播特性の違いを考慮した。なお、構造物の振動と放射音を比較するために、車両走行時に生じる振動は振動速度として評価を行った。また、振動速度レベルの基準値は $5 \times 10^{-8} \text{m/s}$ とした。



図5 スピーカ試験

2.3 鋼橋の主要部位の振動と放射音の関係

鋼橋上を列車が通過する際、レールから橋梁の各振動部位に伝播した振動に起因した放射音（構造物音）が発生する。したがって、列車通過に伴う振動に起因する構造物音の音源は、橋梁上に広がる列車と同等の長さをもつ音源と考えられるため、構造物音の音源全体の放射パワーは図6に示すような各振動部位を囲むように配置した仮想境界面の面積と当該箇所を通過する音響インテンシティから算出することができる。

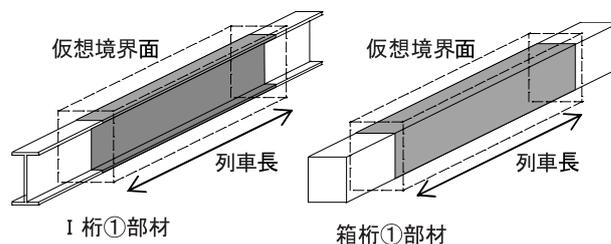


図6 振動部位を囲む仮想境界面

そこで、列車通過に伴う振動に起因する構造物音源全体の放射パワーを算出する手順として、まずレール加振時の橋梁の主要振動部位での振動速度レベルとその近傍点の音響インテンシティレベルの計測結果をもとに、振動速度と放射音の強さの関係を求めた（図7～8）。つぎに、図7～8の結果を利用し、列車通過時の振動速度に対する各部位からの放射音の強さ I を推定した（図9～10）。

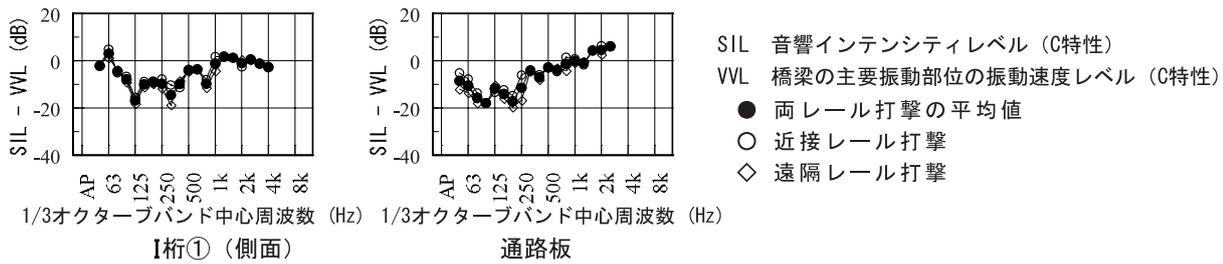


図7 I桁①および通路板の振動速度と放射音の関係 (レール加振試験の分析結果)

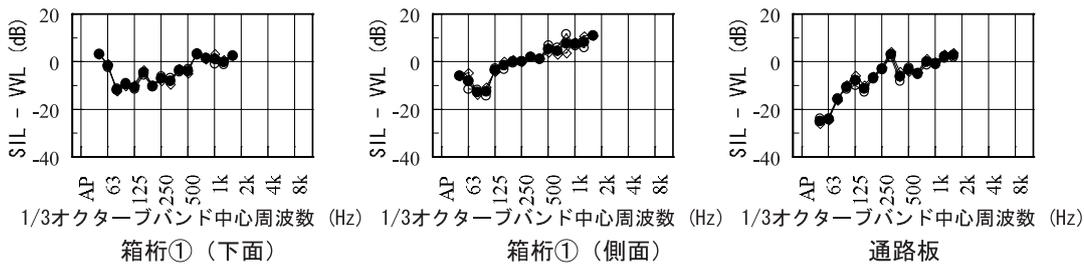


図8 箱桁① (下面および側面) および通路板の振動速度と放射音の関係 (レール加振試験の分析結果)

