

橋梁から放射される交通騒音の 3 次元解析と低減対策の評価

3D infrasound analysis of a bridge under traffic load and evaluation of the countermeasure

吉田純司*, 杉山俊幸**

Junji YOSHIDA and Toshiyuki SUGIYAMA

*博(工) 山梨大学准教授 医学工学総合研究部 (〒400-8511 山梨県甲府市武田 4-3-11)

** 工博 山梨大学教授 医学工学総合研究部 (同上)

Superstructures of bridges are usually vibrated in small amplitude by traffic load and their responses sometimes generates infrasound around the bridges. This study simulates infrasound generated in a real bridge, and its countermeasure by TMD is evaluated in the simulation. As the first step, superstructure of the bridge is modeled by FEM with plate elements such that several mode shapes and natural frequencies obtained in a vibration experiment in the past is reproduced by the model. Secondly, limit conditions for generating effective infrasound by running a vehicle is found from the simulation. Then, TMDs(Turned Mass Dampers) are introduced in the model in order to reduce the effective infrasound, and it is found that the infrasound is reduced by 5dB.

Key Words: bridge, infrasound, 3D analysis, countermeasure, turned mass damper

キーワード：道路橋, 低周波騒音, 3次元解析, 低減対策, 同調質量ダンパー

1. はじめに

道路橋から放射される低周波音による騒音問題は昭和 50 年代のはじめ, 中央自動車道に架設された葛野川橋(山梨県大月市)や阿知川橋(長野県阿知村)の周辺住民からの様々な苦情が寄せられたことにより浮き彫りとなり, 新しいタイプの道路橋公害として社会問題に発展した^{1),2)}.

近年, 道路橋の長大化, 走行車両の大型化, 高速化や交通量の増加などの交通条件の変化や, 道路橋への住宅の近接などから, 交通振動により橋梁から放射される低周波音が増幅する傾向にあり, 遮音壁設置, 低騒音路面の施工, 低騒音タイヤの開発や普及が注目されるようになっている。このような理由から, 現在様々な低減対策工法が行われているが, こうした対策工法の低減効果を定量的に検討している事例は希少である³⁾。低周波音の発生原因や発生条件を明らかにし, 対策工法の効果を定量的に示すことは, 既設橋および新設橋での低周波騒音の対策を行う上で極めて有効な情報を提供することになると考えられる。

本研究では, 交通騒音が生じている実橋梁を対象として, 加振実験結果に基づき橋梁上部構造をモデル化し, 車両走行時に生じる交通騒音を解析的に検討する。また,

騒音の対策として TMD(Turned Mass Damper)の設置を想定し, その効果を定量的に検討することを目的とする。

具体的には, まず, 橋梁上部構造のモデル化方法について述べる。併せて, 解析で利用する車両モデルと路面凹凸のモデルについても説明する。次いで, 本研究で用いた橋梁-車両系モデルの動的解析手法と, 低周波騒音の計算手法について述べる。次に, 車両 1 台走行時において, 橋梁から放射される低周波騒音の解析結果を分析し, 低周波音が発生する条件について考察する。最後に, 低周波騒音の対策として, TMD を用いた場合の有効性について検討する。

2. 道路橋上部構造および車両の動的解析モデル

2.1 道路橋上部構造のモデル化

本研究では, 低周波騒音が問題視された実橋梁の上部構造を, 曲げ変形のみを考慮した板要素(エルミート型の形状関数を有する 4 節点, 16 自由度の要素)を用いてモデル化した⁴⁾。材料には, 線形弾性体を仮定している。対象とした橋梁は, 図-1 のような 3 径間連続の高架橋であり, 断面は, 図-2 に示すように I 型の主桁が 8 本配置

