

# 単純鋼橋から放射される低周波音に関する一考察

A study on Low-frequency noise radiated from simply supported steel bridges

謝 旭\*, 山口宏樹\*\*, 山下幹夫\*\*\*, 国分修\*\*\*\*

Xu XIE, Hiroki YAMAGUCHI, Mikio YAMASHITA and Syuichi KOKUBUN

\*博士(学術), 開発コンサルタント(株) (〒170-0005 東京都豊島区南大塚 3-20-6)

\*\* 工博 埼玉大学教授, 工学部建設工学科 (〒338-8570 埼玉県さいたま市下大久保 2 5 5)

\*\*\* 開発コンサルタント(株) (〒170-0005 東京都豊島区南大塚 3-20-6)

\*\*\*\* 工博 開発コンサルタント(株) (〒170-0005 東京都豊島区南大塚 3-20-6)

In this paper, a numerical method to estimate the sound pressure level of low-frequency noise radiated from steel bridges due to traffic vibration is proposed. According to the comparison between the analysis results and the field measured data, applicability of the analysis has been confirmed. Moreover, the characteristics of sound pressure level caused by running vehicles are analytically investigated for the simply supported steel bridge with deck plate slab. It was found that local vibration mode of deck plate affects significantly on the sound pressure level of the low-frequency noise. In addition, an effect of expansion joint of bridge is also discussed.

*Key Words: low-frequency noise, traffic-induced vibration, sound pressure level*

キーワード: 低周波音, 交通振動, 音圧レベル

## 1. まえがき

低周波音による建具のガタツキ被害や頭痛, 胸部・腹部の圧迫感などの人体的影響などは昭和 50 年前後から報告されてきており<sup>1)~4)</sup>, 鋼橋から放射される低周波音の発生メカニズムや橋梁周辺への音圧伝搬についても数多くの研究がなされている<sup>5)~9)</sup>。しかし, 問題はなお完全に解明されておらず, 構造設計において照査基準は確立していない。したがって, 低周波音被害が発生するかどうかは橋梁建設後でないと把握できず, 周辺住民から苦情が寄せられた場合には, 橋梁管理者や設計者がジョイントの段差解消や舗装改善などの経験的対策を実施するのが実情である。また, 近年では, 構造解析技術の進歩による橋梁の軽量化や交通量の増大化が進行する傾向にあり, 環境問題への意識の高まりとも相まって, 橋梁振動による騒音被害や低周波音被害なども設計段階から考慮される必要が大きくなってゆくものと考えられる。

本論文では, 理論的な手法で鋼橋から放射される低周波音を定量的に評価すること, 低周波音低減対策の確立のための一助とすることを目的として, 車両走行による構造の振動応答から, 音伝搬理論により橋梁から放射される低周波音圧の推定を試みた。また, 得られた結果を鋼橋周辺から測った実測値と比較し, 本解析方法の妥当性を検証した。さらに, 鋼床版を有する鋼橋を対象として, 走行車両による鋼橋から放射される低周波音について検討を行い, 単純鋼橋から放射される低周波音の音圧特性について検討した。

## 2. 橋梁から放射される低周波音圧レベルの解析方法

本論文で用いた低周波音圧の解析的推定方法を図-1 に示す。橋梁から放射される低周波音の音圧レベルは, 車両が橋梁を通過するときの橋梁振動応答を音源として, 音伝搬による着目点の音圧を重ね合わせる方法で算出した<sup>9)</sup>。但し, 反射などの境界影響を無視した。

図-1 において, 音源とする橋梁振動の大きさは次の振動パワー (音響パワー)

$$\begin{cases} W = \rho_a c_a \sum_{i=1}^n \bar{u}_i^2 \Delta S_i \\ P_{WL} = 10 \log_{10} (W/W_0) \end{cases} \quad (1)$$

で評価する<sup>9)</sup>。式(1)の  $W$  と  $P_{WL}$  はそれぞれ橋梁から放射されるパワー(ワット)と dB で表示するパワーレベルである。 $n$  は橋梁構造解析モデルの節点数,  $\rho_a$  と  $c_a$  は空気の密度 (1.205kg/m<sup>3</sup>, 1 気圧気温 20℃) と空気中の音速 (343.0m/s, 1 気圧気温 20℃),  $\bar{u}_i$  は節点  $i$  の有効振動速度振幅 (m/s),  $\Delta S_i$  は節点  $i$  分担範囲の面積(m<sup>2</sup>),  $W_0$  は基準パワー(10<sup>-12</sup>ワット)である。

