

実供用荷重下における橋梁交通振動とそれに起因する低周波音

Low Frequency Sound Radiated from a Bridge under in-service Environments

河田直樹*, 川谷充郎**, 金 哲佑***, 高見洋平****

Naoki Kawada, Mitsuo Kawatani, Chul-Woo Kim, Yohei Takami

*博(工), 株式会社エース 基盤整備本部 (〒600-8133 京都市下京区七条通加茂川筋西入稲荷町 458)

**工博, 神戸大学大学院 工学研究科 教授 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

***博(工), 京都大学大学院 工学研究科 教授 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

****神戸大学大学院 工学研究科 学生 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

This paper discusses about a field experiment focusing on the low frequency sound radiated from a viaduct. Analytical results taken from a traffic-induced vibration analysis and boundary element method are also discussed. Observations demonstrate that analytical sound pressure levels in frequency domain show similar tendency with those of experimental ones, even though analytical results do not perfectly match with experimental ones. The propagation of the sound pressure taken from the analysis reveals that the distribution of the sound pressure level at lower frequency below 10Hz is greatly affected by the vibration of bridge's entirely motion. On the other hand, the sound pressure level over 10Hz is affected by vibrations of the bridge decks.

Key Words: traffic-induced vibration of bridge, Low frequency sound, Boundary element method, in-service environments

キーワード: 橋梁交通振動, 低周波音, 境界要素法, 供用荷重

1. はじめに

橋梁の交通振動に伴い放射される低周波音は、居住地域に近接して高架橋が建設されるケースの多い我が国では、環境問題の一つとして高い関心が寄せられている。

一般に道路環境における騒音問題として、車両のエンジン音やタイヤ転動音が一般的であるが、低周波音は橋梁上を車両が通過する際に橋梁上部工から空気振動として放射され、周波数が小さいその特性から様々な環境問題を引き起こす。例えば、建具等が振動するなどの物的影響や、振動感や頭痛、吐き気等がもたらされる心理的・生理的影響等がある^{1~3)}。

また、低周波音は反射面や透過時の吸音による低減効果は低く、また波長が長いことから容易に回折する。そのことから、一般騒音に対して用いられる遮音壁等の伝搬経路上対策に対して、発生源対策として橋梁の振動を低減させる対策が採用されることが多い⁴⁾。しかしながら、橋梁から放射される低周波音はまだ未解明な部分が多く、橋梁交通振動そのものが橋種やジョイントの構造、路面凹凸、車両速度や重量により一様ではないため、周

辺の音場を簡易的に推定することが難しく、それに伴い対策が遅れているのが実情である。周辺住民および道路管理者も効果的な騒音低減対策の確立を望んでいるが、現段階では各事例毎に、個々に測定・解析・対策を繰り返す、その事例の積み重ねから判断していくしかないのが現状である。

本研究では、そのような背景から、実供用下での交通振動と放射音の実態を把握することを目的に、建設後間もない7径間連続ラーメン箱桁橋を対象に、現地計測および低周波音解析を実施した。低周波音解析は事前に交通振動解析を実施し、その結果を元に放射する音圧を解析する。そのため、現地計測にあたっては、低周波音の他、橋梁の振動状態の確認の必要から、橋梁の加速度応答についても計測する。

なお、対象とする橋梁近傍では実際に騒音問題が顕在化はしていないが、後述するように幅広構造の橋梁でありながら1本柱形式で支持されている橋梁形式であることや、剛性の低い鋼床版を採用しており、張出し長の長い床版の局所的な振動の影響、またそれらの低周波音に及ぼす影響を確認するため本研究に至った。

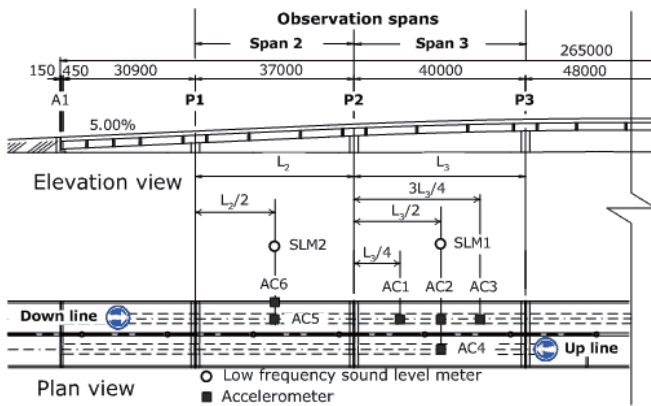
表一 計測地点一覧表

加速度応答計測位置	
AC1	P2 より $L_3/4$ 地点 (下り線)
AC2	第3 径間中央 (下り線)
AC3	P2 より $3L_3/4$ 地点 (下り線)
AC4	第3 径間中央 (上り線)
AC5	第2 径間中央 (下り線)
AC6	第2 径間中央張り出し床版部 (下り線)
低周波音計測地点	
SLM1	第3 径間 下り線側官民境界近傍
SLM2	第2 径間 下り線側官民境界近傍