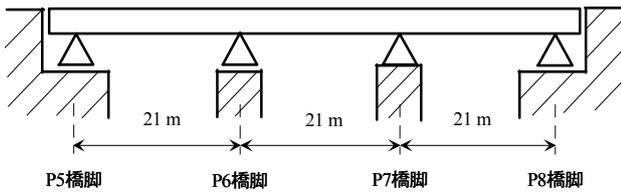


図-1 対象とした実橋梁の概要

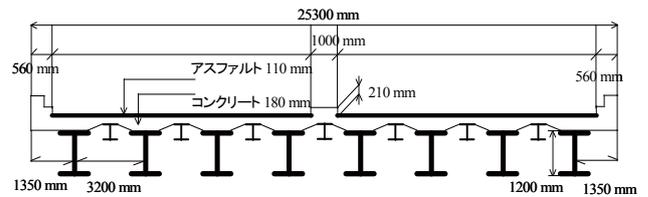


図-2 橋梁上部構造の断面図

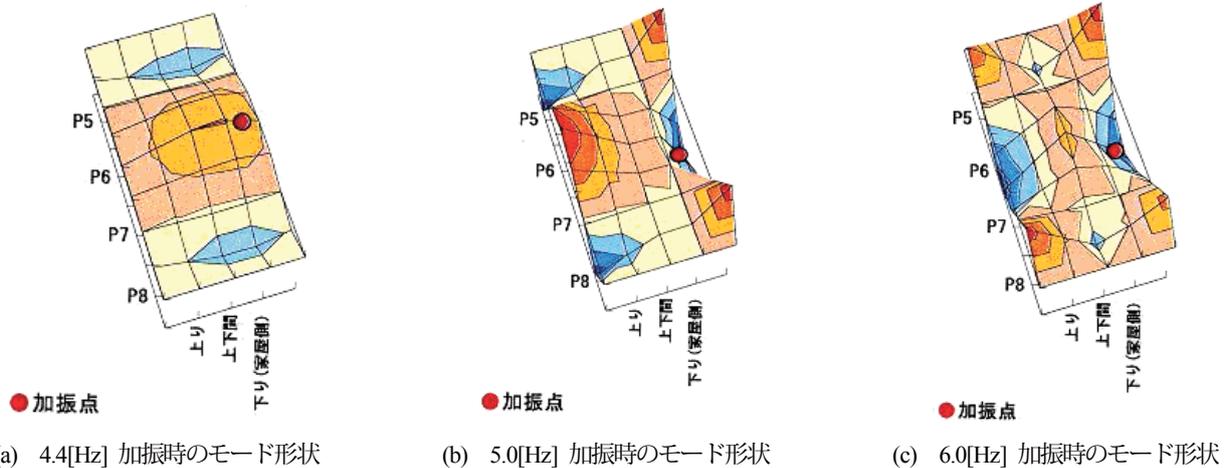


図-3 加振実験で得られた橋梁上部構造の固有振動数と固有モード

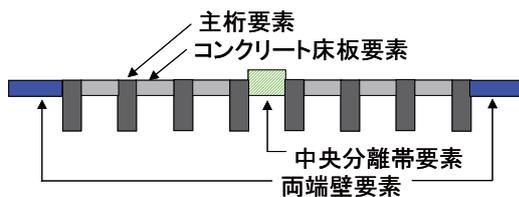


図-4 上部構造モデルの断面図

されている構造である。この橋梁では、加振器を用いた上部構造の加振実験が行われており、上部構造の比較的低次の固有振動数と固有モードがわかっている。図-3に既往の加振実験で得られた固有振動数と固有モードを示す。

この橋梁上部構造のモデル化にあたっては、実構造をできる限り反映させるため、図-2の断面図を参考にして、中央分離帯、主桁、床版、両端のサイドブロック部を区別し、異なる寸法・材料定数を持つ要素で分割することとした(図-4)。また、橋軸方向端部の要素についても、隣接する桁との連結を考慮して異なる寸法・材料定数を持つ要素を用いた。

次に、加振実験の結果(固有振動数、振動モード形)に近い力学特性を有する橋梁上部構造のモデルを構築するために、主桁部分の要素については、寸法および材料定数を一定(鋼の材料定数に近い値を使用)とし、橋軸方向端部、サイドブロック部および床版部分の要素については、寸法(幅、長さ、厚み)と材料定数(ヤング率、ポアソン比、質量密度)を未知数として、既往の実験結果で得られている固有振動数、固有振動モードに近い値となるよう同定した。具体的には、次式の

$$E = \sum_i (f_i^{(e)} - f_i^{(m)})^2 + \sum_i (1 - \mathbf{x}_i^{(e)} \cdot \mathbf{x}_i^{(m)})^2 \quad (1)$$

が最小になるようシンプレクス法⁵⁾を用いて同定した。ここで、 $f_i^{(e)}$ 、 $f_i^{(m)}$ は、それぞれ実験およびモデルでの*i*次の固有振動数、 $\mathbf{x}_i^{(e)}$ 、 $\mathbf{x}_i^{(m)}$ は、それぞれ実験およびモデルでの*i*次の単位固有ベクトルである。

上部構造で具体的に用いている要素の番号を図-5に、各要素のサイズおよび材料定数を表-1に示す。また、このモデルの境界条件を表-2に示す。このような構造モデルを用いた場合の固有振動数と固有モードの例を図-6に示す。図-6と図-3とを比較すると、実験で得られている固有振動数および固有振動モードが本モデルにより精度良く再現できていることがわかる。

2.2 路面凹凸のモデル化

対象とする橋梁は、路面の凹凸のプロファイル計測を行っていないため、本研究では、パワースペクトルを用いて路面凹凸を近似する。このような近似方法は、これまでいくつか提案されているが、本研究では一般に広く利用されている次式のスペクトルモデルを用いる^{6),7)}。

$$S_r(\Omega) = \frac{\alpha}{\Omega^n + \beta^n} \quad \Omega_{\min} \leq \Omega \leq \Omega_{\max} \quad (2)$$

Ω_{\min} は一般に対象とする橋梁の支間帳や橋長を考慮して決められる。本研究では、 $\Omega_{\min} = 0[\text{cycle/m}]$ 、 $\Omega_{\max} = 1.0[\text{cycle/m}]$ とする。また、スペクトルの特性値である α 、 β 、 n は実測調査で得た値を、参考に表-3の値^{7),8)}を用いる。