また, 点音源に起因する橋梁周辺の音圧レベル  $S_{PL}$  は次のように算出される<sup>9)</sup>。

$$S_{PL} = 20 \log_{10} (P_{rms}(f, r)/P_0) \quad (2)$$

式(2)において、 $r$ は点音源から着目点までの距離(m)、 $f$ は周波数(Hz)、 $P_0$ は最小可聴音圧値( $2 \times 10^{-5} \text{N/m}^2$ )、 $P_{\text{rms}}$ は式(3)の表面積 $\Delta S$ の点音源伝播理論により算出された音圧 $P(r, f)$ の実効値( $\text{N/m}^2$ )である。

$$P(r, t, f) = \sum_{n=1}^n \frac{j \rho_a c_a k}{4\pi r} u_i(f) \Delta S_i e^{j(\omega t - kr)} \quad (3)$$

式(3)に、 $j$ は虚数単位、 $k$ は音波の波数である。

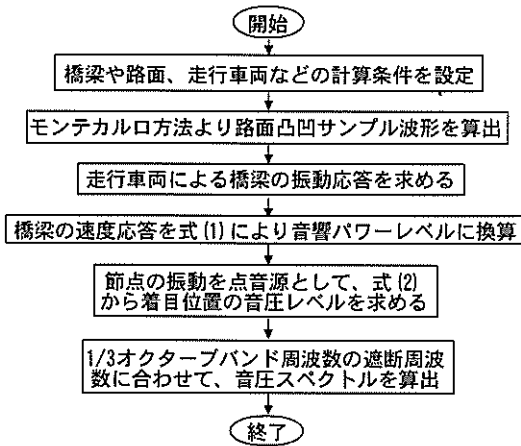


図-1 解析アプローチ

低周波音は1/3オクターブ中心周波数に対応する音圧レベルで一般的に表示されることから<sup>10)</sup>、本解析においても式(2)から得た音圧レベル $S_{PL}$ をさらに1/3オクターブ中心周波数の遮断周波数範囲に合わせて、周波数別の音圧レベルを算出することにした。また、橋梁振動の速度応答 $u$ は橋梁-車両連成振動解析(モード法)から求める<sup>11)</sup>。なお、着目点の位置に依存しない鋼橋の音響を評価するために、図-1に音響パワーレベルの計算も含まれている。

### 3. 実測値との比較

2.で述べた低周波音圧レベルの推定方法の妥当性を確認するために、図-2に示すような主桁と結合された鋼床版を有するスパン約26mの単純鋼橋を対象として、解析を行い、実測値の比較を行った。

#### 3.1 橋梁の解析モデル

解析の対象とした鋼床版桁橋は、構造減衰や剛性が小さいため、鋼板の振動によって放射される音響パワーレベルが高く、道路周辺の住民から苦情が寄せられた。苦情の原因と見られる低周波音は1/3オクターブ中心周波数約10Hz~20Hzの範囲のものが主であった。このため、理論解析から低周波音を推定する際、構造振動は低次モードに起因するものだけではなく、少なくとも30Hz程度までの応答を正しく捕らえることが不可欠であり、板構造の局部振動を考慮できる解析モデルを適用することが必要であ

る。

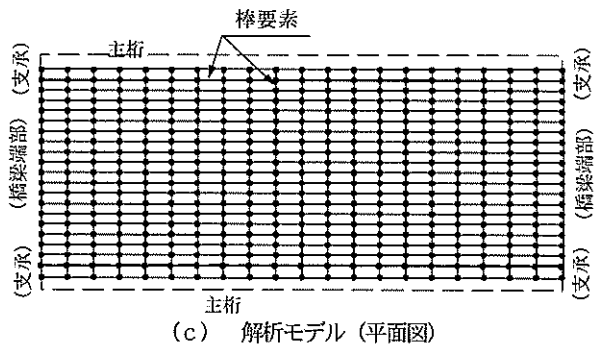
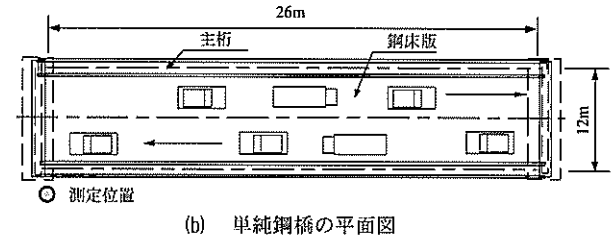
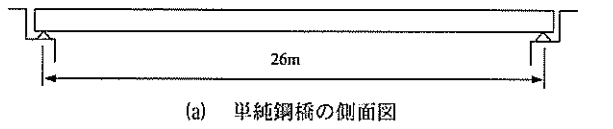