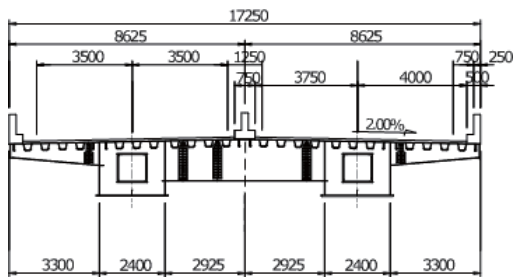
AC : 鉛直加速度

SLM : 低周波音音圧レベル

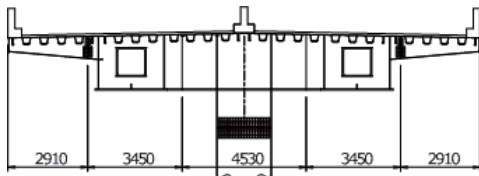
L : 支間長



(a) 側面図・平面図・現地計測地点



(b) 上部工標準断面図



(c) 橋脚位置上部工断面図

図一 対象橋梁

2. 騒音・振動計測結果

2-1. 対象橋梁

本研究において対象とする橋梁の一般図を図一1 に示す。約5%の縦断勾配を有し、P3-P4間で道路を跨ぐ、橋長265.0mの7径間連続鋼床版箱桁橋である。

上下線各々2車線を有する幅員17.25mの幅広構造を2箱桁で支持し、床版の張り出し長は3mを超える。また、上部工と下部工(鋼製橋脚)とは剛結された、7径間連続のラーメン形式が採用されている。

2-2. 現地計測

本研究では、対象橋梁の振動特性や放射音性状を確認するため、橋梁の加速度応答および低周波音音圧レベル



図二 一般車両走行状況

を現地計測した。なお、測定は一般車両走行下の10分間計測を行った。計測ポイントは、加速度応答として図一1(a)におけるAC-1~6の合計6点、低周波音音圧レベルはSLM1およびSLM2の2点計測した。なお、低周波音は橋梁から10m離れた官民境界地点近傍で、地上1.2mの音圧レベルを計測している。

ここで、計測時に通過した車両の重量や詳しい車間距離などの条件は不明であるが、測定中は図二に示すように、車両走行状況をビデオカメラにて記録し、車両走行位置や車両タイプなど、後述する解析における判断材料とした。

本研究では、橋梁の特徴である幅広構造でありながら1本柱のラーメン構造であることと、橋梁の振動やそれに伴う低周波音の特徴を明らかにすることを目的としており、着目する音圧レベルは、1/3オクターブバンド中心周波数における3.15Hz, 4.0Hz, 5.0Hz, 12.5Hz, 16Hz, 25.0Hz, 40.0Hzとする。これは、後述する橋梁固有値解析結果において確認された、3Hz~5Hz近傍の橋梁の

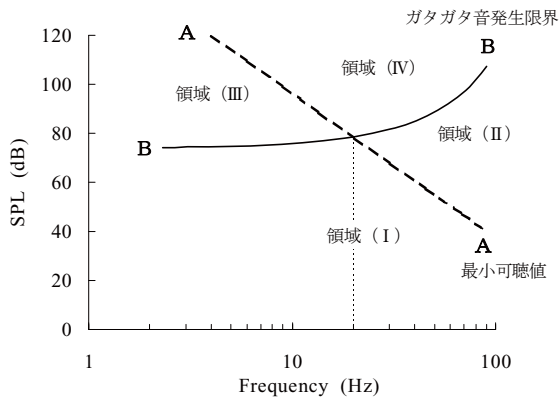


図-3 低周波音の分類^{2),3),5)}

表-2 低周波音の領域説明^{2),3)}

領域Ⅰ	戸障子、窓ガラス等がガタガタ鳴ることもなく、どんな低周波も感知されない。
領域Ⅱ	戸障子、窓ガラス等がガタガタ鳴ることはないが、低周波が何らかのかたちで感知され、生理的な苦痛を感じるが多い。
領域Ⅲ	低周波音は、それ自体は直接的には感知されないことが多いが、戸障子、窓ガラス等などが鳴るとい物理的な現象によって間接的に感知される。
領域Ⅳ	戸障子、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ため音として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。

曲げやねじれ、また 11Hz～25Hz の張り出し床版の局所的な曲げに関する固有振動数に相当する。なお、計測結果の評価は大型車両が通過する間の音圧レベルに着目するが、1Hz や 2Hz といった低い周波数の音圧レベルは車両通過に伴う風圧の影響が考えられるため本研究では議論しない。

低周波音の環境評価基準値については明確には確立されていないが、一般にがたつき音発生限界および最小可聴値との比較でその影響を把握することができる。図-3 にそれぞれの閾値および同図中に示される領域Ⅰ～Ⅳの内容を表-2 に示す。本研究では低周波音測定結果や解析結果音圧レベルにはこの閾値をあわせて示す。