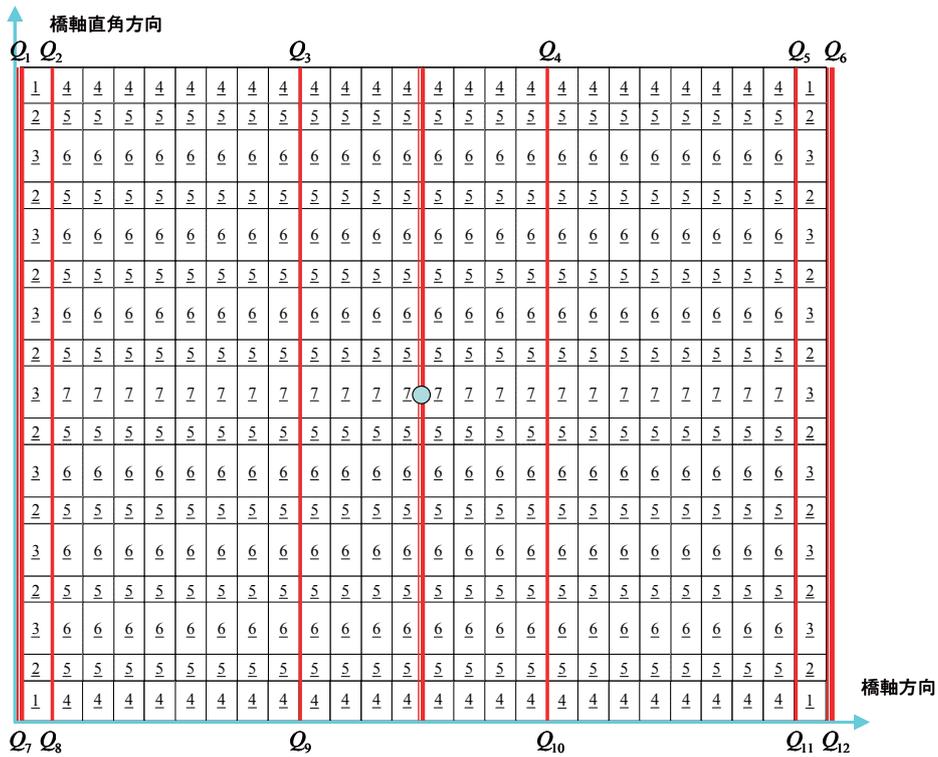


図5 橋梁の要素タイプ (表1と連動)

表1 道路橋上部構造の構造部材

	連部 両端壁	連部 主桁	連部 床板	橋梁 両端壁	橋梁 主桁	橋梁 床板	橋梁 中央
要素番号	1	2	3	4	5	6	7
個数	4	16	14	48	192	144	24
幅 [m]	1.0	0.25	3.04	1.0	0.25	3.04	3.04
厚さ[m]	0.40	0.40	0.40	0.19	1.0	0.19	0.45
ポアソン比	0.3	0.3	0.3	0.2	0.3	0.2	0.2
重量密度 [tonf/m ³]	6.11	6.11	6.11	2.04	5.79	2.04	2.04
ヤング率 [kN/m ²]	1.26×10 ⁸	1.26×10 ⁸	1.26×10 ⁸	1.62×10 ⁷	1.26×10 ⁸	1.62×10 ⁷	1.62×10 ⁷

表2 橋梁上部構造モデルの境界条件 (図5参照)

Q ₁ -Q ₇ 間, Q ₆ -Q ₁₂ 間	w, θ _x , θ _y , θ _{xy} を拘束
Q ₂ -Q ₈ 間, Q ₃ -Q ₉ 間 Q ₄ -Q ₁₀ 間, Q ₅ -Q ₁₁ 間	wのみを拘束

モンテカルロ法から推定された位置 x における路面凹凸の変位 $r(x)$ は,

$$r(x) = \sum_{k=1}^N \psi_k \sin(\omega_k x + \phi_k) \quad (3)$$

で表されることが知られている⁹⁾。ここで、 ω_k は路面凹凸の空間周波数、 ϕ_k は $0 \sim 2\pi$ までの一様乱数である。 ψ_k は期待値 0、標準偏差 σ_k のガウス分布にしたがう確

率変数で、その分散 σ_k^2 は

$$\sigma_k^2 = 4S_r(\Omega_k)\Delta\Omega \quad (4)$$

である。ただし、 S_r はスペクトルモデル、 $\Delta\Omega$ は、想定するパワースペクトル密度の上限値 Ω_{\max} 、下限値 Ω_{\min} とすると、

$$\Delta\Omega = \frac{\Omega_{\max} - \Omega_{\min}}{N} \quad (5)$$

で求めることができる。 N は分割数を表し、一般に $N=100 \sim 500$ が用いられる。本研究では、 $N=500$ とした。 ω_k は路面凹凸の空間周波数で $\omega_k = 2\pi\Omega_k$ の関係があり、 Ω_k は、

$$\Omega_k = \Omega_{\max} + \left(k - \frac{1}{2}\right)\Delta\Omega \quad (6)$$