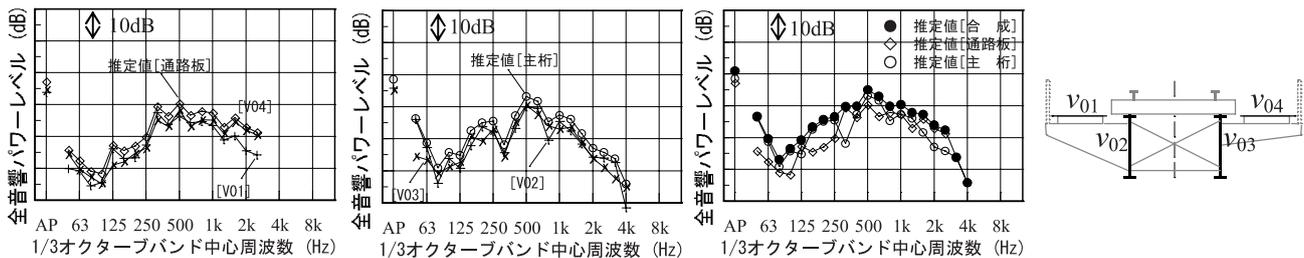


図9 I桁①における構造物音の全音響パワーレベル

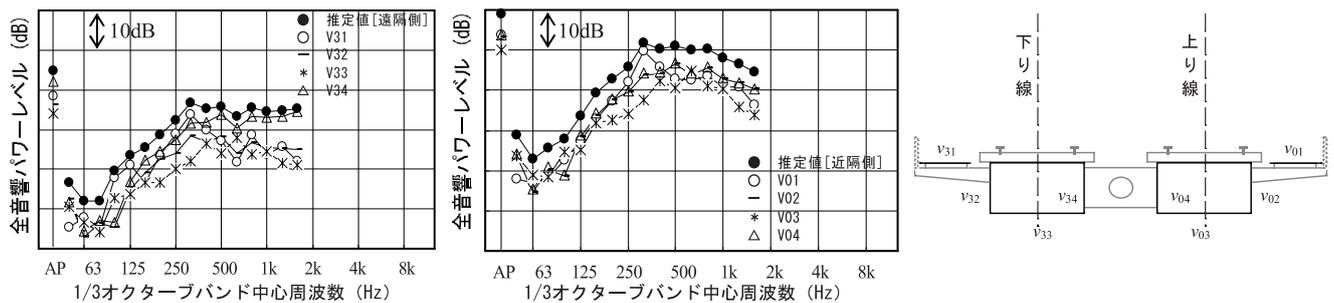


図10 箱桁①における構造物音の全音響パワーレベル

なお、I桁①部材の上下面および箱桁①部材の上面からの放射音は、まくらぎによる遮蔽などの影響により寄与が小さいと考え、同部材からの放射音は考慮しないこととした。

図9のI桁①の推定結果より、左右の主桁V02、V03 (I桁①)、左右の通路板V01、V04はほぼ同じ音響パワーで、周波数特性も概ね一致している。主桁と通路板の音響パワーを比較すると、通路板よりも主桁の方が若干大きい。

図10の箱桁①の推定結果より、通路板V01、箱桁 (側面) V02、V04はほぼ同じ音響パワーで、最も小さいのは箱桁 (下面) V03である。また、遠隔側軌道の音響パワーレベルは近

接側 (列車走行側) 軌道の10dB未満であり、沿線の騒音に対する寄与度は低いことから、遠隔側軌道からの構造物音発生は考慮せず、騒音予測を行うこととした (3.3節参照)。

3. 在来線騒音予測手法構築の概要

3.1 FDTD法による騒音予測

2節の構造物音調査および振動測定結果から、FDTD法による騒音予測を行った。予測は、解析領域を2次元音場として扱い、領域内を正方メッシュに分割して、音場における

音圧 $q(x,y,t)$ 、 x,y 方向の粒子速度 $u(x,t),v(y,t)$ を「運動の式」(式(1))と「連続の式」(式(2))に従って交互に計算することで観測点での音圧 $q(x,y,t)$ の時間波形を求めた。

$$-\frac{\partial q(x,y,t)}{\partial x} = \rho \frac{\partial u(x,t)}{\partial t}$$

$$-\frac{\partial q(x,y,t)}{\partial y} = \rho \frac{\partial v(y,t)}{\partial t} \dots \dots (1)$$

$$-\frac{\partial q(x,y,t)}{\partial t} = \kappa \left(\frac{\partial u(x,t)}{\partial x} + \frac{\partial v(y,t)}{\partial y} \right) \dots \dots (2)$$

