

地铁诱发的环境振动及振源减振效应的实测与分析*

盛 涛^{1,2}, 张善莉^{2,3}, 单伽钲², 施卫星²

(1. 宁波大学建筑工程与环境学院 宁波, 315211) (2. 同济大学结构工程与防灾研究所 上海, 200092)

(3. Faculty of Engineering, National University of Singapore Singapore, 119077)

摘要 以上海市某地铁线路邻近的六层砌体结构居民建筑为例,通过现场实测,分析了地铁诱发的三向环境振动对室内舒适度的影响程度及主要影响因素;分别在更换了高弹性扣件和降低了列车行驶速度之后,再次对三个正交方向的室内舒适度进行了实测。结果表明:a. 地铁环境振动主要引起室内楼板的竖向振动,其振级与楼板竖向自振频率直接相关,且沿楼层往上逐层减小,顶层楼面相对于首层可减小约 5 dB;b. 楼板的水平向振动主要受整体结构高阶振型的影响,在某些特定楼层可能出现舒适度超标;c. 更换高弹性扣件能明显减小室内楼板的竖向振级,在峰值处可减小约 10 dB,但也明显放大了其纵向振级,对横向振动的控制效果不明显;d. 降低列车行驶速度对三个正交方向的室内舒适度均具有明显的提升效果,竖向振级在峰值处减小约 8 dB,横向和纵向振级最大减小约 30 dB,可用于某些环境振动敏感区域进行振动控制。

关键词 地铁; 环境振动; 舒适度; 振源减振; 现场实测

中图分类号 X593; TU352.1

引 言

城市轨道交通可以很大程度的减小交通拥堵及大气污染等问题,已成为我国“十二五”时期的重点投资和发展战略之一。随着各大、中型城市的地铁线路逐渐进入建设和运营阶段,由此引发一系列环境振动问题,在一些特殊区段对建筑物的室内舒适度产生了很大影响,已引起社会各界的广泛关注^[1-3]。例如:北京地铁 6 号线途径的朝阳区定福家园小区、广州地铁 6 号线途径的黄花岗附近小区、上海地铁的 10 号线和 11 号线交汇的红庄小区等,居民对地铁线路所引起的室内振动的反响均非常强烈^[4]。

为了减小该类环境振动的影响,传统的振动控制方法主要包括振源减振、传播途径减振及建筑物被动减振与隔振三种类型^[5-8]。由于受到实际条件的限制,以往关于振源减振方法的实测及研究多注重振源与自由场地的振动控制效应^[9-11],而很少与邻近建筑室内的舒适度直接关联,且测试过程多局限于竖向,往往忽略了水平向振动的影响,难以对此

类环境振动的影响程度作出全面的评估。

笔者以上海市某地铁线路和邻近的多层砌体结构居民建筑为例,通过现场实测首先分析了未采取任何减振措施时,地铁隧道诱发的三向环境振动对室内舒适度的影响程度及主要的影响因素。在更换了高弹性扣件和降低了列车行驶速度之后,分别对室内的三向舒适度再次进行了实测,比较分析了两种振源减振方法的有效性。现场测试和分析的结果对地铁环境振动及其控制措施的开发具有参考价值。

1 实测场地概况

笔者测试场地位于上海市浦东新区的某地铁站附近,地铁隧道与邻近自由场地及 6 层居民建筑的位置关系如图 1 所示。其中,自由场地的面积约为 $30 \times 45 \text{ m}^2$ 。6 层居民建筑采用砌体结构,层高 2.8 m,底层采用架空楼板,总建筑面积约为 $1\,728 \text{ m}^2$ 。隧道的埋置深度为 8~12 m,平均每 3 min 通过一趟上行或下行列车。根据现场的勘察结果,深度 50 m 范围内的土层主要包括粘性土及淤泥质

* 国家自然科学基金资助项目(51408324),上海市建交委“十一五”重大科研项目资助项目(重科 2010-002);校重点学科项目(XKL14D2069)

