

文章编号: 1005-0523(2017)03-0007-07

交通荷载作用下钢箱梁振动声场分布研究

程海根, 陈海华

(华东交通大学土木建筑学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 交通荷载引起的桥梁振动辐射低频噪声严重危害居民的身体健康, 研究箱梁噪声分布对评价及降低环境噪声污染具有重要意义。结合车桥耦合振动和声传播理论, 通过建立桥梁振动辐射有限元-边界元的求解体系, 以 32 m 等截面钢箱梁桥作为实体模型, 对交通荷载作用下钢箱梁振动产生的瞬态噪声声场特性进行了数值模拟, 得出瞬态噪声声场特性。分析结果表明, 顶板的振动辐射噪声大于梁体的其它结构。随着离梁体距离增加, 声压变小, 噪声衰减幅度也会变小。在钢箱梁内添加吸声材料后, 降噪效果不大。

关键词: 钢箱梁桥; 振动响应; 瞬态边界元; 声场分布

中图分类号: U491.9+1 **文献标志码:** A

DOI: 10.16749/j.cnki.jecjtu.2017.03.002

在经济交通快速发展过程中, 噪声污染问题也日益突出, 其中交通振动被列为引起低频噪声的四大振动源之一。随着城市交通的快速发展和交通流量的日益增加, 桥梁振动辐射噪声污染问题已直接影响到人们的生活。因此对桥梁振动低频噪声开展相关理论研究, 掌握该类低频噪声产生的机理, 对合理评价环境噪声污染程度以及有效控制桥梁振动辐射低频噪声的发生, 具有重要的现实意义。

至今, 已有不少学者研究探讨桥梁放射低频噪声的机理。Fukasawa Y 等^[1]采用 4 自由度和单向平板车辆模型对连续和简支梁桥的振动空气声波进行了分析研究。Sugiyama T 等^[2]通过比较分析了钢桥和混凝土桥梁在低频噪声辐射方面的差异, 从理论和实测两方面确认了钢桥振动低频噪声更为严重的结论。Theeraphong Chanpheng^[3]在研究降低结构声辐射的问题上提出声辐射模型比结构振动模型效果更好。并指出, 将结构表面的振动速度和声辐射功率相结合进行振动声辐射研究, 利用声辐射模态可以更好的描述结构的振动声辐射特性。Goromaru 等^[4]采用简单车辆模型, 分析了杆系结构振动低频噪声的辐射问题。张鹤, 谢旭^[5,6]利用格子梁结构模拟桥面板, 结合车桥耦合理论和空气波传播原理建立桥梁振动辐射瞬态噪声的有限元-边界元混合求解体系, 得到交通荷载作用下的结构振动和由此引起的声压。并采用边界元法对桥梁声辐射特性进行分析, 考虑地面对声场分布的影响, 总结出声场在空间的分布规律。

对声辐射问题可以通过一定边界条件下的波动方程加以描述, 根据分析方法的差异可以分为频域分析和时域分析, 频域分析是以 Helmholtz 方程为基础的稳态分析方法, 以频率为自变量计算结构振动的声辐射特性, 计算效率较高, 但这种方法仅适用于稳态声场计算, 不能反映结构体频率点处的声辐射规律和随时间变化的瞬态波动场。而时域分析法是以波动方程为基础的时域瞬态声场分析, 在时间域内直接求解波动场参量, 因此, 稳态声场特性和瞬态场特性均可用此法计算。

本文以一座运营中的钢桥为对象, 按照此桥 32 m 等截面简支钢箱梁为模型, 在 ANSYS 有限元软件中建立模型并进行车桥耦合振动加载得到桥梁结构振动响应结果, 之后, 将响应结果导入声学软件 LMS Vir-

收稿日期: 2016-12-08

作者简介: 程海根(1969—), 男, 副教授, 主要研究方向为桥梁结构受力、振动噪声分析及控制。

tual. Lab 中进行声学响应计算,通过对比得到钢箱梁在不同行车速度,不同吸声材料方面场点截面的声压分布,为降低桥梁辐射低频噪声提供可行性方案。

1 瞬态边界元计算方法

声学方程的任何一种形式都可以从流体的连续方程、运动方程、能量方程、物态方程推导而来。通过对流体方程进行线化和不同的假设可以得到不同形式的声学方程。即欧拉方程组-(1)(2)(3)

$$\rho\left(\frac{\partial v}{\partial t}+v \cdot \Delta v\right)=\nabla p+f \quad (\text{连续方程}) \quad (1)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t}+v \cdot \Delta p+\rho \cdot \Delta v=pq \quad (\text{运动方程}) \quad (2)$$

$$\frac{\partial s}{\partial t}+v \cdot \Delta s=0, c^2=\left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right) \quad (\text{物态方程}) \quad (3)$$

