

轨道交通邻近建筑的砂袋垫层多维隔振试验研究

吴 燕¹, 俞 翔¹, 孙金海¹, 刘干斌^{2*}

(1.宁波市轨道交通物产置业有限公司, 浙江 宁波 315000; 2.宁波大学 土木与环境工程学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 修建了足尺隔振建筑模型, 通过现场试验分析了砂袋垫层对竖向和水平向多维轨道交通环境振动的实际隔振效果. 结果表明: (1)砂袋垫层的压缩和剪切模量较小, 且等效阻尼比较大; (2)应用砂袋垫层后, 隔振频率远低于楼盖竖向和建筑物水平向的自振频率, 且远离轨道交通环境振动的主振频率; (3)应用砂袋垫层隔振措施后, 建筑室内的竖向和水平向加速度峰值减幅分别达 79%和 60%; (4)与此同时, 室内的竖向振动 1/3 倍频程分频振级减小近 15 dB, 水平向分频振级减小近 12 dB. 由此可知, 砂袋垫层可显著提升轨道交通多维激励下邻近建筑的室内舒适度.

关键词: 轨道交通; 砂袋垫层; 足尺建筑模型; 基础隔振

中图分类号: TU352.12; TB533+.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-5132 (2021) 04-0067-05

轨道交通邻近建筑的被动隔振是控制环境振动不利影响的传统措施之一^[1-4], 其主要机理是应用竖向隔振支座降低结构的自振频率, 以减少轨道交通竖向高频振动的传递. 但已有研究表明, 轨道交通运行时诱发的水平向环境振动也对建筑物的室内舒适度具有潜在负面影响^[1,5], 特别是当环境振动的主振频率与建筑结构的水平向高阶振型自振频率一致时, 影响更为明显.

而目前针对轨道交通邻近建筑开发的各类隔振支座以满足竖向隔振需求为主, 对于其水平向隔振需求关注度较小. 此外, 这些支座还存在较多天然缺陷, 例如: 蝶簧或钢弹簧支座^[6]的耐腐蚀性较差, 厚层橡胶支座的竖向刚度离散性较大^[7], 等等. 此外, 这类支座的设计构造也较为复杂, 导致其经济成本较为高昂, 在一定程度上限制了其实际应用范围.

针对以上不足, 在考虑经济成本和施工难度后, 文献[8]提出应用砂袋垫层作为轨道交通邻近建筑竖向隔振支座的新途径, 并结合某三层框架结构的 1/8 缩尺模型对其竖向隔振性能展开了试验研究. 其机理是应用砂袋垫层的竖向低刚度和摩

擦耗能特性^[9], 减少轨道交通环境振动的传递. 但其并未对砂袋垫层的水平向隔振性能展开试验研究, 且因其缩尺比例过小使得砂袋垫层的抗压刚度、阻尼, 以及楼盖的竖向自振频率在相似性上存在较大误差. 因此, 砂袋垫层的实际三向隔振性能还有待更深入的试验研究与验证.

为进一步检验砂袋垫层作为轨道交通邻近建筑基础隔振措施的可行性, 分析砂袋垫层对轨道交通竖向和水平向多维环境振动的实际隔振效果, 本文拟在某空置场地修建一栋足尺隔振建筑模型, 再结合足尺砂袋垫层开展现场试验, 研究结果可为轨道交通邻近建筑的环境振动控制提供技术参考.

1 足尺隔振建筑

本文设计的足尺隔振建筑采用砌体结构, 层高 2.8 m, 平面设计尺寸为 3.0 m×2.8 m. 参照建筑抗震设计规范, 在基础部位设置 300 mm×500 mm 的钢筋混凝土隔振层梁, 混凝土强度等级为 C30. 此外, 现浇楼盖的厚度均设置为 100 mm. 墙体采用实心黏土砖砌筑, 厚度为 240 mm. 上部结构总

收稿日期: 2020-10-28.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journal.lg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 浙江省自然科学基金 (LY18E080011); 宁波市自然科学基金 (2019A610402).

第一作者: 吴燕 (1972—), 女, 江苏海门人, 高级工程师, 主要研究方向: 轨道交通上盖物业开发技术. E-mail: 936474900@qq.com

*通信作者: 刘干斌 (1976—), 男, 江西吉安人, 教授, 主要研究方向: 土结构动力相互作用. E-mail: liuganbin@nbu.edu.cn

质量约 16 t. 图 1 所示为其立面设计. 在其基础部位设置有大功率激振设备, 可模拟输出轨道交通的竖向和水平向多维环境振动激励. 其中, 水平弱轴方向与图 1(a)中含门窗的墙体方向平行, 隔振试验时沿该方向输入水平向激励.

