

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

FUNDAMENTAL CHARACTERISTICS OF LOW FREQUENCY SOUND RADIATED FROM
HIGHWAY BRIDGES UNDER THE PASSAGE OF HEAVY VEHICLES

深沢泰晴* 杉山俊幸** 中原和彦*** 水上浩之****

By Yasuharu FUKASAWA, Tosiya SUGIYAMA, Kazuhiko NAKAHARA and Hiroyuki MIZUKAMI

In the first half of this study, the authors investigate dynamic responses of highway bridge to travelling heavy vehicles. As models of heavy vehicles and highway bridges, the four-degree-of-freedom spring-mass system with two axles and the simple girder bridge with unevenness on the surface at its end supports are employed respectively. Governing equations of the coupling motions of bridge and vehicle models are integrated numerically by Runge-Kutta-Gill's method. In the latter half, using the Fourier spectra of vibration velocity of the bridge surface calculated in the present dynamic analysis, the SPL of the low frequency sound radiated from bridge vibration is analytically obtained under the assumption in acoustic field that each of infinitesimal elements of the bridge surface may correspond to a sound source in infinite baffle. The effects of unevenness on the surface at bridge ends, span length of the bridge and travelling velocity of the vehicle on the SPL are examined.

1. はじめに

車両通過時の道路橋振動から放射される低周波音による騒音問題は、昭和50年代のはじめの頃、中央自動車道に建設された葛野川橋（山梨県大月市）や阿知川橋（長野県阿知村）の周辺住民から種々の苦情が寄せられたのを契機に、新しいタイプの道路橋公害として社会問題化した^{1), 2)}。日本道路公団試験所は、上記両橋に対して詳細な調査研究³⁾を実施するとともに、東名高速道路、中央自動車道の供用中の48橋についての実測・分析⁴⁾、供用前の段階にある数橋に対する各種の実験研究⁵⁾等によって、道路橋の低周波音による騒音問題の解明に先駆的な役割を果たし、数々の貴重な資料を公表した。また、これら日本道路公団試験所の一連の研究とは別に、五郎丸ら¹⁰⁾は、14の実橋に対する実測値の分析に基づき、放射音の音圧レベルと1/3 オクターブバンド・スペクトルの推定式を提案している。

しかしながら、現場実験による測定結果は、風や地面反射の影響、伸縮装置や路面の状況の微妙な違いなど、確定し難い因子の影響も受けるので、実測結果のみに頼る研究では、問題の完全解明には自ずから限界があることも事実である。すなわち、この種の現象の解明には、現場実測に基づく研究と並行して理論的解

* 工博 山梨大学教授 工学部土木環境工学科 (〒400 甲府市武田4丁目3-11)

** 工博 山梨大学助教授 工学部土木環境工学科 (〒400 甲府市武田4丁目3-11)

*** 工修 東京電力(株) 柏崎刈羽原子力建設所 (〒945-03 柏崎市青山町16-46)

**** 山梨大学大学院 工学研究科土木工学専攻修士課程 (〒400 甲府市武田4丁目3-11)

析も行ふ必要がある。したがって、当然理論解析面でも様々な角度からのアプローチがなされている^{5)~9)}。例えば、今市ら⁶⁾は、平板振動に伴う放射音響場の精緻な理論の展開と、車両走行時の単純支持桁橋の振動解析とを結びつけて、道路橋振動から放射される低周波音の音圧分布を計算している。また、大島ら^{7)・9)}は、はり理論及び有限帯板要素法により各種道路橋の振動速度を解析し、これを用いて橋面から放射される音響パワーレベルやそのスペクトルを求め、道路橋の音響放射特性の検討と車両走行実験による検証も行っている。

以上のように、道路橋の低周波音による騒音問題は、実測結果に基づく分析と理論的な解析とによって多面的に研究されてきているが、今日まだ必ずしも十分に解明されたとは云えない。本文においては、まず4自由度系の重車両モデルと標準的な中小支間の鋼桁橋モデルを用い、車両一橋梁連成系の動的応答を解析して、橋面任意点の振動速度のフーリエ・スペクトルを求める。次に、橋梁振動から放射される低周波音の音響場は、振動する橋面を無限バツフル中にある無数の半球状の呼吸球音源と近似的にみなして解析する。その際、振動速度として上記のフーリエ・スペクトルを適用することにより、任意受音点の音圧レベルのスペクトル図を描く。最後に、このスペクトル図にもとづき、橋梁端部の段差、橋梁支間長、車両の走行速度等の諸因子が橋梁の曲げ振動から放射される低周波音の基本特性に与える影響を検討し、低周波音公害の発生条件を明かにするものである。

2. 車両走行時の橋梁及び車両の動的応答

2.1 車両モデルと橋梁モデル

重車両の走行に伴う道路橋の動的応答を解析するに際して、車両モデルとしては、①1軸集中力モデル、②1軸質量モデル、③1軸1自由度系モデル、④1軸2自由度系モデル、⑤2軸4自由度系モデルなどが考えられる。従来、道路橋の低周波音問題の解析においては、多くの場合、④の1軸2自由度系モデルが用いられている。

ここでは、建設省土木研究所の橋梁に関する調査報告¹¹⁾等において用いられている⑤の2軸4自由度系モデルを採用する。モデルの概要及び緒元をそれぞれ図2.1、表2.1に示す。本研究において、このモデルを採用する理由は、橋梁端部の段差によって通過車両に惹起されるピッチング運動が、橋桁の振動、ひいては放射音特性に少なからず影響を及ぼすと予想されるからである。運動方程式そのものはかなり煩雑になるが、後述するように高速・大容量のコンピュータによって直接的な数値積分で解くことを前提にすれば、その煩雑さもさほど問題にはならない。

次に、橋梁振動としては、ここでは曲げ振動のみを対象とする。また、数値計算に用いる橋梁モデルとしては、単純支持の等断面鋼桁橋とし、4種の代表的な支間長に対する単位長さ当り重量、曲げ剛性は、土