2-3. 現地計測結果

第3径間の低周波音測定結果(SLM1)を図-4に示す。着目する周波数毎に音圧レベルが大きい上位10ステップを抽出している。3.15Hz～5.00Hzではがたつき音発生限界値を超過し、領域(Ⅲ)に達する音圧レベルが観測されている。また同様に、12.5Hzについても、図-4(a), (d), (e), (f), (g)では領域(Ⅲ)に達している。さらに、25Hz近傍に着目すると、図-4(c)～(g)では領域(Ⅳ)まで達しており、がたつき音発生限界値および最小可聴値を超過している。卓越するこの12.5Hz, 25Hzの振動数は、車両のばね下の固有振動数、張り出し床版の固有振動数

表-3 各時間の平均音圧レベル

Observation frequency	SLM1 (Span 3)	SLM2 (Span 2)
3.15 Hz	80.78 dB	76.61 dB
4.00 Hz	85.40 dB	83.14 dB
5.00 Hz	81.22 dB	86.61 dB
12.5 Hz	82.50 dB	83.68 dB
16.0 Hz	80.22 dB	79.49 dB
25.0 Hz	82.04 dB	80.32 dB
40.0 Hz	77.14 dB	77.64 dB

にほぼ一致しており、その影響が現れたものと推測される。以上のように、この第3径間では4Hz近傍や12.5Hz, 25Hzでの音圧レベルが卓越する傾向となった。

同様に、第2径間の測定結果(SLM2)を図-5に示す。第3径間の図-4と同様、音圧レベルが大きい上位10ステップを抽出した結果である。全体に第3径間部と同様の傾向の結果が得られているが、10Hz以下の低い周波数の音圧レベルに違いがみられる。第3径間では4Hzが卓越するが、第2径間では5Hzの音圧レベルが高くなる。4Hzおよび5Hzはそれぞれ第3および第2径間のねじれ固有振動数にほぼ一致していることが関係しているものと推測される。

各支間の音圧レベルの特性を明らかにするため、表-3に、各1/3オクターブバンド毎の上位5ステップの平均音圧レベルを示す。この表からも、第3径間では3.15Hzおよび4.0Hzの音圧レベルが第2径間の値に比較し大きく観測され、5.00Hzの音圧レベルに関しては第2径間の場合の方が大きくなる傾向にあることが分かる。

以上の結果から、観測された低周波音は、近接する橋梁支間部の振動性状の影響を大きく受けることが確認できる。

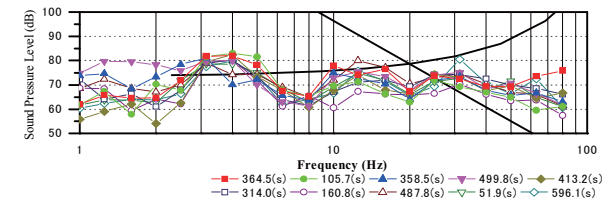
3. 橋梁交通振動解析

3-1. 解析条件

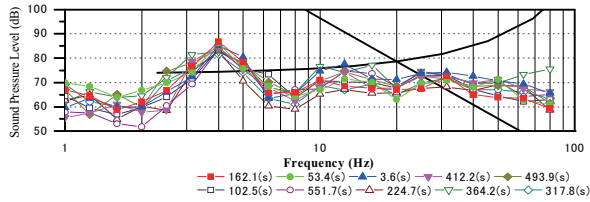
本研究では、前述した実測結果に加え橋梁から放射する低周波音を解析により再現し、その妥当性を確認すると共にその放射音の傾向を明らかにすることとした。

まず、放射音の発生要因となる橋梁の交通振動は、橋梁と自動車の動的特性および走行速度、路面凹凸など影響を大きく受ける。筆者らはすでに、橋梁上を車両が通過する際の応答を、車両との連成振動解析により再現し、得られる結果は現地計測結果とも良く一致することを確認している^{6~8)}。本研究においても放射音発生要因である交通振動を連成振動解析により求めることとし、前述した実測結果との比較のため、可能な限り実交通状態を再現した振動解析を行うこととした。

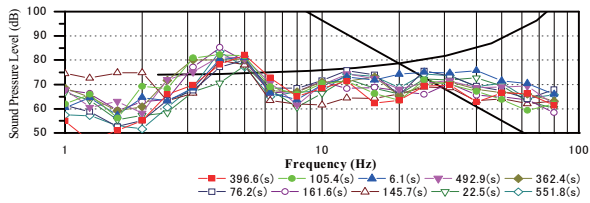
なお、交通振動解析における橋梁モデルは、1節点6



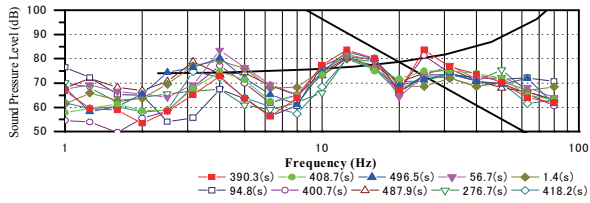
(a)



