

城轨交通高架线环境振动的仿真与预测

张鹤年¹, 孙广俊^{2,3}, 肖军华², 李雄威⁴

(1. 东南大学 建筑学院, 南京 210096; 2. 南京工业大学 土木工程学院, 南京 210009;
3. 北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100022; 4. 常州工学院 土木建筑工程学院, 江苏 常州 213002)

摘 要: 基于轮轨相互作用原理, 建立了城轨交通高架线路列车振动荷载激励函数。将该激励力作用在有限元软件建立的三维轨道支承结构和土体传播路径计算模型上, 对地铁运行引起的周边环境振动响应进行了仿真模拟, 并利用现场实测数据进行了比较和验证。进一步, 分析了列车运行速度和场地土特性对环境振动的参数影响。在对各参数的影响特征进行了定量分析的基础上, 通过统计分析, 建立了城市轨道交通高架线路环境振动的振级预测公式, 并利用现场实测数据进行了验证。研究表明, 仿真模拟和预测结果能够较为真实的反映城轨交通高架线路运行引起的环境振动的实际情况。

关 键 词: 城市轨道交通; 高架线路; 环境振动; 仿真模拟; 预测模型

中图分类号: O 327

文献标识码: A

Simulation and prediction for environment vibration induced by urban rail transit with elevated line

ZHANG He-nian¹, SUN Guang-jun^{2,3}, XIAO Jun-hua², LI Xiong-wei⁴

(1. School of Architecture, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. College of Civil Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China; 3. College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China;
4. School of Civil Engineering & Architecture, Changzhou Institute of Technology, Changzhou, Jiangsu 213002, China)

Abstract: Firstly, on the basis of wheel-track interaction theory, a function of exciting force of moving train on elevated line is established. Then, the exciting force is acted on the three-dimensional numerical models of rail structure, elevated line and soil foundation by utilizing the finite element software. The surrounding environment vibration response caused by train operation is simulated; and the numerical results are compared and verified by the field measurement data. Furthermore, the parameter effects of length of bridge span, train speed and soil properties on environment vibration are studied. On the basis of investigation of parameter influence characters and according to the statistical analysis, a prediction formula of vibration level on ground induced by urban rail transit with elevated line is presented and validated by the field experiments. The research results show that the numerical simulation and prediction can truly reflect the actual environment vibration caused by urban rail transit with elevated line.

Key words: urban rail transit; elevated line; environment vibration; simulation; prediction model

1 引 言

振动是国际上公认的七大公害之一^[1], 如同噪声和水污染一样, 是考量城市居住环境质量和工作环境质量的重要指标。随着现代城市规模的日益扩大, 轨道交通以其运量大、速度快、安全可靠等特点, 成为解决城市交通的重要手段。但由此引起的

振动对环境的影响也引起了人们的普遍关注。城市轨道交通相比于道路交通车密度高, 速度及载重大, 持续时间长, 引起的周围地面和建筑物的振动也更加强烈, 且城市轨道交通引发的争议和抱怨往往围绕振动和噪声展开。轨道交通的振动和噪声不但会对沿线居民的生活造成影响, 而且会引起周围岩土介质及沿线结构物的破坏。因此, 研究城市轨

收稿日期: 2013-03-25

基金项目: 江苏省博士后基金资助项目(No.1101000115); 国家自然科学基金资助项目(No.51008158, No.41102229); 中国博士后科学基金资助项目(No.2012M520133)。

第一作者简介: 张鹤年, 男, 1980 年生, 博士后。E-mail: zhanghn_001@163.com

道交通对周边环境振动的影响及控制,对提高城市轨道交通系统的规划、设计和运营水平,保证工程结构的安全,改善城市环境质量,提高居民生活质量等方面具有重要的理论意义和社会效益^[1]。

伴随着城市轨道交通的建设,高架桥已作为一种主要的城轨交通结构型式越来越多地得到应用。与此同时,国内外学者对高架桥上列车运行引起的地面及建筑物振动开展了理论分析、试验研究和预测模型的建立,为城轨交通高架线路环境振动的研究提供了有益成果。如文献[2-6]对不同地区、不同结构特点的城轨交通高架线路的环境振动进行了测试和分析。然而,由于轨道交通运行引起的环境振动与线路结构、地区地质环境等密切相关。为深入认识不同地区、不同结构型式的环境振动特点和规律,并建立适合于当地工程和环境特点的振动预测模型,还需要积累更多的地区性经验^[7]。