(ρ : 空気密度、 κ : 体積弾性率)

3.2 初期条件の検討

図1~2に示す各観測点の沿線騒音を予測するための、FDTD法による数値計算の初期条件を検討した。なお、音源の性状の違いにより車両走行音と構造物音とに分けて予測した後に、それらを合成することにより沿線騒音を算出することとした。

車両走行音については、粒子速度の初期値を0として、時刻 $t=0$ で空間的にガウス分布型の音圧分布を与えている。一方、振動に伴って発生する構造物音については一定の継続時間をもつ振動速度波形を与えることを考え、音圧の初期値を0として、粒子速度としてガウス分布型のパルス状の時間波形 $U(t)$ (Gaussian pulse、式(3))を用いることとした。

$$U(t) = A \cdot e^{-\{(\Delta t \times n - T) / (0.29 \times T)\}^2} \dots \dots (3)$$

ここで、 Δt はFDTD法の時間分解能 ($=1/f_s$ 、 $f_s=64\text{kHz}$)、 n は時刻 $t=0$ を基準とした離散データの番号で、 $t=\Delta t \times n$ 、 $n=0, 1, 2, \dots$ である。また、 T は式(4)で与えられる値である。

$$T = 0.646/f_0 \dots \dots (4)$$

ここで、 $f_0(\text{Hz})$ は式(3)に示すGaussian pulseのパワースペクトルが3dB低下する遮断周波数である。本報では $f_0=1\text{kHz}$ とした場合のGaussian pulseの時間波形 $U(t)$ を適用した。図11、図12に、 $U(t)$ の時間波形とFFT分析結果を示す。

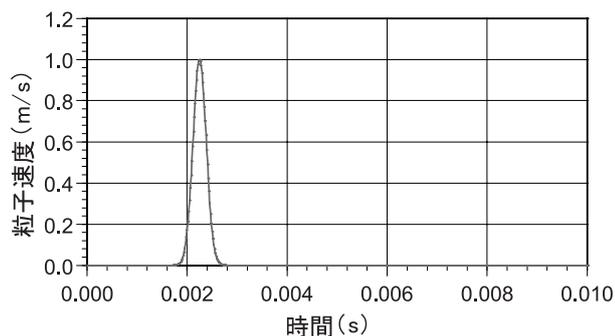


図11 Gaussian pulse $U(t)$ の時間波形

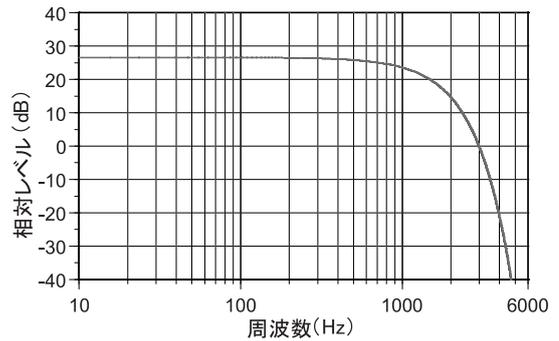


図12 Gaussian pulse $U(t)$ のFFT分析結果

3.3 鋼橋からの放射音モデルの作成

本報では、鋼橋からの放射音源について以下のようなモデルを作成した。車両音源については2次元の無指向性点音源、構造物音源については橋梁の主要振動部位ごとの2次元の面音源として作成した。構造物音の主要振動部位は、図1に示すI桁①については、主桁の腹板、通路板とし、部材面積が小さいI桁①の上下フランジは非振動部位と仮定した。主桁の腹板や通路板のような平板状振動面の場合、板の両面が振動面で、かつ表裏逆位相の放射が想定されるため、振動面両側に逆位相の放射をする面音源モデルとした。また、図2に示す箱桁①については、枕木に面する箱桁上面を除く両側面と下面の3面、通路板を主要振動部位と仮定した。なお、側面や下面の振動による箱桁内部への放射音の箱桁外部への透過は無視できるほど小さいと考え、箱桁外向きの放射のみの面音源モデルとした。

