

地铁诱发的砖混结构环境振动 及传递规律研究

王振刚

(中铁第四勘察设计院集团有限公司, 武汉 430063)

摘要:为解决地铁运行引起的邻近砖混结构环境振动问题,以某7层砖混结构为研究对象,实测隧道内、室外地面、结构楼板的振动响应,分析振动沿“隧道-地面-结构”的传递规律,并由此提出建筑物内环境振动超标可能的原因:隧道埋深浅、建筑与隧道距离近且处于同个土层使得土体对振动的衰减效果较差;结构部分楼板共振导致振动响应超过评价规定的室外地面和室内首层。进一步建立该砖混结构的有限元模型,采用实测柱底竖向加速度作为荷载,并对比实测楼板响应验证模型的准确性。模拟计算结果证实中间层及顶层楼板的放大效应,并通过分析获得了楼层数量、层高、板厚、墙厚参数对振动响应空间分布的影响。研究成果对砖混结构的环境振动评价具有一定参考价值。

关键词: 地铁; 环境振动; 砖混结构; 环境影响评价; 数值模拟

中图分类号: U231; TU311.3

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2024)04-0080-08

Environmental Vibration and Propagation Laws of Brick-Concrete Structures Induced by Subways

WANG Zhengang

(China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan 430063)

Abstract: This study addresses the environmental vibration issues of adjacent brick-concrete structures induced by subway operations, focusing on a 7-story brick-concrete building as the primary investigation subject. Vibrations were measured at the tunnel, outdoor ground level, and various structural floors to analyze the propagation characteristics along the “tunnel-ground-structure” path. The study aims to identify reasons for vibration levels exceeding standards. Key factors contributing to the issue include the shallow depth of tunnel burial, the proximity of buildings to the tunnel, and their shared soil layer, resulting in inadequate vibration attenuation through the soil. Additionally, resonance effects within specific floor slabs of the structure contribute to vibration responses surpassing evaluation standards outdoors and on the first indoor floor. A finite element model of the brick-concrete structure was constructed using measured vertical accelerations at column bases as loads. The model's accuracy was validated against measured floor responses, confirming amplification effects on middle and upper floors. Parametric analysis explored the impacts of floor count, story height, slab thickness, and wall thickness on the spatial distribution of vibration responses. The findings from this study provide valuable insights for evaluating environmental vibrations in similar structures, offering guidance for mitigating effects and ensuring compliance with vibration standards.

Keywords: subway; environmental vibration; brick-concrete structure; environmental impact assessment; numerical simulation

收稿日期: 2024-04-04 修回日期: 2024-05-16

作者简介: 王振刚, 男, 硕士, 高级工程师, 从事噪声振动与水污染防治研究, 35383233@qq.com

基金项目: 中国铁建股份有限公司科技研发计划项目(2022-A02)

引用格式: 王振刚. 地铁诱发的砖混结构环境振动及传递规律研究[J]. 都市轨道交通, 2024, 37(4): 80-87.

WANG Zhengang. Environmental vibration and propagation laws of brick-concrete structures induced by subways[J].

Urban rapid rail transit, 2024, 37(4): 80-87.

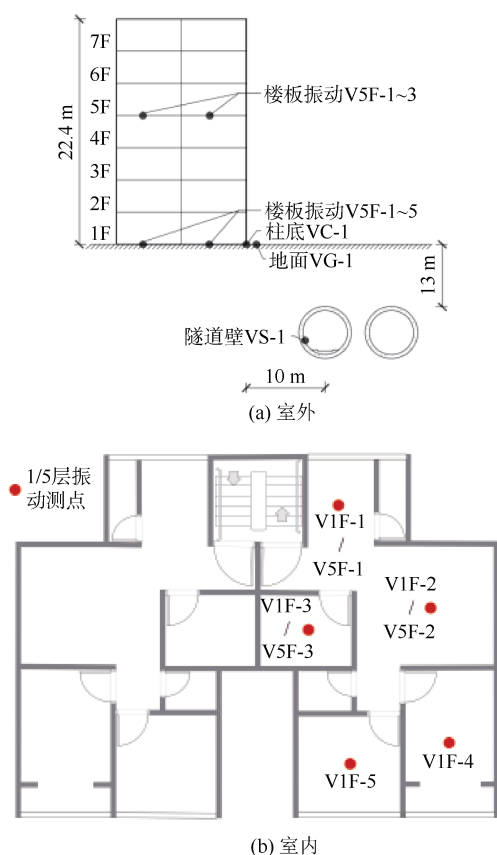


图2 测点布置

Figure 2 measuring point arrangement

2.2 振源与地面振动对比分析

通过对比隧道壁及室外 0.5 m 处振动, 分析地铁振动传播中的频率变化。图 3 为上述测点(VS-1、VG-1)平均 1/3 倍频程谱对比结果(未进行 Z 计权, 下同)。