收稿日期:2014-03-10;修回日期:2014-06-03

土,其中淤泥质土为连续分布,其厚度约为13 m,与隧道底部基本平齐。整个覆盖土层的平均剪切波速为125 m/s,为典型的软土地场条件。

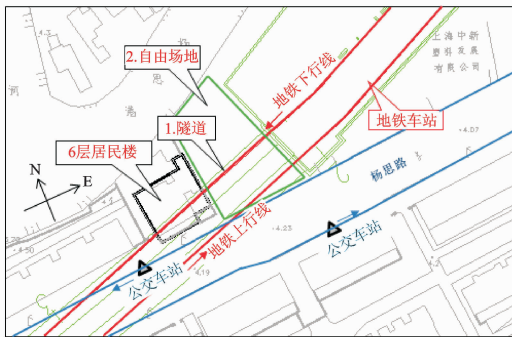


图1 地铁环境振动的实测场地图

Fig. 1 Measuring site of subway-induced environmental vibrations

自由场地、6层居民建筑及楼板振动测试的现场照片如图2所示。由于该建筑紧临上海市二级公路,测试数据中可能混有路面交通引起的环境振动影响,在数据处理和分析时根据 Morlet 小波变换原理结合其频谱特性对其影响作了消除^[4]。另外,在测试楼板的三向振动时,为了排除架空装修层的影响,直接将传感器布置在混凝土楼面上,见图2(c)。

2 建筑物室内舒适度实测与分析

2.1 测试及分析方法

应用12个可测频率范围0.05~500 Hz、灵敏度为49.67 V/g的Lance LC0132T,以及6个可测频率范围0.03~200 Hz、灵敏度16.89 V/g的KD12000L压电式传感器,结合SVSA动态数据采集仪对6个楼层的三向振动加速度时程进行测试,采样频率设置为200 Hz。为了确定环境振动对室内舒适度的主要影响因素,另在室外的自由场地处布置一个测点,以分析土层振动与楼板振动的频谱特性区别。

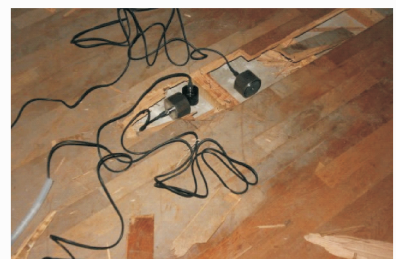
以往实测结果表明,地铁环境振动表现出较强的非平稳特性,因此结合 Morlet 小波时-频谱和功率谱^[12]及对楼板振动进行分析,按照ISO2631:Part I和Part II舒适度评价标准^[13-14]及国内的JGJ/T 170-2009地铁环境振动评价标准^[15],作出10趟列车通过时的1/3倍频程分频振级平均值后,与舒适度限值进行比较。



(a) 自由场地
(a) Open field for measuring



(b) 6层居民建筑北视图
(b) North view of six-story residential



(c) 室内楼板三向振动测试
(c) Vibration measuring on floorslab in three orthogonal directions

图2 自由场地和6层居民楼现场照片

Fig. 2 Photos of the open field and the six-story residential

2.2 测试结果及分析

作出室外自由场地和室内1层楼面板的竖向振动加速度时程、功率谱及小波时-频谱如图3所示。另作出10趟列车通过时,第1,2,6层楼面的1/3倍频程分频振级平均值及随楼层的变化情况,如图4所示。

由图3的测试结果可知:a.室外自由场地的环境振动能量主要集中于20~80 Hz,呈冲击振动和宽频振动特性;b.室内1层楼面的竖向振动的频率成分相对单一,主要位于39 Hz处,也呈现出冲击振动特性;c.室外自由场地处环境振动的功率谱峰值为0.004 (m/s²/Hz),而室内1层楼面的功率谱峰值为0.2 (m/s²/Hz)。

结合该建筑的抗震性能鉴定报告,首层楼面板的竖向自振频率约为39 Hz。结合上述实测结论可知,

地铁环境振动在由墙体传递至室内楼板后,引发了强烈的楼板平面外振动,因此楼板的竖向自振频率是影响室内舒适度的主要因素。由此可知,在减小地铁环境振动对邻近建筑室内舒适度的影响时,应尽量使得环境振动频率区间远离楼板的竖向自振频率。

由图4(a)~(c)的分频振级测试结果可知,地铁引起该建筑物的室内竖向振级严重超出了舒适度标准限值,室内振感强烈。水平向振动则相对较小,但仍有超标的可能性(如2层和6层楼面的横向振动),应引起注意。图4(d)~(e)的实测结果表明:

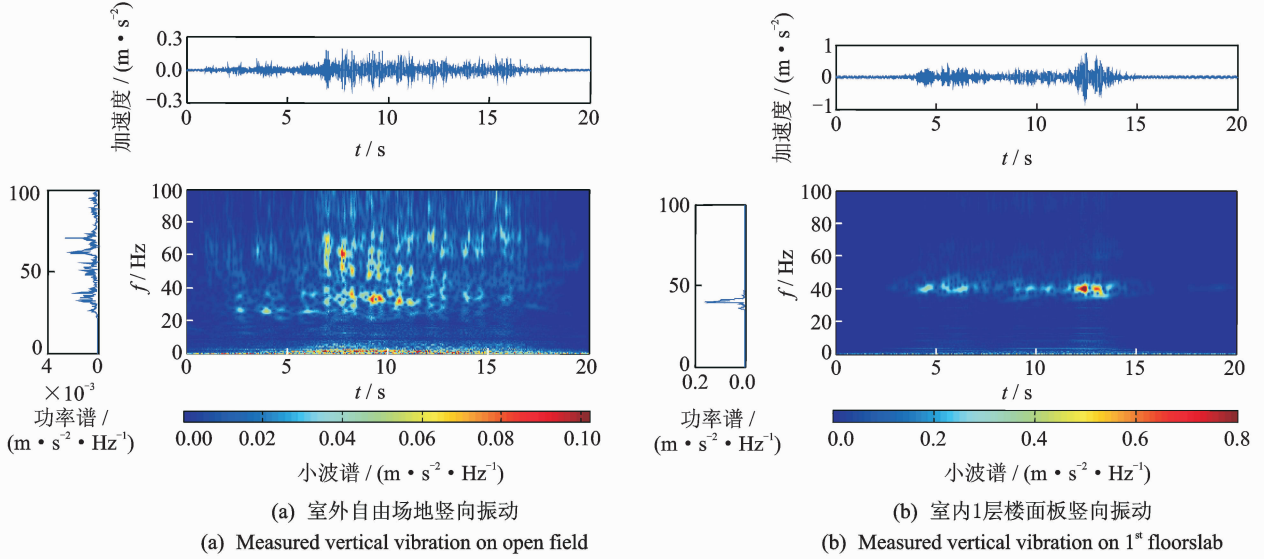


图3 室外自由场地和室内1层楼面的竖向振动加速度时程、功率谱及小波时-频谱

Fig. 3 Accelerations, PSD and wavelet time-frequency spectrum of the vertical vibrations on open field and the 1st floorslab

