

地铁振动的传递及对建筑物的影响实测与分析

盛涛^{1,2}, 张善莉^{1,3}, 单伽程¹, 施卫星¹

(1. 同济大学 结构工程与防灾研究所, 上海 200092; 2. 宁波大学 建筑工程与环境学院, 浙江 宁波 315211;
3. 新加坡国立大学 工程学院, 新加坡 119077)

摘要: 在上海市某软土场地对地铁隧道诱发的三向环境振动进行了监测, 结合连续小波变换及 1/3 倍频程分频振级, 对隧道内与自由场地的振动频谱特性及传递规律等进行了分析, 同时对邻近建筑的室内舒适度作了评估。测试结论包括如下方面: ①轨道扣件上的三向振动表现出明显的宽频和冲击振动特性, 经隧道衬砌的第 1 层滤波效应后, 传递至其中部的竖向和横向振动均相对平稳, 且衰减效应明显。②传递至自由场地的三向振动, 经土层的反射和折射效应后, 呈现出与列车编组对应的冲击振动特性; 其与衬砌上的频率成分基本相似, 但振幅衰减效应不如衬砌, 甚至会出现一定幅度放大。③经建筑墙体的第 3 层滤波效应后, 竖向振动传递至楼板后其频率成分单一, 对室内舒适度影响很大, 其分频振级的峰值位于楼板的竖向自振频率处, 是影响室内舒适度的决定性因素。④地铁引起的地面高频振动激发了建筑结构的水平向高阶振型, 对部分楼层的舒适度具有潜在影响, 应引起注意。上述测试结论有助于为地铁环境振动有针对性地设计相应减振及隔振措施提供参考。

关键词: 地铁; 环境振动; 小波分析; 分频振级; 舒适度

中图分类号: TU352.12, X593

文献标志码: A

In-situ Measurement and Analysis of Subway Vibration's Transmission and the Influence to Nearby Buildings

SHENG Tao^{1,2}, ZHANG Shanli^{1,3}, SHAN Jiazheng¹, SHI Weixing¹

(1. Research Institute of Structural Engineering and Disaster Reduction, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Faculty of Architecture, Civil Engineering and Environment, Ningbo University, Ningbo 315211, China; 3. Faculty of Engineering, National University of Singapore, Singapore 119077, Singapore)

Abstract: Abstract: The three-dimensional environmental vibrations induced by a shallow buried subway in Shanghai were in-situ measured. By applying with continuous wavelet

transform and 1/3 octave frequency vibration level, the vibration transferring characteristics between the tunnel and the open field were analyzed. Simultaneously to the human comfort inside a nearby six-story residential building. Testing results include 4 aspects: ① the 3-D vibrations on rail-pads were characterized by wide-banded and shocking. The vertical and transverse vibrations were relatively smooth after transferred to the center of lining, but amplitudes attenuated greatly. ② The 3-D vibrations in the open field transferred from lining were obviously shocking-vibration characteristics corresponding to the carriages. The frequencies were the same with the lining, but the amplitudes attenuated smaller, sometimes maybe magnified. ③ After transferred through the third filter system represented by the masonry walls of building, the vertical resonance frequencies of floor-slabs were corresponding to the peak values of the vertical octave vibration levels in this testing, and were the main factor influencing the human comfort inside building. ④ The horizontal high frequencies transferred from subway tunnel have potential influences on some floors' human comfort, need to be paid more attentions. The above measurements will be benefited to the design of vibration reduction methods to railway vibrations specifically.