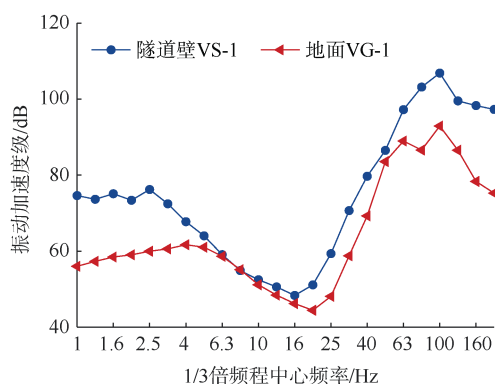


图3 振源与地面振动 1/3 倍频程谱对比

Figure 3 Comparison of vibration source and ground vibration in 1/3 octave spectrum

由图 3 分析可知, 振源经土体传至地面过程中, 土体中的衰减效果不明显, 5~63 Hz 频段的衰减量在 5 dB 以下, 其中 6.3~16 Hz 几乎不衰减。原因是结

构距离地铁近(10 m)、隧道埋深浅(13 m)且基础与隧道处于同个土层(粉质黏土)。

2.3 室内外振动对比分析

图 4 为室内外测点(VG-1、VIF-1、VIF-2、VIF-3、VIF-4、VIF-5)处平均 1/3 倍频程谱对比结果。

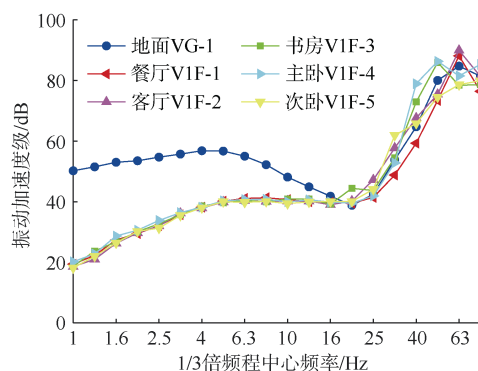


图4 室内外振动 1/3 倍频程谱对比

Figure 4 Comparison of 1/3 octave spectrum of vibrations indoor and outdoor

由图 4 可以看出, 1~16 Hz 频段首层楼板振级基本相同, 且室外地面振动大于室内, 在 16~80 Hz 处, 楼板在部分频段处的振级超过室外, 书房 VIF-3、主卧 VIF-4 在 50 Hz 处, 餐厅 VIF-1、客厅 VIF-2 在 63 Hz 处振级达到最大且超出地面。

这一现象可能是由于车致振动传至建筑物在 50~63 Hz 引起楼板共振, 这与楼板的自振频率特性相关。选取首层典型楼板(VIF-1)进行分析。图 5 为环境激励下楼板响应的自功率谱, 表明该楼板的自振频率为 61.7 Hz。图 6 为某次列车通过时室外地面与该楼板振动响应的频谱对比。可以看出, 相比地面振动, 该楼板在自振频率附近(61.8 Hz)出现明显峰值, 验证了由于共振导致振动放大效应。

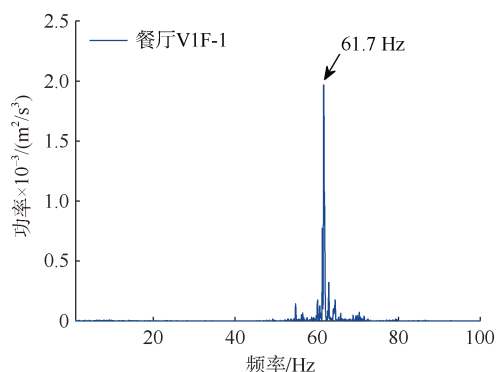


图5 环境激励下楼板(VIF-1)动力响应自功率谱

Figure 5 Self-power spectrum of the dynamic response of floor (VIF-1) under environmental excitation