で与えられる。

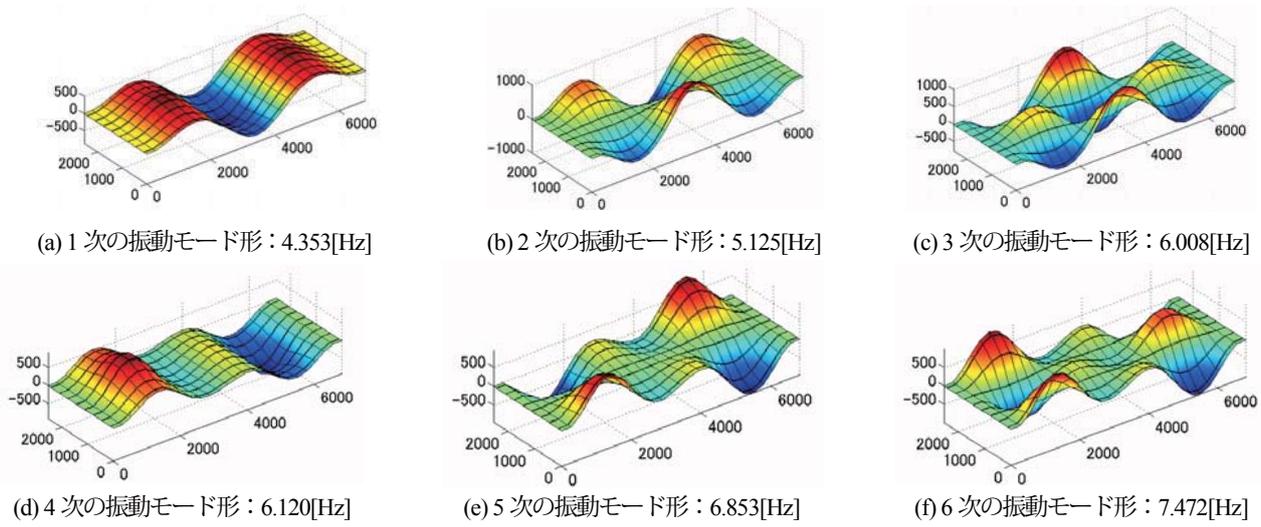


図-6 橋梁モデルの固有振動数と固有モード

表-3 道路評価別のスペクトルモデルのパラメータ

	ISO 評価	α	β	n
① 名神高速完成直後	最良	0.001	0.05	2.0
② 桁系橋の平均	普通	0.0098	0.08	1.92

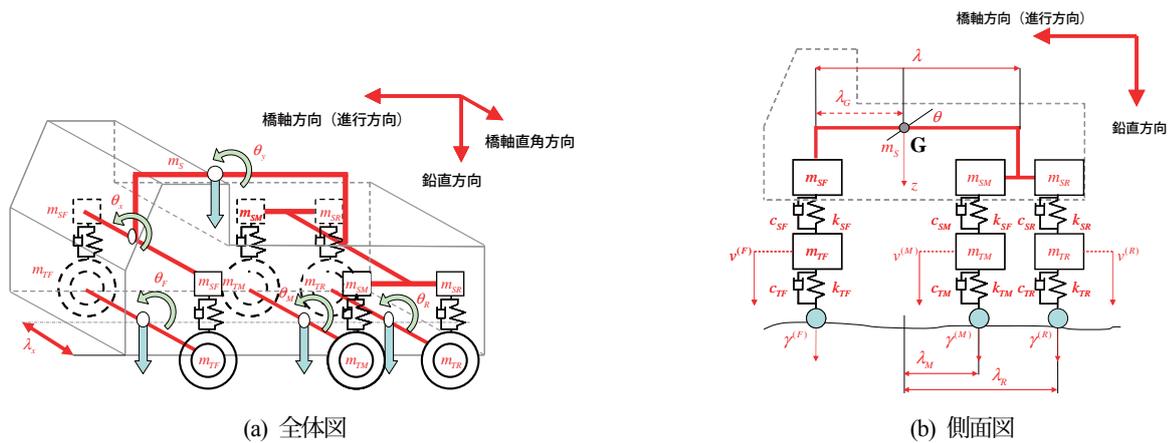


図-7 3次元9自由度系車両モデルの概要

2.3 車両のモデル化

ここでは、車両の動的解析モデルとして、図-7に示すような3次元6軸9自由度系車両モデル⁹⁾を用いる。このモデルは、車両本体のばね上振動に関する上下振動(bouncing)、縦揺れ振動(pitching)、横揺れ振動(rolling)、前軸車輪のばね下振動に関する上下振動(parallel hop)、横揺れ振動(axle tramp)、後軸および後軸車輪のばね下振動に関する上下振動(parallel hop)、縦揺れ振動(windup)、横揺れ振動(axle tramp)を考慮することができる¹⁰⁾。紙面の関係から車両モデルの運動方程式等は省略する。なお、本研究では、25tonfトラックが走行する場合を想定し、表-4のような定数を用いている。

3. 車両-橋梁モデルの動的解析法

3.1 橋梁モデルおよび車両モデルの運動方程式

板要素により離散化された橋梁上部構造のモデルの運動方程式は、

$$[M]\{\ddot{w}\} + [C]\{\dot{w}\} + [K]\{w\} = \{f\} \quad (7)$$

のように表される。ここに、 $\{w\}$ は節点変位ベクトル、 $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ はそれぞれ質量マトリクス、減衰マトリクス、剛性マトリクスであり、いずれも定数である。また、 $\{f\}$ は、外力ベクトルであり、交通荷重が外力に相当する場合には、車両の変位や速度の関数となる。

一方、車両モデルの運動方程式は、

$$[M_v]\{\ddot{z}\} + [C_v]\{\dot{z}\} + [K_v]\{z\} = \{F\} \quad (8)$$

表4 3次元9自由度系車両モデルのパラメータ値

車両重量 [kN]		$w_V = 248.92$	
重心位置 [m]		$\lambda_G = 4.39$	
車軸間隔 [m]		$\lambda_M = 1.44 \quad \lambda_R = 2.76 \quad \lambda_x = 0.97$	
		ばね上	ばね下
前輪	重量[kN]	$m_{SF} = 31.97$	$m_{TF} = 7.16$
	ばね定数[kN/m]	$k_{SF} = 441.0$	$k_{TF} = 3430.00$
	減衰係数[kN(sec/m)]	$c_{SF} = 2.94$	$c_{TF} = 9.80$
後輪	重量[kN]	$m_{SM}, m_{SR} = 33.44$	$m_{TM}, m_{TR} = 9.32$
	ばね定数[kN/m]	$k_{SM}, k_{SR} = 1666.00$	$k_{TM}, k_{TR} = 3430.00$
	減衰係数[kN(sec/m)]	$c_{SM}, c_{SR} = 7.84$	$c_{TM}, c_{TR} = 9.80$