Key words: subway; environmental vibration; wavelet analysis; frequency vibration level; human comfort

由于轨道交通系统可以很大程度减小现代都市的交通拥堵及大气污染等问题, 已经成为我国“十二五”时期的重点投资发展战略之一。随着各大、中型城市的地铁线路逐渐进入建设和运营阶段, 由此引发了一系列环境振动问题, 对室内舒适度、精密仪器的正常使用及古建筑的安全保护等均产生了较大的影响, 引起了社会各界的普遍重视^[1-3]。

传统的地铁振动控制方法主要包括振源减振、

收稿日期: 2013-12-23

基金项目: 国家自然科学基金(51408324); 上海市科委、建交委项目(09dz1207800, 重科 2010-002)

第一作者: 盛涛(1984—), 男, 讲师, 工学博士, 主要研究方向为地铁环境振动控制与地震工程。E-mail: south_west@126.com

通讯作者: 单伽程(1986—), 男, 助理研究员, 工学博士, 主要研究方向为结构工程健康监测及振动控制。E-mail: sjz_725@163.com

传播途径减振及建筑物被动减振^[3-4]. 这些方法在实施前均需对地铁环境振动的频谱特性及其衰减规律等进行理论预测或实测评估,以获取相应的设计参数. 然而目前的实测过程多单独对某自由场地或邻近建筑室内振动进行测试^[5-7],很少见到将地铁隧道内、自由场地及邻近建筑物室内的振动同时进行测试和分析的实例,且测试过程多局限于竖向,而忽略了水平向振动的数量级,难以对此类环境振动的产生机理及其影响程度等作出全面合理的评估.

本文在上海市某软土地条件下对地铁隧道诱发的环境振动进行了现场监测,同时结合连续小波变换原理、1/3 倍频程分频振级及 ISO2631 国际环境振动标准,对地铁隧道内、邻近自由场地及建筑物室内的三向振动进行了分析,探索了地铁振动在经过衬砌、土层及建筑结构的 3 层滤波效应后频谱及振幅特性的衰减规律及对邻近建筑物室内舒适度的影响程度.

1 测试场地及评估方法

测试场地位于上海市浦东地区的某地铁站附近. 地铁线路与邻近自由场地及 6 层居民建筑的位置关系如图 1 所示. 地铁隧道采用盾构施工,埋置深度为 8~12 m,属于典型的浅埋地铁隧道,外部直径为 6.8 m,衬砌厚度为 0.3 m,列车型号主要为 6 节编组的 AC07 型电动客车,测试段的平均速度为 60 km·h⁻¹. 自由场地尺寸约为 30 m×45 m,土层以黏性土及淤泥质土为主,20 m 深度范围内的平均剪切波速为 125 m·s⁻¹. 6 层居民建筑采用砌体结构,钢筋混凝土条形基础,层高为 2.8 m,建筑总面积约为 1 728 m².

应用 3 套振动测试设备,分别位于隧道内、自由场地及建筑物室内,对某工作日晚高峰时间段的三向环境振动同时进行了测试. 从时域、频域、时-频域及 1/3 倍频程分频振级 4 个角度对环境振动的频谱特性及其传递衰减规律等进行分析. 其中时-频域分析方法主要采用 Morlet 连续小波变换^[8],而 1/3 倍频程分频振级则主要依据 ISO2631:Part 1 和 Part 2 中有关的计权网络及其计算评估方法^[9-10].

如图 1 所示,测试场地邻近市级公路,其诱发的环境振动会对测试结果产生一定干扰,本文根据两者的频率成分不同,应用 Morlet 小波变换原理对干扰项进行识别,并应用傅里叶变换去除本底振动的影响^[3].

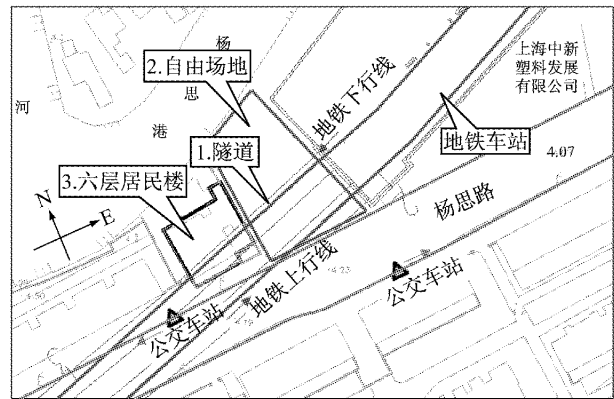


图 1 测试场地(隧道—自由场地—6 层居民楼)

Fig.1 Testing place (tunnel — open field — 6 story residential)

2 隧道内三向振动测试

在自由场地下方的地铁隧道内布置 6 个可测频率范围为 0.2~1 000 Hz 的 KD1100LC 传感器,分别位于扣件上和衬砌中部,如图 2 所示,结合同济大学土木工程防灾国家重点实验室研发的 SVSA 动态数据采集仪对 3 个方向的振动加速度时程进行同步测试.