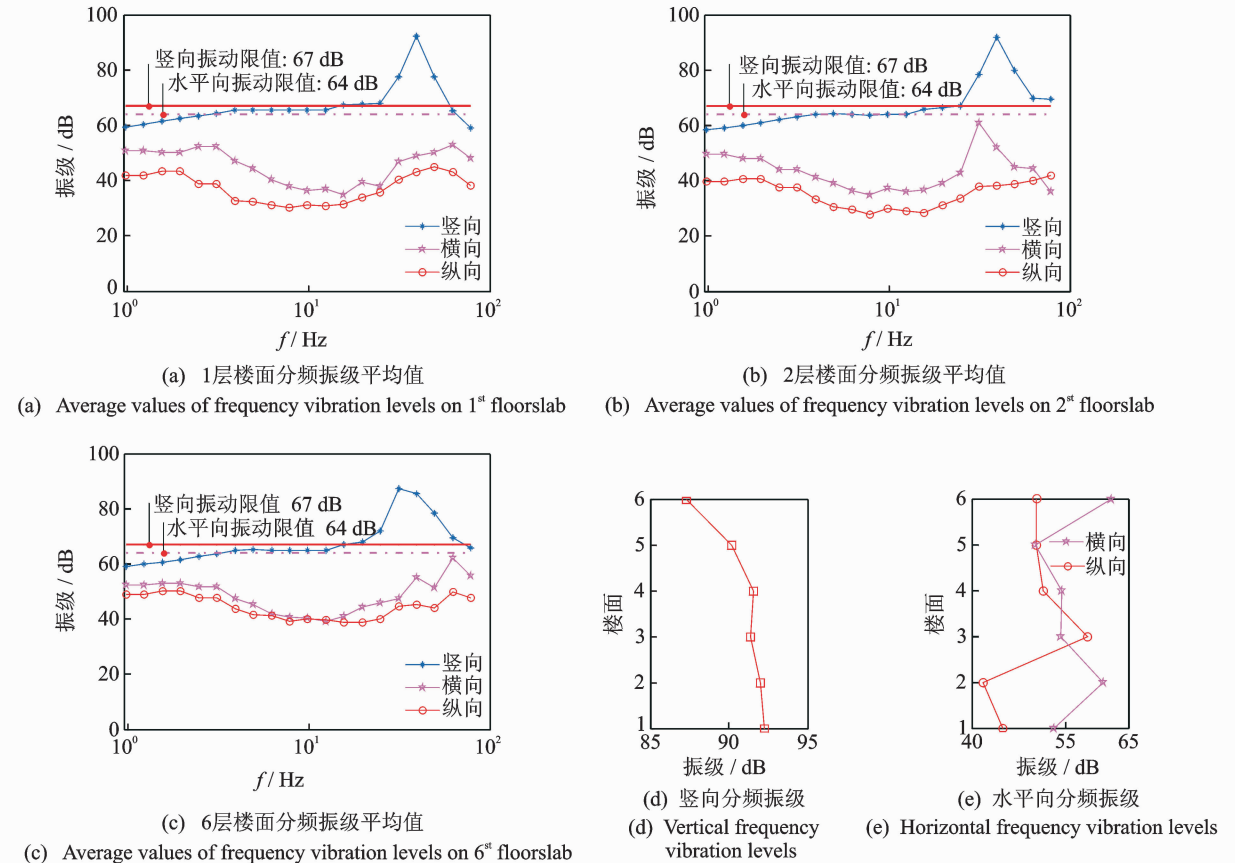


图4 1,2,6层楼面的分频振级平均值和沿楼层的变化趋势

Fig. 4 Average frequency vibration levels on the 1st, 2nd, 6th floorslabs, and the variation tendency with floors

a. 竖向振级沿楼层往上逐层减小,6 层楼面相对于 1 层楼面减小了约 5 dB;b. 地铁激励下建筑结构的水平向振动以高阶振型为主,在一些特定楼层存在舒适度超标的可能性,如第 3 层和第 6 层的纵向、第 2 层的横向振级。因此,在一些敏感地段还应采取辅助措施减小水平向地铁环境振动对建筑物的影响。

3 更换扣件的减振效应实测与分析

3.1 扣件减振原理

扣件是钢轨与轨枕的联接零件,用于保证轨道结构的弹性和整体稳定性。扣件系统可以看作是扣件弹簧 K_f 和轨下垫层弹簧 K_p 的并联,其计算简图如图 5(a)所示,因此其竖向刚度 K_{fv} 约为 K_f 和 K_p 之和。

目前,我国轨道交通系统中应用的减振型扣件主要分为两类,一种是 K_{fv} 值约为 17~50 kN/mm 的一般弹性扣件;另一种是 K_{fv} 值约为 10~17 kN/mm 或更小的高弹性扣件。扣件系统的形状复杂性决定了其较难应用材料力学的方法计算其竖向刚度,一般应用实验方法进行测试^[16]。

3.2 测试方法

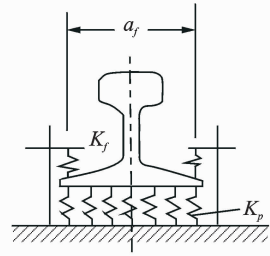
为了分析由英国 PANDROL 公司研发的 Vanguard 高弹性扣件对室内舒适度的提升效果(扣件的构造细节如图 5(b)所示),在位于上述 6 层居民建筑正下方的地铁隧道内,沿线 1 km 处应用该类高弹性扣件代替不具有减振性能的扣件后,对室内舒适度再次进行测试。现场更换扣件后的照片如图 5(c)所示。