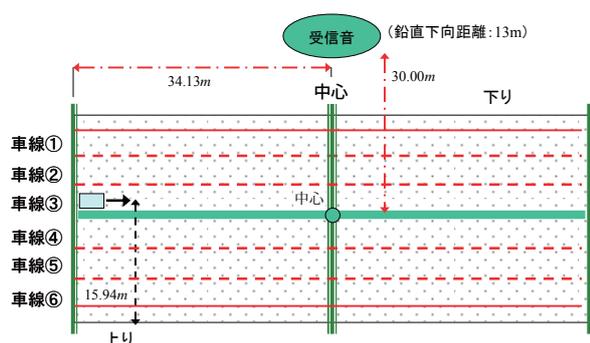


図8 橋梁上部構造の平面図における車線と受信点の位置

のように表される。ただし、 $\{z\}$ は車両モデルの変位ベクトル、 $[M_V]$ 、 $[C_V]$ 、 $[K_V]$ それぞれ質量マトリクス、減衰マトリクス、剛性マトリクスであり、いずれも定数である。また、 $\{F\}$ は外力ベクトルであり、車両のタイヤ位置での変位 γ とその時間導関数 $\dot{\gamma}$ の関数となる。 γ は、一般に路面自身が有している凹凸に橋梁が振動する際に生じる変位を加えたものとなる。

3.2 連成した運動方程式の解法

式(7)、式(8)は、外力ベクトルに互いの変数を含んでいることから単独で解くことは困難となる。本研究では、両者を相互に近似的に解き、両者の解が収束するまで解析を繰り返す手法を用いた。解析の時間刻みを Δt として、時刻 t_n での応答がすべて既知のとき、次ステップの時刻 $t_{n+1} := t_n + \Delta t$ での応答を求める手順を以下に示す。

手順①：未知数である時刻 t_{n+1} での橋梁の応答 $\{\tilde{w}_{n+1}\}$ 、 $\{\dot{\tilde{w}}_{n+1}\}$ 、 $\{\ddot{\tilde{w}}_{n+1}\}$ の代わりに、時刻 t_n の橋梁の応答 $\{w_n\}$ 、 $\{\dot{w}_n\}$ 、 $\{\ddot{w}_n\}$ を用いて、時刻 t_{n+1} の車両のタイヤ位置での路面の変位および速度の近似値 $\tilde{\gamma}_{n+1}$ 、 $\dot{\tilde{\gamma}}_{n+1}$ を求め、これらより $\{F_{n+1}\}$ の近似値 $\{\tilde{F}_{n+1}\}$ を算出する。

手順②： $\{\tilde{F}_{n+1}\}$ を用いて、車両の運動方程式である式(8)をNewmarkの β 法¹⁾により解き、時刻 t_{n+1} の車両の応答

の近似値 $\{\tilde{z}_{n+1}\}$ 、 $\{\dot{\tilde{z}}_{n+1}\}$ 、 $\{\ddot{\tilde{z}}_{n+1}\}$ を求める。

手順③： $\{\tilde{z}_{n+1}\}$ 、 $\{\dot{\tilde{z}}_{n+1}\}$ 、 $\{\ddot{\tilde{z}}_{n+1}\}$ を用いて、時刻 t_{n+1} における、車両が橋梁に与える外力ベクトルの近似値 $\{\tilde{f}_{n+1}\}$ を算出する。

手順④： $\{\tilde{f}_{n+1}\}$ を用いて、橋梁の運動方程式である式(7)をNewmarkの β 法¹⁾で解き、時刻 t_{n+1} の橋梁の応答の近似値 $\{\tilde{w}_{n+1}\}$ 、 $\{\dot{\tilde{w}}_{n+1}\}$ 、 $\{\ddot{\tilde{w}}_{n+1}\}$ を求める。

手順⑤：手順④で求めた $\{\tilde{w}_{n+1}\}$ 、 $\{\dot{\tilde{w}}_{n+1}\}$ 、 $\{\ddot{\tilde{w}}_{n+1}\}$ を用いて再び手順①～手順④を行い、収束条件を満たすまでそれを繰り返す。ただし、収束条件は、車両の変位応答、速度応答、加速度応答の「前回の繰り返し計算での近似値に対する相対誤差」がいずれも 1.0×10^{-6} 以下になることとした。

4. 低周波音の計算手法

4.1 点音源からの音圧²⁾

剛体板などによって区切られた半無限空間において、円振動数 ω で速度応答が $Ve^{i\omega t}$ のように調和振動する微小面積 ds の点音源があるとき、音源から距離 r だけ離れた受信点 Q での音圧は、

$$P(f, t, r) = \frac{i\rho c}{2\pi r} V \cdot ds \exp[i(\omega t - Kr)] \quad (9)$$

のように表される。ここに i は虚数単位、 ρ は空気の種類密度、 c は音速、 K は音波の波数(= $2\pi/\lambda$, λ :波長)、 V は速度応答の振幅である。