式中: ρ 为流体密度; v 为流体速度; p 为流体压力; s 为流体熵; f 为外部作用力; q 为外部质量源。

在描述声波特性中,为了计算分析的简化,对于声传播理论分析中进行一系列的条件假设:① 假定流体介质是理想的非黏性介质;② 在无受到外界干扰的情况下,流体介质处于静止状态;③ 声传播的整个过程处于绝热状态;④ 除桥梁外无其它噪声源;⑤ 在桥梁主体结构建设完工后,通车前还需对桥面板进行铺装。本文旨在分析钢箱梁在车辆交通荷载作用下的振动噪声分布,而桥面铺装层覆盖整个桥面板,因此对钢箱梁的振动噪声分布为整体影响,不会改变单一或个别场点的声压值;另外桥面铺装层的主要作用是保护桥面板不受外部条件(车辆、日照、雨水)的损坏和侵蚀,吸声属性很小。因此桥面铺装层对钢箱梁振动噪声分布的影响本文不做单独考虑。

在以上的基本假设下,通过欧拉方程组可以得到理想状态下的流体三维声波方程:

$$\nabla^2 p-\frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}=0 \quad (4)$$

式中: c_0 为空气中声速; ∇^2 为拉普拉斯算符,在直角坐标系中, $\nabla^2=-\frac{\partial^2}{\partial x^2}+\frac{\partial^2}{\partial y^2}+\frac{\partial^2}{\partial z^2}$ 。

声传播的内容中,边界条件是用来描述声压在传播边界上与结构表面的动力联系,定义:

$$q(X, t)=-\rho_0 i_n \quad (5)$$

式中: ρ_0 为空气密度; i_n 为结构表面的法向加速度。

$$q(X, t)=\frac{\partial P(Y, t)}{\partial n} \text{—声通量} \quad (6)$$

在时间域内进行声辐射瞬态声压求解需要对初始条件定义:当 $t=0$ 时

$$\begin{aligned} P(Y, t)=0, \frac{\partial P(Y, t)}{\partial n}=0 \\ P^*(Y, t)=0, \frac{\partial P^*(Y, t)}{\partial n}=0 \end{aligned} \quad (7)$$

对方程(7)进行拉普拉斯变换和逆变换,根据卷积定理,考虑积分核的奇异性,可以得到声波时域计算边界积分方程:

$$C(Y)P(Y, t)=\frac{1}{4\pi} \sum_m^n \frac{1}{r} q(X, t) d\tau + \frac{1}{4\pi} \int_\tau \frac{\partial r}{\partial n} \left\{ \frac{1}{r^2} P(X, t) + \frac{1}{cr} \left[\frac{\partial p(X, t)}{\partial \tau} \right]_{\tau=t} \right\} d\tau \quad (8)$$

$C(Y)=1-\frac{1}{4\pi} \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \int_0^{2\pi} \int_0^{\phi(\theta)} \sin\theta d\theta d\theta$ 惠更斯原理是基于边界元积分方程对声波辐射进行的理论基础,

对于积分方程是对声波特性的定量描述。在计算后的任意时刻、任意点处的声波阵面都可以用已知的面积元迭加获得。

声场分布计算中,已知结构表面振动加速度可以得到边界上各节点声通量,在得到声压和声通量后,声场中各点的声压为

$$\hat{P}^n = \sum_{m=n}^{\bar{n}} \sum_{\alpha=1}^{n_m} [\alpha(m)] G^{(n-m+1)} q^{(\alpha_s)} - \sum_{m=n}^{\bar{n}} \sum_{\alpha=1}^{n_m} [\alpha(M)] H^{(n-m+1)} p^{(\alpha_s)} \quad (9)$$