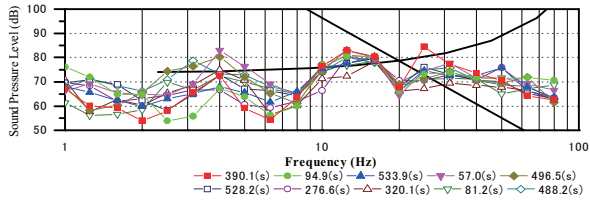
(b)



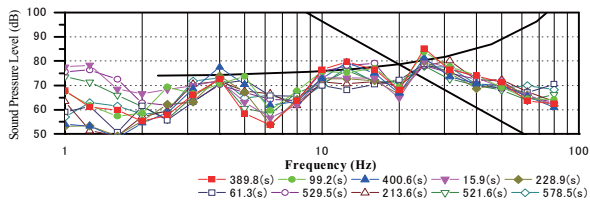
(c)



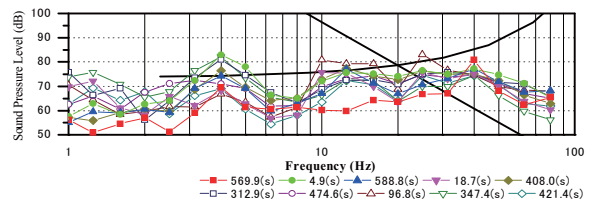
(d)



(e)

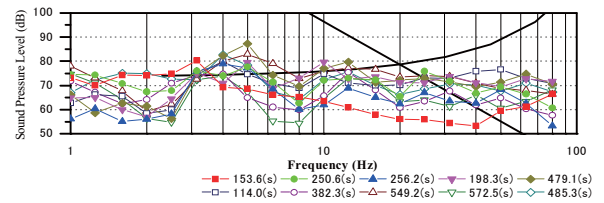


(f)

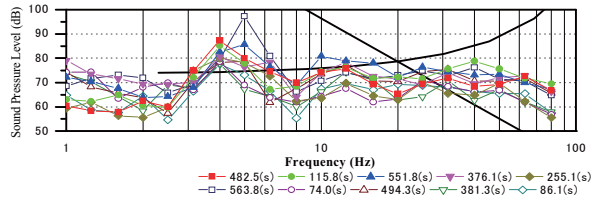


(g)

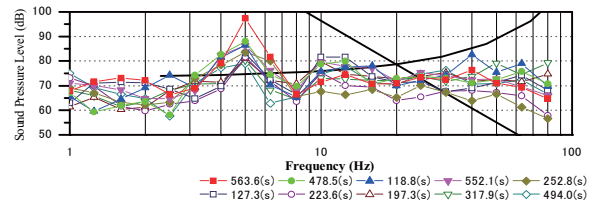
図-4 実測音圧レベル (SLM1 [第3支間])
 (a) 3.15Hz (b) 4Hz (c) 5Hz (d) 12.5 Hz (e) 16Hz (f) 25Hz (g) 40Hz



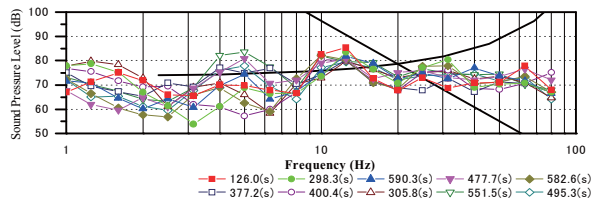
(a)



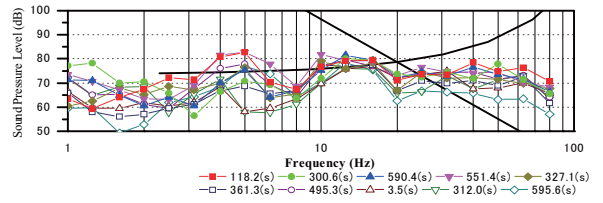
(b)



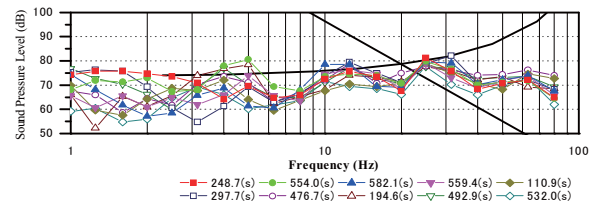
(c)



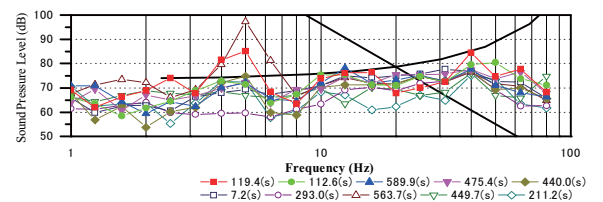
(d)



(e)



(f)



(g)

図-5 実測音圧レベル (SLM2 [第2支間])
 (a) 3.15Hz (b) 4Hz (c) 5Hz (d) 12.5 Hz (e) 16Hz (f) 25Hz (g) 40Hz