本文基于轮轨相互作用原理^[1]建立了城市轨道交通高架线路列车荷载的激励函数,采用有限元软件建立了城市轨道交通高架线轨道支承结构与地基土振动传播路径计算模型,对环境振动进行了数值仿真和参数影响分析,建立了适用于城市轨道交通高架线产生的环境振动预测公式,并利用现场试验数据对预测公式的适用性进行了验证。

2 列车荷载激励函数

轨道不平顺是车辆和轨道系统振动的主要激励来源,影响列车-轨道相互作用力的主要原因在于轨道不平顺和轨面波形磨耗效应。英国铁路技术中心多年来的大量理论研究和实验工作表明^[8],竖向轮轨力主要出现在0.5~10 Hz, 30~60 Hz及100~400 Hz 3个频率范围。

根据上述分析,本文采用一个正弦函数叠加形式来模拟列车振动激励 $F(t)$,可以表示为

$$F(t) = P_0 + P_1 \sin \omega_1 t + P_2 \sin \omega_2 t + P_3 \sin \omega_3 t \quad (1)$$

列车振动激励可以与高、中、低频振动,附加动载以及轨道波磨效应相对应。相应的振动荷载幅值为

$$P_i = M_0 a_i \omega_i^2 \quad (2)$$

$$\omega_i = 2\pi \frac{v}{L_i} \quad (3)$$

式中: P_0 为静荷载部分,表示车轮静载; P_1 、 P_2 和 P_3 为动荷载部分,分别对应于表1所示的I-III控制标准中的某一典型值下的振动荷载; M_0 为列车轮对质量; a_i 为轨道几何不平顺矢高; ω_i 为不同车速下

不平顺波长对应的圆频率; v 为列车运行的速度; L_i 为相应于表1中I-III控制标准下的典型波长。

根据式(1)~(3),分别采用50、55、60、65、70、80 km/h 6种不同车速加以分析。参考南京轨道交通列车的相关数据,取单边静轮重 $P_0=80$ kN,簧下轮对质量 $M_0=750$ kg。结合相关研究经验^[7],对应于表1中的3种控制标准,分别取其不平顺振动波长和相应的矢高值为: $L_1=10$ m, $a_1=3.5$ mm; $L_2=2$ m, $a_2=0.4$ mm; $L_3=0.5$ m, $a_3=0.08$ mm。这样,可以得到对应于不同车速的低频 ω_1 、中频 ω_2 和高频 ω_3 及相应的振动荷载幅值 P_1 、 P_2 和 P_3 ,如表2所示。

表1 轨道几何不平顺值
Table 1 Track irregularity values

控制标准	波长 L /m	矢高 a /mm
按行车平稳性 (I)	50	16
	20	9
	10	5
	5	2.5
按作用到线路上的动力附加荷载 (II)	2	0.6
	1	0.3
波形磨耗 (III)	0.5	0.1
	0.05	0.05

表2 不同车速下激励荷载的不同频率及幅值
Table 2 Dynamic loading (frequency and amplitude) at different speeds

车速 /(km/h)	P_1 /kN	P_2 /kN	P_3 /kN	低频 /Hz	中频 /Hz	高频 /Hz
50	0.20	2.28	1.83	8.72	43.61	174.44
55	0.24	2.76	2.21	9.59	47.97	191.89
60	0.29	3.29	2.63	10.47	52.33	209.33
65	0.34	3.86	3.09	11.34	56.69	226.78
70	0.39	4.47	3.58	12.21	61.06	244.22
80	0.51	5.84	4.67	13.96	69.78	279.11

3 轨道支承体系-传播路径计算模型

地铁高架线路的轨道支承结构为混凝土梁,高架线路支承结构模型如图1所示。模型尺寸选自南京地铁南延线的实际参数,南延线上的桥梁跨度 d 一般情况为30 m,对三维桥梁结构采用实体单元类型进行建模。

城市轨道交通引起的环境振动问题主要指线路周围地面和建筑物的振动,所以在建立传播路径模型时应能较好的模拟振动在地基土中的传播。高架线路的振动传播路径模型如图2所示,模型尺寸120 m×40 m×60.8 m,并采用以下假定:

- (1) 轨道支承结构与地基土之间没有相对错动, 接触面上的运动保持一致;
- (2) 忽略基础与周围土层之间的接触非线性;
- (3) 考虑到振动荷载在土壤中产生的应变较小, 土体可以按弹性介质考虑。

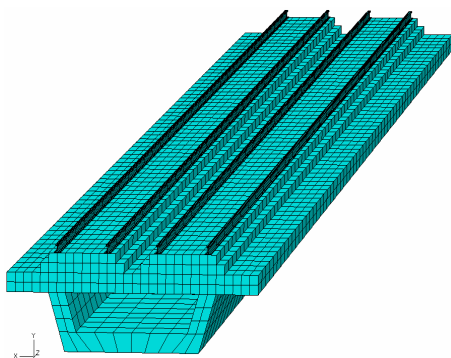


图1 高架线路支承结构模型
Fig.1 Calculation model of elevated line

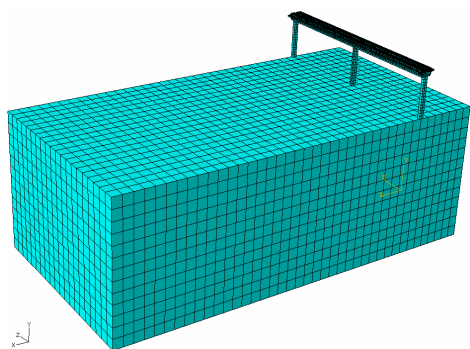


图2 高架线路桥墩-地基土振动传播路径模型
Fig.2 Calculation model of Pier and soil foundation for elevated line

在无限域介质的瞬态波动问题模拟中, 一种广泛采用的数值模拟技术是引入虚拟的人工边界从无限介质中切取出有限尺寸的近场计算区; 然后对计算区采用有限元技术完成模拟。本文采用一种能同时模拟散射波辐射和地基弹性恢复性能的人工边界: 黏弹性人工边界^[9]。

4 环境振动仿真模拟与参数影响

4.1 算例参数

(1) 轨道-桥梁系统参数: 钢轨单位长度质量 $\bar{m}_r = 51.514 \text{ kg/m}$, 弹性模量 $E_r = 200 \text{ GPa}$, 轨枕质量 $m_s = 240 \text{ kg}$, 轨枕间距为 62.5 cm , 钢轨和轨枕之间的弹簧系数与阻尼系数分别取值为 $k_{rs} = 0.3 \times 10^5 \text{ kN/m}$, $C_{rs} = 100 \text{ kN} \cdot \text{s/m}$, 轨道与桥梁之间的弹簧系数与阻尼系数分别取值 $k_{bg} = 1.3 \times$

10^5 kN/m , $C_{bg} = 63.2 \text{ kN} \cdot \text{s/m}$, 考虑不同桥梁跨度的影响, 桥梁的跨度依次选取 7.5 m , 15 m , 30 m 和 60 m , 其中 30 m 为标准参数输入时的桥梁跨度, 桥梁箱梁截面面积为 4.132 m^2 , 惯性矩为 2.28 m^4 , 阻尼比为 0.05 , 单位长度质量为 $10\ 330 \text{ kg/m}$, 混凝土等级 C40, 弹性模量 30 GPa , 桥梁支座刚度 $4.5 \times 10^4 \text{ kN/m}$, 阻尼 $2\ 000 \text{ kN} \cdot \text{s/m}$ 。

(2) 地基土参数: 在模型中假设地基土是不分层的单一土体, 考虑不同性质地基土对自由场地振动的影响, 将地基土归纳为几类属性, 各类地基土的参数选取如表3所示, 选取工况6为标准地基土参数。

(3) 列车速度: 列车速度取值为南京地铁列车的车速变化范围, 分别取为 $50, 55, 60, 65, 70 \text{ km/h}$ 及 80 km/h , 选取 65 km/h 为标准速度参数。

表3 不同性质地基土参数
Table 3 Parameters of soils

序号	名称	卓越周期 /s	弹性模量 /Pa	密度 /(kg/m ³)	泊松比	阻尼比
1	砾石土	0.15	4.0×10^7	2.4×10^3	0.2	0.02
2	砂土	0.25	3.5×10^7	2.3×10^3	0.225	0.04
3	粉土	0.35	3.0×10^7	2.2×10^3	0.25	0.06
4	粉质黏土	0.45	2.5×10^7	2.1×10^3	0.275	0.08
5	粉质黏土	0.50	2.0×10^7	2.0×10^3	0.30	0.1
6	粉质黏土	0.55	1.5×10^7	1.9×10^3	0.325	0.15
7	黏土	0.60	1.0×10^7	1.8×10^3	0.35	0.2
8	黏土	0.70	0.1×10^7	1.6×10^3	0.4	0.3