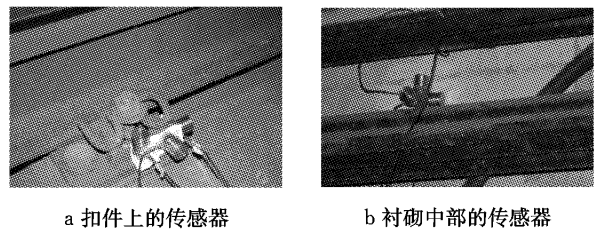


图 2 测点及传感器的布置

Fig.2 Measurement place and layout of sensors

根据 ISO2631,人体敏感的频率范围为 1~400 Hz,最为敏感的频率区间为 1~80 Hz,因此设置采样频率为 1 000 Hz,共测试不少于 10 趟列车引起的三向振动.

其中某趟列车引起的扣件上竖向振动加速时程及其功率谱、小波时-频谱如图 3 所示. 测试结果表明,列车经过时扣件上的竖向振动加速度峰值约为 12 g,属于宽频振动,在 500 Hz 范围内均有分布,其中以 250 Hz 处最为集中,在 10~200 Hz 表现出明显的冲击振动特性. 冲击振动数量与列车编组数量正好对应,其时间间隔也与地铁列车的轴距和行驶速度相符. 另外,各频率处振幅的大小基本相近,类似白噪声. 由于横向和纵向振动的频谱规律与竖向基本相似,此处不再赘述.

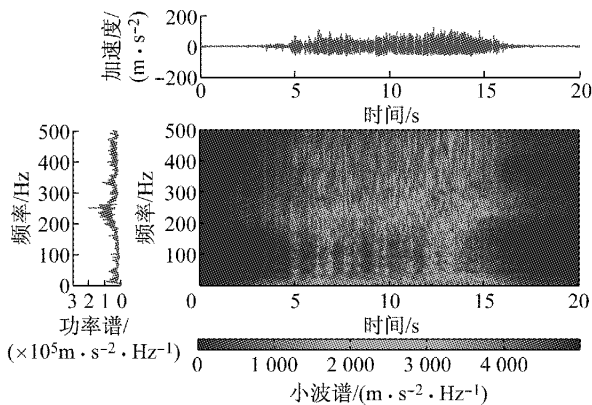


图 3 扣件上的某趟列车引起的竖向振动

Fig. 3 One of the vertical vibrations at rail pad

经过衬砌结构第 1 道滤波后,衬砌半高处与上述图 3 对应的竖向、横向振动加速度时程及其功率谱、小波时-频谱如图 4 和 5 所示. 测试结果表明: 竖向及横向振动均变得相对平稳, 不再呈现出明显的冲击特性; 竖向振动峰值位于 35 Hz 附近, 横向振动则位于 50~75 Hz 内, 100 Hz 以上振动基本被滤掉. 根据结构动力学的原理, 在振动输入类似白噪声的前提下, 可以初步估计衬砌结构的竖向及横向自振频率位于上述 2 个频率区间内, 属于人体最为敏感的 1~80 Hz 区间.

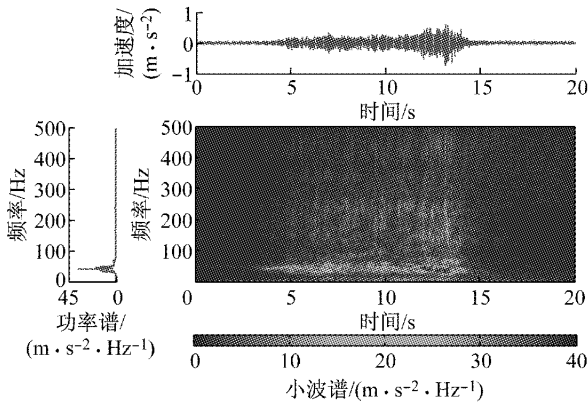


图 4 隧道衬砌半高处的竖向振动时程

Fig. 4 The vertical vibration at the half-height of lining

根据 ISO 2631 标准计算 10 趟列车经过时各测点的 1/3 倍频程分频振级. 再根据人体敏感度进行修正后的平均值如图 6 和 7 所示.