3.4 面音源の放射特性の検討

本報では、I桁①および箱桁①での沿線騒音の実測結果と2次元音場の予測結果を整合させるように、振動部位を模擬した2次元の面音源に指向性を仮定した。

図13に示すように、構造物音を発生する面を幅 $L(\text{m})$ の2次元の面音源とする。この面を4等分に分割し、中央部2面と両端部2面が逆位相で振動することとした。それぞれの複素振幅 (式(3)の A) については、中央部を $\dot{A}=+1.0$ 、両端部を $\dot{A}=-0.6$ とした。図14に振動速度の振幅分布を示す。このように設定することで、2次元の面音源に仮想的な指向特性を与えることができる。

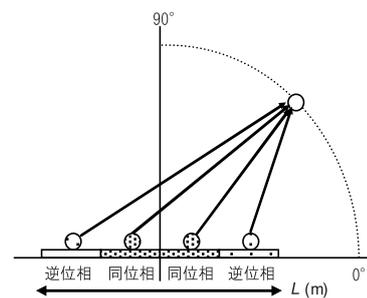


図13 構造物音源からの放射音モデル

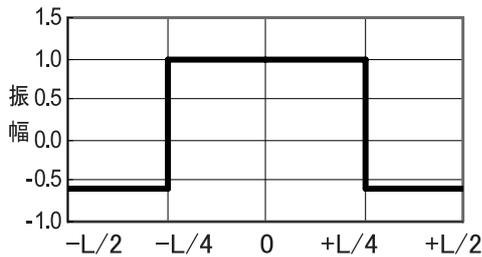


図14 面音源に付与する振動振幅の分布

4. 実測値と予測値の比較

3.1節～3.4節の手順に従い、4次の差分近似のFDTD法による騒音予測を行った。解析領域は反射性の地表面をもつ2次元の半自由音場（I桁①で横22m×縦13m、箱桁①で横24m×縦17mで、それぞれ左右側面・上面に幅5mの境界吸収層を配置）とし、空間分解能 $1.6 \times 10^2 \text{m}$ 、時間分解能 $15.625 \mu\text{s}$ ($=1/(64\text{kHz})$)、計算時間長2.048s（逐次計算回数65536回）として計算した。解析周波数の上限帯域は2.5kHz（1/3オクターブバンド中心周波数）である。

車両騒音の予測については、まず、平地の各観測点においてFDTD法で得られた音圧 $q(x,y,t)$ の時間波形をFFT分析し、バンド音圧レベル L_n (dB)を計算した。つぎに、レール近傍点を参照点としてFDTD法で得られた音圧波形 $q_{ref}(x,y,t)$ から求めたバンド音圧レベル L_n^{ref} (dB)と、同一地点で実測した車両騒音のバンド音圧レベル $L_n^{ref,meas}$ (dB)とのレベル差 ΔL_n を式(5)で求めた。このレベル差を補正量として各観測点のバンド音圧レベル L_n (dB)に加算することで、レール近傍点で計算値を実測の車両騒音に一致させ、計算結果を車両騒音として評価した。

$$\Delta L_n = L_n^{ref,meas} - L_n^{ref} = 20 \times \lg(p_n^{ref,meas} / q_n^{ref}) \dots (5)$$

一方、構造物騒音の予測については、主要振動部位の振動計測点を参照点とし、数値計算で用いた振動速度（粒子速度） $U_{ref}(x,t)$ から求めたバンド振動速度レベル $L_n^{u,ref}$ (dB)と、同一点で実測した振動速度のバンド振動速度レベル $L_n^{v,ref,meas}$ (dB)とのレベル差 ΔL_n^v を式(6)で求めた。そして、FDTD法で得られた各観測点での音圧 $q(x,y,t)$ から求めたバンド音圧レベル L_n (dB)に ΔL_n^v を補正量として加算した。

$$\Delta L_n^v = \Delta L_n^{v,ref,meas} - L_n^{u,ref} = 20 \times \lg(V_n^{ref,meas} / U_n^{ref}) \dots (6)$$