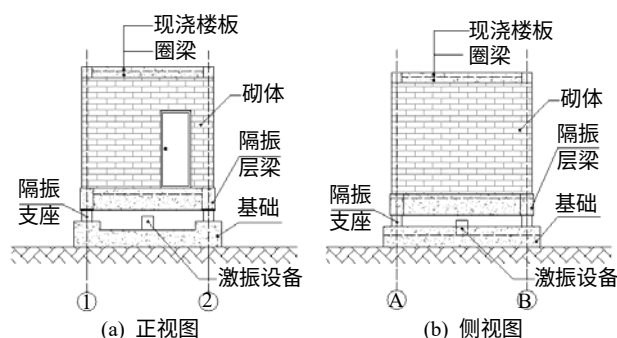


图 1 足尺建筑模型立面

图 2 是施工完成后的足尺建筑现场照片. 在放置砂袋垫层后, 混凝土短柱与上部结构脱离, 仅由砂袋作支承构件. 砂袋尺寸为 $35\text{ cm} \times 35\text{ cm} \times 8\text{ cm}$, 外包装袋为长丝无纺土工布, 内部填充均匀级配的中砂颗粒, 填充度为 100%. 长丝无纺土工布和砂颗粒的物理力学属性见表 1~2.



(a) 建筑正视图



(b) 建筑侧视图

图 2 建筑物及场地照片

表 1 长丝无纺土工布的物理力学属性

密度/ ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)	厚度/ mm	拉伸强度/ ($\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$)	拉伸模量/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)	拉伸率/ %
150	1.2	8	14.2	50

表 2 填充砂的物理力学属性

中值粒 径/mm	不均匀 系数	曲率 系数	密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	含水 率	内摩擦 角/($^{\circ}$)
0.4	2.6	1.14	1.75	0	32

2 砂袋垫层的抗压抗剪试验

应用压剪试验机对叠放层数为 3 层的砂袋垫层开展抗压和抗剪性能试验. 抗压试验主要测试其竖向滞回曲线及极限承载力, 抗剪试验测试其设计压应力下的等效剪切刚度及等效阻尼比. 其中, 抗压试验以 800 kPa 为平衡位置, 通过往复加载获得其滞回曲线; 抗剪试验控制剪应变为 0.5% . 试验结果如图 3 所示.

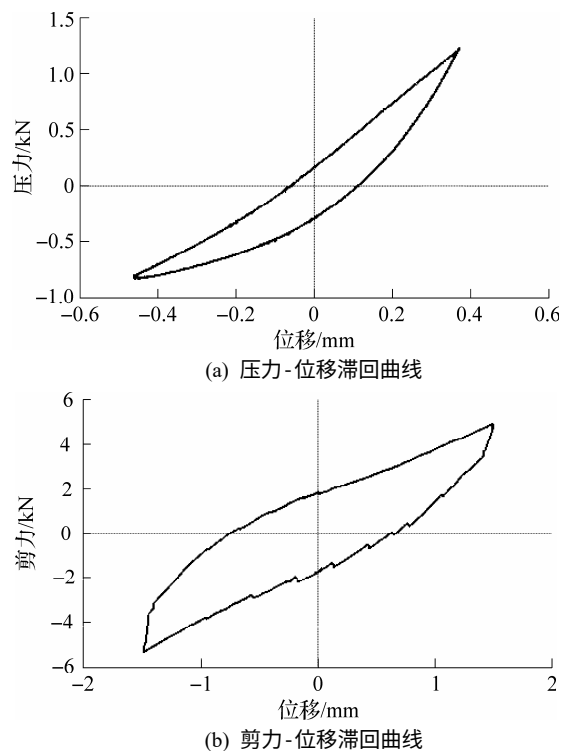


图 3 砂袋垫层的抗压抗剪试验结果

在压力作用下, 砂颗粒之间孔隙率逐渐减小. 图 3(a)中滞回曲线未呈现对称性, 但一定程度上仍能反映砂袋垫层的竖向动力特性. 由滞回曲线换算得到其抗压刚度约为 $2.6\text{ kN} \cdot \text{mm}^{-1}$, 等效阻尼比约为 9%; 等效抗剪刚度约为 $4.0\text{ kN} \cdot \text{mm}^{-1}$, 等效阻尼比约为 12%. 此外, 其极限抗压承载力约 1 MPa , 远小于橡胶隔振支座, 比较适合轻质量建筑. 由此可知, 砂袋垫层的动力性能原理上可满足轨道交通邻近中、低层建筑的竖向和水平向减隔振所需.