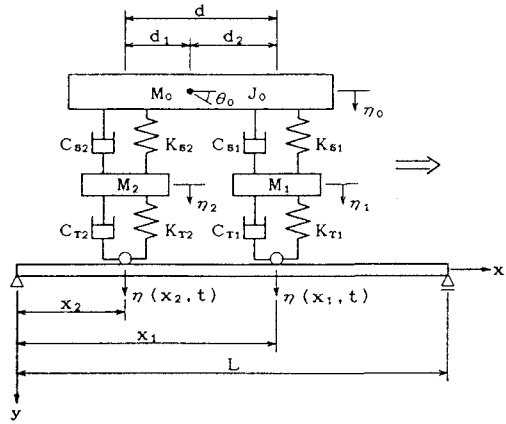


図2.1 走行車両の4自由度系モデル

表2.1 4自由度系車両モデルの諸元

重量：ばね上部 $M_0=17,000$ kg ばね下部前部 $M_1=700$ kg；ばね下部後部 $M_2=2,300$ kg		
車軸間隔： $d=3.85$ m； $d_1=2.84$ m； $d_2=1.01$ m		
ばね上極回転慣性： $J_0=408,200$ kg・cm・s ²		
	ばね定数(kgf/cm)	減衰定数(kgf・s/cm)
前軸懸架部	$K_{s1}=1,500$	$C_{s1}=17$
後軸懸架部	$K_{s2}=12,000$	$C_{s2}=140$
前軸タイヤ部	$K_{T1}=2,200$	$C_{T1}=2$
後軸タイヤ部	$K_{T2}=8,800$	$C_{T2}=7$

表2.2 橋梁モデルの諸元

桁形式	支間長 (m)	単位長さ 当りの重 量(kg/m)	曲げ剛性 E I (kg・cm ²)	1次固有 振動数 (Hz)	2次固有 振動数 (Hz)	3次固有 振動数 (Hz)
活荷重 合成桁橋	30	10,730	4.14×10 ¹³	3.39	13.58	30.54
	40	11,190	7.98×10 ¹³	2.60	10.38	23.36
	50	12,000	1.30×10 ¹⁴	2.05	8.19	18.43
鋼床版箱桁橋	70	7,350	1.47×10 ¹⁴	1.42	5.68	12.77

本研究所資料に基づき表2.2に示す値を用いる。また、鋼桁橋の減衰定数 h_m は、各モードとも0.02とする。

2.2 車両—橋梁系の運動方程式

図2.1 に示すような4自由度系車両と橋桁との連成振動系を解析対象とする。まず、座標 x の位置における橋桁のたわみ $\eta(x, t)$ は、一般座標 $q_n(t)$ と基準関数 $X_n(x)$ を用いて次式で表される。

$$\eta(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} q_n(t) X_n(x) \quad (2.1)$$

車両各部に作用する動的力のつり合い条件、並びに橋桁に対するモード解析法の適用によって、連成系の運動方程式は次のように導かれる¹⁾⁾。

$$M_0 \ddot{\eta}_0 + C_{S1}(\dot{\eta}_0 + d_1 \dot{\theta}_0 - \dot{\eta}_1) + C_{S2}(\dot{\eta}_0 - d_2 \dot{\theta}_0 - \dot{\eta}_2) + K_{S1}(\eta_0 + d_1 \theta_0 - \eta_1) + K_{S2}(\eta_0 - d_2 \theta_0 - \eta_2) = 0 \quad (2.2a)$$

$$J_0 \ddot{\theta}_0 + C_{S1}(\dot{\eta}_0 + d_1 \dot{\theta}_0 - \dot{\eta}_1) d_1 - C_{S2}(\dot{\eta}_0 - d_2 \dot{\theta}_0 - \dot{\eta}_2) d_2 + K_{S1}(\eta_0 + d_1 \theta_0 - \eta_1) d_1 - K_{S2}(\eta_0 - d_2 \theta_0 - \eta_2) d_2 = 0 \quad (2.2b)$$

$$M_1 \ddot{\eta}_1 + C_{T1} \left\{ \dot{\eta}_1 - \sum_{n=1}^n X_n(x_1) \dot{q}_n \right\} - C_{S1}(\dot{\eta}_0 - d_1 \dot{\theta}_0 - \dot{\eta}_1) + K_{T1} \left\{ \eta_1 - \sum_{n=1}^n X_n(x_1) q_n \right\} - K_{S1}(\eta_0 + d_1 \theta_0 - \eta_1) = 0 \quad (2.2c)$$

$$M_2 \ddot{\eta}_2 + C_{T2} \left\{ \dot{\eta}_2 - \sum_{n=1}^n X_n(x_2) \dot{q}_n \right\} - C_{S2}(\dot{\eta}_0 + d_2 \dot{\theta}_0 - \dot{\eta}_2) + K_{T2} \left\{ \eta_2 - \sum_{n=1}^n X_n(x_2) q_n \right\} - K_{S2}(\eta_0 - d_2 \theta_0 - \eta_2) = 0 \quad (2.2d)$$

$$M_E \ddot{q}_m + C_{Em} \dot{q}_m + K_{Em} q_m - X_m(x_1) \left[\frac{d_2}{d} M_0 g + M_1 g + C_{T1} \left\{ \dot{\eta}_1 - \sum_{n=1}^n X_n(x_1) \dot{q}_n \right\} + K_{T1} \left\{ \eta_1 - \sum_{n=1}^n X_n(x_1) q_n \right\} \right] - X_m(x_2) \left[\frac{d_1}{d} M_0 g + M_2 g + C_{T2} \left\{ \dot{\eta}_2 - \sum_{n=1}^n X_n(x_2) \dot{q}_n \right\} + K_{T2} \left\{ \eta_2 - \sum_{n=1}^n X_n(x_2) q_n \right\} \right] = 0 \quad (2.2e)$$

($m=1, 2, \dots, n$)

ここに、式(2.2e)は橋桁の第 m 次モードに対応し、 M_E 、 C_{Em} 、 K_{Em} は、それぞれ換算質量、換算減衰係数、換算ばね定数である。これらは、それぞれ次式のように表される。

$$M_E = \int_0^l \rho A \{X_m(x)\}^2 dx, \quad C_{Em} = \int_0^l C_m \{X_m(x)\}^2 dx, \quad K_{Em} = \omega_m \int_0^l \rho A \{X_m(x)\}^2 dx \quad (2.3a-c)$$

ここに、 ρA 、 C_m 、 ω_m は、それぞれ橋桁の単位長さ当りの質量、第 m 次モードに対応する減衰係数、固有円振動数である。

なお、 C_{Em} は減衰定数 h_m で表すと次式のようになる。

$$C_{Em} = 2h_m M_E \omega_m \quad (2.4)$$

式(2a-e)を解析的に解くことはほとんど不可能である。ここでは直接数値積分法の一つである Runge-Kutta-Gill法によって解く。

2.3 橋梁及び車両の動的応答とフーリエ・スペクトル

単純支持の橋桁を対象とするので、基準関数 $X_n(x)$ は次式で与えられる。

$$X_n(x) = \sin(n\pi x/L) \quad (2.5)$$

振動モードは5次まで考慮することとした。

式(2.2)をRunge-Kutta-Gill法によって数値積分で解くにあたって、時間キザミ Δt は、後に動的応答量のフーリエ・スペクトルを高速フーリエ変換によって求める際に、車両の橋梁通過時間 T_0 を2の累乗に分割する必要も考えて、 $\Delta t = T_0/1024$ とする。