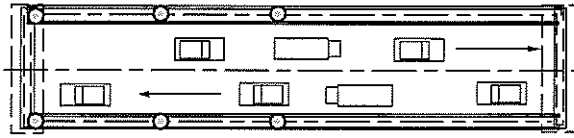
図-2 鋼床版を有する単純鋼橋および解析モデル

連続体の鋼床版は、板要素を用いたFEM解析法でモデル化するのが最も厳密な方法であるが、データ作業が煩雑となるため、実務に適用するには無理があるものと思われる。本論文では、解析の簡易性から橋梁を骨組構造としてモデル化するが、解析精度の確保を図ることから、床版を通常の橋梁振動解析に比べてより密に分割し、板構造の振動特性を考慮することにした。

図-2cに細かく分割した床版の解析モデルを示す。各部材の断面諸元はそれぞれの分担幅から棒要素に置き換えて算出している。

#### 3.2 固有振動解析および実測値との比較

図-2cに示した解析モデルを用いて、まず固有振動解析を行い、結果を実測値と比較した。実測は図-3に示すように、両主桁の端部、スパンの1/4点およびスパンの中央点位置に振動計(加速度計)を設置し、橋梁の常時微動および車両通過時の振動応答をFFT分析した。表-1に主桁の常時微動から得た橋梁の固有振動数と本解析から求めた計算値の比較を示す。結果から、1~3次の橋梁低次モードに対して、解析値は実測値とよく一致していることがわかる。しかしながら、床版の振動特性は実測されなかったため、検証することはできていない。



○ 振動測定位置

図-3 加速度計の設置位置

表-1 橋梁の固有振動特性

モード	解析値 (Hz)	実測値 (Hz)	モード形
1	2.76	2.75	たわみ1次
2	4.50	4.65	ねじり1次
3	6.83	6.90	たわみ2次

### 3.3 交通振動解析条件

#### (1) 走行車両のモデルおよび諸元

走行車両について、従来多数の計算モデルが提案されているが、車両諸元の特が困難であることから、本論文では図-4のような4自由度モデルを適用した。つまり、バネ上部の車体を剛体として、その振動は上下と回転振動の2自由度で表わす。バネ下の前後車輪軸は節点質量とし、上下振動の自由度でその振動を考慮する。また、車体-車輪-路面の間はバネとダッシュポットで結合する。

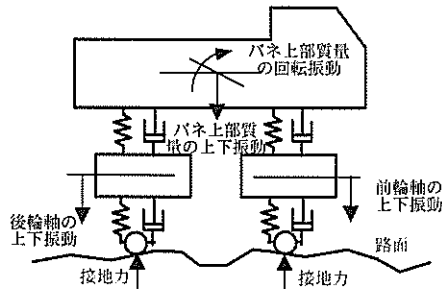


図-4 4自由度車両モデル

通過車両との厳密な対応は困難であるが、低周波音実測時の実測は大型車両通過時に行われたことから、表-2に示す総重量18tの車両諸元を用いた<sup>1)</sup>。なお、車両の固有振動数も表-2に併記している。

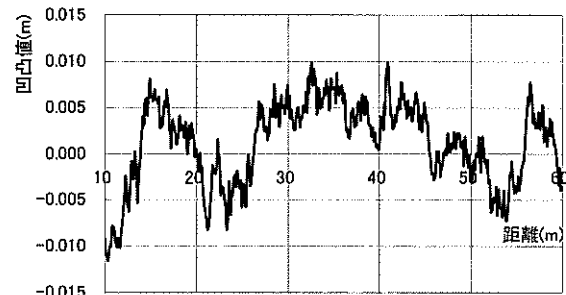
#### (2) 車両の走行条件

一般に、車両の走行条件は走行車線の平面位置と車間距離、走行速度および路面凹凸、ジョイントでの路面段差で与えられる。低周波音実測時の現場での交通観測より、測点(図-2)側の車線を通過する車両に満載の大型車両が