自由度のはり要素を用いた有限要素モデルとする。また、1本柱ラーメン橋脚式橋梁であることから、橋梁曲げ応答に関係する橋脚や基礎ばねについてもモデル化している。この橋梁の固有値解析結果を図-6に示す。4次モード(2.648Hz)および8次モード(3.574Hz)はそれぞれ、橋梁上部工の曲げ1次、ねじれ1次に該当し、また、49次モード(12.52Hz)では、張り出し床版の曲げモードが現れる。本解析の用いる走行車両は、実際の走行車両が20tf(196kN)トラックと想定し、図-7に示す8自由度系の三次元車両にモデル化する。車両諸元を表-4に示す。走行条件は、実測結果との比較のため、現地走行車両を想定した表-5に示す条件とする。また、考慮する路面凹凸については、図-8に示すパワースペクトル密度 $S(\Omega)$ からモンテカルロシミュレーションにより作成した路面データを考慮する。

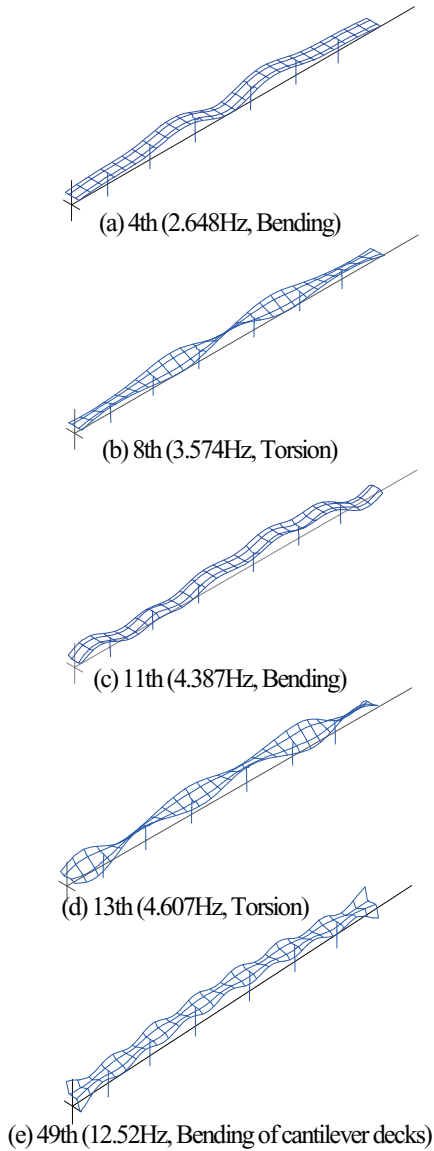


図-6 固有値解析結果

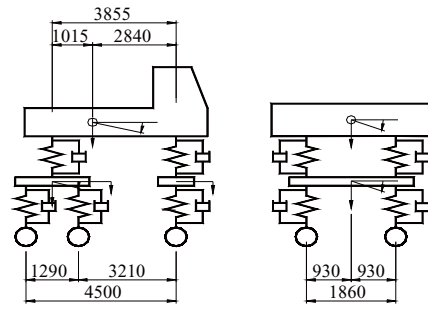


図-7 車両モデル

表-4 走行車両の動的特性

Total weight		196.0kN
Axle weight	Front	49.0kN
	Rear	147.0kN
Logarithmic decrement	Front	0.66
	Rear	0.33
Natural frequency (bounce motion)	Front	1.9Hz
	Rear	3.2Hz

表-5 車両の走行条件

Time	下り線		上り線	
	追い越し車線	走行車線	走行車線	追い越し車線
157.1 s				1 st truck enters
159.1 s			2 nd truck enters	1 st truck leaves
160.1 s				3 rd truck enters
161.1 s			2 nd truck leaves	
162.1 s				3 rd truck leaves

