

# 高架道路から発生する低周波音の音響特性に関する考察\*

## Study on Characteristics of Infra Sound Radiated from Road Bridge\*

徳永法夫\*\*・福島昭則\*\*\*・西村 昂\*\*\*\*

By Norio TOKUNAGA\*\*・Akinori FUKUSHIMA\*\*\*・Takashi NISHIMURA\*\*\*\*

### 1. はじめに

道路橋から発生する低周波音の問題は、昭和50年前後から社会的に知られるようになった。

その後、低周波音に関する実態調査や評価に関する研究が盛んに行われている。しかし、評価方法についてはISO<sup>1)</sup>でG特性感覚補正曲線が提案されているが低周波音の感覚については個人差が大きいことなどから、わが国では騒音や振動のような一般的な評価指標にはなっていない。また低周波音の測定方法についてもJIS規格がないことから騒音の測定方法を参考に日本騒音制御工学会が提案した方法<sup>2)</sup>を踏まえて測定されているのが現状である。

今後、環境影響評価法に基づき低周波音が道路事業の環境影響評価の評価項目に含まれることになると考えられる。このことを踏まえて道路橋からの低周波音の予測方法について、全国の道路橋80箇所での実測調査結果に基づく提案式が報告された<sup>3)</sup>。

ところで、道路橋沿道の住民からの低周波音に関する苦情には振動と併せたものもあり、特に建具のガタツキについては低周波音によるものか振動によるものか、あるいは両者に起因するものか判断が困難な場合もある。著者らはこれまで主に道路橋から発生する振動に関する研究<sup>4)</sup>を行ってきたが、上記の理由から道路橋からの低周波音についても物理的な知見が必要と考えた。

今回、われわれは多数の道路橋沿道で低周波音の周波数特性の実測調査を行った。その結果をもとに、道路橋から発生する低周波音の卓越周波数と道路構造物の支間長との対応を検討し、両者の間にみられる相関を把握した。また、振動板からの音響放射モデルを用いてコンク

リート板と鋼板の放射係数を検討し、低周波音の発生源に関する知見を得た。

### 2. 現地調査の概要

#### (1) 調査場所および測定橋梁

高架構造の自動車専用道路を対象として調査を行い、高架道路に面する家屋の屋外において低周波音の測定を行った。測定点は主に1～3階の建物前面に設置した。

測定した橋梁数は29橋梁である。道路橋から発生する低周波音と橋種の関係を検討するために上部構造形式で分類した。橋梁の上部構造種別毎の測定点数を表1に示す。また、今回調査した橋梁の支間長は表2に示すとおりである。なお、低周波音の卓越周波数が橋梁の支間長に関連することが文献<sup>3)</sup>に報告されている。

表1. 上部構造種別毎の測定点数

| 上部構造 | 測定点数 | 備 考              |
|------|------|------------------|
| 鋼I桁  | 14   |                  |
| 鋼箱桁  | 10   | 桁本数：2～3          |
| その他  | 5    | PC桁, RC桁, ディレクター |

表2. 調査した橋梁の支間長

| 上部構造 | 支間長(m) |           |
|------|--------|-----------|
|      | 平均値    | 最小～最大     |
| 鋼I桁  | 27.9   | 18.0～42.0 |
| 鋼箱桁  | 34.9   | 27.5～62.5 |
| その他  | 35.3   | 10.0～83.0 |

#### (2) 低周波音の測定および分析

現地測定は、高架道路を走行する大型車の混入率が一日のうちでもっとも大きくなる早朝の5～6時の1時間において実施した。現地ではセンサ出力をすべてデータレコーダに録音した。

録音データを再生し、1秒毎にFFT分析を行い低周波音の周波数特性の時刻変動を算出した。FFT分析による周波数分解幅は0.78Hzである。この分析を1時間にわたって実施した。低周波音に対する評価指標として一般的な評価値はない。しかし、今回は橋梁との物理的な

\*キーワード：交通公害、環境計画

\*\*正員、工博、阪神高速道路公団神戸第二建設部（神戸市中央区東川崎町1-3-3（神戸ハーバーランドセンタービル22階）、TEL078-360-8141、FAX078-360-8158）

\*\*\*正員、(株)ニューズ環境設計（神戸市兵庫区水木通2-2-22、TEL078-574-5448、FAX078-578-8221）

\*\*\*\*正員、工博、大阪市立大学工学部土木工学科、（大阪市住吉区杉本3丁目138、TEL&FAX06-6605-2731）

対応を検討することが目的であるため、FFT分析により求めた1時間(3600個)の瞬時の周波数特性データを用いて周波数毎に物理的な定義が明確である以下の指標を算出し検討に用いた。