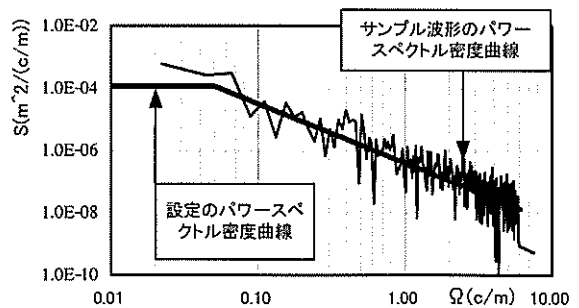
多く、かつ、近接する大型車両はほとんどないことがわかっていて、このため、解析においては一台の大型車両が測点側の車線を通過することを条件とした。また、車両の走行速度は、橋梁現場の通行条件とビデオの撮影から、40km/hと仮定した。

表-2 車両の諸元<sup>1)</sup>

車両総重量(トン)	18
車両上部の質量(KN-sec <sup>2</sup> /m)	16
車両上部の極慣性(KN-sec <sup>2</sup> -m <sup>2</sup> )	54.2
前輪懸架部バネ(kN/m)	1200
後輪懸架部バネ(kN/m)	4800
前輪懸架部減衰(kN-sec/m)	5.0
後輪懸架部減衰(kN-sec/m)	20
前軸タイヤ部質量(KN-sec <sup>2</sup> /m)	0.4
後軸タイヤ部質量(KN-sec <sup>2</sup> /m)	1.6
前軸タイヤ部バネ(kN/m)	2400
後軸タイヤ部バネ(kN/m)	9600
前軸タイヤ部減衰(kN-sec/m)	6.0
後軸タイヤ部減衰(kN-sec/m)	24.0
前バネから重心までの距離(m)	2.5
後バネから重心までの距離(m)	1.5
1次固有振動数(Hz)	1.887
2次固有振動数(Hz)	2.878
3次固有振動数(Hz)	15.159
4次固有振動数(Hz)	15.243



(a) 路面凹凸サンプル波形



(b) 路面凹凸のパワースペクトル密度関数

図-5 路面凹凸条件

### (3) 路面凹凸

路面凹凸は実測されていないため、正確な現場の路面条件を解析に取り込むことはできない。ここでは、文献 12) に示されている次のパワースペクトル密度関数を路面の凹凸条件として仮定した。なお、ISO 判定基準を参考すれば、式 (4) に与えられる路面状況は良好～普通路面に相当する。

$$S(\Omega) = \begin{cases} 0.004 \times 0.05^{-1.9} & (0 \leq \Omega \leq 0.05) \\ 0.004 \times \Omega^{-1.9} & (\Omega \geq 0.05) \end{cases} \quad (4)$$

ここに、 $\Omega$ は周波数(c/m)、 $S(\Omega)$ は路面のパワースペクトル( $\text{cm}^2/(\text{c/m})$ )である。図-5a は平均値 0 の定常ランダムなガスト過程とみなしてモンテカルロ法により算出した路面凹凸のサンプル波形である。図-5 b から分かるような、サンプル波形のパワースペクトル密度関数は設定条件値とよく一致している。

なお、ジョイント位置の路面段差は、低周波音の実測時期が段差解消の工事を実施する前であるため、5mm とした。

### (4) その他の解析条件

構造の減衰は実測のたわみ振動波形から得た値 (0.5%) を近似に各モードの減衰として適用した。Newmark  $\beta$  法により橋梁一車両振動系の応答を求める際、計算の安定性を図るために、 $\beta$  を 0.25 とした。また、床版局部振動の影響を取り込むために、100 までの振動モードを考慮し、音源とする橋梁の振動応答を求めた。なお、時刻歴計算での時間刻みは 0.00025sec とした。

### 3.4 測点での低周波音圧の比較

低周波音の測定点はジョイント付近 (主桁の外側 0.5m) で (図-2)、マイクの設置位置は地面から 1.2m である。また、走行車両による低周波音のほか、暗低周波音も計測したが、最も大きな暗低周波音は 1/3 オクターブ中心周波数 8.0Hz で 65dB であり、橋梁振動以外の低周波音源はほとんど認められなかった。