上述结果表明: 扣件上的三向分频振级主要集中在 10~80 Hz, 竖向振级最大; 而衬砌上的分频振级则主要位于 35 Hz 附近, 横向最大. 衬砌结构对扣件上振动的衰减效应非常明显, 其中竖向、横向及纵向振级的最大衰减幅度为 45%~55%, 分别为 65, 57 及 68dB.

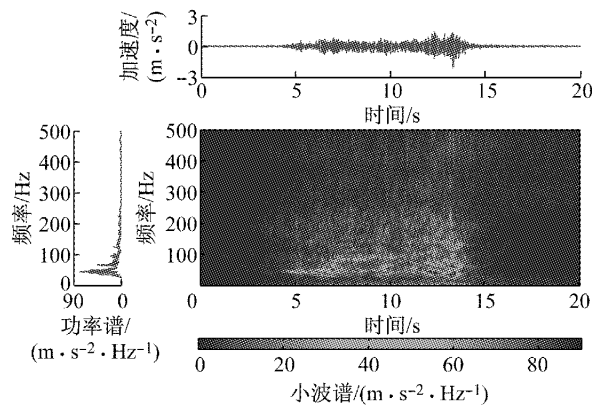


图 5 隧道衬砌半高处的横向振动时程

Fig. 5 The transverse vibration at the half-height of lining

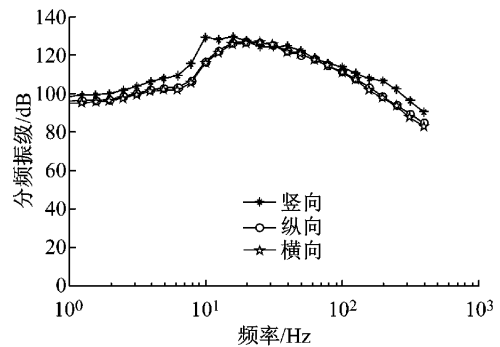


图 6 扣件上 10 趟列车通过时的分频振级平均值

Fig. 6 Average values of 10 trains' frequency vibration levels at rail pad

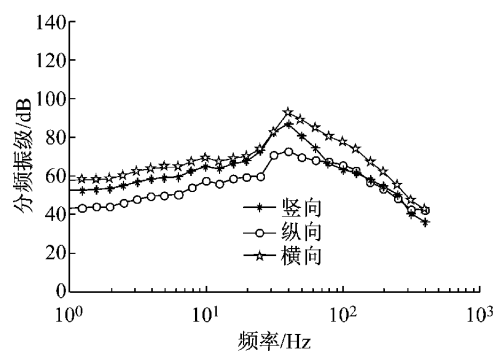


图 7 衬砌上 10 趟列车通过时的分频振级平均值

Fig. 7 Average values of 10 trains' frequency vibration levels at lining

3 自由场地环境振动测试

衬砌结构的三向振动经过土层的第 2 次滤波效应后通过反射与折射传递至自由场地. 在图 1 所示的隧道正上方自由场地中轴线上以及横向偏移 10

m 处布置 2 个测点,分别记为测点 1 和测点 2,应用 6 个 Lance LC0132T 高灵敏度传感器结合 SVSA 动态数据采集仪对 3 个正交方向的加速度时程进行测试.

作出某趟列车通过时的加速度时程、小波时-频谱及功率谱如图 8 和图 9 所示. 测试结果表明,自由场地的竖向振动再次呈现出冲击振动特性,其冲击数量与列车编组也正好相同;不同于扣件上的类似白噪声振动,其不再呈现宽频特性,仅在 50~80 Hz 内特定频率处的振幅较大. 其中在距离隧道 10 m 处,其冲击振动特性也逐渐淡化,出现了 35 Hz 左右的非平稳振动.