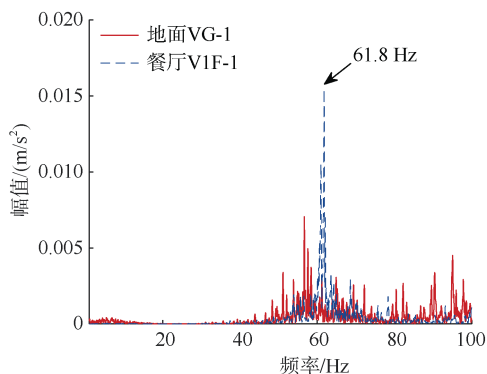


图6 楼板响应(V1F-1)与地面振动(VG-1)的频谱对比
Figure 6 Spectrum comparison of floor response (V1F-1) and ground vibration (VG-1)

下面进一步对比分析1层与5层楼板的动力响应,研究结构不同空间位置的振动。图7为测点(V1F-1、V1F-2、V5F-1、V5F-2)平均1/3倍频程谱对比结果。由图7可知,5层楼板响应在1~25 Hz的低频范围内相比首层有明显增大。在50~80 Hz振级随楼层增加而减小。这种振动空间分布规律与砖混结构整体模式的自振频率与振型特性相关。

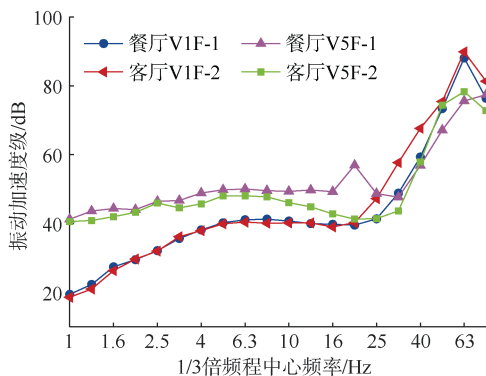


图7 1、5层振动1/3倍频程谱对比
Figure 7 Comparison of 1/3 octave spectrum of vibrations on the first and fifth floor

2.4 环境振动评价结果

参考该区间线路的环评报告,振动评价采用《城市区域环境振动标准》(GB 10070—88)^[13]中“交通干线道路两侧”标准,评价位置为建筑室外0.5 m内及室内地面中央,评价量为Z振级 VL_Z ,昼间限值为75 dB。表1为该建筑物环境振动评价结果。

评价结果显示,室内外测点的振动均有超标。个别车次数据表明,在室外测点超标量较小的情况下,室内部分楼板的振动可能比室外地面振动更大,出现明显的超标现象。通过分析原因如下:隧道埋深浅、

建筑与隧道距离近且处于同个土层使得土体对振动的衰减效果较差;结构部分楼板共振导致振动响应超过评价规定的室外地面和室内首层。

表1 室内外振动评价结果

Table 1 Evaluation results of indoor and outdoor vibrations

评价位置	测量值/dB	评价结果
室外地面(VG-1)	77.8	超标 2.5 dB
首层餐厅(V1F-1)	78.3	超标 3.3 dB
首层客厅(V1F-2)	80.0	超标 5 dB
首层书房(V1F-3)	79.0	超标 4 dB
首层主卧(V1F-4)	73.1	未超标
首层主卧(V1F-5)	81.9	超标 6.9 dB
5层餐厅(V5F-1)	71.3	未超标
5层客厅(V5F-2)	73.5	未超标
5层书房(V5F-3)	76.1	超标 1.1 dB

3 砖混结构车致振动数值模拟

本节建立研究对象的有限元模型,加载实测柱底振动并进行参数化分析,研究影响结构响应分布的因素及影响规律。

3.1 有限元模型及荷载

采用文献[14]提出的基于舒适度评价的结构精细化建模方法,考虑弱振下非结构构件和局部构造对结构动力特性的影响建立模型。表2为模型中结构构件材料参数取值。使用ANSYS软件建立模型,梁、柱采用BEAM188单元,梁截面240 mm×240 mm,柱截面240 mm×240 mm;楼板以及承重砖墙使用SHELL181单元,板厚140 mm,墙厚240 mm;单元尺寸为0.5 m;约束模型底部边界;采用Rayleigh阻尼,阻尼比取值为0.01。建立的有限元模型如图8所示。