数値計算に用いる車両モデルは、すでに表2.1に示した車両重量20(ton)のものを基本とするが、比較のために他にばね上重量のみを変化させて25, 30(ton)としたもの

も併せて合計3種類とする。それらの車両自体の固有振動数は表2.3の通りである。1次及び2次モードはばね上部の回転(θ_0)と変位(η_0)の連成モードであり、3次及び4次モードはそれぞればね下部の変位(η_1)及びばね下部の変位(η_2)が卓越するモードである。車両の走行速度は、60, 80, 100 (km/h)の3種類とする。橋梁モデルは、すでに表2.2に示した通りである。橋梁端部と伸縮装置間の段差 h は、図2.2のように設定し、その数値としては文献¹²⁾の実測データを参考にして、0, 1, 2, 3 (cm)の4種類とする。

求める応答量としては、橋梁については主要点の鉛直変位 η 、振動速度 $\dot{\eta}$ 、加速度 $\ddot{\eta}$ とする。また、走行車両については、ばね上部の鉛直変位 η_0 、振動速度 $\dot{\eta}_0$ 、鉛直加速度 $\ddot{\eta}_0$ 、回転角 θ_0 、角速度 $\dot{\theta}_0$ 、角加速度 $\ddot{\theta}_0$ 、並びに前・後輪ばね下部のそれぞれ鉛直変位 η_1, η_2 、振動速度 $\dot{\eta}_1, \dot{\eta}_2$ 、加速度 $\ddot{\eta}_1, \ddot{\eta}_2$ の応答を求める。これら応答量のフーリエ・スペクトルも計算する。

表2.3 車両の固有振動数

車両重量 (tf)	固有振動数 (Hz)			
	1次モード	2次モード	3次モード	4次モード
20	2.35	3.17	11.67	15.47
25	2.20	2.98	11.66	15.39
30	2.06	2.89	11.65	15.34

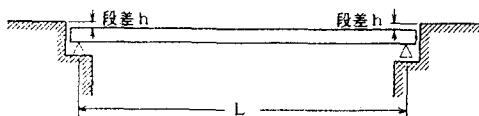
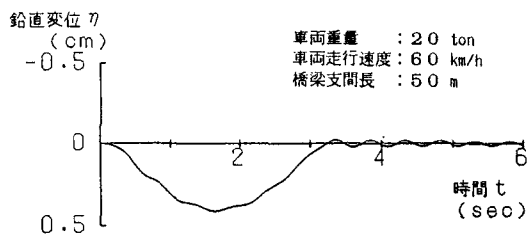
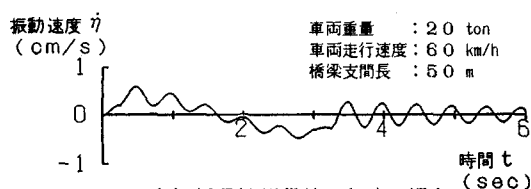