本次测试所用的仪器与第 2 节相同。为简化分析,仅在首层楼面布置一个测点,同时测量三个正交方向的振动加速度时程。

3.3 实测结果及分析

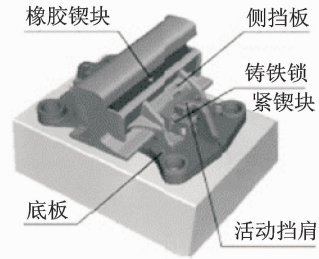
某趟列车通过时的楼板竖向振动加速度时程、功率谱及小波时-频谱如图 6(a)所示。按国内外舒适度相关标准^[13-15]作出 10 趟列车通过时,更换扣件前后的 1/3 倍频段分频振级平均值,如图 6(b)~(d)所示。

比较图 6(a)和图 3(b)的测试结果可知,更换高弹性扣件后,楼板的竖向振动能量在时间轴上更为集中,功率谱则仅为更换扣件前的 1/4。



(a) 扣件系统计算简图

(a) Calculation diagram of fastener



(b) Vanguard高弹性隔振扣件

(b) Vanguard high elastic vibration isolation fastener



(c) 更换高弹性扣件后的轨道照片

(c) Photo of the rail with high elastic fasteners

图 5 轨道扣件系统的计算简图及 Vanguard 高弹性扣件

Fig. 5 Track fastener system and Vanguard high elastic fastener

图 6(b)的竖向振级实测结果表明,高弹性扣件对室内竖向舒适度具有明显的提升效应,1~80 Hz 范围内各频率处的振级均有所减小,在 39 Hz 处减小了约 10 dB。

图 6(c)的横向测试结果表明,除了在 50 Hz 处出现了约 8 dB 的放大现象外,其他频率处的振级与更换扣件前基本相似,因此更换高弹性扣件对室内横向振级的控制效果不明显。图 6(d)的纵向测试结果则表明,高弹性扣件对室内的纵向振级有明显的负面效应,导致所有频率处的振级平均增加了约 10 dB,最大增幅约 15 dB。这与高弹性扣件使得钢轨的弯曲变形更为明显、进而增加车轮沿钢轨的纵向爬行力有较大关系,在实际工程应用时应引起重视。