- ① 1時間のエネルギー平均音圧レベル ( $L_{eq}$ )
- ② 1時間の最大音圧レベル ( $L_{max}$ )
- ③ 5分(300個)毎の最大値12個の算術平均音圧レベル ( $\overline{L_{max}}$ )

なお①については道路交通騒音の評価値が $L_{eq}$ であり騒音についてはエネルギー平均値と心理評価の対応がよいことを、②および③については振動に関する苦情がピークに関して寄せられることが多いことも念頭においた。

### 3. 物理特性に関する調査結果

#### (1) 音圧レベル

オールパス(A.P., 個々での検討では1.6~90Hz)の音圧レベルを表3に示す。また、 $L_{eq}$ を測定点で比較して図1に示す。

1時間の $L_{eq}$ は、29測定点中の最大値が90dB、算術平均値が79dBである。橋種別にみると鋼I桁が他の形式よりも4~5dB大きい傾向にある。

1時間の最大値 $L_{max}$ は、29測定点中の最大値が103dB、算術平均値が92dBである。また鋼I桁が他の形式よりも2~4dB大きい。

$\overline{L_{max}}$ は、最大値が99dB、算術平均値が89dBである。また鋼I桁が他の形式よりも3dB大きい。 $L_{max}$ と $\overline{L_{max}}$ のレベル差は3~4dBである。

既存文献中の低周波音の測定事例<sup>5)</sup>と今回の測定値を比較して図2に示す。文献データは中央値( $L_{50}$ )であり、今回の測定値は $L_{eq}$ であることから両者をそのまま比較はできないが、一般には $L_{eq} > L_{50}$ の関係にあることを考えると、今回の測定値は一般環境部のうちの自動車専用道路や一般道の沿道の平均的な音圧レベルである。

#### (2) 車両走行時の音圧

橋梁を車両が走行したときの測定点での音圧変動波形の測定例を上部構造種別に図3に示す。なお、図の縦軸は、式(1)で求めた表示した時間内(10秒間)の実効音圧を基準とした相対音圧で示している。

$$1Pa = \frac{1}{T} \sqrt{\int_0^T p^2(t) dt} \tag{1}$$

$T = 10 \text{ sec}$   
 $p(t)$  : 時刻 $t$ の音圧(Pa)

いずれの波形にも0.2~0.3秒程度の周期的な変動がみられ、大きな成分をもつ特定の周波数の変動に他の周

表3. 音圧レベル (A.P.) の測定結果 (dB)

| 指 標                   |      | 上部構造での分類 |      |      |       |
|-----------------------|------|----------|------|------|-------|
|                       |      | 鋼 I 桁    | 鋼箱桁  | その他  | 全体    |
| $L_{eq}$              | 平均値  | 81.6     | 77.6 | 76.7 | 79.4  |
|                       | 標準偏差 | 5.2      | 4.9  | 2.8  | 5.1   |
|                       | 最大値  | 89.9     | 83.0 | 79.7 | 89.9  |
|                       | 最小値  | 72.9     | 68.0 | 72.6 | 68.0  |
| $L_{\max}$            | 平均値  | 93.8     | 91.6 | 89.7 | 92.3  |
|                       | 標準偏差 | 5.4      | 4.7  | 3.9  | 5.0   |
|                       | 最大値  | 102.6    | 97.2 | 94.4 | 102.6 |
|                       | 最小値  | 86.9     | 83.6 | 84.0 | 83.6  |
| $\overline{L_{\max}}$ | 平均値  | 90.1     | 87.6 | 86.8 | 88.7  |
|                       | 標準偏差 | 5.6      | 5.2  | 3.5  | 5.2   |
|                       | 最大値  | 99.2     | 94.2 | 90.9 | 99.2  |
|                       | 最小値  | 81.0     | 78.9 | 81.9 | 78.9  |

(単位: dB)

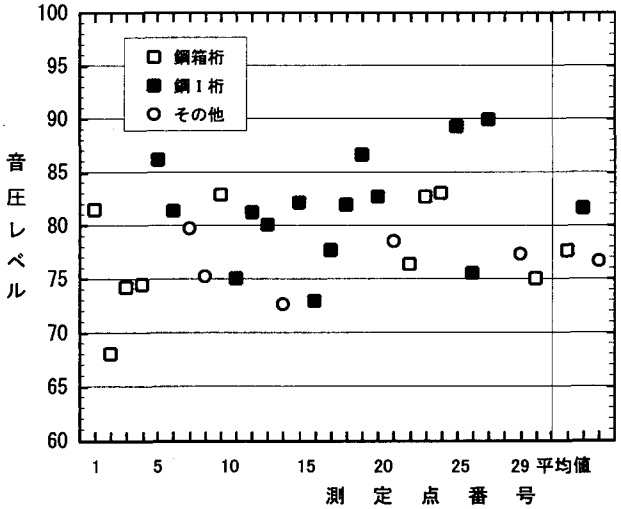


図1. 音圧レベル ( $L_{eq}$ ) の測定結果

(単位: dB)