2 钢箱梁计算模型

2.1 钢箱梁桥结构有限元模型

利用 ANSYS 元模型,模型采用 32 m 等截面简支钢箱梁,钢板采用 Q345q(D) 钢材,弹性模量 206 GPa,泊松比 0.28,质量密度 7 850 kg/m³。箱梁梁体高 1.8 m,宽 8.5 m,采用 Solid45 实体单元模拟,荷载标准为城市-A 级,加载采用节点加载。由于 LMS.Virtual.lab 瞬态边界元模块边界元网格必须是三角网格,所以 ANSYS 中使用三角自由网格划分(见图 1),通过有限元动力学分析得到结构瞬态振动响应。

2.2 钢箱梁边界元模型

通过声学软件 LMS.Virtual.Lab 的瞬态边界元模块建立模型(见图 2)。在 LMS 中,无论声学边界元还是声学有限元,网格单元尺寸与计算频率有对应关系,网格最大单元的边长要小于最高频率点处波长的 1/6。即: $L \leq \frac{c}{6f_{\max}}$ 。在本文,最高频率 f_{\max} 为 200 Hz,所以,网格最大单元边长要小于 0.283 m。此外,在 LMS 中进行分析计算时,会有结构网格和声学网格。这些网格需要转移数据或建立耦合关系,因此,还需定义网格间的映射关系。本文采用 Maximum Distance 映射算法,目标节点的值由源节点的值确定,具体公式为

$$P_{\text{Target}} = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{P_i^{\text{source}}}{d_i}}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{d_i}}$$

式中: P_{Target} 为目标节点的值; d_i 为源节点到目标节点距离; P_i^{source} 为源节点的值。



图 1 有限元模型网格划分图
Fig.1 Finite element model mesh

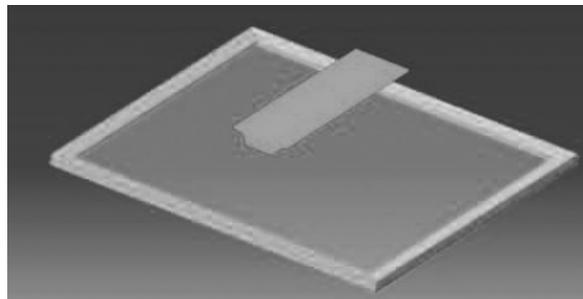


图 2 钢箱梁边界元模型
Fig.2 The boundary element model of steel box girder

3 声辐射结果与分析

本文所建模型为城市立交桥,地面距桥梁底板为 7 m。选取桥梁跨中截面处,场点布置(见图 3),场点 1,2,3 分别为距顶板 6,3.5,1 m;场点 4,5 距底板为 1,3.5 m;场点 6 距地面 1.7 m(人站立时双耳的高度),场点 7 距地面 1 m(人蹲下时双耳的高度);场点 8,9 为桥梁两侧边缘上部距顶板 1 m 处位置。

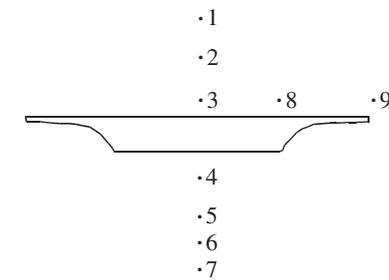


图 3 场点布置图
Fig.3 Site layout

3.1 箱梁外竖向截面处声压分布

选取单车道行驶,汽车行驶速度为 72 km/h,分析场点 1~7 竖向截面声压分布情况(见图 4、图 5)。

从图(4)、图(5)中,可知桥梁顶板上部竖向截面处场点声压值由大到小依次为:场点 3>场点 2>场点 1。桥梁底板下部竖向截面处场点声压值由大到小依次为:场点 4>场点 7>场点 6>场点 5。桥梁上下部竖向截面处场点声压值由大到小依次为:场点 3>场点 4>场点 7>场点 6>场点 2>场点 5>场点 1。