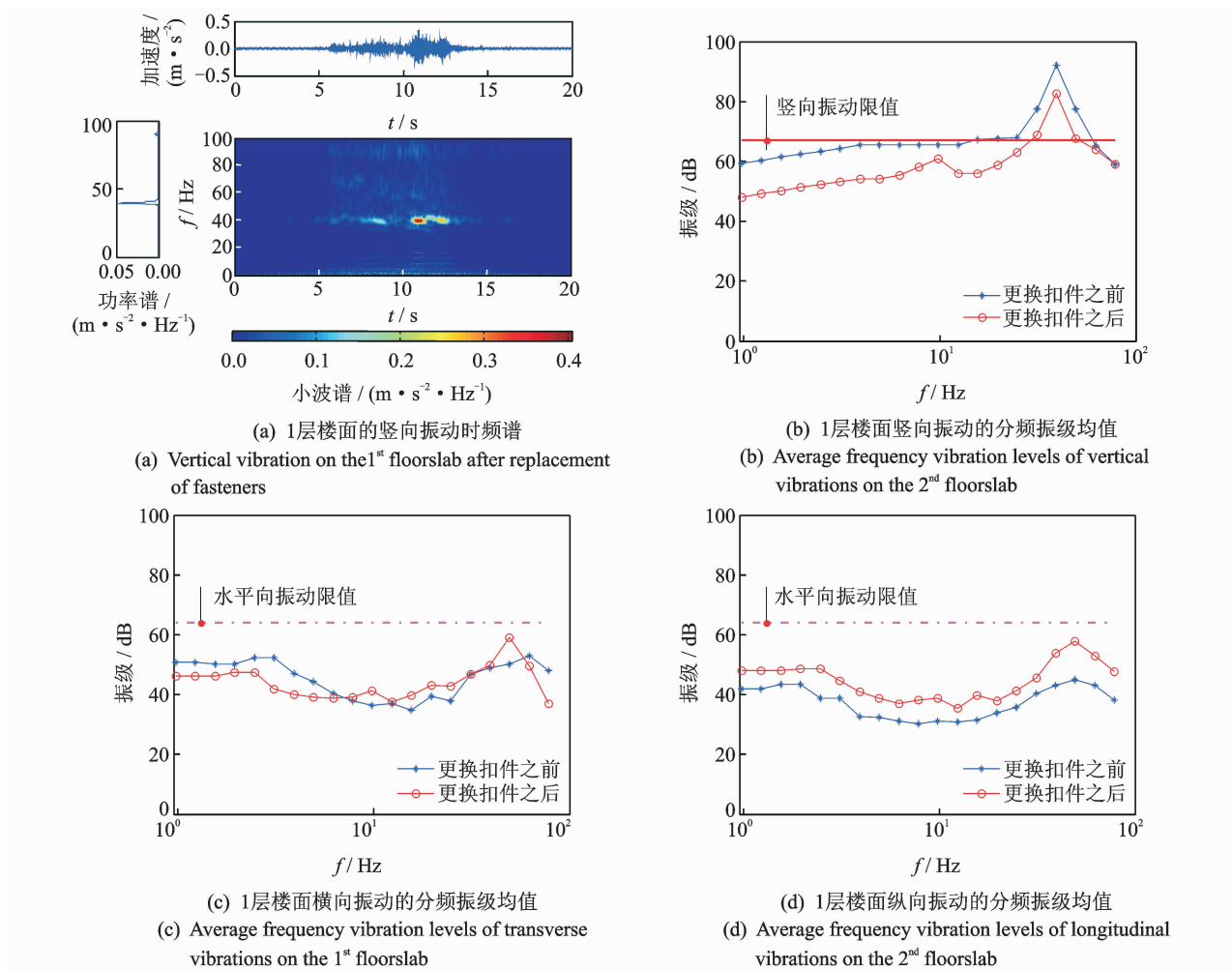


图 6 更换扣件后, 1 层楼面的竖向振动时-频特性及三向振动的分频振级

Fig. 6 Vertical vibrations time-frequency spectrum and the orthogonal average frequency vibration levels on the 1st floorslab

4 降低列车行驶速度的减振效应实测与分析

4.1 降速的振动控制原理与测试方法

行驶状态的列车作用于轨道上的力大体可以分为竖直力、水平横向力和水平纵向力三种,其大小均与列车行驶速度直接或间接相关^[16]。为了分析列车行驶速度对邻近建筑室内舒适度的影响,将列车行驶速度的平均值由之前的 60 km/h 降低为 36 km/h 后,再次对室内舒适度进行实测。测点的布置位置、测试方向及所用设备、仪器等,均与更换扣件后的实测过程相同。

4.2 实测结果及分析

某趟列车通过时的楼板竖向振动加速度时程、功率谱及小波时-频谱如图 7(a)所示。按舒适度相

关标准^[13-15]作出 10 趟列车通过时,降速前后的 1/3 倍频程分频振级平均值,如图 7(b)~(d)所示。

比较图 7(a)、图 6(a)和图 3(b)的测试结果可知,降低列车行驶速度后,楼板的竖向振动能量不仅在时间轴区域上更分散、且功率谱更小,这对于以 1 s 为计权时间的评价体系而言^[12-14],对舒适度的提升更为有利。

图 7(c)~(d)的测试结果表明,降低列车行驶速度对室内楼板在三个正交方向的舒适度均具有明显的提升效果,其中竖向振级在楼板自振频率处(39 Hz)减小了约 8 dB;横向及纵向振级在各频率处最大减小了约 30 dB,平均减小了约 8 dB。

需要说明的是,在结合应用了高弹性扣件和降低列车行驶速度两种方法之后,室内舒适度虽有了较大幅度的提升,使得竖向 1/3 倍频程分频振级最大减小了约 18 dB,但对于文中所述的实例而言,楼