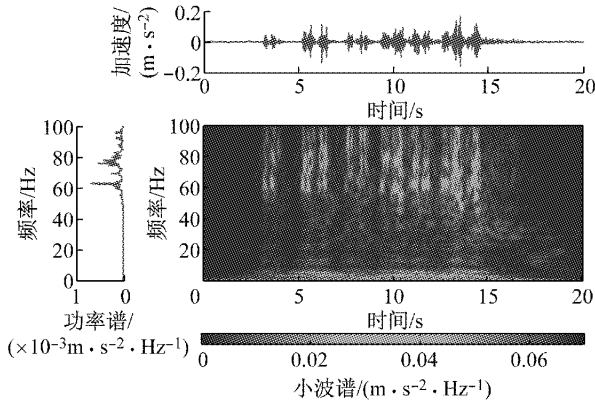


图 8 自由场地测点 1 的竖向振动

Fig.8 The vertical vibration at the 1st place on open field

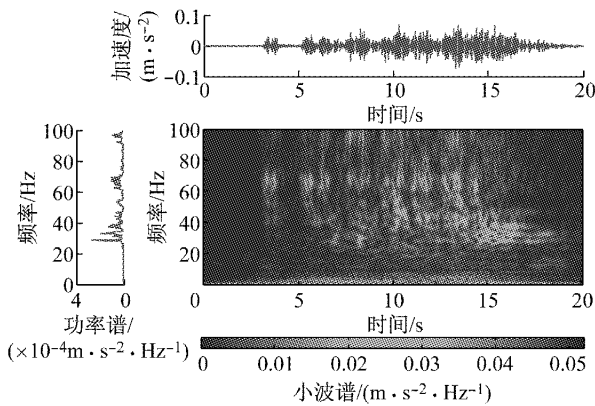


图 9 自由场地测点 2 的竖向振动

Fig.9 The vertical vibration at the 2nd place on open field

根据 ISO 2631 标准计算 10 趟列车经过时 2 个测点的 1/3 倍频程分频振级. 再根据人体敏感度进行修正后的平均值如图 10 所示.

测试结果表明:①自由场地上振动的频谱特性在 3 个方向基本相似,但振级大小和随距离的衰减速度不同;其中竖向振级小于水平向,且衰减速度慢于水平向(10 m 距离的竖向衰减为 8%,而水平向约

为 18%). ②衬砌上的振动传递至其正上方的自由场地后,竖向振级的最大衰减幅度约为 32%,横向振级的最大衰减幅度约为 22%,35 Hz 附近的衰减效应最为明显,80 Hz 处最小;纵向振级在 30~50 Hz 处略有减小,在其他频率处出现了小幅度增加.

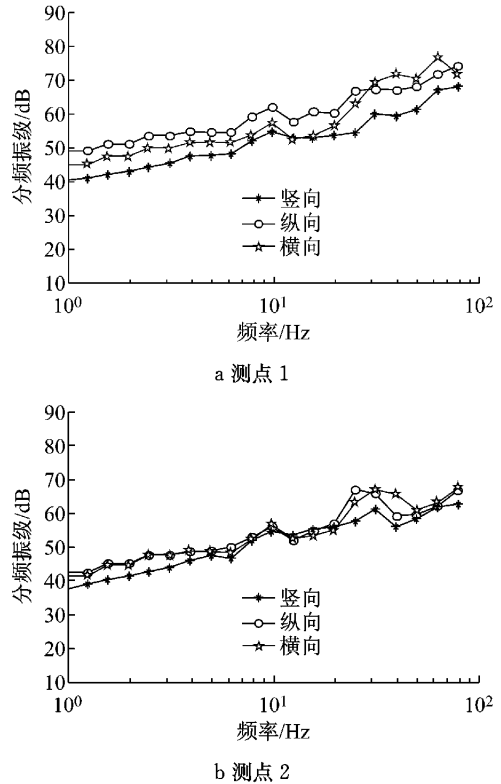


图 10 各测点 10 趟列车通过时的分频振级平均值

Fig.10 Average values of 10 trains frequency vibration levels at each measuring place