このことから、任意の速度応答を示す音源の音圧は、応答をフーリエ変換し、各周波数ごとの振幅を V の代わりに用いることで周波数ごとの音圧を算出することができる。さらに、音源が空間的に分布している場合には、それらを周波数ごとに重ね合わせる(空間的に積分する)ことで求めることができる。

$$p(f, t, r) = \int_S P(f, t, r) \quad (10)$$

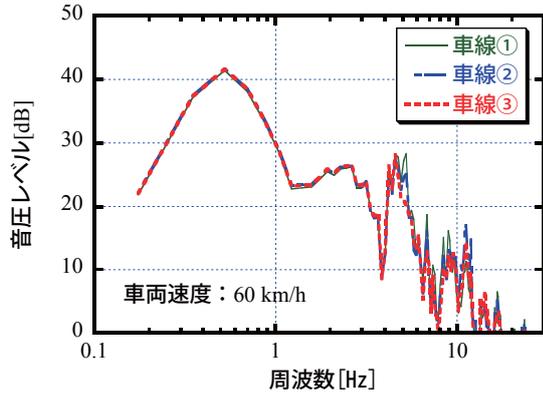


図-9 車両の走行車線の違いによる音圧レベルの比較

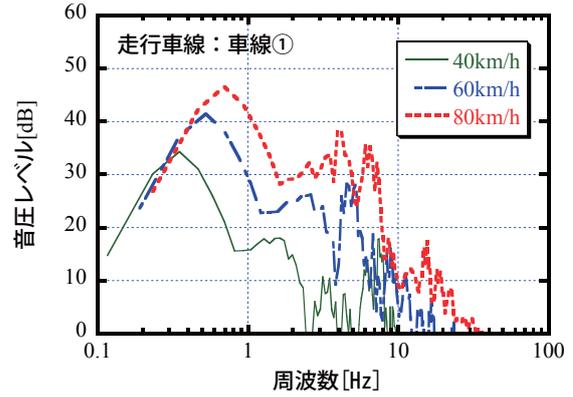


図-10 車両走行速度の違いによる音圧レベルの比較

次に $p(f, t, r)$ の実行値 $p_{rma}(f, r)$ を次式によって求める。

$$p_{rma}(f, r) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T |p(f, t, r)|^2 dt} \quad (11)$$

ここで、 $T = 1/f$ である。さらに、音圧(単位: Pa)を音圧レベル SPL (sound pressure level)(単位: dB)に換算するには次式を用いる。

$$L_{SPL} = 20 \cdot \log_{10} \frac{p_{rma}}{p_0} \quad (12)$$

ここに、 p_0 は正弦波 1 [kHz] の最小可聴値: 2×10^{-5} [Pa] である。

4.2 橋梁から放射される騒音の計算

交通振動により、上部構造全体が振動していると考えると、式(10)の積分は、モデル化した全要素についての和で表される。具体的には、モデル化した領域を Γ 、 e 番目の要素が占める領域を Γ_e 、要素の総数を M として

$$p(f, t, r) = \sum_{e=1}^M \int_{\Gamma_e} P(f, t, r) \quad (13)$$

である。ここで、 e 番目の要素における節点での速度ベクトルを $\{\dot{w}_e\}$ 、対応する形状関数を並べた列ベクトルを $\{N_e\}$ として、この要素内での速度は、

$$v_e = \{N\}^T \{\dot{w}_e\} \quad (14)$$

と記述できる。さらに、要素サイズは受音点までの距離に比べ十分小さく、 r は要素内で一定値とみなせると仮定すると、式(13)右辺の積分は、

$$\begin{aligned} \int_{\Gamma_e} P(f, t, r) &= \int_{\Gamma_e} \frac{i\rho c}{2\pi r} v_e \exp[i(\omega t - Kr)] ds \\ &= \frac{i\rho c}{2\pi r} \exp[i(\omega t - Kr)] \int_{\Gamma_e} \{N\}^T ds \{\dot{w}_e\} \end{aligned} \quad (15)$$

のように表すことができる。

5. 低周波音の解析結果と考察

5.1 解析パターン

本研究では、2.1 節でモデル化した橋梁上部構造上を車両 1 台が走行した場合の騒音について詳細に検討した。具体的には、車両の走行速度を 40km/h~80km/h、車両走行位置を図-8 のように 6 パターン、路面の凹凸について凹凸なし(路面 A)、最良路面(路面 B)、普通路面(路面 C) の 3 パターン、である。また、路面の凹凸は、2.2 節に従って乱数を用いて生成させているため、同一条件で 30 回解析した結果の最小値、平均値、最大値を用いて評価することとした。

なお、騒音レベルを評価する受音点については、図-8 に示すように、橋梁中央部から、橋軸直角方向に 30m、鉛直下方向に 13m としており、この位置は、実際に騒音が報告された位置に相当する。

5.2 解析結果と考察

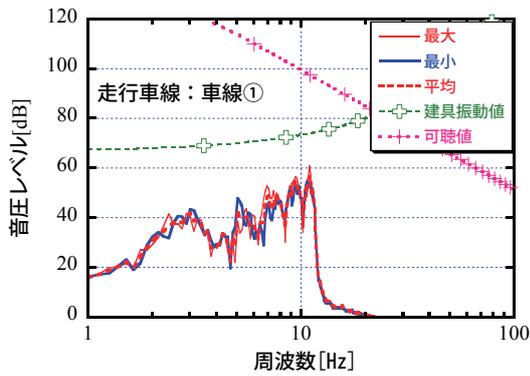
(1) 走行速度および走行位置に関する検討

まず、図-9 に路面凹凸がない車線①~③を、車両速度 60km/h で車両が走行した場合の音圧レベルを示す。図-9 をみると、若干ではあるが、4~6Hz において、車線①→車線②→車線③の順で音圧が小さくなっていくのがわかる。すなわち車線①走行時が最も音圧が大きくなることを示している。他の車両速度で走行した場合でも同様の傾向であった。