空白欄は走行車両なしを示す

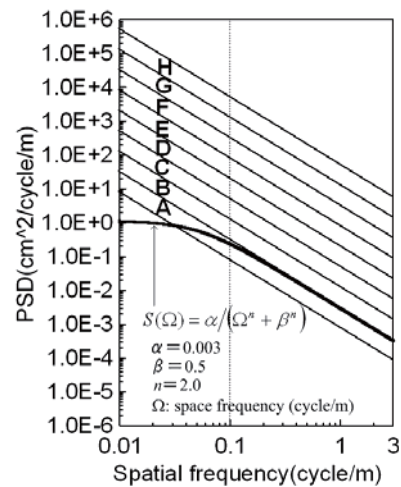
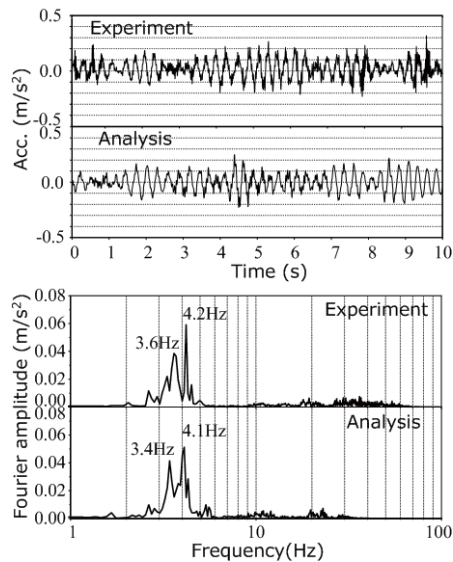
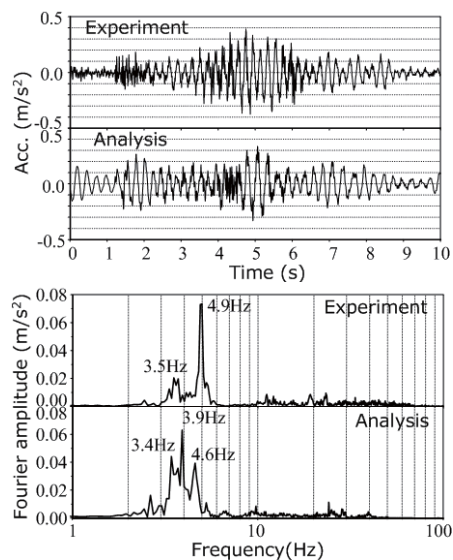


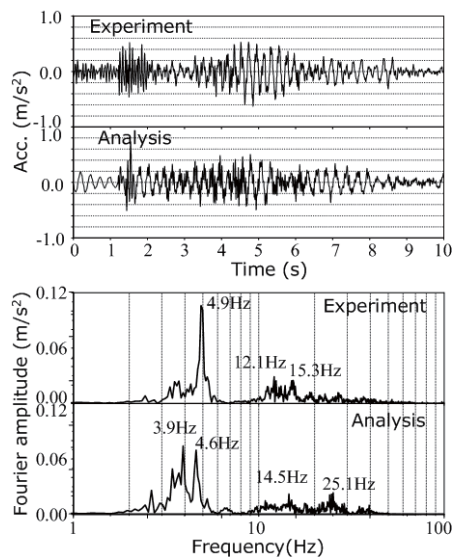
図-8 路面凹凸スペクトル



(1) 測点：AC2（第3径間中央主桁）



(2) 測点：AC5（第2径間中央主桁）



(3) 測点：AC6（第2径間張出床版）

図-9 橋梁加速度応答

3-2. 解析結果

計測された供用中の走行荷重による橋梁の加速度応答と、表-5 に示した同様の交通状況を想定した交通振動解析によって得られる加速度応答を、フーリエスペクトルとともに図-9 に示す。走行車両や路面凹凸等想定した解析ではあるが、いずれの測点においても実測結果を比較的良好に再現できており、スペクトルをみても卓越振動数も良く一致している。実測された低周波音の傾向と同じく、第3径間では4Hz近傍が卓越し、第2径間では5Hz近傍が大きくなる。さらに、張り出し床版の加速度応答(AC6)では10Hz以上の振動数領域でも実測結果と同様の傾向を示しており、橋梁解析モデルや走行条件の妥当性が確認できる。

4. 低周波音解析

4-1. 解析条件

通常音場波動解析で用いられている数値解析手法は、差分法や有限要素法、境界要素法^{9,10)}などがあり、すでに筆者らは境界要素法を用いて橋梁から放射される放射音の理論解析を試みている^{11~13)}。この境界要素法は、対象とする領域の問題から導かれる境界に関する積分方程式を導き、この境界積分方程式を有限個の境界の要素に関して離散的に数値解析を行う手法である。すなわち、対象問題が境界のみの方程式となるため、差分法や有限要素法的全領域法に比較し解くべき未知数を少なくでき、無限領域を扱う外部問題では、無限遠方への波動伝播問題の処理が容易といえる。対象とする領域が橋梁周辺全域に及ぶ本研究においても、以上の利点を有する境界要素法を用いて解析することとする。

解析に用いる橋梁の境界要素モデルを図-10 に示す。橋梁全体をモデル化することが望ましいが、前述したように最も近接する径間の影響を大きく受けることが分かっているため、ここでは、第3径間からの放射音のみに着目することとした。なお、交通振動解析では桁ははり要素とし箱桁断面として考慮していないが、騒音解析においては桁下空間の音場特性が箱桁によって影響される可能性があるため、腹板、下フランジもモデル化している。ただし、腹板からの面外方向の放射音については扱わず、反射面として扱う。また、地盤面での放射音の反射については鏡像法¹⁴⁾を用い、音は地盤面で全反射すると考える。