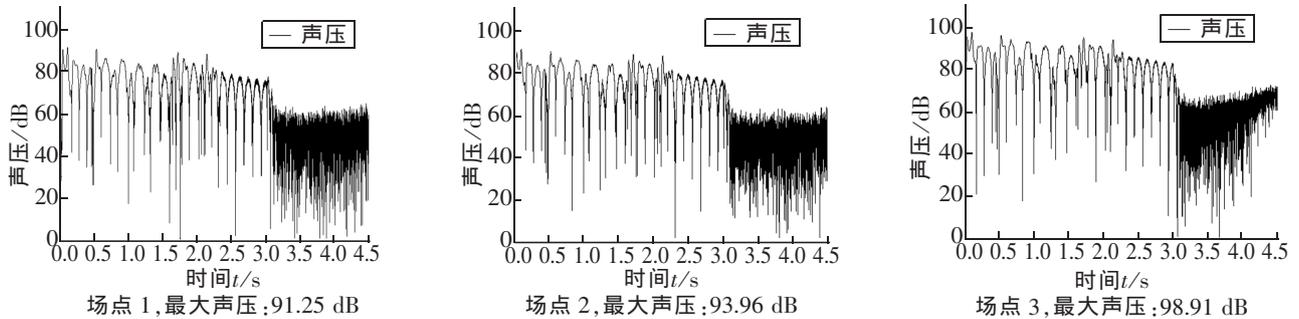


图 4 场点 1~3 声压图

Fig.4 Sound pressure diagram for Site 1~3

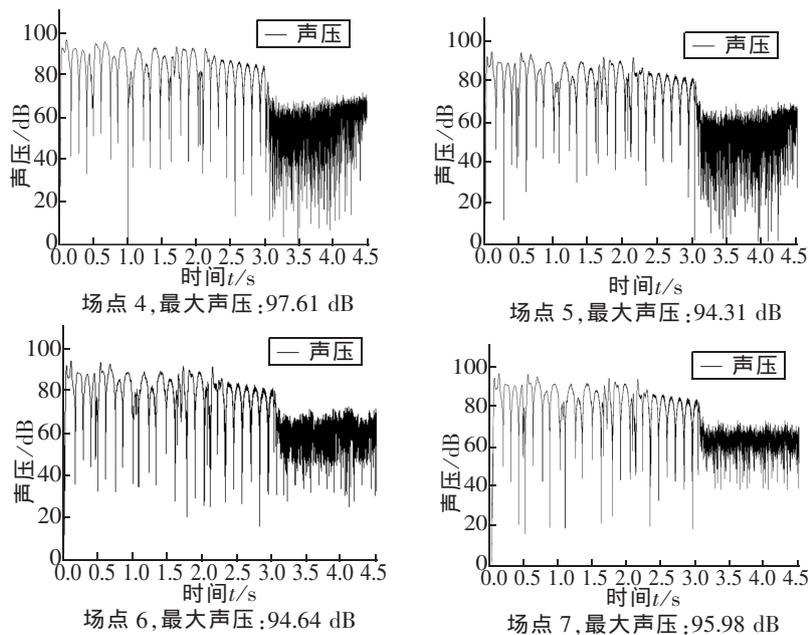


图 5 场点 4~7 声压图

Fig.5 Sound pressure diagram for Site 4~7

由场点 1,2,3 声压分布情况得,在桥梁顶板上部竖向截面处,离顶板距离越大,声压越小;场点 2 声压较场点 3 声压下降了 4.95 dB,场点 1 声压较场点 2 声压下降了 2.71 dB。由此可得出,随着距离的增加,噪声衰减的幅度变小。由场点 4,5,6,7 声压分布情况得,离梁体最近处场点 4 声压最大。本文模拟过程中考虑了地面的全反射作用,声波会出现叠加现象,导致声压变化。由场点 1~7 声压分布情况得,车辆直接作用在桥面板,由顶板振动引起桥梁其它结构体振动,顶板振动辐射噪声最大,在顶板上部,随着距离的增加,声压变小。在底板下部,因为地面对声辐射影响,声压由大到小再由小到大变化。