表2 结构构件材料参数

Table 2 Material parameters of structural components

构件类型	弹性模量/GPa	密度/(kg/m³)	泊松比
柱	35.5	2 500	0.2
梁	35.5	2 500	0.2
楼板	33.5	2 500	0.2
墙体	1.29	1 800	0.15

考虑到地铁环境振动以竖向为主,水平向加速度较小,且本研究主要分析楼板竖向振动,因此车致振动荷载使用实测柱底测点(VC-1)的竖向加速度,采用大质量法加载,计算时间步长为0.005 s。同步测得室外地面(VG-1)最大Z振级为81.9 dB,5层客厅(V5F-2)

楼板中心振动、频谱图峰值分别为 48.6、56 Hz。

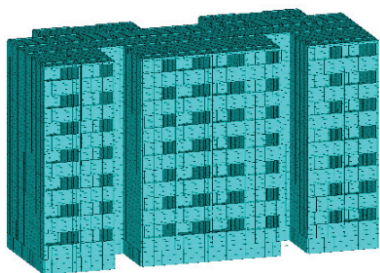


图8 有限元模型
Figure 8 Finite element model

3.2 模型验证

通过对比实测与模拟结果验证结构模型的准确性。计算得到的5层第3户内楼板中心处测点(V5F-1、V5F-2、V5F-3)的最大Z振级分别为75.1、73.4、81.9 dB,而实测值分别为73.5、71.5、79.8 dB。模拟值与实测值分别相差1.6、1.9、2.1 dB,吻合良好。对于响应的频谱特性,以客厅测点(V5F-2)为例,实测与模拟的频谱结果(包络图)对比见图9。

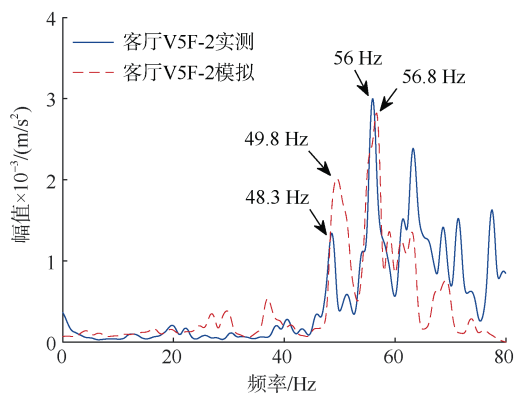


图9 模拟与实测的频谱对比

Figure 9 Comparison between simulation and actual measurement

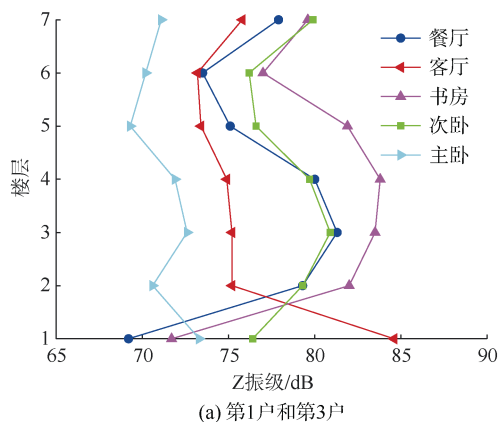
由图9可以看出,模拟得到的振动响应频谱与实测频率分布相似。在楼板自振频率附近,模拟结构响应的卓越频率为49.8 Hz和56.8 Hz,与实测结果48.3 Hz、56.0 Hz相比,相对误差在5%以下。但在70 Hz以上的较高频率模拟和实测仍存在差异,原因可能是实际楼板装饰面层、附加质量(家具)等因素使楼板的自振频率特性更复杂。