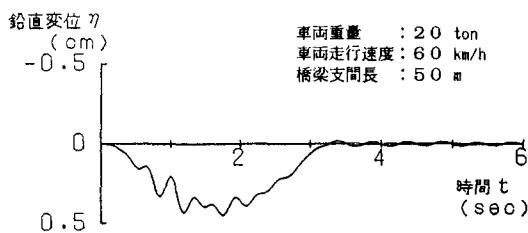
図2.2 橋梁端部の段差



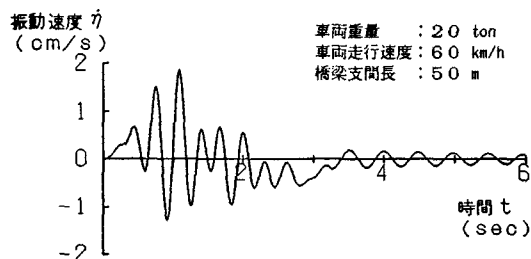
(a) 橋梁端部段差0(cm)の場合



(a) 橋梁端部段差0(cm)の場合



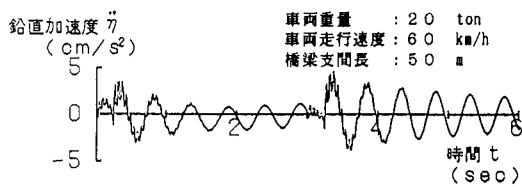
(b) 橋梁端部段差2(cm)の場合



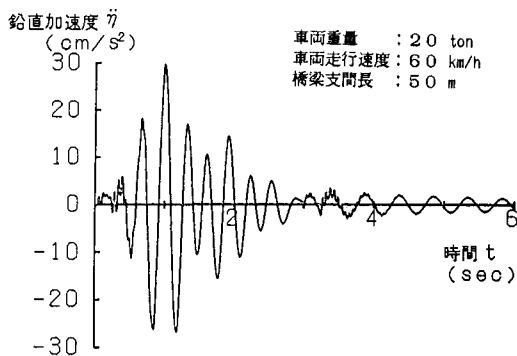
(b) 橋梁端部段差2(cm)の場合

図2.3 橋梁の支間中央断面の鉛直変位応答

図2.4 橋梁の支間中央断面の振動速度応答

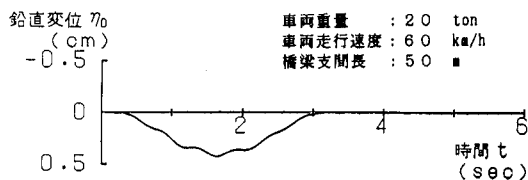


(a) 橋梁端部段差0(cm)の場合

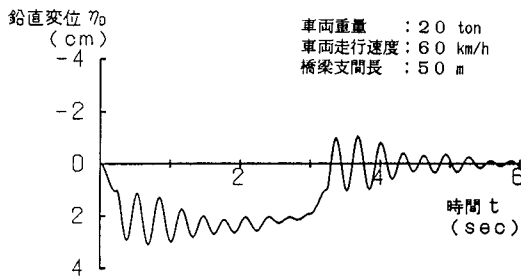


(b) 橋梁端部段差2(cm)の場合

図2.5 橋梁の支間中央断面の鉛直加速度応答

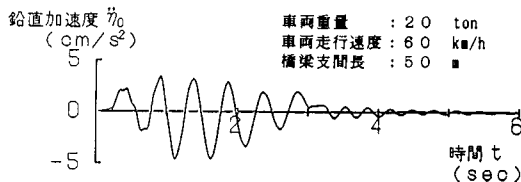


(a) 橋梁端部段差0(cm)の場合

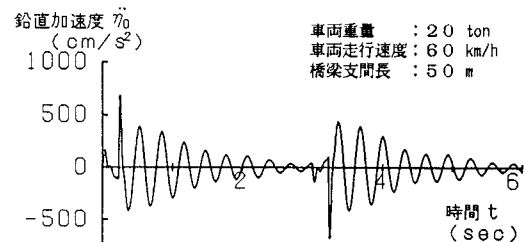


(b) 橋梁端部段差2(cm)の場合

図2.6 走行車両のばね上部の鉛直変位応答

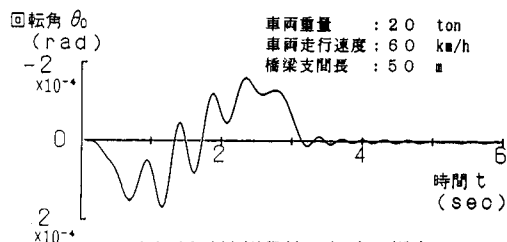


(a) 橋梁端部段差0(cm)の場合

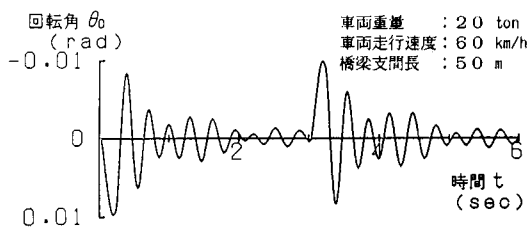


(b) 橋梁端部段差2(cm)の場合

図2.7 走行車両のばね上部の鉛直加速度応答



(a) 橋梁端部段差0(cm)の場合



(b) 橋梁端部段差2(cm)の場合

図2.8 走行車両のばね上部の回転角応答

ここには、計算結果の一例を示す。それらは、車両重量20 (ton)、車両の走行速度60(km/h)、橋梁支間長50(m)の場合であり、橋梁端部の段差については 0と2(cm)の2通りの場合を比較しやすいように対で示す。応答は車両の前輪が橋梁上に入ってから後輪が橋梁を離脱した後の自由振動までを含めて示す。図2.3，図2.4，図2.5は、橋梁の支間中央断面の鉛直変位 $\eta(L/2, t)$ ，振動速度 $\dot{\eta}(L/2, t)$ ，鉛直加速度 $\ddot{\eta}(L/2, t)$ のそれぞれの時間変化を示す。橋梁端部の段差が橋梁振動に及ぼす影響がよく読み取れる。

図2.6，図2.7は、走行車両のばね上部の鉛直変位 $\eta_0(t)$ ，鉛直加速度 $\ddot{\eta}_0(t)$ のそれぞれの時間変化を示

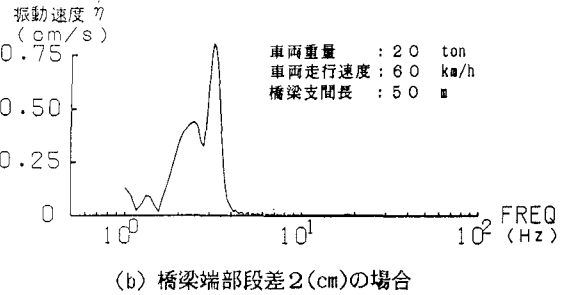
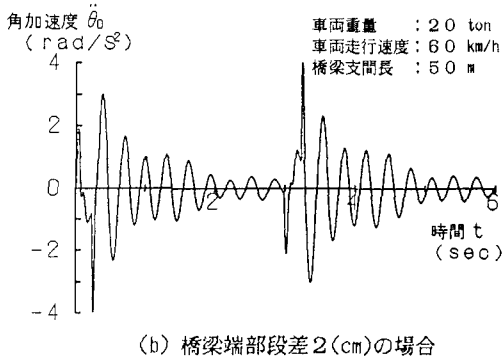
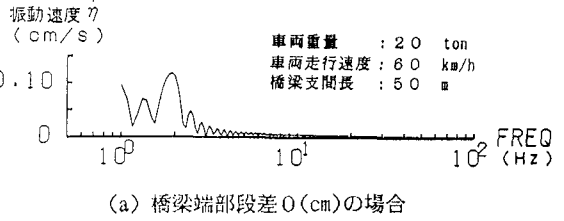
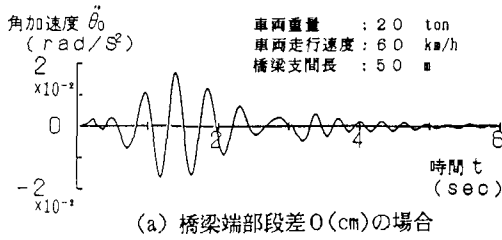


図2.9 走行車両のばね上部の角加速度応答

図2.10 橋梁の支間中央断面の振動速度スペクトル

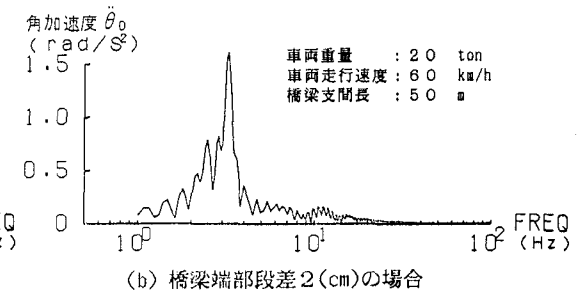
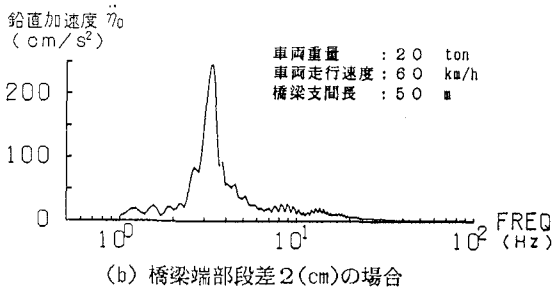
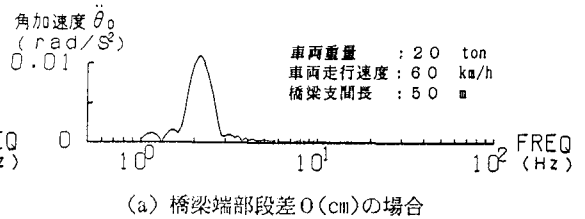
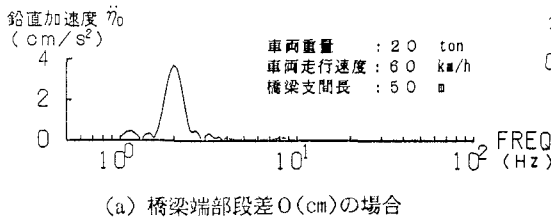


図2.11 走行車両のばね上部の鉛直加速度スペクトル

図2.12 走行車両のばね上部の角加速度スペクトル

す。橋梁端部の段差によって走行車両のばね上部に励起される鉛直加速度が目立つ。

図2.8，図2.9は，それぞれ走行車両のばね上部の回転角 $\theta_a(t)$ ，角加速度 $\ddot{\theta}_a(t)$ の時間変化を示す。橋梁端部の段差によって，走行車両のばね上部に生じる回転運動を定量的に捉えることができる。