4.2 数值模拟结果与实测值的比较

本文计算了不同参数输入情况下高架线路地铁列车运行引起的自由场地振动, 计算结果为场地上不同距离处的竖向加速度时程。限于篇幅, 此处只列出标准参数输入下自由场地的竖向加速度时程曲线, 考虑到本文主要研究的是列车运行对周围地面的振动影响, 选取自由场地测点与轨道中心线的距离 D 分别为 $5, 10, 20, 40, 60, 80 \text{ m}$, 分别计算各计算点处的竖向加速度时程, 如图3所示。并取距离振源 5 m 处的数值仿真结果和现场实测数据 (南京地铁1号线南延线的小龙湾站至竹山路站区间) 进行对比, 如图4、图5所示。

由图4和图5可以看出, 数值仿真结果与实测结果基本一致, 模拟的振级稍大于实测的结果, 这表明基于有限元建模分析得出的计算结果能够较为真实的反映环境振动的实际情况。

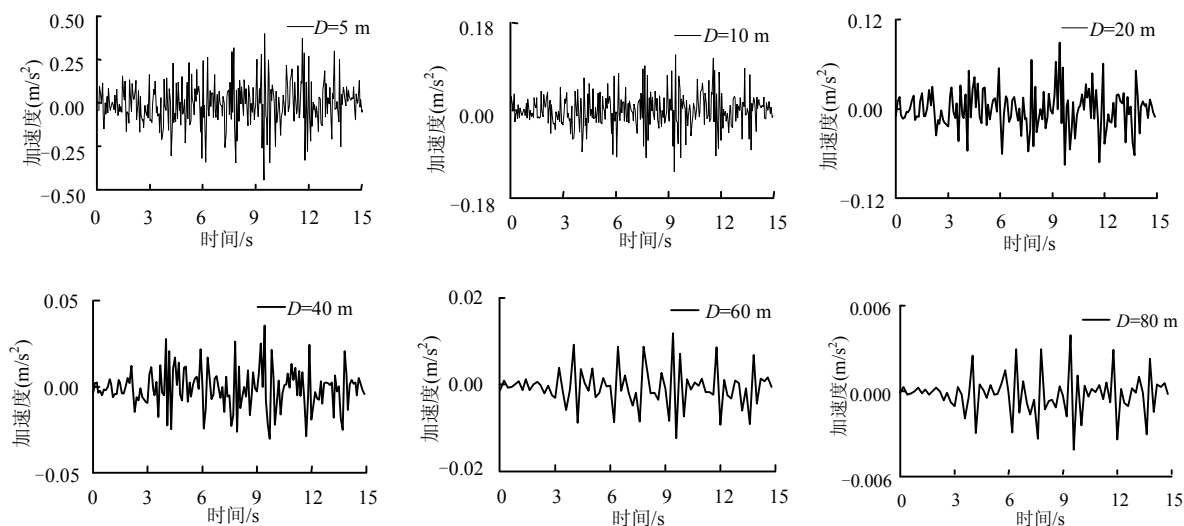
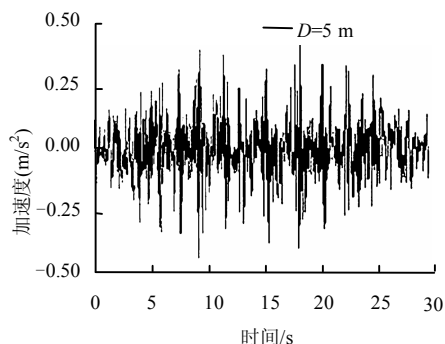
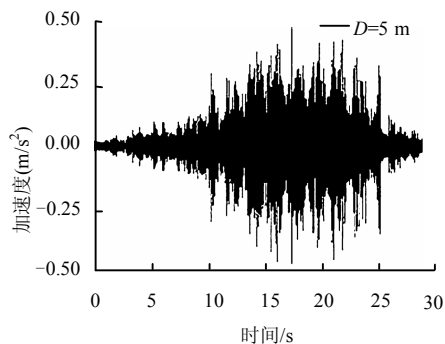