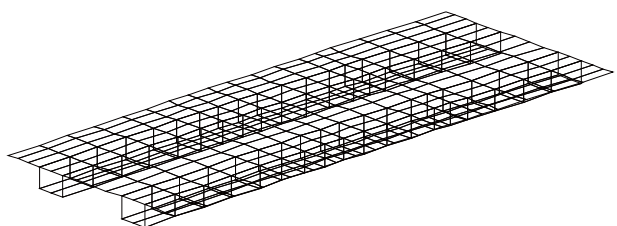


図-10 低周波音解析における橋梁モデル

4-2. 解析結果

第3 径間および第2 径間の支間中央低周波音音圧レベルを実測結果と比較して図-11 に示す。

境界要素法を用いた低周波音解析では、音場・音圧を左右する境界としては橋梁だけを考慮しており、音は地盤面で全反射としている。また、橋梁解析モデルについても複雑な構造は再現しておらず、単純化しているなど、現地状況との相違はあるが、得られた音圧レベルは比較的実測結果と近い傾向を示している。SLM2 における3～5Hz 間では解析結果が実測結果より 20dB 程度大きく得られているが、現在のところ明確な理由は不明である。

次に、橋梁周辺の音圧レベル分布を図-12 および図-13 に示す。図-12 は第3 支間中央断面、図-13 は SLM1 位置での側面音圧レベル分布を示している。このように橋梁振動解析および低周波音解析を行うことにより実測を行うことなく任意の地点での音圧レベルを求めることができ、橋梁の放射音特性の事前確認や、騒音対策