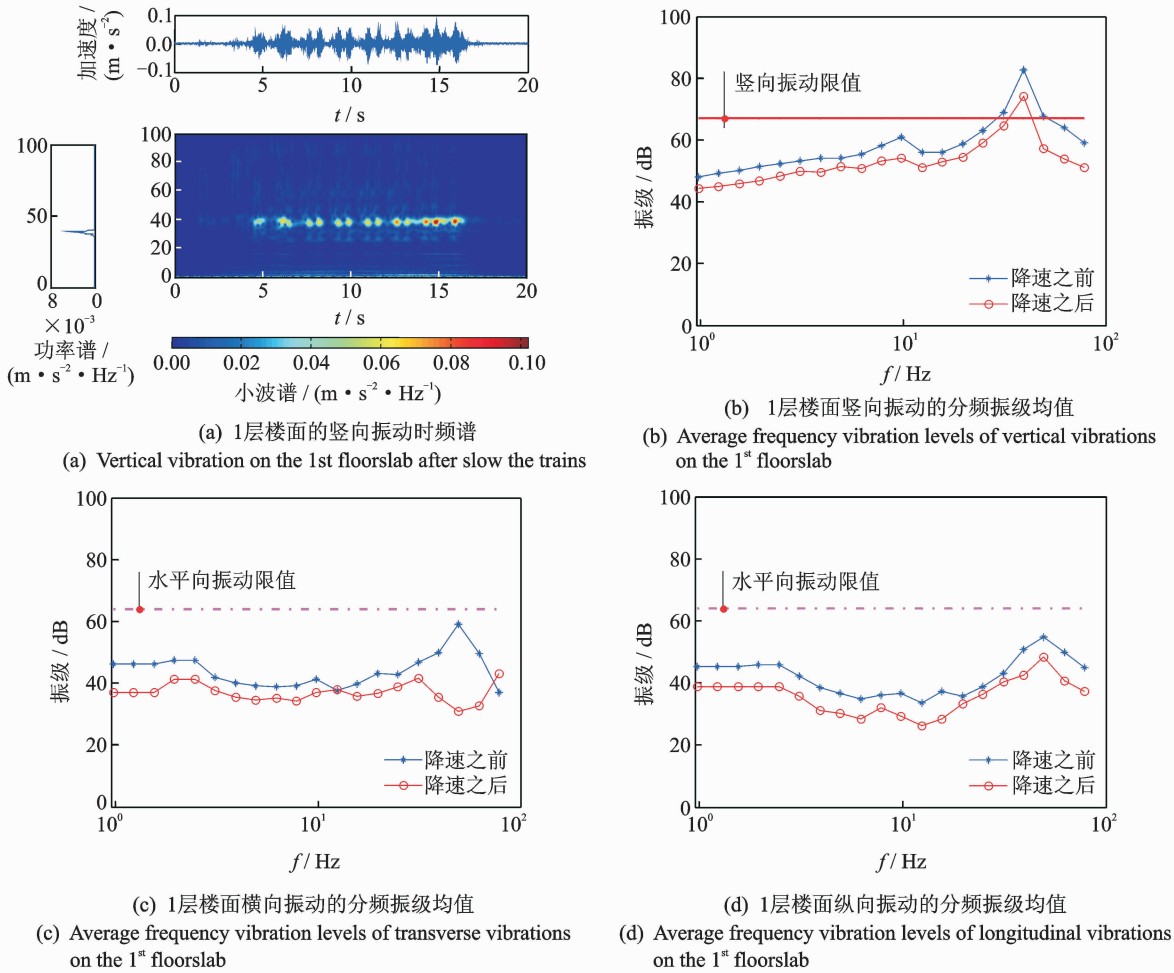


图 7 降低列车速度后,1 层楼面的竖向振动时-频特性及三向振动分频振级

Fig. 7 Time-frequency spectrum of the vertical vibration and the orthogonal average frequency vibration levels on the 1st floorslab

板的竖向舒适度仍超出标准约 6 dB,因此还需结合其他方法进一步提升室内舒适度,以满足 JGJ/T170-2009 规范的限值要求^[15]。

5 结 论

1) 地铁环境振动主要引起室内楼板的竖向振动,其与楼板的竖向自振频率直接相关,且沿楼层往上逐层减小,本例中的 6 层楼面相对于 1 层楼面减小了约 5 dB。

2) 楼板的水平向振动主要受整体结构高阶振型的影响,在某些特定楼层有出现水平向舒适度超标的可能性。因此在部分敏感地段,还应控制地铁水平向环境振动对室内舒适度的影响。

3) 更换高弹性扣件能明显减小室内楼板的竖向振级,在峰值处可减小约 10 dB,但也明显放大了

其纵向振级,对横向振动的控制效果不明显。

4) 降低列车速度对三个正交方向的室内舒适度均具有明显的提升效果,竖向振级在峰值处减小约 8 dB,横向和纵向振级最大减小约 30 dB,可用于某些环境振动敏感区域进行振动控制。

参 考 文 献

[1] 夏禾. 交通环境振动工程[M]. 北京: 科学出版社, 2010:1-5.