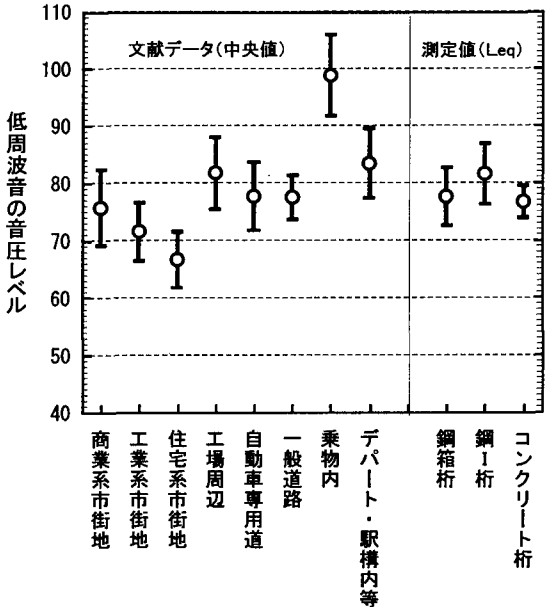
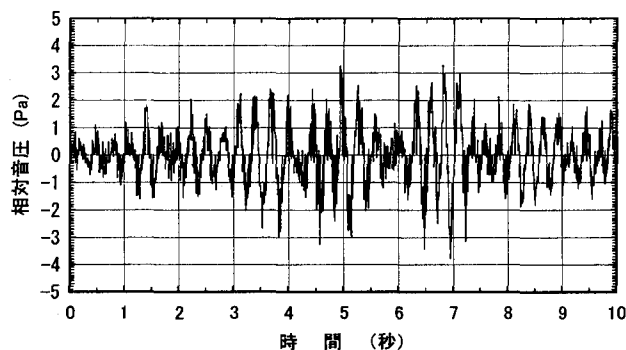


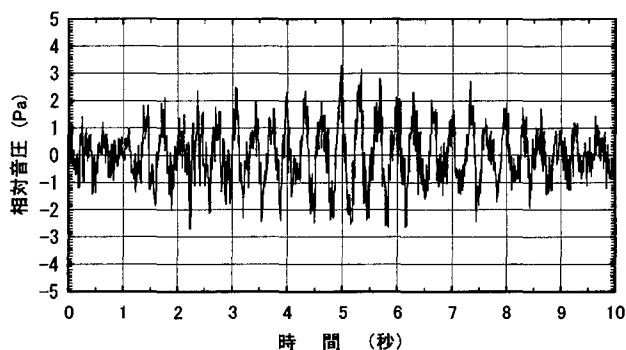
図2. 測定値と一般環境部の低周波音の比較  
 ○: 算術平均値、太線: 標準偏差