4 邻近建筑的室内振动测试

地铁振动首先由地基传递至建筑物基础,再经过由结构墙体构成的第 3 层滤波效应传递至楼板,引起室内舒适度问题. 本文在图 1 所示的 6 层居民楼南侧的某卧室中央逐层布置测点,应用 18 个 Lance LC0132T 和 KD 12000L 传感器,结合应用 SVSA 动态数据采集仪分别测试水平双向和竖向的振动加速度时程,采样频率设置为 200Hz. 部分楼面的测试结果如图 11~13 所示.

比较图 11 与图 8 的竖向振动测试结果可知:振动传递至室内楼板后,在特定频率处出现了相对平稳的振动,高频成分大部分被滤掉,且加速度峰值远大于自由场地. 由现场勘察报告计算的楼板竖向自振频率为 35~45 Hz,结合结构动力学原理的传递率计算公式可知^[11],楼板的竖向自振频率是地铁环境

振动作用下影响其室内竖向舒适度的决定性因素。

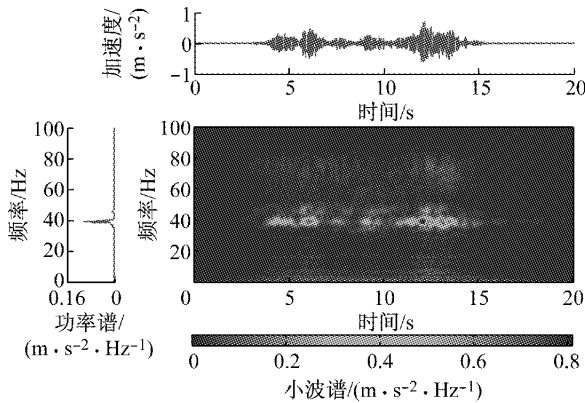


图 11 第 2 层楼面的竖向振动

Fig. 11 The vertical vibration at the 2nd floorslab

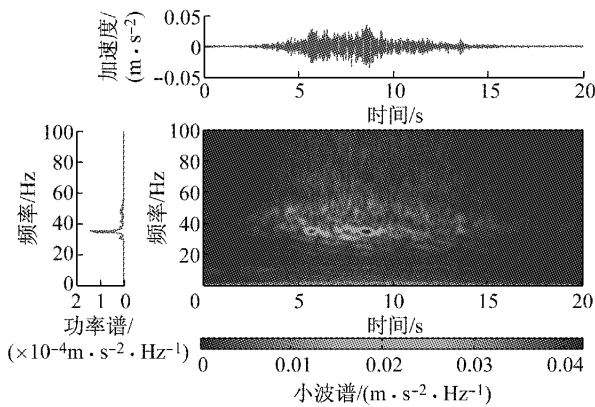


图 12 第 2 层楼面的横向振动

Fig. 12 The transverse vibration at the 2nd floorslab

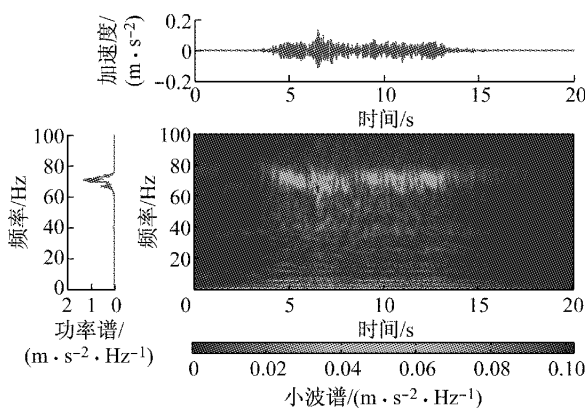


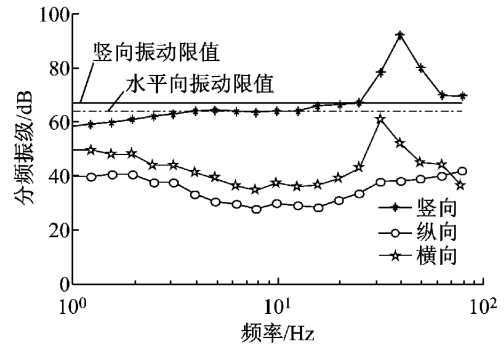
图 13 第 6 层楼面的横向振动

Fig. 13 The transverse vibration at the 6th floorslab

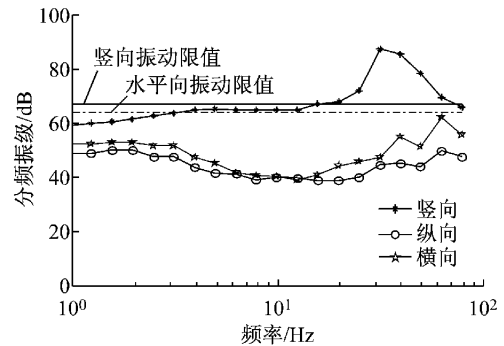
图 12 和图 13 的水平向测试结果表明,6 层楼面横向振动的加速度峰值约为 2 层楼面的 4 倍,两者的振动频率完全不同.结合图 10 a 的测试结果可知,地铁运行时激发的水平向高频环境振动使得邻近建筑结构的水平向振动以高阶振型为主,对部分楼层

的水平向舒适度造成一定影响。