3.2 箱梁外横向截面处声压分布

选择图 3 中场点 3,8,9,对比分析箱梁外横向截面处声压分布,如图 6 所示,场点声压值由大到小依次为:场点 3>场点 8>场点 9。

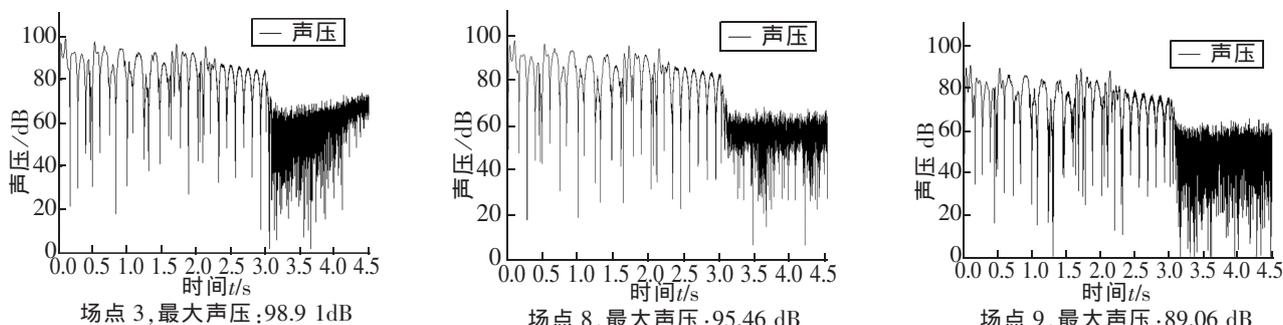


图 6 场点 3,8,9 声压图

Fig.6 Sound pressure diagram for Site 3,8,9

由图 6 得,随着距离的增加,离桥梁中心线越远,场点声压值越小。

3.3 箱梁外侧向截面处声压分布

在用 LMS.Virtual.Lab 软件计算分析中,行车方式采用双车同向 72 km/h,提取面场点在车行驶至 1/4 跨、中跨、出桥、出桥后 0.2 s 四种情况声压级分布云图,如图 7。

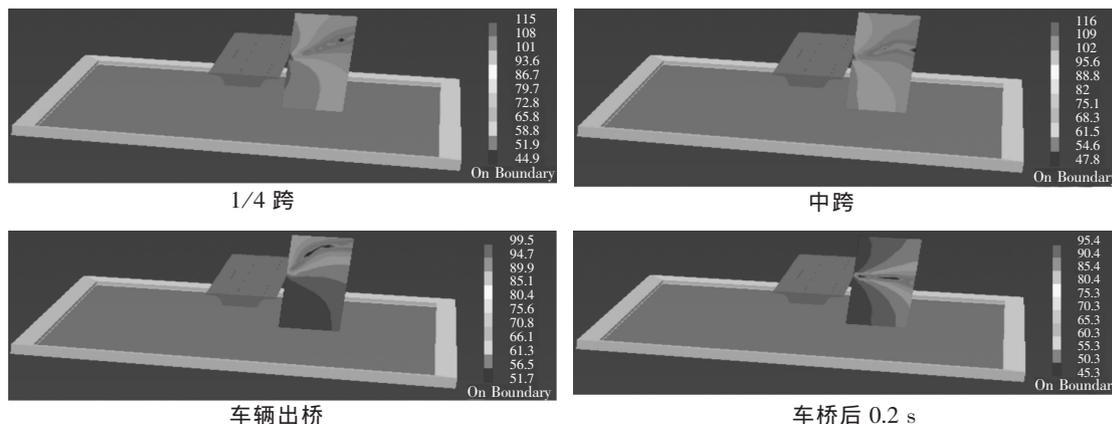


图 7 面场点声压级分布云图

Fig.7 Sound pressure level distribution for surface sites

图 7 声压级分布云图结果显示,靠近梁体和地面左下方范围声压最大。以桥面板为界,声波波形产生了交错现象。考虑地面,桥梁结构侧向截面处左下方区域的结构噪声大于其它区域,梁体附近处声压最大。

3.4 不同行车速度对场点声压的影响

由于本文是在理论上对钢箱梁在车辆荷载作用下的振动噪声做模拟研究,因此在对模型的计算中,设置的行车速度参数间隔跨度大;另外为考虑钢箱梁在行车速度极限状态下振动噪声的分布,最高时速也相应加大。因此选取行车速度 36,72,120 和 160 km/h 4 种速度情况,行车方式为单车道行驶,场点布置如图 3 中布置的场点 3,通过对比分析得出不同速度对场点声场分布的影响(见图 8)。

从图 8 中可得,不同速度下场点的声压大小依次为:160 km/h 速度下声压值>120 km/h 速度下声压值>72 km/h 速度下声压值>36 km/h 速度下声压值。在图 8 中,可知汽车行驶速度越大,桥梁的振动辐射噪声越大;并且汽车驶离桥面后,桥梁还会在很长一段时间持续振动辐射噪声。