3 激振试验设计

3.1 激振试验工况

设计 2 个试验工况, 见表 3。其中, 工况 1 为非隔振, 由 4 根混凝土短柱支承上部结构, 其竖向和水平向隔振频率设计值分别由短柱的抗压、抗弯和抗剪刚度估算得到。工况 2 为基础隔振工况, 采用 4 组砂袋垫层作为隔振支座, 每组砂袋叠放层数为 3 层, 此时砂袋垫层的高宽比小于 1.0, 可保证支承结构的稳定性。开展工况 2 试验时, 为防止不均匀沉降, 在缓慢放松千斤顶和置入砂袋垫层的过程中, 严格控制 4 个支撑部位的沉降变形并实时作出调整, 使得各部位的沉降变形一致。

表 3 试验工况				Hz
工况	支座型式	自振频率		
		竖向	水平向	
1	固定基础	240.0	>20.0	
2	4 组砂袋垫层	2.4	2.7	

表 3 中工况 2 的竖向和水平向隔振频率均由砂袋垫层的抗压、抗剪刚度估算得到。足尺建筑敲击试验的结果表明其自振频率与设计值基本相符。

3.2 测点布置

分别在基础顶面、室内楼面中央布置 2 个加速度传感器。加速度传感器为 LC0132T 高灵敏度压电式传感器, 设置采样频率为 200 Hz, 最大可分辨频率涵盖了规范要求的 4~80 Hz^[10]。

3.3 轨道交通环境振动输入

以上海市某轨道交通邻近建筑基础顶面实测

的竖向和水平向加速度时程作为输入^[3]。其中, 竖向和水平向分别包含由 5 趟列车引起的场地振动, 其采样频率均为 200 Hz。

分别作出某趟列车引起的竖向振动和水平向振动的加速度时程及其功率谱曲线, 如图 4 所示。由功率谱曲线可知, 轨道交通环境振动的竖向主振频率区间为 30~80 Hz, 水平向主振频率区间为 50~60 Hz。

4 试验结果与分析

4.1 竖向隔振性能分析

竖向轨道交通环境振动激励下, 各测点竖向振动加速度峰值的平均值见表 4。工况 1 和工况 2 的基础顶面加速度峰值基本相同, 但工况 2 的室内楼面加速度峰值降幅达 79%, 由此可知砂袋垫层的竖向隔振效果显著。

表 4 各测点竖向振动加速度峰值平均值 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-2}$		
测点位置	$a_{\text{PG,ave}}$	
	工况 1	工况 2
基础顶面	7.2	7.1
室内楼面	16.2	3.4

以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^[10]为依据, 从频域角度分析砂袋垫层对室内舒适度的提升效果。首先将室内楼面实测的加速度时程由快速傅里叶变换转换到频域, 再计算 4~80 Hz 区间内各 1/3 倍频程处的分频振级平均值, 并与居住区限值(2 类区)进行比较, 其结果如图 5 所示。