图3 标准参数输入下自由场地竖向加速度时程

Fig.3 Vertical vibrations of ground under standard parameters



(a) 模拟加速度时程



(b) 实测加速度时程

图4 加速度时程的数值模拟与实测值的对比

Fig.4 Comparisons of calculated and observed time histories of accelerations

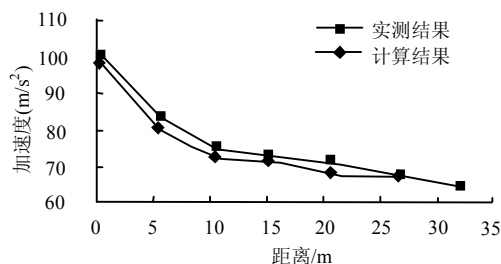


图5 振级的数值模拟与实测值的对比

Fig.5 Comparisons of calculated and observed vibration levels

4.3 环境振动参数影响分析

分别对不同桥梁跨度、列车速度和地基土性质情况下环境振动的响应进行分析计算。

图6为桥梁跨度变化,其他参数均为标准输入情况下的自由场地振动的振级随距离的衰减曲线。从图中可以看出,随着桥梁跨度的增大,列车引起的地面振动有增大趋势,列车通过60 m跨度桥梁较其它三种跨度桥梁引起的地面振动大近20 dB,列车通过15 m跨度桥梁和30 m跨度桥梁引起的地面振动相差不大,列车通过7.5 m跨度桥梁引起的地面振动最小。

图7为列车速度变化,其他参数均为标准输入情况下自由场地振动的振级随距离的衰减曲线。从图中可以看出,随着列车速度的增大,地面振动呈增大趋势。

图8为不同卓越周期的地基土条件,其他参数均为标准输入情况下,自由场地振动的振级随距离的衰减曲线。从图中可以看出,地基土卓越周期越长,土质越软,其列车引起的地面振动越大,不同地基土性质时列车引起的地面振动衰减趋势较为相似。

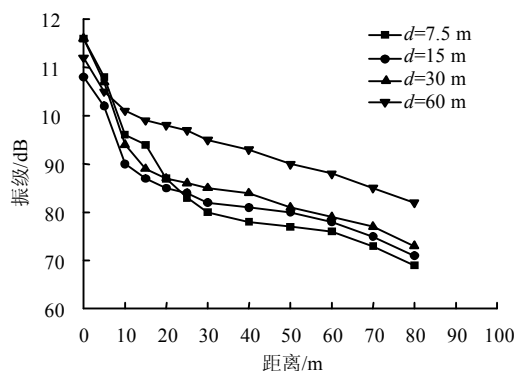


图6 桥梁跨度变化引起的自由场地振动衰减

Fig.6 Vibration attenuations under different bridge spans

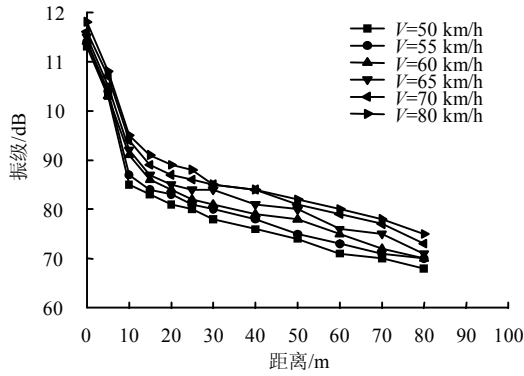


图7 列车速度变化引起的自由场地振动衰减

Fig.7 Vibration attenuations under different train speeds

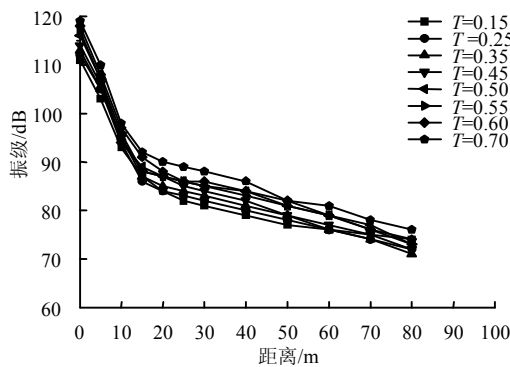


图8 地基土性质变化引起的场地振动衰减

Fig.8 Vibration attenuations under different soil properties

5 环境振动预测与验证

根据文献[1-2]的研究, 地铁运行引起的地面振动随距离和地基土性质的变化关系, 具有如下函数形式:

$$L_z = k_1 r^{-k_2} e^{-k_3 r} \quad (4)$$

式中: L_z 为振级; r 为距离振源的距离; k_1 为关于振级的待定系数; k_2 为反映几何阻尼的系数; k_3 为反映材料阻尼的系数。其中, k_1 , k_2 和 k_3 与地基土性质有关。

本文借鉴上述模型, 将其作为南京轨道交通高架线环境振动预测的基本模型, 对模型中相关参数的规律进行本地化研究。

通过对不同地基土条件下地面振级的最小二乘回归分析, 可以得到相应的 k_1 , k_2 和 k_3 的值, 再通过 k_1 , k_2 和 k_3 与相关地基土参数的回归分析, 可以得到标准参数输入时不同地基土、不同距离情况下的地面振级的预测公式

$$L_z = (-118.24 + 0.098\rho - 2.24 \times 10^{-5} \rho^2) \times r^{-0.0034\mu^{-0.924}} \times e^{-0.009223\xi r} \quad (5)$$

式中: ρ 、 μ 和 ξ 分别为地基土密度、泊松比和阻尼比。

当改变列车速度, 而其他参数均固定时所引起的地面振动, 与标准列车速度引起的地面振动有一个差值, 它是列车速度和距离的函数。采用复合回归的方法建立地面振级差值 Y_v 与列车速度 V 和距离 r 的函数关系, 即列车速度的修正项为

$$Y_v = 80 \times (0.018 - 0.135r) \times (V/80 - 1) \quad (6)$$

综合考虑以上几种主要因素, 包括受振点距离、地基土性质、列车速度、建立高架线路列车引起的地面振动预测模型

$$VL = L_z + Y_v \quad (7)$$

在实际对地面振动预测的过程中, 式(7)不易应用。故需建立简化的预测公式, 公式中只保留地基土性质, 并以地基土特征周期一个参数作为变量, 同时有振源距离、桥梁跨度、列车速度和列车编组, 建立的预测公式为:

$$VL = f(r) + X_v + X_B + X_S \quad (8)$$

其中

$$f(r) = A_1 + A_2 \ln r \quad (9)$$

式中: $f(r)$ 为自由场地振动随距离衰减基准曲线; $A_1 = 94.6 + 38.2T$; $A_2 = -(7.9 + 10.2T)$ 为地基土卓越周期 T 的函数; X_v 为列车速度修正项; X_B 和 X_S 分别为列车编组和桥梁跨度修正项。

为了验证简化预测公式的效果, 并考虑到实测数据受客观条件制约的有限性, 列车速度取为 65 km/h, 土的卓越周期取为 0.15 s, 桥梁跨度为 30m, 代入式(8)进行计算, 并与实测结果进行对比, 如图9所示。

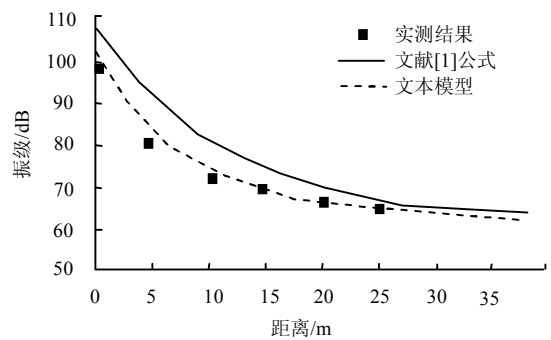


图9 预测模型与实测结果对比

Fig.9 Comparisons of calculated vibration levels by predicted model and the observations

可以看出, 在文献[1-2]的预测模型基础上, 结合南京本地实测数据重新进行分析, 所得的预测结果与实测结果相比更为接近, 与距离轨道中心 10 m 的范围内, 与实测结果相差在 5 dB 之内; 在后 10 m 到 25 m 的范围内, 与实测值基本一致。因此, 本文的预测模型能够更好的预测南京地铁高架线的环境