波数の変動が重畳された波形となっている。このことから橋梁からの低周波音の特徴として、特定の周波数の振幅が大きいことが考えられる。

(a). 鋼 I 桁



(b). 鋼箱桁



(c). PC 桁

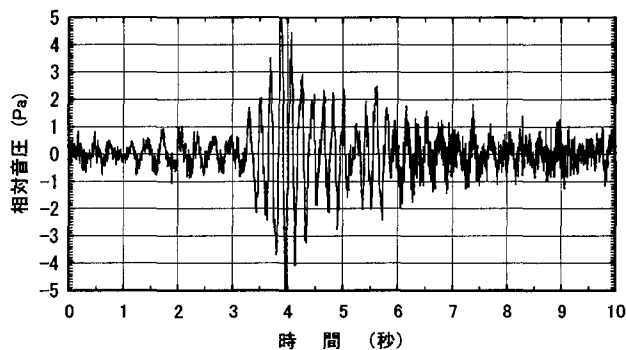


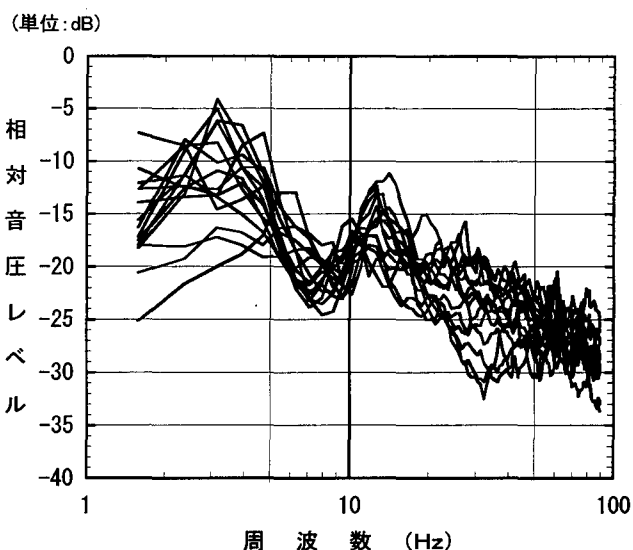
図3. 低周波音の音圧波形の測定例  
縦軸は10秒間の実効値を基準として相対値

### (3) 低周波音の周波数特性

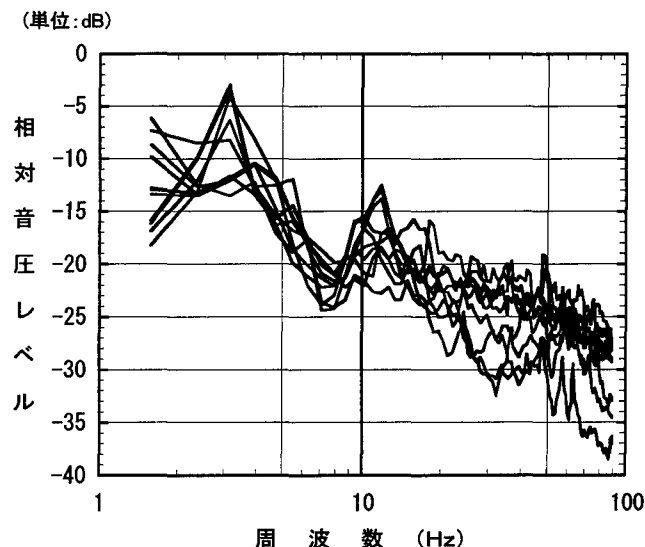
低周波音の周波数特性（1時間の $L_{eq}$ ）を上部構造別に図4に示す。縦軸はオールパス値（1.6～90Hzの音圧レベル）を基準とした相対値で示しており、29橋梁の調査結果を重ね書きしている。

全体的には低い周波数ほど音圧レベルが大きい傾向にある。また、3～6Hz付近と10～20Hz付近の音圧レベルが卓越している。特に3～6Hz付近は図2に示した音圧振幅波形の0.2～0.3秒周期の変動である。また、3～6Hz付近と10～20Hz付近の卓越周波数にはすべての橋種にみられ、上部構造形式による違いはみられない。

(a). 鋼 I 桁



(b). 鋼箱桁



(c). その他(PC桁等)

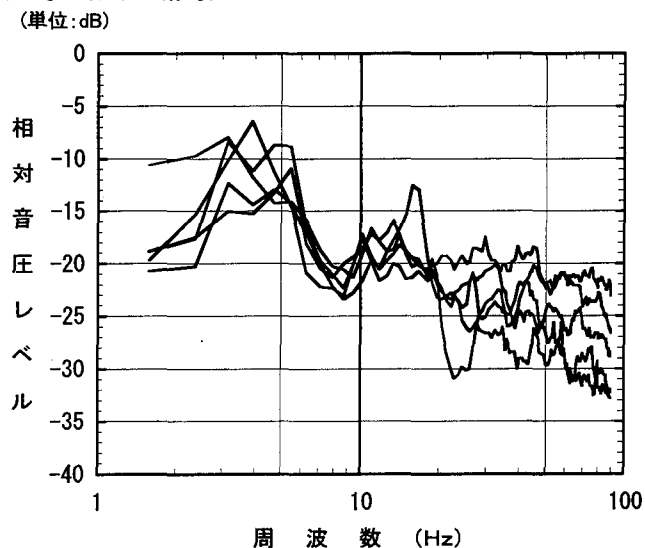


図4. 低周波音の周波数特性  
(0dB=オールパス値)

(4) 卓越周波数

周波数分析結果にみられた2つの帯域の卓越周波数をFFT分析結果より求め、その前後の周波数成分とあわせて次式による加重平均を行い卓越周波数を算出した。

$$f = \frac{\sum_{i=-1}^{+1} f_i \cdot 10^{L(f_i)/10}}{\sum_{i=-1}^{+1} 10^{L(f_i)/10}} \tag{2}$$