図2.10，図2.11，図2.12は，それぞれ橋梁の支間中央断面の振動速度 $\dot{\eta}(L/2, f)$ ，走行車両のばね上部の鉛直加速度 $\ddot{\eta}_a(f)$ ，角加速度 $\ddot{\theta}_a(f)$ のフーリエ・スペクトル図である。これらの図からは，橋桁及び車両の両者とも，段差がない場合には橋桁の1次モード（2.05Hz）に対応する振動が卓越し，段差がある場合には走行車両の2次モード（3.17Hz）に対応する振動が卓越していることがわかる。

3. 橋梁振動から放射される低周波騒音

3.1 音圧レベルの解析

解析対象の単純支持桁橋に対し、図3.1 に示すように右手系の直角座標系(0-X,Y,Z)を設定する。支間長L、幅Wの橋面を橋軸方向にn等分割、幅員方向にm等分割し、それぞれの要素を微小な音源とみなす。

要素(i,h)(i=1~n,h=1~m)から放射される周波数fの音波の任意受音点Q(X,Y,Z)における音圧 $p_{ih}(f,t,X,Y,Z)$ は、その要素を無限バツフル中にある一つの半球状の呼吸球音源と考えると次式で表すことができる¹³⁾。

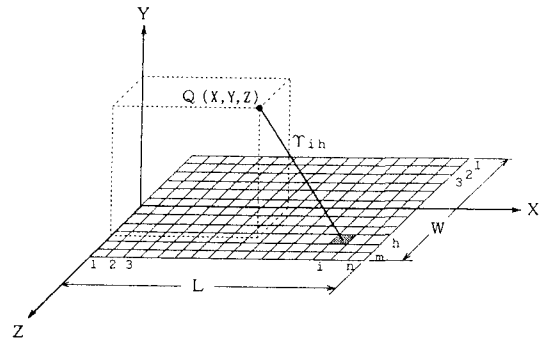


図3.1 座標系と橋面分割

$$p_{ih}(f,t,X,Y,Z) = \frac{j\rho ck}{2\pi r_{ih}} \{v_{ih}(f) \cdot dS\} \exp[j(\omega t - kr_{ih})] \quad (3.1)$$

ここに、jは虚数単位、 ω は円振動数($=2\pi f$)、 ρ は空気密度、cは音速、kは音波の波数($=2\pi/\lambda$, λ :波長)、dSは要素の面積($=L \cdot W/(n \cdot m)$)である。また、 $v_{ih}(f)$ は、要素(i,h)の速度振幅のスペクトルであり、2.2で説明した手法で求めることができる。さらに、 r_{ih} は要素(i,h)の中心と受音点Qの間の距離であり、次式のように表される。

$$r_{ih} = \sqrt{\{X - ((i-1)L/n + L/(2n))\}^2 + \{Z - ((h-1)W/m + W/(2m))\}^2 + Y^2} \quad (3.2)$$

さて、周波数fの音波の受音点Q(X,Y,Z)における音圧P(f,t,X,Y,Z)は、橋面上に分布するn×m個の点音源から放射される音波による音圧 $p_{ih}(f,t,X,Y,Z)$ を重ね合わせて求める。すなわち

$$P(f,t,X,Y,Z) = \sum_{i=1}^n \sum_{h=1}^m p_{ih}(f,t,X,Y,Z) \quad (3.3)$$

次に、P(f,t,X,Y,Z)の実効値 $P_{rms}(f,X,Y,Z)$ を次式によって計算する。

$$P_{rms}(f,X,Y,Z) = \sqrt{\frac{1}{T} \int \{P(f,t,X,Y,Z)\}^2 dt} \quad (3.4)$$

ここに、 $T=1/f$ である。

さらに、音圧(単位:N/m²)を音圧レベルSPL(単位:dB)に換算するには、次式を用いる。

$$\begin{aligned} \text{SPL}(f,X,Y,Z) &= 20 \log_{10} \frac{P_{rms}(f,X,Y,Z)}{P_0} \\ &= 20 \log_{10} P_{rms} + 94 \end{aligned} \quad (3.5)$$

ここに、 P_0 は最小可聴値(2×10^{-5} N/m²)を表す。

3.2 低周波音の干渉

ここでは、前節3.2の解析手法を検証する狙いも含めて、逆位相で振動する橋面から放射される低周波音が橋面付近で干渉し合う状況を、上記の諸式を用いた数値計算によって調べてみる。具体的な数値計算によって、1から4次までの固有モードで振動する支間長50(m)、幅員10(m)の橋梁から放射される低周波音の橋面上空間における音圧レベルの分布を求めてみた。振動速度の最大振幅は、各固有モードとも1.0(cm/s)とした。

計算結果の一部を図3.2(a),(b)に示す。これらは、2次及び3次の固有振動について、ともに橋梁中心線上の橋軸方向70(m)橋面上空50(m)の平面内の等分割点の音圧レベルの計算値にもとづき等音圧レベル線を描いたものである。図3.2(a)の2次モードの場合において、支間中央の橋面上における黒塗りの部分は、左右

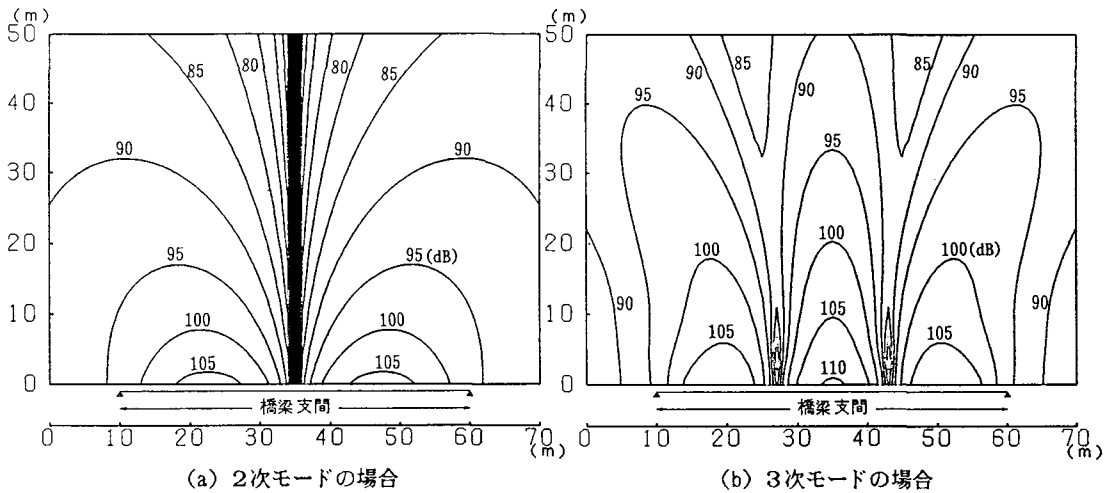


図3.2 固有振動による放射音の音圧レベル分布

逆位相かつ逆対称振動から放射される音波が干渉により消し合い、マイナスの音圧レベル、すなわち音圧が最小可聴値($2 \times 10^{-5} \text{ N/m}^2$)以下になってしまう部分である。図3.2(b)の3次モードの場合では、支間1/3の橋面上では左右逆位相振動のため干渉現象は現れているが、逆対称振動ではないので図3.2の場合のような最小可聴値以下の音圧にはなっていない。