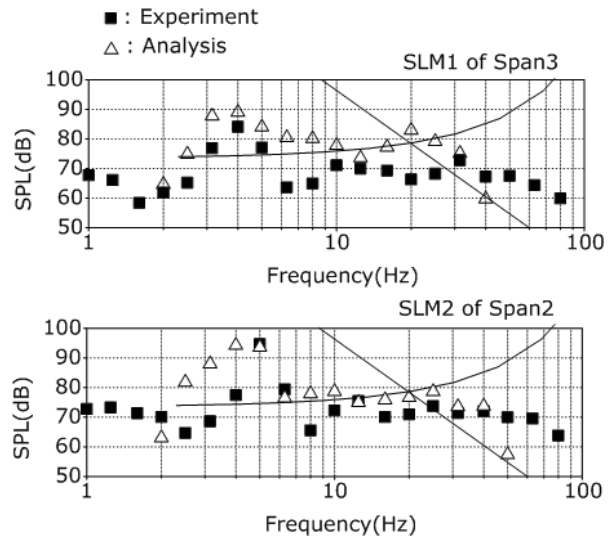


図-11 低周波音音圧レベル

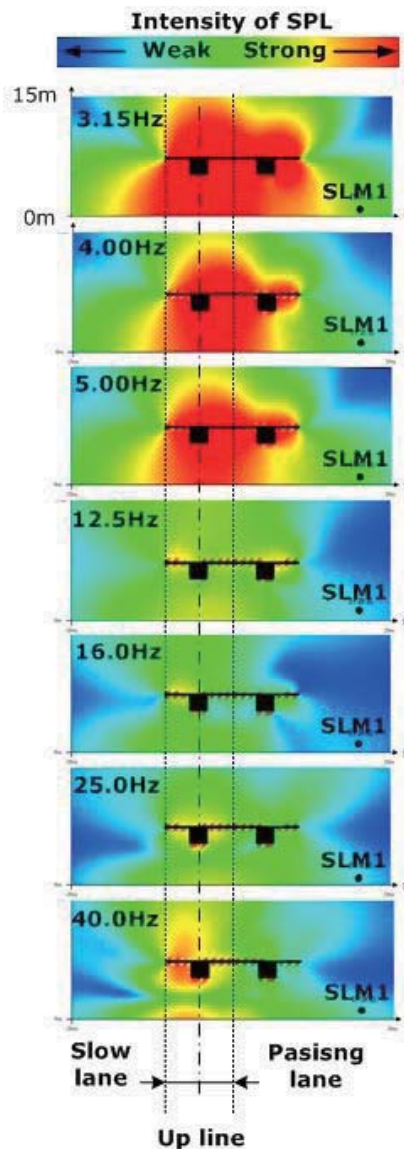


図-12 低周波音音圧レベル分布（横断方向断面）

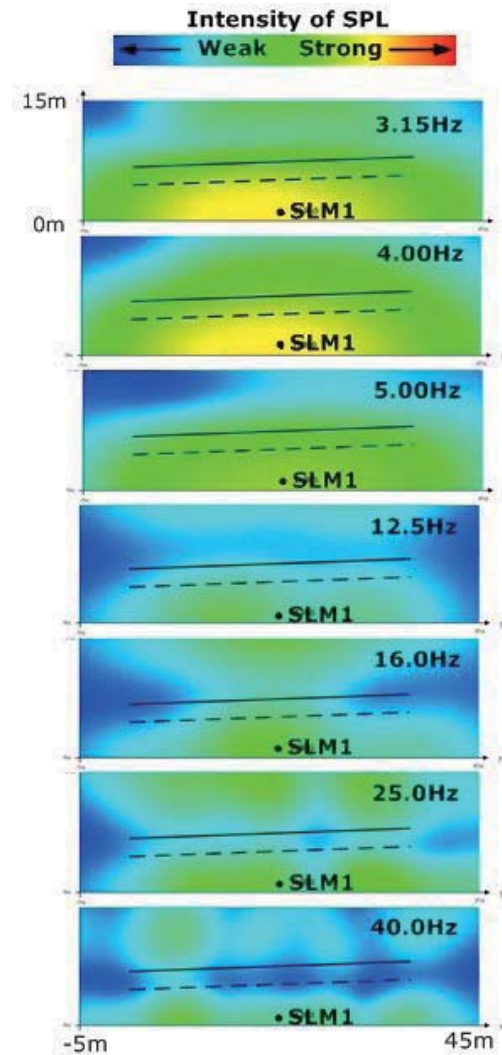


図-13 低周波音音圧レベル分布（橋軸方向断面）

効果の確認，また橋梁周辺の環境影響評価が机上で可能になる．本橋の放射音場の特徴は，図-12 より，3.15Hz や 4.00Hz，5.00Hz は橋梁のたわみおよびねじれ振動の影響により音圧レベルの高い範囲が大きく広がる．また，12.5Hz や 40Hz の放射音は張り出し床版部より広がる事が確認でき，全体に車両走行側である上り線側の音圧レベルが高くなる事がわかる．

一方，橋軸方向への音圧レベル分布を示した図-13 から，桁のたわみ，ねじれに基づく低い周波数の音の広がりは支間中央近傍を中心に広がることが分かる．ところが，高い周波数では支点部付近の音圧レベルが高くなる傾向にあることが分かり，40Hz ではその傾向が強い．支点部付近の路面凹凸性状が悪くなれば，さらにこのような周波数の音圧レベルが高くなる事が予想される．

5. 結論

橋梁の交通振動により放射される低周波音の現地計測および解析により，特にがたつき発生要因となるような数 Hz の低い周波数の低周波音は，近接する上部工のたわみやねじれ振動の影響を大きく受ける事が確認された．また，床版張り出し長が約 3m と比較的長い本橋の場合，車両ばね下振動の影響を受けやすく，12.5Hz 近傍の音圧レベルが高くなる傾向になることを確認した．

さらに，周辺の音圧レベル分布を確認した結果，今回測定した支間中央での低周波音は，3～5Hz といった桁の低次振動に伴う放射音が大きくなる傾向にあり，可聴域の音については支点部近傍で高くなる傾向となることを確認した．つまり，100Hz 以下の低周波音の中でも対象とする周波数によって音圧レベルが高くなる領域が異なることから，実測および評価にあたっては十分な注意が必要といえる．

本研究では上記のように，これからの環境負荷の少ない橋梁の建設や改善に向け，低周波音の解析に関する基礎的な研究を行ったものであり，今後橋梁の床版や腹板などの局所的な振動，また対策工法なども含めた研究への進展が望まれる．

参考文献

- 1) 環境省環境管理局大気生活環境室：低周波音防止対策事例集，2002.3.
- 2) 環境庁：昭和 52 年度低周波空気振動等実態調査（低周波空気振動の家屋等に及ぼす影響の研究）報告書，昭和 53 年 3 月．
- 3) 中村俊一，時田保夫，織田 厚：低周波音に対する感覚と評価に関する基礎研究，昭和 55 年度文部省科学研究費「環境科学」特別研究，1979.
- 4) 土木学会鋼構造委員会 鋼橋の振動・騒音に関する環境負荷低減工法の評価検討小委員会：鋼橋の振動・騒音問題とその対策事例，2008.11.
- 5) 環境省環境管理局大気生活環境室：低周波音問題対応の手引書，2004.6.
- 6) 川谷充郎，山田靖則，嶽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.79-86，1998.1.
- 7) 川谷充郎，山田靖則，金 哲佑，川木秀昭：道路橋交通振動の三次元解析による床版応答の評価，構造工学論文集，Vol.44A，pp.827-834，1998.3.
- 8) 川谷充郎，安松敏雄，川木秀昭，織田敏章，下村公一朗：2 主桁橋の走行荷重による三次元動的応答解析，鋼構造年次論文報告集，Vol.7，pp.533-540，1999.11.
- 9) 小林昭一：波動解析と境界要素法，京都大学学術出版会，2000.2.
- 10) R.D.Cikawski, C.A.Brebbia : Boundary Element Methods in Acoustics, 1991.
- 11) 河田直樹，川谷充郎：境界要素法による道路交通振動に起因する低周波音の理論解析，土木学会論文集，Vol.62 No.3，pp.702-712，2006.9.
- 12) Mitsuo Kawatani, Chul W. Kim, Naoki Kawada and Shohei Koga : Assessment of Traffic induced Low Frequency Noise Radiated from Steer Girder Bridge, Steel Structures, 8, pp.305-314, 2008.
- 13) 川谷充郎，河田直樹，上野晃伸，古賀翔平：境界要素法による鋼床版連続桁橋からの低周波音理論解析，土木学会第 61 回年次学術講演会講演概要集，I-511，2006.9.
- 14) 前川純一，森本政之，阪上公博：建築・環境音響学 第 2 版，pp.163，共立出版，1990.