

道路橋交通振動に起因する低周波音に関する解析的評価

神戸大学大学院 フェロー 川谷 充郎
神戸大学大学院 学生員 ○高見 洋平

京都大学大学院 正会員 金 哲佑
神戸大学大学院 学生員 西谷 貫慈

1. はじめに 橋梁周辺における低周波音を解析的に評価するためには橋梁動的応答を正確に把握する必要がある、3次元走行車両-橋梁連成振動方程式に基づく橋梁動的応答の解析手法¹⁾が川谷らによって確立されている。そして河田ら²⁾は橋梁振動に起因する低周波音の音場解析に関する研究において、波動論に基づく境界要素法を用いた解析によって実際の床版振動による低周波音放射に近い現象を再現し、高精度で音場特性を再現できることを確認している。さらに、既往の研究では鋼床版箱桁道路橋の橋梁加速度応答・低周波音圧レベル計測値を用いて橋梁応答と低周波音の相関関係に関して検討している³⁻⁴⁾。本研究では橋梁加速度応答・低周波音計測と同時に撮影した車両走行の映像をもとに、実際に近い交通条件のもとで橋梁動的応答・低周波音を再現し解析的に評価する。

2. 解析概要 橋梁動的応答はモード法により定式化した車両-橋梁連成系の振動方程式を Newmark's β 法により逐次積分して求める。橋梁交通振動による低周波音は、橋梁の速度応答を用いて境界要素法により算出する。橋梁の速度応答は橋梁床版面での粒子速度と等しいとする境界条件の下で音場解析を行い、地盤面での音の反射は鏡像法による全反射として考慮する。

2. 1. 対象橋梁 対象橋梁一般図を Fig.1 に、加速度・低周波音計測点の詳細を Table 1 に示す。支間長は 31.5+ 37.0+ 40.0+ 48.0+ 40.0+ 37.0+ 31.5(m) の全長 265.0m、幅員 17.25m の 7 径間連続鋼床版箱桁ラーメン橋であり、第 4 径間中央に関して対称である。

2. 2. 解析モデル 交通振動解析において、橋梁は 1 節点 6 自由度の梁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、橋梁曲げ応答に係る橋脚や基礎ばねについてもモデル化している。車両は 3 次元の 8 自由度系としてモデル化している。次に低周波音解析に関して、上下フランジ面の応答値が等しいと仮定し、箱桁断面を考慮して音場解析を行う。低周波音解析における橋梁モデルを Fig. 2 に示す。音の干渉や音圧レベル分布を正確に表現するには、点音源をその波長の 1/5~1/6 おきに配置させる必要がある²⁾ためメッシュ間隔を約 1m とし、文献 3) の場合よりも細分化した境界要素モデルとしている。路面凹凸モデルはパワースペクトル密度 $S_{z_0}(\Omega) = \alpha / (\Omega^n + \beta^n)$ に $\alpha = 0.001(\text{cm}^2/(\text{m}/\text{c}))$ 、 $\beta = 0.05(\text{c}/\text{m})$ 、 $n = 2.00$ を使用し、モンテカルロシミュレーションにより路面データを作成する。

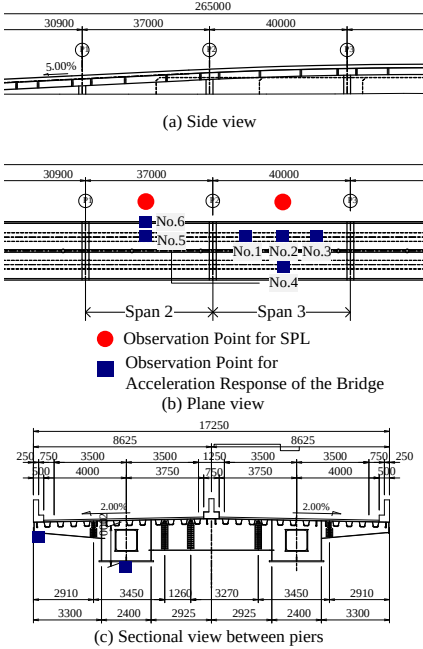


Fig. 1 General view of the bridge

Table 1 Measurement point

加速度応答計測点	
NO.2	第3径間下り車線主桁部支間中央点
NO.5	第2径間下り車線主桁部支間中央点
NO.6	第2径間下り車線張出部支間中央点
低周波音圧レベル計測点	
Span3	第3径間下り車線支間中央位置官民境界
Span2	第2径間下り車線支間中央位置官民境界

Table 2 Vehicles running condition

Case 1 (Span 3)				
下り車線		上り車線		
Time(sec)	走行車線	追越車線	追越車線	走行車線
-0.9				1台目進入
1.1				1台目退出
1.5				2台目進入
2.8				3台目進入
3.3				2台目退出
4.8				3台目退出
Case 2 (Span 2)				
下り車線		上り車線		
Time(sec)	走行車線	追越車線	追越車線	走行車線
-7.34				1台目進入
-5.54				1台目退出
-2.34				2台目進入
-0.64				2台目退出
0.76	3台目進入			
3.06	3台目退出			

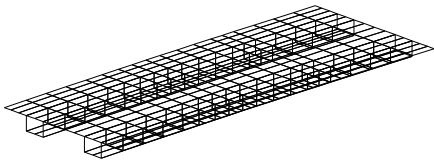


Fig. 2 BEM model of the bridge

キーワード：低周波音，交通振動，車両-橋梁連成振動，Newmark's β 法，境界要素法

連絡先：〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1 神戸大学大学院工学研究科市民工学専攻 Phone：078-803-6383

3. 解析結果 着目径間および車両走行条件を Table 2 に示す. ここで, 交通振動解析における路面凹凸サンプルによる橋梁動的応答のばらつきを考慮し, 50 個のサンプルそれぞれに対して車両-橋梁連成振動解析を行う. そして各解析で得られる橋梁速度応答をもとに算出される低周波音圧レベルの平均値 (mean) と標準偏差 (σ) を用いて低周波音を評価する. 低周波音の評価は平均的な目安として Fig. 3 に示す物理的影響閾値と最小可聴値を表す曲線を用いる.