[2] Peris E, Woodcock J, Sica G. Annoyance due to railway vibration at different times of the day[J]. Journal of Acoustical Society of America, 2012, 131(2): 191-196.

[3] Sanayei M, Maurya P, Moore J A. Measurement of building foundation and ground-borne vibrations due to surface trains and subways [J]. Engineering Struc-

- tures, 2013, 53(8):102-111.
- [4] 盛涛. 城市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: 1-3, 47-48.
- [5] Connolly D P, Kouroussis G, Giannopoulos A. Assessment of railway vibrations using an efficient scoring model [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2014, 58(3): 37-47.
- [6] 冯青松, 雷晓燕. 基于 2.5 维有限元-边界元分析轨道随机不平顺影响下的铁路地基振动 [J]. *振动与冲击*, 2013, 32(23): 13-19.
Feng Qingsong, Lei Xiaoyan. Railway ground vibration with track random irregularities based on 2.5D finite element-boundary element method [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2013, 32(23): 13-19. (in Chinese)
- [7] Adam M, Von E O. Reduction of train-induced building vibrations by using open and filled trenches [J]. *Computers and Structures*, 2005, 83(1): 11-24.
- [8] 袁俊, 孟昭博, 胡卫兵. 振源传导桩隔振系统作用机理与性能 [J]. *振动、测试与诊断*, 2014, 34(1): 57-62.
Yuan Jun, Meng Zhaobo, Hu Weibing. Vibration isolation mechanism and performance of excitation transmission pile system [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2014, 34(1): 57-62. (in Chinese)
- [9] Cho Tongjun. Experimental and numerical analysis of floating floor resonance and its effect on impact sound transmission [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2013, 332(25): 6552-6561.
- [10] 孙成龙, 高亮. 北京地铁 5 号线钢弹簧浮置板轨道减振效果测试与分析 [J]. *铁道建筑*, 2011, 4(4): 110-113.
Sun Chenglong, Gao Liang. Measurement and analysis of the steel floating slab effectiveness of line 5 Beijing subway [J]. *Railway Construction*, 2011, 4(4): 110-113. (in Chinese)
- [11] 刘建达, 苏晓梅, 陈国兴. 地铁运行引起的地面振动分析 [J]. *自然灾害学报*, 2007, 16(5): 148-154.
- Liu Jianda, Su Xiaomei, Chen Guoxing. Analysis of ground vibrations induced by passing trains in subway tunnel [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2007, 16(5): 148-154. (in Chinese)
- [12] Lee F D. Conceptual wavelets in digital signal processing [M]. San Diego, California: Space & Signal Publishing, 2009: 90-94.
- [13] International Organization for Standardization. ISO2631-1: 1997, mechanical vibration and shock evaluation of human exposure to whole body vibration, part 1: general requirements [S]. Denver, America: Printed by IHS, 1997.
- [14] International Organization for Standardization. ISO2631-2: 2003, mechanical vibration and shock Evaluation of human exposure to whole body vibration, part 2: vibration in buildings (1 Hz to 80 Hz) [S]. Denver, America: Printed by IHS, 2003.
- [15] 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测量标准 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [16] 陈松良. 轨道工程 [M]. 上海: 同济大学出版社, 2006: 194-198.



第一作者简介: 盛涛, 男, 1984 年 9 月生, 博士、讲师。主要研究方向为地铁环境振动控制及地震工程。曾发表《地铁邻近建筑的厚层橡胶支座基础隔振试验研究》《建筑结构学报》2015 年第 36 卷第 2 期) 等论文。

E-mail: south-west@126.com

通信作者简介: 单伽钰, 男, 1986 年 5 月生, 博士、助理研究员。主要研究方向为地铁环境振动控制及建筑结构健康监测。
E-mail: 08jzshan@tongji.edu.cn