3.3 低周波音の分類

低周波音は、図3.3に示す音圧レベルのスペクトル図において、2つの限界値曲線によって区切られる領域に対応して4種類に分類される^{(14), (15)}。低周波音の最小可聴値にはかなりの個人差があり、必ずしも一義的には定められないので、その平均値を用いて描いたのが図中の線ABである。これより低い音圧レベルの低周波音は、多くの人にとって直接的には知覚されないことになる。一方、線CDは障子、窓ガラス、雨戸などの建具類がガタツキ始める最小の音圧レベルを示している。これら低周波音の最小可聴値線とガタガタ音発生限界値線は、ほぼ20Hz付近で交叉する。4つの領域ごとの低周波音の特性は、それぞれ次のようである。

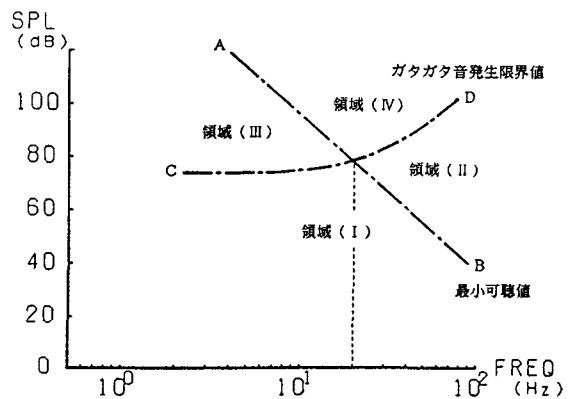


図3.3 低周波音の分類

領域(I) 戸障子、窓ガラスなどがガタガタ鳴ることもなく、どんな低周波音も感知されない。低周波音による公害は発生しない。

領域(II) 戸障子、窓ガラスなどがガタガタ鳴ることはないが、低周波音が何らかのかたちで感知され、生理的な苦痛を感じる場合が多い。低周波音公害をもたらす代表的なタイプの一つであり、ここでは「低周波騒音」と呼ぼう。

領域(III) 低周波音は、それ自体は直接的には知覚されない場合が多いが、戸障子、窓ガラスなどがガタガタ鳴るという物理的な現象によって間接的に感知される。周波数が20Hz以下ということから、「超低周

波騒音」と呼んで、領域(Ⅱ)の「低周波騒音」と区別しよう。

領域(Ⅳ) 障子、窓ガラス、雨戸などの建具類がガタガタ鳴る一方で、低周波であっても音圧レベルが高いので「音」としても感知される場合が多く、低周波音公害としてかなり厳しい状況にさらされる。

橋梁振動に伴う低周波音公害として報告されている事例の多くは、上述の「低周波騒音」や「超低周波騒音」によるもののようである。次節3.4 における具体的な数値解析によって、これらの実態を詳らかにする。

3.4 音圧レベルのスペクトル図と特性

ここでは、重車両が道路橋上を走行する際に発生する橋梁の曲げ振動から放射される低周波音の特性を調べる。そのために、2.3 において橋桁の動的応答の具体的な数値計算によって得た振動速度のフーリエ・スペクトルを、3.1 の諸式に適用して、低周波音の音圧レベルのスペクトル図を描く。橋梁幅員を2車線分の10(m)とし、2車両が並走する場合を想定する。数値計算においては、橋軸方向の等分割数 $n=50$ 、幅員方向の等分割数 $m=10$ とした。その他の条件は前章2. の動的応答計算の場合と同じである。

以下において、描かれた音圧レベルのスペクトル図にもとづき、橋梁端部の伸縮装置との段差、橋梁支間長、車両の走行速度、車両重量等が低周波放射音の特性に及ぼす影響を検討する。