4 加吸声材料分析

为保护桥下行人的身体健康,减小噪声的危害,从钢箱梁结构特性出发,在钢箱梁内顶板安装吸声材料,在 LMS.Virtual.Lab 软件中进行模拟。通过对比分析无吸声材料、吸声材料阻抗 300 kg/m³,600 kg/m² 3 种情况,场点布置为图 3 中的场点 3,行车方式为单车道 120 km/h 行驶,如图 9。

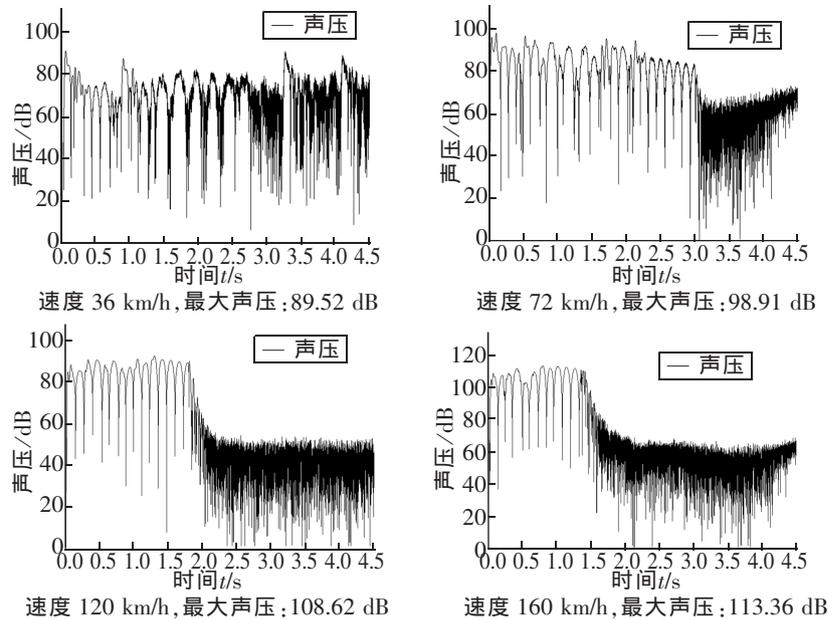


图8 不同速度下场点3声压分布图

Fig.8 Sound pressure distribution for Site 3 at different velocities

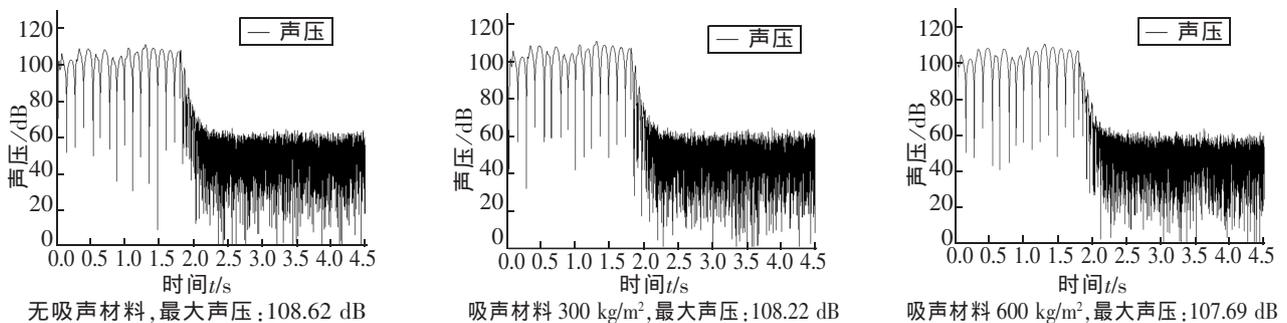


图9 不同吸声材料下场点3的声压分布图

Fig.9 Distribution of sound pressure for different sound absorbing materials at Site 3

从图9中显示可知,钢箱梁顶板安装了吸声材料后,噪声值下降幅度很小,而且,在车辆驶离桥面后,场点的声压数值无明显衰减。对比不同阻抗的吸声材料,可以发现吸声材料,在降噪效果上相差不大。