境振动情况。

6 结 论

(1) 高架桥线路列车引起的地面竖向振动随与振源的距离增大而减小;地基土卓越周期越长、地面振动越大;列车速度增大、地面振动增大;桥梁跨度越大、地面振动越大。

(2) 综合考虑受振点距离、场地性质、列车速度建立了多参数影响下的轨道交通高架桥环境振动预测公式,通过与实测结果的对比,表明本文预测模型与实测结果吻合更好。

参 考 文 献

- [1] 夏禾. 交通环境振动工程[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [2] 魏鹏勃. 城市轨道交通引起的环境振动预测与评估[D]. 北京: 北京交通大学, 2009.
- [3] LUC S. Impact of sound and vibration of the north-south high-speed railway connection through the city of Antwerp Belgium[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2003, 267: 637—649.
- [4] 边学成. 高速列车荷载作用下高架桥和地基振动分析[J]. *振动工程学报*, 2006, 19(4): 438—445.
BIAN Xue-cheng. Analysis of viaduct-ground vibrations due to high-speed train moving loads[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2006, 19(4): 438—445.
- [5] 谢伟平, 孙洪刚, 于艳丽. 轻轨系统引起的地基振动响应分析[J]. *华中科技大学学报*, 2002, 19(4): 23—26.
XIE Wei-ping, SUN Hong-gang, YU Yan-li. Analysis of ground vibration under light rail loads[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Urban Science Edition)*, 2002, 19(4): 23—26.
- [6] XIA H. Vibration effects of light-rail train-viaduct system on surrounding environment[J]. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 2002, 2(2): 227—240.
- [7] 张鹤年, 阳建强, 孙广俊, 等. 地铁运行诱发的环境振动数值模拟与模型预测[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2012, 42(5): 988—993.
ZHANG He-nian, YANG Jian-qiang, SUN Guang-jun, et al. Numerical simulation and model prediction for environmental vibrations induced by metro operation[J]. *Journal of Southeast University(Natural Science Edition)*, 2012, 42(5): 988—993.
- [8] JENKINS H. The effect of track and vehicle parameters on wheel/rail vertical dynamic forces[J]. *Railway Engineering*, 1974, 3(1): 2—16.
- [9] 刘晶波, 王振宇, 杜修力, 等. 波动问题中的三维时域黏弹性人工边界[J]. *工程力学*, 2005, 22(6): 46—51.
LIU Jing-bo, WANG Zhen-yu, DU Xiu-li, et al. Three-dimensional visco-elastic artificial boundaries in time domain for wave motion problems[J]. *Engineering Mechanics*, 2005, 22(6): 46—51.
- [6] 刘汉龙. 现浇 X 形钢筋混凝土桩施工工法[P]. 中国: ZL200710020306.3, 2007.
- [7] CHEN Y M, LIU H L, KONG G Q. Development and application of X-section cast-in-situ concrete pile[C]// *Proceedings of the Fourth Japan-China Geotechnical Symposium*. Okinawa: [s.n.], 2010: 389—392.
- [8] 雍君, 陆晓敏, 刘汉龙. X 形混凝土桩抗拔特性试验研究[J]. *岩土力学*, 2010, 31(11): 3430—3434.
YONG Jun, LU Xiao-min, LIU Han-long. Model test study on anti-pulling property of X-section concrete pile[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(11): 3430—3434.
- [9] 王智强, 刘汉龙, 张敏霞, 等. 现浇 X 形桩竖向承载特性足尺模型试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2010, 32(6): 903—907.
WANG Zhi-qiang, LIU Han-long, ZHANG Min-xia, et al. Full scale model tests on vertical bearing characteristics of cast-in-place X-section pile[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, 32(6): 903—907.
- [10] 刘汉龙, 刘芝平, 王新泉. 现浇 X 形混凝土桩截面几何特性研究[J]. *中国铁道科学*, 2009, 30(1): 17—23.
LIU Han-long, LIU Zhi-ping, WANG Xin-quan. Analysis of section geometry character of X style vibro-pile[J]. *China Railway Science*, 2009, 30(1): 17—23.
- [11] HEWLETT W J, RANDOLPH M F. Analysis of piled embankments[J]. *Ground Engineering*, 1988, 21(3): 12—18.
- [12] RUSSELL D, PIERPOINT N. An assessment of design methods for pile embankments[J]. *Ground Engineering*, 1997, 30(11): 39—44.

上接第 432 页