(a) 橋梁端部の段差が低周波音特性に及ぼす影響

低周波音特性に対し橋梁端部の段差が及ぼす影響を調べるために描いた音圧レベルのスペクトル図の一部

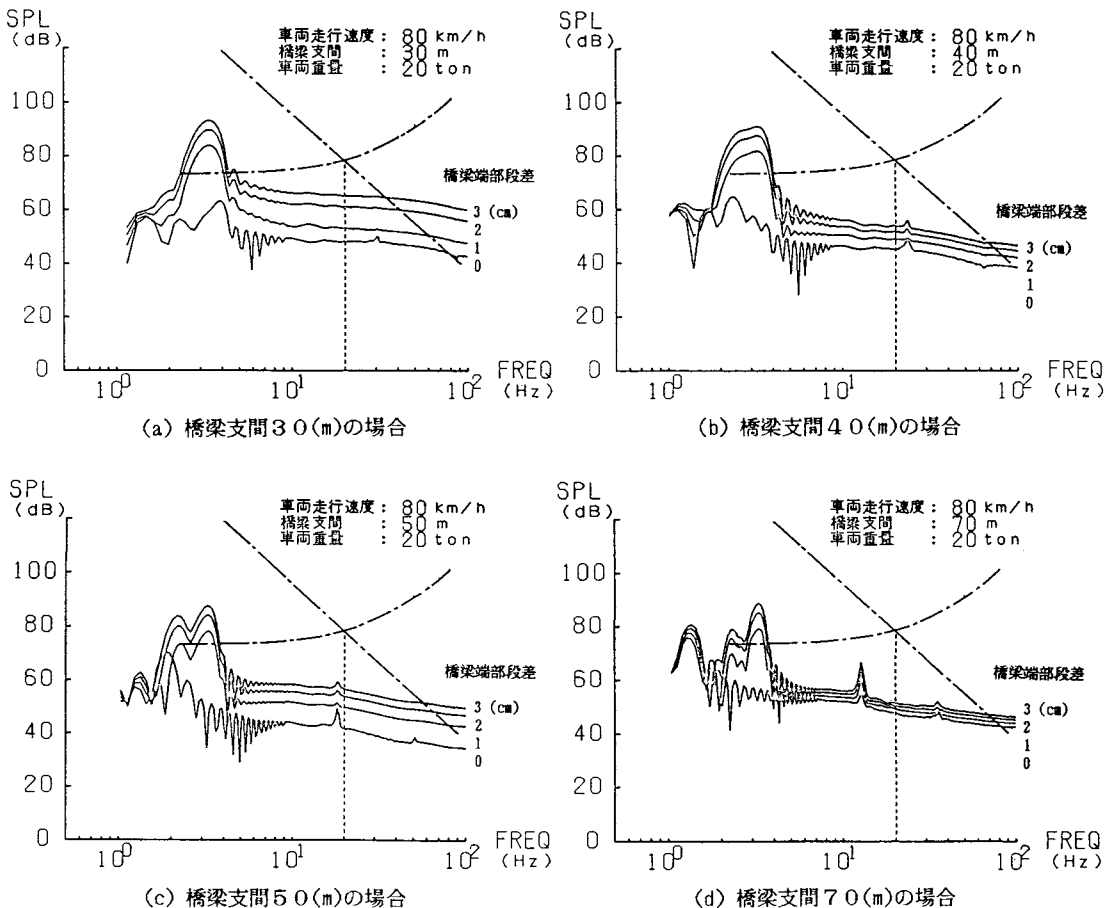


図3.4 段差及び橋梁支間の低周波音特性に及ぼす影響

を図3.4(a)-(d)に示す。受音点は、いずれも橋面中央点上下 30(m)の位置としている。橋梁端部に段差がない場合には、音圧レベルのスペクトルはほぼ領域(Ⅰ)に属し、「低周波騒音」も、「超低周波騒音」もほとんど発生しない。1~3(cm)の段差がある場合には、スペクトルのピークはいずれも領域(Ⅲ)に現れて、「超低周波騒音」の発生を示唆している。領域(Ⅱ)にもスペクトルは入っているが、音圧レベルが低いので、「低周波騒音」となる可能性はそれほど大きいとは思われない。

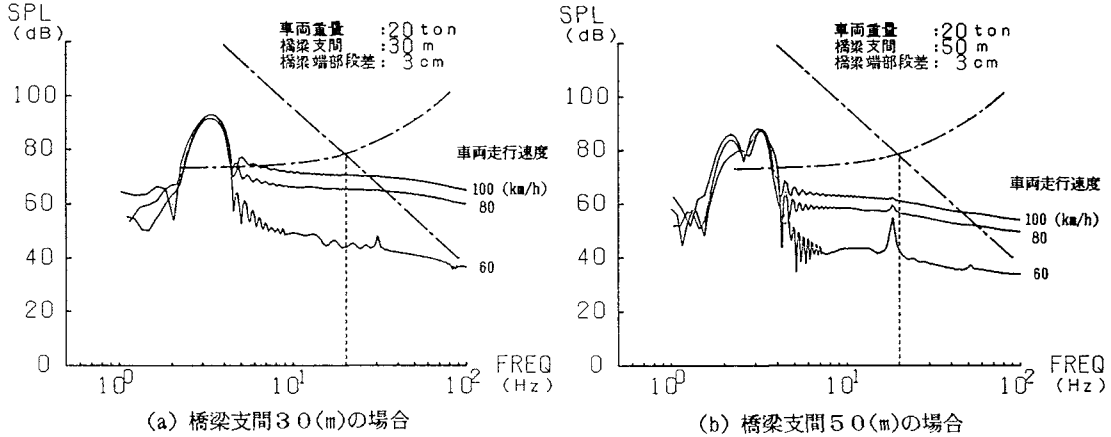


図3.5 音圧レベルに及ぼす車両走行速度の影響

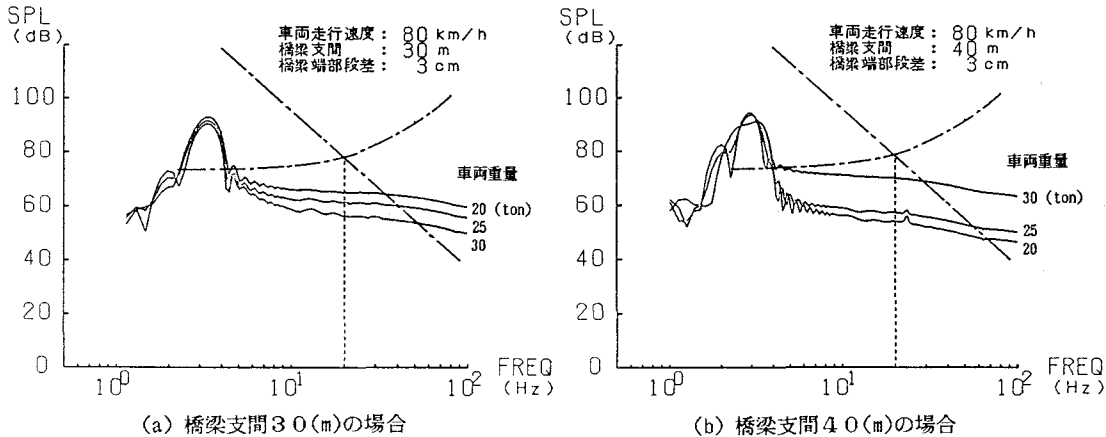


図3.6 音圧レベルに及ぼす車両重量の影響

(b) 橋梁の支間長が低周波音特性に及ぼす影響

放射音への橋梁支間長の影響は、主として橋桁の1次固有振動数と、車両のばね上部の回転振動と鉛直振動の連成モードに対応する車両の1次及び2次固有振動数との関係において現れる。例えば図3.4(a)-(d)にみられるように、橋梁支間長が50(m)の場合には、表2.2に示した橋桁の1次固有振動数2.05(Hz)と、表2.3に示した車両の2次固有振動数3.17(Hz)とが離れているため、領域(Ⅲ)におけるスペクトルは2つのピークを形成している。支間長30(m)の橋梁では、橋桁の1次固有振動数3.39(Hz)と車両の2次固有振動数3.17(Hz)が近いので、領域(Ⅲ)のスペクトルのピークは一つとなり、その分ピーク値は高まり90(dB)を越えるまでになっている。

(c) 車両の走行速度が音圧レベルに及ぼす影響

低周波音特性に及ぼす車両の走行速度の影響を調べるために描いた音圧レベルのスペクトル図のうちの2例を図3.5(a),(b)に示す。受音点は、ともに橋面中央点上下 30(m)の位置としている。「超低周波騒音」の発生につながる領域(Ⅲ)におけるスペクトルのピークに対しては、車両の走行速度の違いによる差はみられないが、「低周波騒音」の発生につながる領域(Ⅱ)においては橋梁の支間長によっては走行速度の増大が音圧レベルの上昇につながる場合が多いことがわかった。