根据 ISO 2631 标准计算 10 趟列车经过时 2 层和 6 层楼面的 1/3 倍频程分频振级.再根据人体敏感度进行修正后的平均值如图 14 所示。



a 第 2 层楼面



b 第 6 层楼面

图 14 第 2 层与第 6 层楼面 10 趟列车通过时的分频振级平均值

Fig. 14 Average values of 10 trains' frequency vibration levels at the 2nd and 6th floors

上述的计算结果表明,2 层和 6 层楼面竖向的 1/3 倍频程分频振级最大约为 96 dB,严重超出了我国标准中的 II 类区夜间限值^[12],但水平向振级仍处于限值以内,其中横向振级仅略小于规范限值.产生该现象的原因与楼板的竖向刚度和整体结构的水平向刚度有关,前者远小于后者,且楼板的竖向自振频率位于竖向地铁环境振动的主振频率区间内.这一方面对我国规范中仅要求评估建筑室内竖向振动而忽略水平向振动的相关规定作了印证;另一方面也说明了在一些特殊情况下(例如建筑物位于地铁正上方、地铁埋深较浅等)建筑物室内的水平向振级仍有超标的可能性,应引起注意。

作出各层楼面竖向和水平向的分频振级峰值如图 15 所示.测试结果表明,竖向振级沿楼层往上逐层减小,传递至顶层时,振级减小了约 6 dB;而纵向和横向的分频振级峰值由于受到高阶振型影响,沿楼层的变化规律不明显,并非一般认为的楼层越高

对水平向舒适度的影响越大。

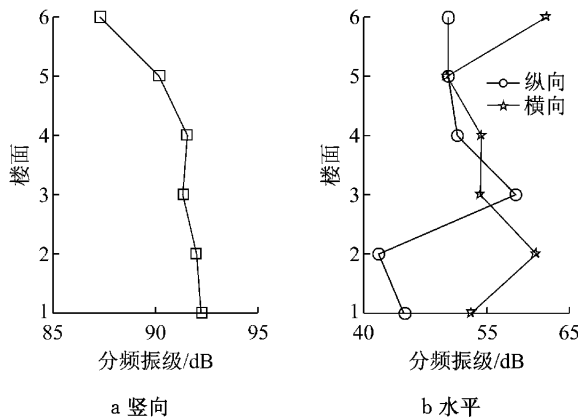


图 15 各楼面分频振级平均值的峰值

Fig.15 Peak values of each floor's average vibration level

5 结论

对位于上海市某软土地下的地铁隧道、自由场地以及邻近建筑室内的三向振动进行了现场监测.结合连续小波变换原理及1/3倍频程分频振级对地铁环境振动在隧道结构、土层及建筑结构之间的传递过程以及频谱特性和衰减规律进行了分析,探索了地铁环境振动对邻近建筑的室内水平向及竖向舒适度的影响程度.主要结论如下:

(1) 轨道扣件上的三向振动表现出明显的宽频和冲击振动特性;经隧道结构的第1层滤波效应后,传递至衬砌中部的竖向和横向振动相对平稳,且1/3倍频程分频振级的衰减效应明显.