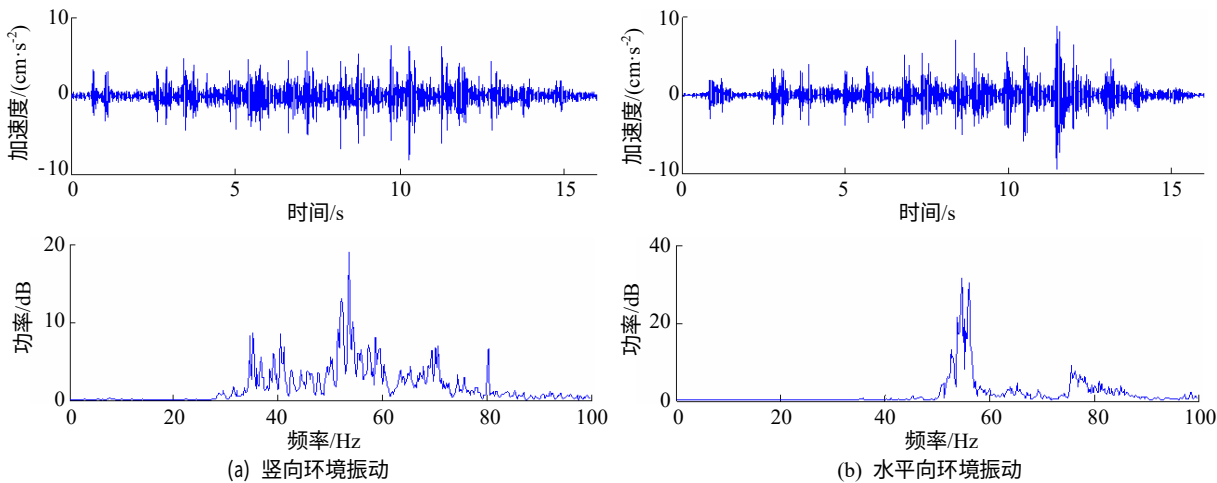


图 4 竖向和水平向轨道交通环境振动输入

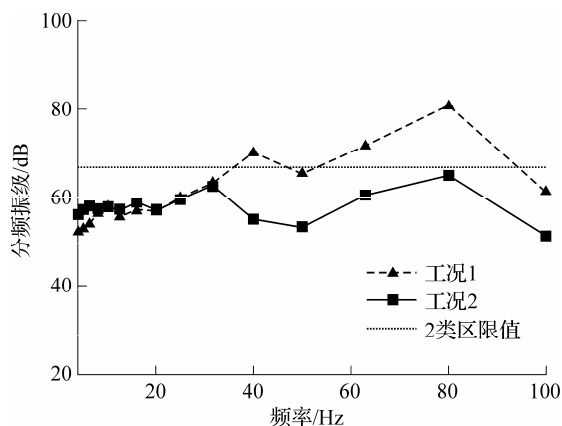


图5 室内楼面竖向 1/3 倍频程分频振级平均值

结果表明, 工况 1 中的分频振级集中在 40 Hz 和 80 Hz 处, 且超出规范限值约 13 dB, 证明轨道交通环境振动引发了楼盖的强烈共振. 工况 2 中的室内楼面振级远小于工况 1, 其中 40 Hz 和 80 Hz 处的振动均降低了约 15 dB, 满足规范限值要求. 虽然低频处的竖向振级有所放大, 但仍远小于规范限值. 上述现象符合结构动力学中基础隔振的相关原理^[11]. 由此可知, 应用砂袋垫层后, 竖向轨道交通环境振动对建筑物的负面影响得到较好控制, 舒适度显著提升.

4.2 水平向隔振性能分析

水平向轨道交通振动激励下, 各测点水平向振动加速度峰值的平均值见表 5. 工况 1 和工况 2 的基础顶面加速度峰值相同, 但工况 2 的室内楼面水平向加速度峰值降幅达 60%, 由此可知, 砂袋垫层对水平向轨道交通环境振动也具有明显的隔振效果.

表5 各测点水平向加速度峰值平均值 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-2}$

测点位置	$a_{\text{PG,ave}}$	
	工况 1	工况 2
基础顶面	14.1	14.1
室内楼面	6.2	2.5

以机械工业环境保护设计规范^[12]为依据, 作出列车经过时室内楼面的水平向 1/3 倍频程分频振级平均值, 并与规范限值进行比较, 如图 6 所示.

结果表明, 工况 1 中的分频振级集中在 63 Hz 和 80 Hz 处, 仅小于规范限值约 1 dB. 结合图 4(b) 中的轨道交通水平向环境振动频谱特性可知, 工况 1 中 60 Hz 附近振动与建筑高阶模态发生了共振.

工况 2 中的室内楼面水平向振级远小于工况 1, 其中 63 Hz 处的振级降低约 12 dB, 且远小于规范限值要求. 同理, 在低频成分附近的水平向振级有所放大, 但幅度较小. 因此, 应用砂袋垫层后, 水平向轨道交通环境振动对建筑物的负面影响也得到较好控制, 舒适度得到显著提升.