低周波音の実測値は大型車両を通過する際の音圧に対して 1/3 オクターブ分析により得た結果を平均したものである。1/3 オクターブ分析は音圧ピーク値の前後でピーク値より 5 dB 程度小さい計測時間内に各周波数バンドの音圧を求めるように分析条件を設定した。

図-6 は車両が橋梁を通過するときの実測値と解析値の比較結果である。図中、横軸は 1/3 オクターブ中心周波数であり、縦軸は dB で表示する音圧レベルである。解析での音圧分析範囲は実測値との整合が難しいため、車両の橋梁通過期間 (約 2sec 間) の橋梁振動応答から、周波数別の音圧分析を行い、測点位置の低周波音圧を算出している。

図-6 の結果に示すように、実測値と解析値は概ね一致していることから、本推定方法は橋梁からの放射音圧を予測するのに有効であると考えられる。しかしながら、一部の周波数範囲で、計算結果と実測値は差異が生じている。特に、

20Hz での解析値は実測値と異なる傾向が見られた。差異の原因究明は今後の課題となるが、床版のモデル化の方法や音波の反射、実測でのデータ分析期間などが必ずしも解析と一致しなかったことが考えられる。

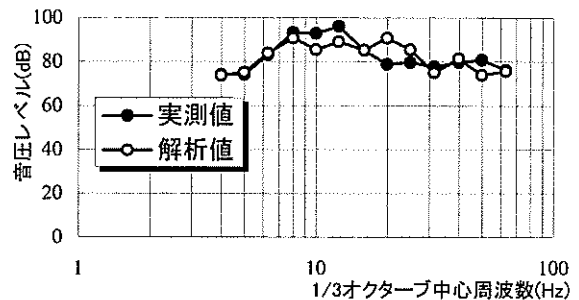


図-6 音圧レベルの解析結果と実測値の比較

### 4. 単純鋼橋から放射される低周波音の発生要因

前述の実測比較結果から、本解析方法は概ね橋梁から放射される低周波音を推定できると考えられるので、単純鋼橋からの低周波音発生要因を考察することにした。

#### 4.1 低周波音放射の卓越振動モード

通常、走行車両による橋梁の振動応答には低次モードの振動成分が支配的に大きく、解析で低次モードを考慮すれば十分な精度の結果を得られると考えられる。しかしながら、図-6 のように、鋼床版を有する単純鋼橋の周辺で計測された低周波音は橋梁の低次固有振動数より高い周波数 12.5Hz でピークを有し、音圧の卓越周波数は橋梁の固有振動数と一致しない。また、その音圧レベルも周波数の増加につれ急激な減少の傾向が見られず、80dB 程度の音圧を持続する。このように、低周波音の挙動は変位や速度などの構造振動応答特性と異なり、高次振動モードも低周波の発生に大きく影響すると思われる。

本橋梁から放射される低周波音発生の主因となる振動モードを究明するために、振動数 30Hz までの振動モードを対象に、各モードの音響パワーレベルを調べた。但し、パワーレベルは速度と線形関係でないため、各モードの合計は構造の音響パワーレベルに等しくないことを付記する。

図-7 に音響パワーレベルの高い各モードの比較結果を示す。図中、パワーレベルがピークとなる周波数でモードの番号を記している。また、参考として 100 次までのモードを考慮したときのパワーレベルも併記している。

当然ながら、結果より、車両が橋梁を通過するとき、一次固有振動モードによる音響パワーが支配的に大きいことがわかる。これに対して、その影響範囲は低い振動数域にとどまる。また、10-30Hz の振動数範囲でも高次モードのパワーレベルは依然高いことが理解される。特に、10Hz 以降の卓越振動モードとみられる 7 と 8 次モードに着目すると、そのモード形状は図-8 に示すような、いずれも床版の局部振動モードである。これは梁部材に比べて、床版の表面積が大きいいため、床版局部振動に起因する音響パ

ワーが大きくなるものである。両モードの振動数は 12.8 と 13.7Hz で、いずれも 1/3 オクターブ中心周波数 12.5Hz の遮断周波数範囲(11.2~14Hz)にある。

これらの結果から、本橋梁から放射される低周波音の音圧が 12.5Hz で卓越するのは、板構造の振動が低周波音に大きく寄与するからであり、数値解析により低周波音を評価するには、床版の振動特性を精度よくモデル化することが重要であるといえる。