ここで、

- $f$  : 卓越周波数(Hz)
- $f_0$  : 2~6Hz および 9~16Hz の帯域でもっとも成分が大きい周波数(Hz)
- $f_{\pm 1} = f_0 \pm \Delta f$  (Hz)
- $\Delta f$  : 周波数分解幅(Hz) (=0.78Hz)
- $L(f_i)$  :  $f_i$  (Hz) の音圧レベル(dB)。

3つの評価指標 ( $L_{eq}$ ,  $L_{max}$ ,  $\overline{L_{max}}$ ) についての周波数特性から、式(2)を用いて卓越周波数を算出した。なお、風の影響で低い周波数帯域の音圧レベルが増加していると判断される場合はその周波数帯域を除いて卓越周波数を算出した。

求めた卓越周波数を図5に示す。

低い周波数帯域の卓越周波数は約 2~6Hz であり、高い周波数帯域の卓越周波数は9~16Hz である。

低い周波数帯域 (2~6Hz) の卓越周波数については、いくつか測定点を除けば、評価指標 ( $L_{eq}$ ,  $L_{max}$ ,  $\overline{L_{max}}$ ) に関係なくほぼ同じ周波数になることが多い。また、卓越周波数をもっとも低い測定点 15 の卓越周波数ともっとも高い測定点 12 の卓越周波数の比は約 3 倍である。

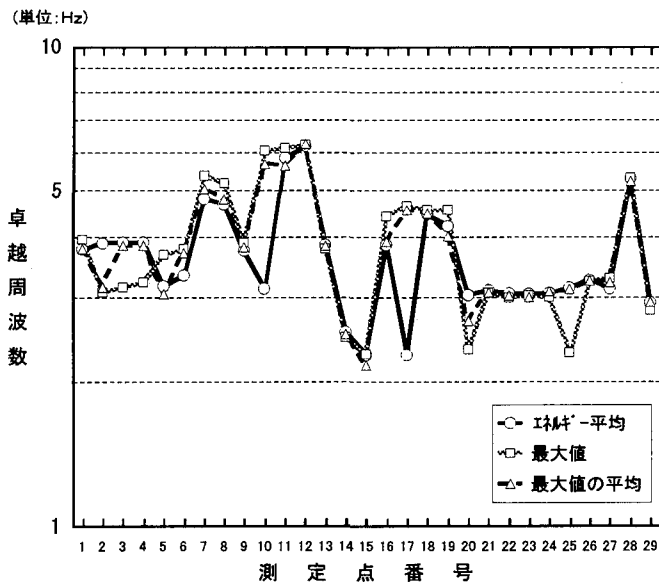
高い周波数帯域 (9~16Hz) の卓越周波数については、の最大と最小の比は約 1.8 倍であり、卓越周波数の最大と最小の比で見れば低い周波数帯域の卓越周波数ほどの違いは見られない。この理由については今後詳細な調査が必要と考えるが、大型車のバネ上の振動がこの周波数範囲にあるといわれており、大型車固有の振動が橋梁を加振し音を発生させていることも理由のひとつと考えられる。

4. 低周波音の卓越周波数成分に関する検討

(1) 卓越周波数と支間長の関係

橋梁の振動から放射される低周波音のメカニズムを解析的に扱うには構成部材が多いことや各部材の接続条件の設定、音響放射効率など複雑であり実橋を対象とした予測は困難である。ところで、環境影響評価において

(a). 低い周波数帯域 (2~6Hz) の卓越周波数



(b). 高い周波数帯域 (9~16Hz) の卓越周波数

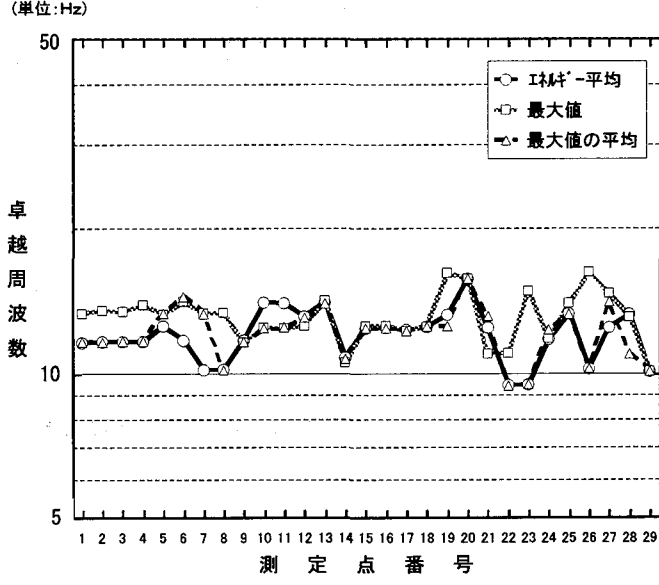


図5. 低周波音の卓越周波数の算出結果

低周波音を扱う場合には、音圧レベルとその周波数特性が分かれば人の感覚閾値との比較や建具などのガタツキの検討、あるいはISOに採用されているG特性値の算出が可能である。したがって橋梁からの低周波音についても音圧レベルと周波数特性 (あるいは卓越周波数) が推定できれば十分なケースも多い。