(2) 经过土层的第2层滤波效应后,传递至自由场地的环境振动再次呈现出与列车编组相应的冲击振动特性.其与衬砌上振动的频率区间基本相似,但竖向和横向振级的衰减效应不如衬砌结构,纵向振级甚至出现了一定程度的放大.

(3) 经建筑结构的第3层滤波效应后,传递至室内楼板的竖向振动频率成分单一,与分频振级的峰值一样,主要位于楼板的竖向自振频率处,是影响室内舒适度的决定性因素.

(4) 地铁引起的高频环境振动激发了建筑结构的水平向高阶振型,对部分楼层的舒适度存在一定影响,应引起注意.

参考文献:

[1] 夏禾,曹艳梅.轨道交通引起的环境振动问题[J].铁道科学

与工程学报,2004,1(1):44.

XIA He, CAO Yanmei. Problem of railway traffic induced vibrations of environments [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2004, 1(1): 44.

[2] Andreas Eitzenberger. Train-induced vibrations in tunnels: A review [R]. Luleå: Division of Mining and Geotechnical Engineering, Luleå University of Technology, 2008.

[3] 盛涛.城市轨道交通环境振动实测及减振隔振方法研究[D].上海:同济大学,2013.

SHENG Tao. In-situ measurements of environmental vibration caused by urban transit and measure study on vibration isolation and reduction [D]. Shanghai: Tongji University, 2013.

[4] Andersen L, Nielsen S R K. Reduction of ground vibration by means of barriers or soil improvement along a railway track [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2005, 25 (7):701.

[5] Villot M, Ropars P, Jean P. Modeling the influence of structural modifications on the response of a building to railway vibration [J]. Noise Control Engineering Journal, 2011, 59 (6): 641.

[6] 张杨,陈国兴,毛昆明.轨道交通运行引起的场地振动实测研究现状[J].防灾减灾工程学报,2011,31(2):225.

ZHANG Yang, CHEN Guoxing, MAO Kunming. Status of research on measurement of ground vibration induced by rail transit [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2011, 31(2): 225.

[7] Heckl M, Hauck G, Wettenschreck R. Structural-borne sound and vibration from rail traffic [J]. Journal of Sound and Vibration, 1996, 193(1): 175.

[8] 孙鹏,丁幼亮,张劲泉,等.基于Morlet小波变换的结构密集模态参数识别[J].东南大学学报:自然科学版,2012,42(2):339.

SUN Peng, DING Youliang, ZHANG Jinqian, et al. Modal identification of closely spaced modes based on Morlet wavelet transform [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2012, 42(2):339.

[9] International Organization for Standardization. ISO2631-1; 1997, Mechanical vibration and shock evaluation of human exposure to whole body vibration, Part 1: General requirements [S]. Danver: IHS, 1997.

[10] International Organization for Standardization. ISO2631-2; 2003, Mechanical vibration and shock evaluation of human exposure to whole body vibration, Part 2: Vibration in buildings (1Hz to 80Hz) [S]. Danver: IHS, 2003.

[11] Chopra A K. Dynamics of structures: Theory and applications in earthquake engineering [M]. New Jersey: Prentice Hall/Pearson Education Press, 2011.

[12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ/T170—2009 城市轨道交通引起建筑物振动与二次辐射噪声限值及其测量方法标准[S].北京:中国建筑工业出版社,2009.

Ministry of Housing and urban-rural Development of the People's Republic of China. JGJ/T170—2009 Standard for limit and measuring method of building vibration and secondary noise caused by urban rail transit [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009.