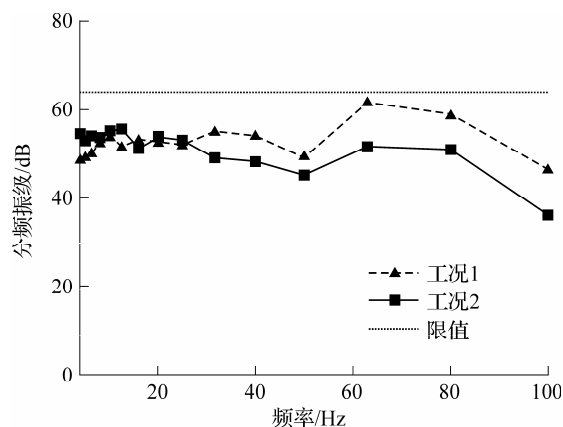


图6 室内楼面水平向 1/3 倍频程分频振级平均值

5 结论

修建了足尺隔振建筑模型, 通过激振试验分析了砂袋垫层对轨道交通竖向和水平向多维环境振动的实际隔振效果, 得出如下结论:

(1) 以 3 层砂袋垫层作为隔振支座时, 竖向和水平向隔振频率远小于建筑物的竖向和水平向自振频率. 此外, 隔振频率与轨道交通竖向和水平向环境振动的主振频率区间也相距较远.

(2) 应用砂袋垫层后, 室内楼面的竖向加速度峰值减幅达 79%, 水平向加速度峰值减幅达 60%, 楼板竖向振动的 1/3 倍频程分频振级也减小了约 15 dB, 水平向振动的分频振级减幅达 12 dB, 室内舒适度均得到显著提升.

综上所述, 砂袋垫层对竖向和水平向轨道交通环境振动的隔振效果显著, 且因其显著的经济性, 在实际工程中具有较高的推广和应用价值. 但需要说明的是, 砂袋垫层的竖向承载力偏低, 目前仅适合于中、低层建筑物. 如何进一步提高其承载力, 使其适应于更多建筑还有待展开更深入研究.

参考文献:

- [1] Talbot J P, Hunt H E M. Isolation of buildings from rail-tunnel vibration: A review[J]. Building Acoustics,

- 2003, 10(3):177-192.
- [2] 李爱群, 王维. 三维多功能隔振支座设计及其在地铁建筑减振中的应用[J]. 地震工程与工程振动, 2014, 34(2):202-208.
- [3] 盛涛, 李亚明, 张晖, 等. 地铁邻近建筑的厚层橡胶支座基础隔振试验研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(2): 35-40.
- [4] 谢伟平, 王政印, 孙亮明. 地铁车辆段新型隔振支座的减振效果研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(10):63-70.
- [5] 盛涛, 张善莉, 单伽程, 等. 地铁诱发的环境振动及振源减振效应的实测与分析[J]. 振动. 测试与诊断, 2015, 35(2):352-358.
- [6] Ou J P, Jia J F. Seismic performance of a novel 3D isolation system on continuous bridges[C]//SPIE Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation and Health Monitoring, 2010:764304.
- [7] 何文福, 刘文光, 杨彦飞, 等. 厚层橡胶隔震支座基本力学性能试验[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2011, 12(3):258-263.
- [8] 盛涛, 李水明, 刘干斌, 等. 地铁邻近建筑的砂袋垫层基础隔振试验研究[J]. 振动与冲击, 2017, 36(24):44-50.
- [9] 刘斯宏, 高军军, 王艳巧. 土工袋减振隔振机制分析及试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(2):325-332.
- [10] JGJ/T 170-2009. 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].
- [11] Chopra A K. Dynamics of Structures: Theory and Applications in Earthquake Engineering[M]. New Jersey: Pearson Education Press, 2011: 590-591.
- [12] JBJ 16-2000. 机械工业环境保护设计规范[S].

Vibration suppressing test of a building with sandbag layers neighboring rail transportation

WU Yan¹, YU Xiang¹, SUN Jinhai¹, LIU Ganbin^{2*}

(1.Ningbo Transit Property Co., Ltd., Ningbo 315000, China;

2.School of Civil and Environmental Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: The vibration isolation effect of sandbag layers for the vertical and horizontal metro environmental vibration has been tested in this paper with a full-scale building model. The test results showed that: (1) The vertical and horizontal stiffness of sandbag layers were both small, and the equivalent damping ratios were high. (2) The isolation frequencies of buildings after installed sandbag layers were lower than the main frequency zones of subway environmental vibration. (3) The vertical and horizontal peak values of indoor acceleration were reduced greatly by using the sandbag layers, and the reduction magnitude reached 79% and 60%, respectively. (4) After installation of sandbag layers, the vertical third-octave frequency vibration levels were nearly reduced by 15 dB, and the horizontal frequency vibration levels were nearly reduced by 12 dB. So, the sandbag layers are beneficial to controlling the negative effect of metro environmental vibration, thus improving the human comfort inside the building.

Key words: subway transportation; sandbag layer; full-scale building model; base-isolation

(责任编辑 韩 超)