ここでは、支承部分で上部工が単純支持されているもっとも単純なモデルを考える。低周波音は上部工の振動により発生していると考えられる。したがって、支間長が異なればそれに応じて卓越振動数も変化すると考えられる。もっとも単純な弦の振動を考えると振動数は弦の長さの逆数に比例する。この点を踏まえて、卓越周波数  $f$  と支間長  $D$  の関係として次の式を仮定した。

$$f \approx A + \frac{B}{D} \quad (3)$$

ここで、 $A, B$  は定数。

F F T 分析結果から求めた 5 分間の最大値の算術平均値 ( $\overline{L_{\max}}$ ) の周波数特性から求めた卓越周波数と橋梁の支間長の逆数との関係を図 6 に示す。なお、測定点付近で橋梁の支間長が異なる場合は、支間長の比が 2 倍未満であればその平均値を用いた。また支間長の比が 2 倍以上の場合は検討には用いなかった。

式(3)による回帰式と相関係数  $r$  は以下のとおりである。

(低い周波数帯域(2~6Hz)の卓越周波数)

$$f = 0.1531 + 105.4/D \quad (4)$$

$$r = 0.919$$

(高い周波数帯域(9~16Hz)の卓越周波数)

$$f = 10.22 + 50.47/D \quad (5)$$

$$r = 0.100$$

低い周波数帯域の卓越周波数と支間長の逆数との相関係数は 0.919 であり非常によい対応を示している。したがって低い周波数帯域の卓越周波数は  $f \approx A + B/D$  ( $A, B$  は定数) の関係にあるといえる。

一方、高い周波数帯域の卓越振動数と支間長の逆数との相関係数は 0.100 であり、支間長には依存していない。

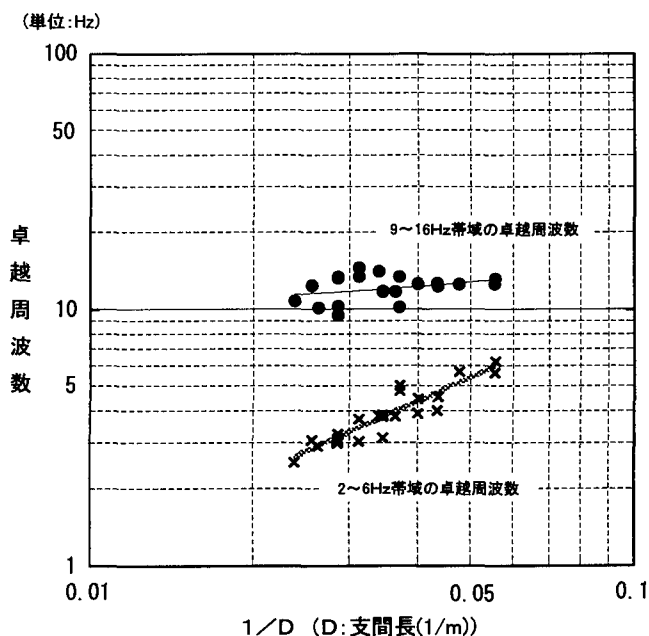


図 6. 卓越周波数と支間長  $D$  の逆数との対応

## (2) 振動からの音波の放射効率

低周波音が橋梁の振動放射によるものであることは自明である。放射面としては床版と桁が考えられる。こ

こでは平板からの音響放射理論を用いて計算により主たる放射面を検討した。

平板の振動により発生する音圧と振動面の振動速度には次式の関係があり、放射音の音圧は振動面の振動速度  $v$  と放射係数  $\sigma$  に依存する。

$$p = \sigma \cdot \rho c v \quad (6)$$

ここで、

$p$  : 放射される音圧 (Pa)

$v$  : 振動面の振動速度 (m/sec)

$\sigma$  : 放射係数

$\rho c$  : 空気の音響インピーダンス ( $\text{kg/m}^2 \cdot \text{sec}$ )

ところで、道路橋の鉛直方向の 1 次固有振動数と支間長の関係式 (実験式) として次式が報告されている<sup>6)</sup>。

$$f_z = 49.1 \cdot D^{-0.779} \quad (7)$$

ここで、 $f_z$  : 鉛直方向の 1 次固有振動数 (Hz)