3. 1. Case 1 (Span 3) Case 1 における橋梁動的応答の実測値と解析結果の一例, 低周波音圧レベルの実測値と解析結果 50 個の平均値と標準偏差を Fig. 4(1) に示す. 実測値と解析値の音圧レベルを比較すると, 文献 3) で確認されていた 20Hz から 40Hz における解析値の過大評価が小さくなっているのが確認できる. また, 橋梁動的応答の R. M. S. 値の平均値は実測結果よりも大きな値を示しており, 2Hz から 6.3Hz の間の周波数帯で解析値の過大評価が見られるものの, とともに 3.15Hz・4Hz 近傍でピーク値をとっており, 音圧レベルの卓越傾向が一致していることが分かる. 過大評価の一因として地盤面における全反射が挙げられるが, この点に関しては今後も検討が必要である.

3. 2. Case 2 (Span 2) Case 1 と同様に Case 2 における実測値および解析値を Fig. 4(2) に示す. 5Hz の音圧レベルは第 3 径間よりも第 2 径間で大きくなるのが実測値に関する検討³⁾より分かっており, 実測値の音圧レベルは, 5Hz で卓越しているのが確認できる. それに対し, 解析においては 5Hz における音圧レベルの卓越が表せていない. また, 橋梁加速度応答の R. M. S. 値では解析結果の値の方が大きく, 2Hz から 4Hz の間で過大評価が見られる. Case 1 に比べて, 3Hz の音圧レベルが低減してかつ, 5Hz の音圧レベルが大きくなっていることから, 解析において第 2 径間の特徴が得られていると考えられる. また, Case 2 においても 20Hz から 40Hz の解析値の過大評価が小さくなっており, 橋梁の境界要素モデルのメッシュ間隔を細分化したことの効果が確認できる.

4. まとめ 本研究では路面凹凸変化による橋梁動的応答のばらつきを考慮し, 同一走行条件で 50 パターンの路面凹凸を準備し, それぞれ低周波音解析までの一連の解析を行ったうえで平均値を用いた低周波音の評価を行った. 2 ケースの実測・解析はともに 2.5Hz から 5Hz の間で卓越し, 物理的影響閾値を越すという大局的な傾向は一致していることがわかる. 20Hz から 40Hz の過大評価は改善されたものの, 2.5Hz から 5Hz の間における過大評価や径間ごとの卓越の特徴に関する解析的再現に関しては今後も検討が必要である.

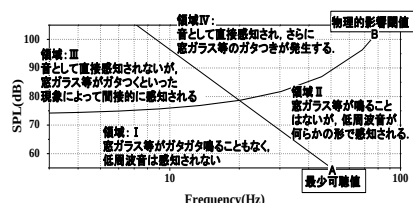
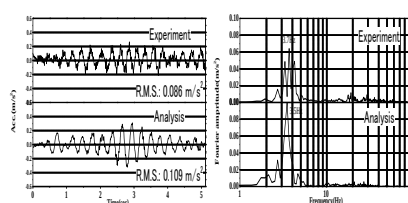
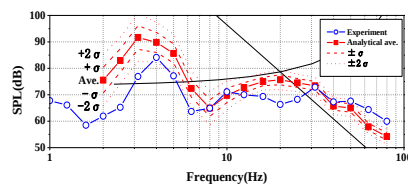


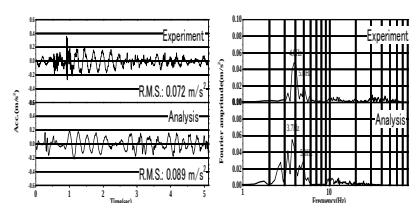
Fig.3 Classification of low frequency sound



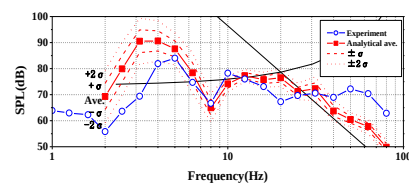
(a) Acc. Response and Fourier Amplitude of Girder



(b) Sound Pressure Level



(a) Acc. Response and Fourier Amplitude of Girder



(b) Sound Pressure Level

Fig.4(1) Case 1

Fig.4(2) Case 2

参考文献

- 1) Chul-Woo Kim, Mitsuo Kawatani, Won-Sup Hwang: Reduction of traffic-induced vibration of two-girder steel bridge seated on electrometric bearings, Engineering Structure, Vol.26, pp.2185-2195, 2004.
- 2) 河田直樹, 川谷充郎: 境界要素法による道路橋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 A(J-STAGE), Vol. 62, No. 3, pp.702-712, 2006.9.
- 3) 川谷充郎, 金哲佑, 大坪祐介, 西谷貫慈: 道路橋交通振動に起因する低周波音現地計測と解析, 土木学会第 64 回年次学術講演会講演概要集, I-290, 2009.9.
- 4) M. Kawatani, C.W. Kim and Nishitani: Field Experiment to Assess Traffic-Induced Low Frequency Sound Radiated from a Steel Box Girder Bridge, Advances in Interaction and Multiscale Mechanics (AIMM'10), pp.573-583, 2010.5.