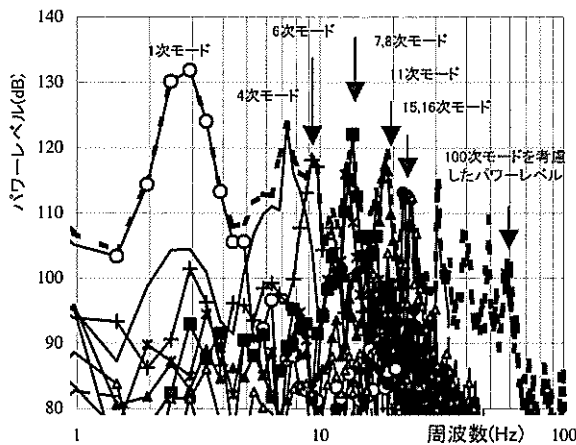


図-7 各モードの音響パワーレベル

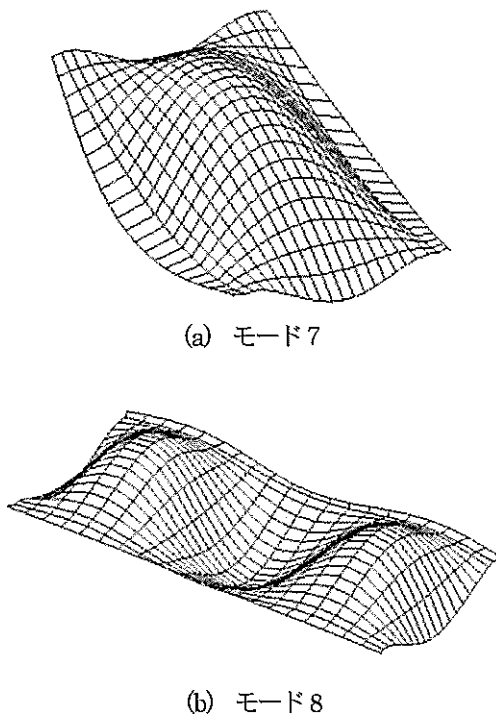


図-8 音響パワーレベルの高いモード形状

#### 4.2 車両通過位置の影響

単純橋から放射される低周波音はジョイントの段差に

よる車輪の衝撃接地力や構造のたわみ振動によるものであるとよく指摘されている。低周波音の周波数分布形と主要な音源の関係を明らかにするために、ここでは車両がジョイントを通過した直後の振動応答と、スパン中央点を通過した直後の振動応答から低周波音を算出して比較を行った。前者は低周波の発生要因がジョイント位置の衝撃力であることに対して、後者はたわみ振動が主な音源であると想定する。ただし、本橋梁のスパン長はわずか 26m であり、走行速度 40km/h の車両は約 2 秒で全橋を通過するため、音圧は 0.5sec 間の振動応答から算出することにした。また、車両がスパン中央点を通過するときの振動応答には、ジョイント衝撃力の影響も含まれている。

図-9 は車両の位置と音圧レベルの関係を示す結果である。その結果より、車両がジョイントを通過するときの音圧レベルは周波数 12.5Hz 前後での値がピーク値となり、それより大きい周波数で急速に低下することが分かる。しかし、車両が橋梁のスパン中央点を通過するときの音圧には 12.5Hz でのピークがみられず、広い周波数範囲でほぼ一定な音圧を維持する。

このような音圧分布の発生原因として、車両がジョイントを通過するとき、床版の縁端に作用する接地力により、図-8 のような床版の局所振動モードが引き起こされ、特定の周波数範囲で大きな音圧が発生したと考えられる。一方、スパン中央点を通過する車両は床版のみならず、両主桁を含めた全体振動モードを卓越し、結果として、低次～高次までの広い周波数範囲で、高いレベルの音圧が発生したと思われる。

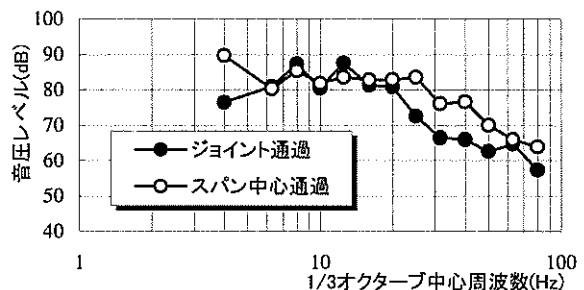
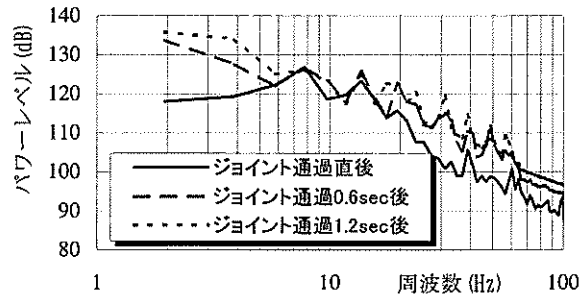