この式に表 1 に示す支間長を当てはめると、1 次固有振動数は 1.6~8.2 Hz となり、低周波音の低い周波数帯域 (2~6 Hz) の卓越周波数とほぼ一致する。1 次固有振動は床版の上下方向の振動とも考えられるため、振動速度  $v$  も大きい。したがって床版の放射係数  $\sigma$  が大きければ低周波音の低い周波数帯域の音波は床版の上下方向の振動により放射されていると考えることができる。

ピストン運動する平板の近傍の空気は平板に垂直な力を受けるが、有限長振動板の端部付近では振動板表裏の圧力差のために空気が側方に流れ、振動面の表裏を往復するだけで音波にはなりにくい。振動面の大きさが音波の波長よりも小さくなると、この現象はより顕著となり放射係数は小さくなる。橋梁から放射される低周波音の卓越周波数は 2~6 Hz であり、波長は 60~170 m である。したがって、橋梁の振動面の振動がそのまま音波に変換されるとは考えにくい。

ここでは、コンクリート床版および鋼 I 桁を想定し、それらをもっとも単純化した平板として考え、平板からの音響放射に関する *Maidanik* の計算式<sup>7)</sup>の入江による近似式<sup>8)</sup>を用いて放射係数を検討した。

放射係数の計算式を以下に示す。

$$\sigma \approx \frac{2\gamma_{11}\gamma^2}{\sqrt{(\gamma^2 - \gamma_{11}^2)^2 + \gamma_{11}^4}} \left( \frac{\gamma}{\gamma_{11}} \right)^{1/4} + \frac{\gamma^{3.5}(\gamma^{3.5} + \beta)}{(\gamma^{3.5} - 1)^2 + \beta} \quad \dots (8)$$

ここで、

$$\gamma_{11} = \left( \frac{P^2}{8S} - 1 \right) \frac{\lambda_c^2}{2S} \quad (9)$$

$P$  : 平板の周長 (m),  $S$  : 平板の面積 ( $\text{m}^2$ )

$c$  : 音速 (m/sec.),  $\lambda$  : 波長 (m)

$$\frac{1}{\beta} = \sqrt{\left(\frac{P}{2} + \frac{2}{\sqrt{S}}\right) \frac{1}{\lambda_c}} \quad (10)$$

$$\lambda_c = \frac{2\pi c}{f_c}, \quad \gamma = \frac{f}{f_c}, \quad f_c = \frac{c^2}{2\pi} \sqrt{\frac{m''}{B'}}$$

$f_c$  : 平板の限界周波数 (Hz)

$m''$  : 板の単位面積あたりの質量 (kg/m<sup>2</sup>)

$B'$  : 板の単位幅あたりの曲げ剛性

$$B' = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \quad (11)$$

$E$  : 板のヤング率,  $h$  : 板厚 (m)

$\nu$  : ポアソン比

高架道路床版のモデルとしてコンクリート板 (20×30×0.18 (m)) を、鋼桁のモデルとして鋼板 (30×1.5×0.02 (m)) を想定した。式 (8)～(11) を用いて放射係数を計算した結果を図 7 に示す。

放射係数が最大となる限界周波数は、コンクリート板で約 100Hz、鋼板で約 600Hz である。20Hz 以下の周波数領域では放射効率 (放射係数のデシベル表示値) は -10dB 未満である。低周波音の音圧レベルが最大となる 2～6Hz の放射効率はコンクリート板で約 -17dB、鋼板で -27～-37dB であり、コンクリート板に比べ鋼板は音波への変換効率が約 10～20dB ほど小さい。この周波数帯域では音波を放射するには鋼桁の寸法 (特に桁の高さに相当する寸法 (1.5m)) が波長 (60～170m) に比べて小さすぎるため、放射効率が小さいと考えられる。

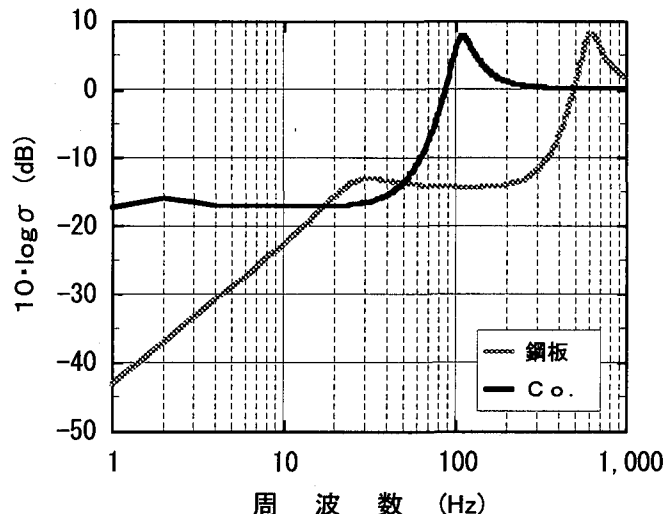


図7. コンクリート板と鋼板の放射効率の計算結果

以上より、2～6Hz の帯域では床版は、放射音の音圧を決める振動および放射効率が共に大きいことがわかった。したがって、この帯域の低周波音は主にコンクリート床版の鉛直方向の振動により発生していると考えられる。