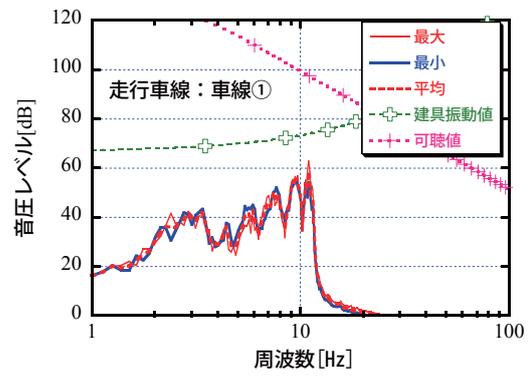
次に、車線①に走行位置を固定し、車両速度を 40km/h、60km/h、80km/h とした場合の、音圧レベルを図-10 に示す。図-10 をみると、車両速度が増加するにつれ、音圧レベルが明らかに上昇している。また、図-9、図-10 を比較すると、車両速度は走行位置よりも音圧レベルに与える影響が大きいことがわかる。ただし、ここで示した解析結果では、音圧レベルが最大でも 50dB 以下であり、いずれも騒音レベルに達していない。

(2) 路面凹凸に関する検討

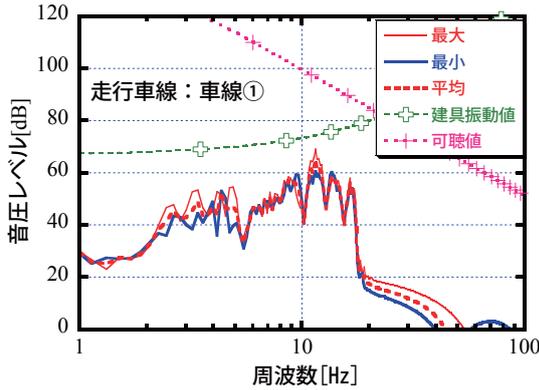
次に、路面凹凸がある場合の影響について検討した結



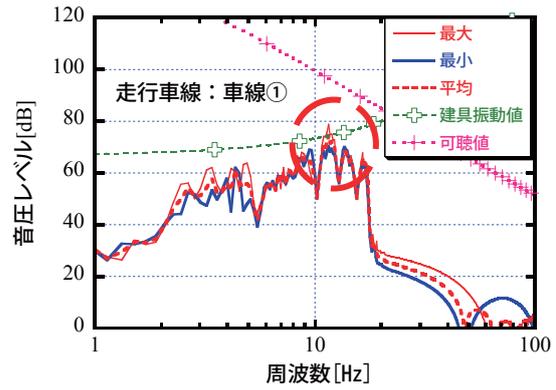
(a) 車両速度 60km/h, 路面凹凸: 最良



(b) 車両速度 60km/h, 路面凹凸: 普通



(c) 車両速度 70km/h, 路面凹凸: 最良



(d) 車両速度 70km/h, 路面凹凸: 普通

図-11 路面凹凸の違いによる音圧レベルの比較

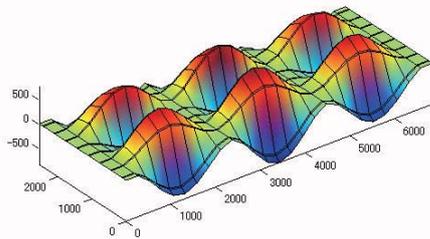


図-12 15 次のモード形状 (固有振動数: 11.82Hz)

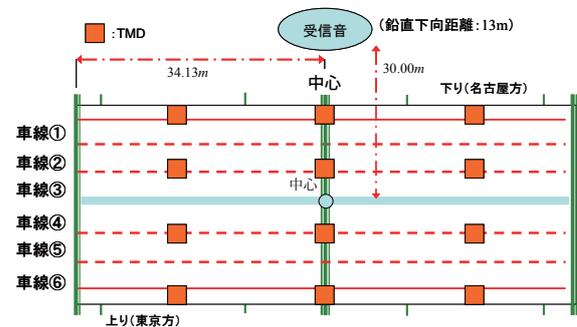


図-13 TMD の設置位置の平面図

果を示す。図-11 に、路面凹凸が「最良」および「普通」である車線①を、車両速度 60km/h および車両速度 70km/h で走行した場合の音圧レベルを示す。図-11 より、車両速度が 60km では、路面状態によらず騒音レベルに達していないものの、車両速度が 70km/h になると、路面凹凸が「普通」の場合に、11~12Hz の間で騒音レベルに達していることがわかる。車両速度が 80km/h の場合も 70km/h の場合と同様の結果であった。

以上の解析より、車両走行速度が 70km 以上で路面凹凸が「普通」の場合に、騒音が発生することがわかった。なお、今回の解析では車両が 1 台のみ橋梁上を通過する場合を想定しているが、実際には、車両が複数台連続で通過する可能性なども十分考えられる。この場合には、より大きな騒音が発生する恐れがある。