(d) 車両重量が音圧レベルに及ぼす影響

車両重量が放射音の音圧レベルのスペクトル図に及ぼす影響も調べた。橋面中央点上下 30(m)の位置を受音点として描いたスペクトル図のうちの2例を図3.6(a),(b)に示す。これらの場合、音圧レベルへの車両重量の影響は、車両の2次固有振動数と橋桁の1次固有振動数の大小関係で決まっている。すなわち、支間長 30m の図3.4(a)の場合には、橋桁の1次固有振動数に車両の2次固有振動数が近い順である車両重量 20, 25, 30(ton)の順に音圧レベルは高くなっている。支間長40m の図3.6(b)の場合は、同様の理由から逆に車両重量 30, 25, 20(ton)の順に音圧レベルは高くなっている。

(e) 受音点の橋面からの距離が音圧レベルに及ぼす影響

受音点の橋面からの距離を変えて描いた音圧レベルのスペクトル図の1例を図3.7に示す。音波が伝播していく過程での拡散現象により、音圧は減衰していくのは自明である。図3.7はその減衰の度合を定量的に示している。

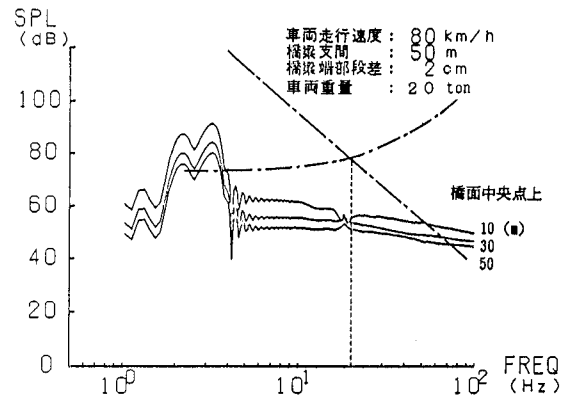


図3.7 音圧レベルに及ぼす受音点距離の影響

4. ま と め

車両が道路橋上を走行する際に発生する低周波音による騒音問題を検討する目的で、まず車両-橋梁連成系の動的応答解析を行った。前・後輪2軸の4自由度系の重車両モデルと、単純支持の標準的な鋼道路桁橋モデルを用い、橋梁端部と伸縮装置間の段差を考慮した数値解析によって連成系の振動特性を調べた。同時に、放射音解析に必要な橋面任意点の振動速度のフーリエ・スペクトルも求めた。

重車両走行に伴う道路橋振動から放射される低周波音の音響場は、振動する橋面を微小要素に分割し、その個々の要素を無限バツフル中にある半球状の呼吸球音源と考えて解析した。その際、橋面の振動速度にはそのフーリエ・スペクトルを適用することにより、任意受音点の音圧レベルのスペクトルを求める方法を開発した。さらに、橋桁の2~4次モードの固有振動による放射音の干渉現象を解析して、この解析手法の検証を行った。

この解析手法に基づき、橋梁端部の伸縮装置間の段差、橋梁支間長、車両の走行速度、車両重量、受音点の橋面からの距離等を変化させて音圧レベルのスペクトル図を描き、車両走行に伴う鋼道路桁橋から放射される低周波音の基本的特性について検討した結果、次のことがわかった。

- (1) この問題で最も支配的な因子は、橋梁端部の段差である。1cm 以上の段差があるとほとんどの場合、20 (Hz)以下の領域で橋面上下30m の音圧レベルのピークが80~90(dB)にも達する。したがって、その場合には低周波音自体は直接的には知覚されないが、戸障子、窓ガラスなどがガタガタ鳴るという物理的な現象によって間接的に感知されるという、「超低周波騒音」の発生の可能性が大きいと云える。

(2) 1cm 以上の段差がある場合で、20(Hz)以下の領域における音圧レベルのピークをさらに高め、「超低周波騒音」のレベルを一層大きくする恐れのある因子は、橋梁支間長である。支間長によっては、橋桁の1次固有振動と、車両ばね上部の鉛直振動と回転振動の連成モードに対応する車両の2次固有振動や1次固有振動とが共振する可能性があるからである。

参 考 文 献

- 1) 西脇仁一・森 卓支：中央高速道路葛野川橋の超低周波騒音現象，日本音響学会論文集，1976年5月。
- 2) 北村 豊・山田次男：低周波空気振動問題について，日本道路公団試験所報告（昭和50年度），pp.324-344，1976年12月
- 3) 小川 清・小野正二：橋梁振動に伴う低周波空気振動に関する試験研究，日本道路公団試験所報告（昭和51年度），pp.234-252，1977年12月；同（その2）， pp.259-278，1978年12月；同（その3）， pp.194-201，1979年12月。
- 4) 山家祥三：低周波空気振動に関する調査 —— 音圧実態調査及び家屋に対する影響 —— ，日本道路公団試験所報告（昭和51年度），pp.311-323，1977年12月
- 5) 山田伸志・小坂敏文・中沢清人：高速道路橋より発生する超低周波音の発生メカニズム，日本音響学会騒音研究会資料，資料番号N-7704pp.19-24，1977年8月。
- 6) 今市憲作・辻本良信・高島 伸・北川晃一：道路橋の振動に伴う放射音の理論解析，日本機械学会論文集（C編），46巻408号，pp904-912，1980。
- 7) 大島俊之・能町純雄：走行車両により橋梁から放射される低周波空気振動の解析，日本音響学会誌，39巻1号，pp.11-18，1983。
- 8) 足立義男：橋梁の振動性状が低周波域の空気振動に及ぼす影響に関する研究，土木研究所報告，第164号-1，pp.1-61，1984。
- 9) 大島俊之・能町純雄・月田良博・三上修一：はり理論による低周波空気振動の放射音圧レベルの解析，土木学会論文集，第356号／I-3，1985年4月。
- 10) 五郎丸英博・白石捷夫・原 公・小森 武：中小支間道路橋における低周波空気振動の放射音圧レベルとスペクトルの推定，土木学会論文集，第403号／VI-10，1989年3月。
- 11) 建設省土木研究所：橋梁の設計動荷重に関する試験調査報告書（Ⅷ-1985），土木研究所資料第2258号
- 12) 本田秀行・小堀為雄：道路橋の伸縮装置部に生ずる走行自動車の衝撃力特性と路面性状の影響，構造工学論文集，Vol.33A，pp.451-458，1987年3月。
- 13) 日本音響学会：音響工学講座④騒音・振動（上），コロナ社
- 14) 時田保夫：低周波音の計測と評価の問題点，文部省科研費環境科学シンポジウム，騒音振動の評価手法，pp.147-161，1981年1月。
- 15) 山田伸志：超低周波音と低周波音，環境技術研究会，1984年7月。

（1990年10月12日受付）