図-9 車両通過位置の影響

図-10 に音響パワーレベルのスペクトルの経時変化を示す。つまり、ジョイントを通過してから 0.0sec、0.6sec、1.2sec 後の振動応答を分析対象にした 0.5sec 間の橋梁振動の音響パワーレベルである。図-9 の測点音圧レベルと同様に、ジョイント通過直後の音響パワーレベルは 8Hz～12.5Hz で大きなパワーとなり、それより低い振動数範囲および高い振動範囲で、パワーレベルがかなり低い。しかし、ジョイント通過 0.6sec 後、1.2sec 後では、低周波数の振動レベルが高くなるのがわかる。



図一10 音響パワーレベルの経時変化

## 5. まとめ

本論文では、走行車両による橋梁構造の振動応答を音源として、点音源の伝搬理論から低周波音圧レベルを推定した。単純鋼橋から計測した実測値と計算値との比較により、本解析で得た低周波音の音圧レベルは、一部範囲で差異が認められたものの、実測値と概ね一致しており、橋梁からの放射音圧を解析によって推定することが可能であることがわかった。

次に、各モードの音響パワーレベルから単純鋼橋の低周波音発生要因を検討した。その結果、鋼床版の局部振動が低周波音発生の重要な要因であることが明らかとなった。このため、数値解析により橋梁から放射される低周波音を推定するには、床版の振動特性を精度よく考慮することが不可欠であると考えられる。

また、車両がジョイントを通過する時の車輪衝撃力に起因する低周波音とスパン中央通過時のたわみ振動に起因するものと比較し、音源と周波数分布の関連性を考察した。その結果、車輪衝撃力による低周波音は床版の局所モードに対応して、特定の周波数域で卓越するのに対して、橋梁たわみ振動に起因する音圧は低次モードに対応した低周波数領域で大きいことが明らかとなった。

今後、板構造の振動特性をより厳密に取り扱える解析モデルを導入し、音の反射を考慮した低周波音の推定方法を開発して、解析精度を改善する予定である。

## 参考文献

- 1) 時田保夫：低周波音の評価について，日本音響学会誌，Vol.41, No.11, pp.806-812, 1985.
- 2) 鋼橋技術研究会防音設計研究部会：鋼橋防音設計のてびき，1991.3.
- 3) 徳永法夫，日野泰雄，西村昂：高架道路における交通振動と苦情要因に関する研究，橋梁と基礎，pp.51-56, 1998.3.
- 4) 村井逸朗：道路事業と低周波音，騒音制御，Vol.23, No.5, pp.319-323, 1999.
- 5) 足立：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，pp.1-62, 1984.11.
- 6) 杉山俊幸，小林俊哉，清水顕誠：鋼橋およびコンクリ

ート橋から放射される低周波音特性の比較と鋼橋の防音対策に関する一考察，構造工学論文集，Vol.45A，pp.671-682, 1999.3.

- 7) 米田昌弘・宮崎雅男・富本朗・鈴木隆久：既設単純合成鋼桁橋の主桁連続化とそれに伴う低周波空気振動の低減効果，構造工学論文集，Vol.45A，pp.659-669, 1999.3.
- 8) 水上浩一：車両走行により道路橋から放射される低周波音の特性に関する研究，山梨大学修士論文，1992.3.
- 9) 岡村美好・深沢泰晴：鋼・硬質ウレタン腹合板における振動・放射音の低減特性，構造工学論文集，Vol.45A，pp.683-691, 1999.3.
- 10) 中野有朋：実践—騒音対策（騒音・低周波・超低周波音），日刊工業新聞社，2000.2.29.
- 11) 橋梁振動研究会：橋梁振動の計測と解析，技報堂出版，1993.10.
- 12) 丸山収・秀嶋桂：走行車両を受ける単純梁の振動制御，構造工学論文集，Vol.43A，pp.703-712, 1997.3.

(2001年9月7日受付)