なお、振動速度レベルを求める際の0dBの基準値には $u_0 = 5.0 \times 10^{-8} \text{m/s}$ を用いた。

以上の手順により、主桁、通路板、箱桁の側面・下面などの振動部位別に構造物騒音を計算し、それらを合算することで鋼橋からの構造物騒音を求め、さらに車両騒音と合成

することによって沿線の総合騒音を予測した。

I桁①および箱桁①の予測値と実測値の比較を表1に示す。ここで、実測値は当該鋼橋を代表的な列車が約90km/hで通過した際の単発騒音暴露レベルの算術平均値で、予測値は、同列車通過時の主要部位での平均振動速度レベルを用いた構造物音と、同型式・同速度の列車による平地通過時の平均レール近傍騒音¹⁾を用いた車両騒音の合成値である。予測結果と実測結果の差を算術平均値でみると、I桁①で平均-0.6dB（二乗平均平方根：1.3dB）、箱桁①で平均-2.0dB（二乗平均平方根：2.6dB）であり、一部の観測点を除き概ね3dB以下の精度で沿線騒音が計算されている。また、図15、図16に示す予測値と実測値の周波数

表1 予測値と実測値の比較

I桁①		箱桁①	
観測点	※予測精度(dB)	観測点	※予測精度(dB)
S01	-0.2	S31	-1.9
S02	2.0	S32	0.1
S11	-1.4	S01	-1.3
S12	-0.8	S02	1.4
S21	0.6	S11	-3.3
S22	0.3	S12	-1.9
S23	-1.7	S13	-4.8
S24	-0.7	S14	-3.0
S31	-0.3	S21	-2.8
S32	-0.9	S22	-1.5
S33	-1.9	S23	-2.6
S34	-2.0	S24	-2.8
算術平均値	-0.6	算術平均値	-2.0
二乗平均平方根	1.3	二乗平均平方根	2.6

※予測精度：予測値と実測値の差

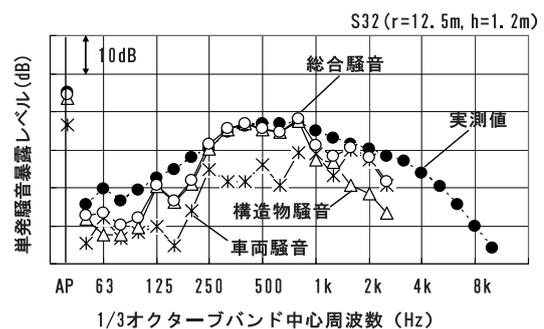


図15 予測結果と実測結果の比較の一例（I桁①）

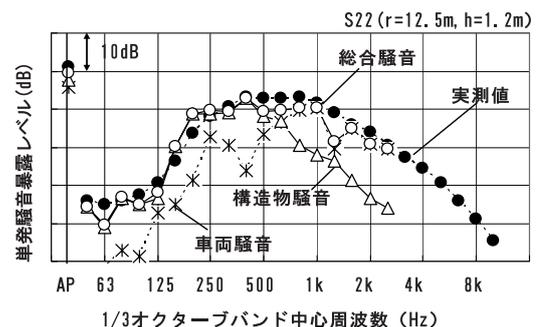


図16 予測結果と実測結果の比較の一例（箱桁①）

特性から、予測値の周波数特性には2次元音場特有の干渉などによるピークやディップが見られるものの、実測値と比較的よく一致しており、周波数1kHz付近の帯域を境に沿線騒音に対する構造物騒音と車両騒音の寄与度が逆転する傾向も既報¹⁾の分析結果とよく合致している。

5. 在来線騒音予測手法の検証測定

本予測手法の妥当性を確認するため、図1の各鋼橋と同一構造形式のI桁^②および箱桁^②において検証測定を行った(図17参照)。これらの測定箇所も関東近郊の在来鉄道である。予測に用いる主要振動部位については、I桁^②については主桁の腹板、通路板、箱桁^②については箱桁の側面と下面とし、それぞれI桁^①、箱桁^①の場合と同様とした。

I桁^②および箱桁^②における距離12.5mでの予測結果と実測結果の周波数特性の比較を図18および図19に示す。図18、図19から、FDTD法による予測値の周波数特性にはピークやディップが見られるが、実測の周波数特性と比較的よく一致しており、周波数帯域において比較的精度良く予測できている。また、いずれの鋼橋においても沿線騒音のオーバーオール値で予測と実測がよく一致しており、鋼橋直下および距離6.25m、12.5mの3地点における予測と実測のレベル差は概ね3dB以下であり、FDTD法を用いた予測計算の精度が高いことが分かる。なお、音源別の予測結果から、概ね1kHz帯域より低い周波数範囲で構造物音が支配的であると推察できる。