また図 4 に示すようにコンクリート桁構造の高架道路 (表 1 の分類の「その他」に含む) でも鋼桁構造と同様、2～6Hz の帯域が卓越しており、桁の種別に依存して

いない。このことも桁以外の振動面、すなわちコンクリート床版から音波が放射されていることを示唆している。

## 5. まとめ

高架構造の自動車専用道路から放射される低周波音の音響特性について検討した。結果を以下に述べる。

- (1) 道路橋周辺の低周波音の周波数特性は 2～6Hz と 9～16Hz の 2 つの帯域の音圧が卓越していた。
- (2) 2～6Hz の卓越周波数は支間長の逆数と非常により相関を示した。この関係式 (実験式) を用いれば、橋梁から発生する低周波音の卓越周波数を推計することが可能である。
- (3) 2～6Hz の帯域は、橋梁の鉛直方向 1 次固有振動数の帯域とほぼ一致する。
- (4) 振動から音波への変換について平板の振動放射理論を用いて検討した結果、2～6Hz 帯域の放射効率は、コンクリート床版の大きさを想定した平板の方が鋼 I 桁の大きさを想定した鋼板よりも 10～20dB 大きかった。鋼 I 桁は音波の波長に比べかなり小さいことから、音波への変換においては損失が大きいと考えられる。
- (5) コンクリート桁構造の高架道路でも鋼桁構造の高架道路と同様、2～6Hz の帯域で卓越成分がみられることから、(3) および (4) とあわせて考えればこの帯域では放射面積が大きいコンクリート床版から音波が放射されていると考えられる。

今後の課題として、①交通量や高架構造をパラメータとした低周波音の音圧レベル推計方法の検討、②実測による振動放射効率の検証があげられる。

## 参考文献

- 1) ISO 7196:Acoustics—Frequency weighting characteristics for infrasound measurements.
- 2) 日本騒音制御工学会技術部会：低周波音及び超低周波音測定方法。
- 3) 村井, 竹田, 大西, 上坂, 那須, 石渡: 道路橋から発生する低周波音の実態と予測方法, 日本音響学会騒音振動研究会資料, N99-34, 1999.
- 4) 徳永, 西村, 日野, 宮原: 高架道路における交通振動低減対策効果と苦情要因の分析, 土木計画学研究・論文集 No. 14, pp. 451-458, 1997
- 5) 日本道路協会: 道路環境整備マニュアル, pp. 249, 1989.
- 6) 橋梁振動研究会編: 橋梁振動の計測と解析 (技報堂出版), pp. 103-114.
- 7) G.Maidanik: Response of Ribbed Panels to Reverberant Acoustic Fields, J. Acoust. Soc. Am., **34**(6), pp.809-826, 1962.
- 8) 入江, 中村: SEA 法による固体音伝搬解析法, 船機誌, **19**(3), pp. 257-267, 1984.

高架構造の都市高速自動車道周辺における早朝の時間帯の低周波音の実態を調査した。音圧レベルはエネルギー平均値で70～90dBであり、一般の道路沿道のレベルとほぼ同じ値であった。また、周波数特性には2～6Hzと9～16Hzの2つの帯域に卓越成分がみられた。2～6Hzの帯域の卓越周波数は支間長の逆数と非常によい相関を示した。一方、9～16Hzの帯域の卓越周波数には橋梁の支間長との関連はみられなかった。さらに、振動板の音響放射理論を用いてコンクリート板と鋼板の音響放射効率を計算した。その結果、2～6Hzの帯域ではコンクリート板の方が鋼板に比べ10～20dB音に変換されやすいことがわかった。

This paper describes characteristics of infra sound radiated from elevated road structure by measurement. Sound pressure levels along road are 70-90dB. In frequency characteristics, two peaks appear. One peak is at 2-6Hz, and the other is at 9-16Hz. Peak frequency at 2-6Hz is proportional to the reciprocal number of the length of road structure. On the other hand, peak frequency at 9-16Hz is not related the road structure length. Sound radiation coefficient by vibration plate is obtained by theoretical equation. At 2-6Hz, the sound radiation loss of concrete plate with road surface is smaller than the one of steel plate with I-type gilder.

---