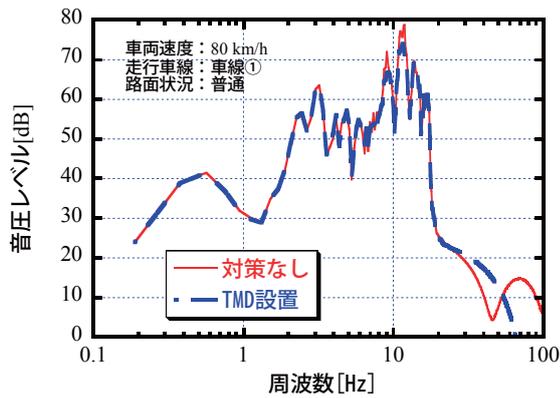
6. TMD による低周波音の低減対策の評価

6.1 TMD の設置位置とパラメータ

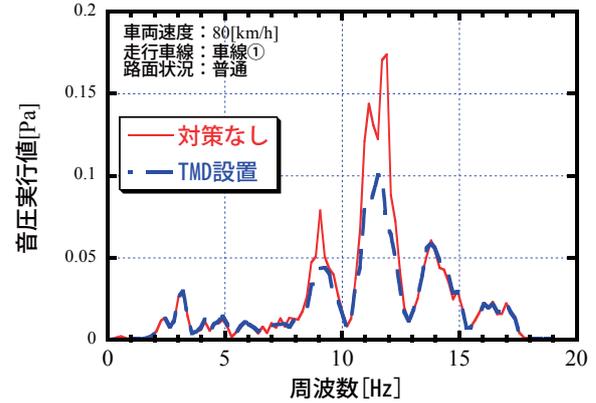
ここでは、上述した音圧レベルを低減する対策の一つとして、同調質量ダンパー (Turned Mass Damper: TMD) を採用した場合の効果について検討を行った。

5 章で示したように、車両走行速度が 70km/h 以上になると、11~12Hz の範囲で騒音レベルに達している。橋梁モデルの固有モードでみると、この範囲は、図-12 に示す 15 次モードの影響と考えられることから、本研究では、15 次モードの腹位置に TMD を設置することとした。具体的には、図-13 のような配置である。

また、TMD のパラメータは、文献 12) の調和外力振



(a) 音圧レベルでの比較



(b) 音圧実行値での比較

図-14 TMD 設置前後での音圧レベルの比較

動の場合を採用して、最適同調比 γ および最適減衰比 ξ に次式を用いた。

$$\gamma = 1/(1+\mu), \quad \xi = \sqrt{3\mu/(8+8\mu)} \quad (16)$$

ただし、 μ は質量比であり上部構造全体の 1% とする。

6.2 TMD 設置による結果と考察

TMD を設置した場合の、音圧実行値および音圧レベルを図-14 に示す。図-14 をみると、TMD の設置により音圧レベルで 5dB ほど低減していることがわかる。また、音圧実行値で見ると、ピーク値が半分程度に減少していることがわかる。

7. まとめ

本研究では、実橋梁を対象として、交通振動下で生じる騒音と、その対策について解析的に検討を行った。得られた知見は以下の通りである。

- (1) 実橋梁での加振実験をもとに、その固有振動数と固有モードを再現する橋梁上部構造のモデルを構築した。
- (2) 3次元の車両モデルを構築した橋梁モデルに導入し、車両 1 台走行時において生じる騒音レベルの検討を行った。その結果、路面凹凸が「普通」以下の状態でかつ車両走行速度が 70km/h 以上の場合に騒音レベルに達することがわかった。
- (3) 騒音が生じる固有モードを対象に TMD を設置したところ、ピーク値に 5dB 程度の音圧レベルの低減がみられた。

謝辞：本研究の遂行に際し、一般社団法人 社会基盤技術評価支援機構・中部から解析対象橋の諸元および実測データを御提供いただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 山田伸志, 渡辺敏夫, 小坂敏文: 超低周波音と低周波音, 環境技術研究協会, 1990.
- 2) 深沢泰晴, 杉山俊幸, 中原和彦, 水上浩之: 車両走行時に道路橋から放射される低周波音の基本特性, 構造工学論文集, Vol.37A, pp.945-956, 1991.
- 3) 深田宰史, 薄井王尚, 梶川康男, 原田政彦: 解析上で斜角延長床版化した橋梁の振動・音響特性に関する一考察, 構造工学論文集, Vol.53A, pp.287-298, 2007.
- 4) T.Y.Yang: よくわかる有限要素構造解析入門, 技報堂出版, 1997.
- 5) 佐藤郁郎: 最小 2 乗法その理論と実際 観測データの非線形解析, 山海堂, 1997.
- 6) 橋梁振動研究会: 橋梁振動の計測と解析, 技報堂出版, 1993.
- 7) 本田秀行, 城戸隆良, 梶川康男, 小堀為雄: 道路橋の路面凹凸パワースペクトル密度に関する調査, 土木学会論文報告集, 第 315 号, pp.149-155, 1981.
- 8) 川谷充郎, 小林義和, 高森和恵: 曲げとねじりを考慮した単純桁橋の走行荷重による非定常連成不規則振動解析, 土木学会論文集, No.570/I-40, pp.231-238, 1997.
- 9) 室井智文, 薄井王尚, 梶山好幸, 深田宰史, 梶川康男, 幸田信則: 伸縮継手付近の路面凹凸の影響を受けた大型車両と PC 桁橋の振動特性, 構造工学論文集, Vol.54A, pp.171-180, 2008.
- 10) 川谷充郎, 山田靖則, 獄下裕一: 三次元車両モデルによる桁橋の動的応答解析, 土木学会論文集, No.584/I-42, pp.79-86, 1998.
- 11) 藤井文夫, 瀧諭, 萩原伸幸, 本間俊雄, 三井和男: 非線形構造モデルの動的応答の安定性, コロナ社, 2003.
- 12) 山口宏樹: 構造振動・制御, 共立出版株式会社, 1996.