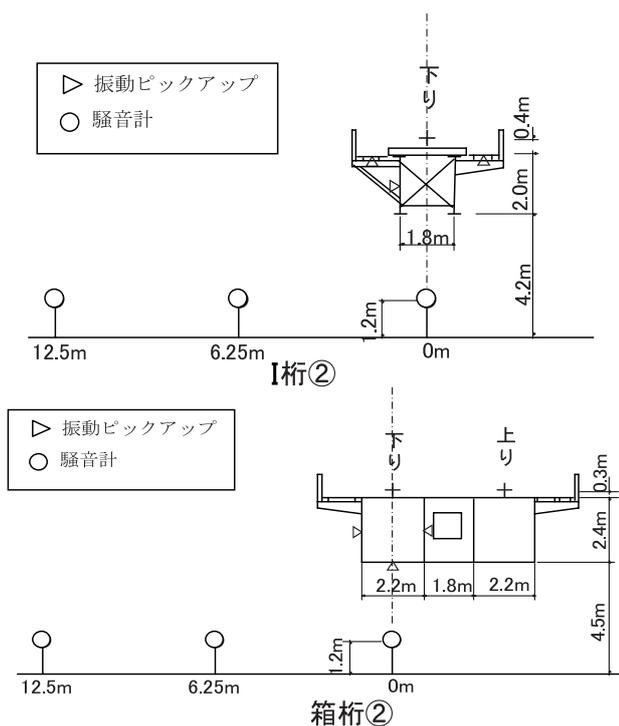


図17 I桁^②と箱桁^②における観測点位置

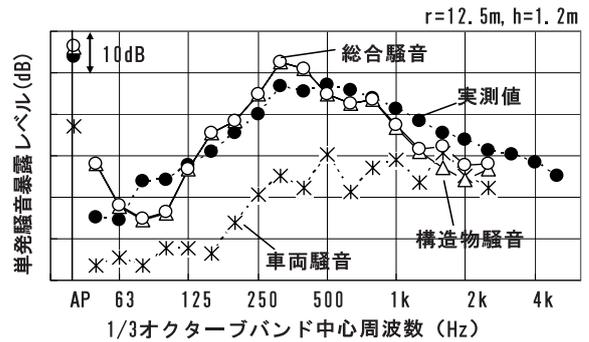


図18 予測結果と実測結果の比較 (I桁^②)

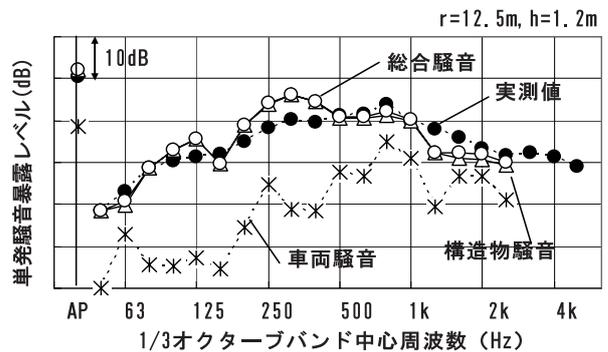


図19 予測結果と実測結果の比較 (箱桁^②)

6. まとめ

関東近郊の在来鉄道の鋼橋区間において実施した構造物調査および振動測定結果より、鋼橋の主要振動部位の振動と振動に伴って放射される構造物音の関係をあきらかにした。その後、測定結果をもとに鋼橋の振動から構造物音を予測する手順を考案し、2種の計算モデル (I桁、箱桁) による沿線騒音の予測を行ったところ、概ね精度良く予測できることを確認した。

さらに、同一構造形式の2つの鋼橋区間において実施した検証測定においても比較的精度良く予測できることを確認した。

今後は、鋼橋から発生する構造物音を低減させる騒音対策の一例として、橋梁の振動部材に制振材を貼るなど制振対策を行った後の沿線騒音についても予測できるよう検討を進めていく予定である。

参考文献

- 1) 石川聡史、柳沼謙一：在来線鋼鉄道橋における構造物音および構造物振動測定に関する一考察、日本騒音制御工学会秋季研究発表会講演論文集、pp.119~122、2010.9.
- 2) 伊戸川絵美、柳沼謙一、石川聡史、堀田竜太、中島康貴、廣江正明：数値計算による構造物音を含む在来鉄道騒音の予測、日本騒音制御工学会秋季研究発表会講演論文集、pp.49~52、2011.9.