5 结论

本文通过建立桥梁振动辐射有限元-边界元模型,分析了32 m等截面钢箱梁桥在车辆动荷载作用下不同工况的时域振动响应,得到钢箱梁在不同工况下的声场分布情况,主要结论如下:

1) 箱梁外竖向截面处:离梁体距离越大,声压越小,并且,随着距离的增加,噪声衰减幅度也会变小;考虑地面对声场分布和声压水平的影响,梁体和地面间的声场分布变化规律为由大到小再由小到大;顶板的振动辐射噪声大于梁体其它结构的辐射噪声。

2) 顶板横向截面处,离梁体中心线越远,声压越小。

3) 梁体侧向截面处,梁体和地面间左下方辐射噪声声压大于其它辐射区域,梁体附近处,声压最大。

4) 车辆行驶速度越大,梁体辐射噪声越大。车辆驶离桥面后,桥梁还会在很长一段时间持续振动辐射噪声。

5) 钢箱梁梁体结构加入吸声材料后,振动辐射噪声将无明显衰减;不同阻抗的吸声材料,在降噪效果上相差不大。

参考文献:

- [1] FUKASAWA Y, SUGIYAMA T, NAKAHARA K, et al. Fundamental characteristics of low Frequency sound radiated from highway bridge under the passage of heavy vehicles[J]. Journal of Structural Engineering, JSCE, 1991, 37(A):945-956.
- [2] SUGIYAMA T, KOBAYASHI T, SHIMIZU K. Characteristics of low-frequency Sound radiated from both steel concrete girder high way bridges and reduction measure against low-frequency sound radiated from steel ones[J]. Journal of Structural Engineering, JSCE, 1999, 45(A):671-681.
- [3] THEERAPHONG CHANPHENG, HITOSHI YAMADA, TOSHIO MIYATA, HIROSHI KATSUCHI. Application of radiation modes to the problem of low frequency noise from a highway bridge[J]. Applied Acoustics, 2004, 65:109-123.
- [4] GOROMARU U, SHIRAISHI K, HARA H, et al. Analysis of low frequency sound radiating from simple girder highway bridge by a moving vehicle[J]. Journal of Construction Management and Engineering, 1991, 427(VI-14):133-142.
- [5] 谢旭, 张鹤, 山下幹夫. 桥梁振动辐射低频噪声评估方法研究[J]. 土木工程学报, 2008, 41(10):53-59.
- [6] 张鹤, 谢旭, 山下幹夫. 桥梁交通振动辐射的低频噪声分布研究[J]. 振动工程学报, 2010, 23(5):514-522.
- [7] 余爱萍, 张重超, 骆振黄. 瞬态声场特性的时域边界元和实验研究[J]. 上海交通大学学报, 1989, 23(3):82-89.
- [8] 蒋伟, 何正耀, 王东海. 辐射体声场计算的综合 Helmholtz 积分方法[J]. 电声基础, 2006, 10:9-12
- [9] 李小珍. 高速铁路列车-桥梁系统耦合振动理论及应用研究[D]. 成都:西南交通大学, 2000.
- [10] 李小珍, 张迅, 李亚东. 高速铁路简支箱梁结构噪声的边界元方法[J]. 土木工程学报, 2011, 44:95-101.

Research on Acoustic Field Distribution of Steel Box Girder under the Traffic Load

Cheng Haigen, Chen Haihua

(School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: Low-frequency vibration radiation noise of bridges, caused by traffic load, has become a serious problem threatening residents' life and health. It is of great significance to explore effects of the noise distribution of box girder for evaluating and reducing environmental noise pollution. Based on the theory of axle coupled vibration and sound transmission, this paper established the FEM and BEM solution system of vibration radiation. Taking a box girder of 32m constant depth as the solid model, it conducted the numerical simulation of the transient sound field characteristics for the steel box girder vibration under traffic loads. Results showed that the vibration radiation noise of the roof is bigger than that of other structures of the girder. With the increase of the distance from the girder, the sound pressure becomes smaller, and the amplitude of the noise attenuation will also be smaller. It finds out that the use of sound absorption material in the box girder may not help the noise reduction.

Key words: bridge of steel box girder; vibration response; acoustic transient boundary; acoustic field distribution

(责任编辑 王建华)