综上所述,本文建立的砖混结构有限元模型准确性满足环境振动分析的需要,可用于后续分析。

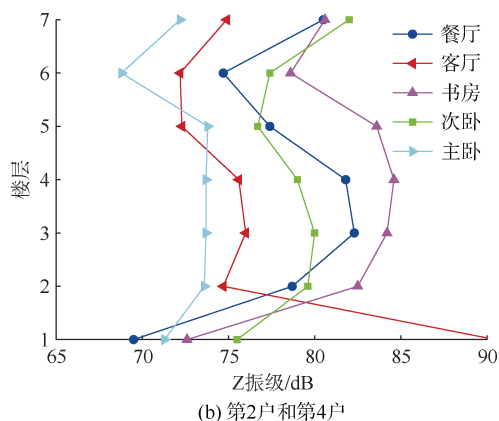
3.3 车致振动响应空间分布

基于验证后的数值模型,分析振动响应的空间分

布规律。图10为各楼层全部楼板中心处振动响应的最大Z振级。由于采用的一致激励方法以及结构自身的对称性,第1与第3户、第2与第4户对应楼板的振动响应相同。



(a) 第1户和第3户



(b) 第2户和第4户

图10 各楼层楼板最大Z振级

Figure 10 Maximum Z-vibration level of each floor

由图10分析可得到以下结论:相同平面位置处楼板的响应随楼层高度并非单调变化,部分位置楼板振动随高度增加先增大后减小再增大,在中间楼层(3层或4层)和顶层出现振动放大现象。而图11中典型位置楼板(第1户次卧房间楼板,下同)在不同楼层的1/3倍频程谱表明,各层楼板振动响应的卓越频率并未发生明显变化。说明这种响应的分布规律与车致荷载激起的结构整体模态的振型特征有关。在振动放大区所在的楼层,最大Z振级能超过此时的室外地面振动水平(81.9 dB)。

3.4 多因素影响分析

动力特性是结构固有属性,受结构参数的共同影响。本节基于上述验证后的数值模型,通过参数化分析,研究楼层数量、楼层高度、楼板厚度、墙体厚度等因素对振动响应分布规律的影响。

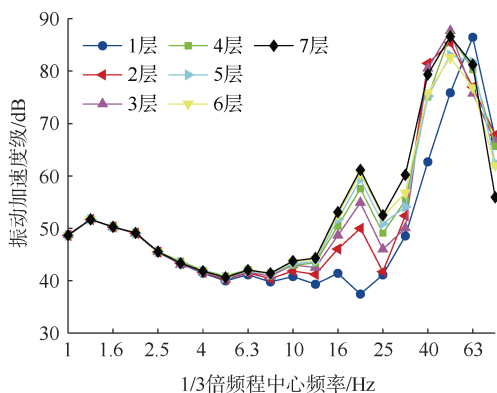


图 11 各楼层相同位置楼板振动 1/3 倍频程谱对比
Figure 11 Comparison of 1/3 octave spectrum of floor vibrations at the same locations on each floor

3.4.1 楼层数量

砖混结构的楼层数量通常为 2~7 层。不同楼层数量砖混结构竖向模态的振型存在差异。楼层数量越多,建筑总高度越高,结构的竖向自振频率越低,在激励频率影响的范围内将出现更高阶的竖向振型,从而导致振动响应分布的改变。本节研究楼层数量的影响规律,保持其他参数不变,只改变楼层数量为 2 层~7 层,计算楼板振动响应。

图 12 为振动响应的高度分布随楼层数量的变化规律。由图中可以看出,楼层数量对楼板振动响应随高度的变化趋势存在明显影响。较少楼层数量的低层建筑顶部楼层的振动响应更大,而随着楼层数量的增加多层建筑更有可能出现中间层放大的现象。

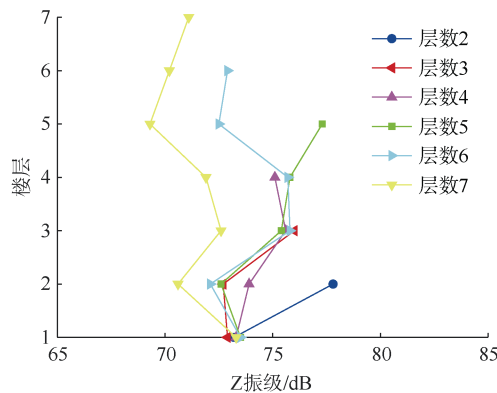


图 12 不同楼层数量时典型楼板振动响应的高度分布
Figure 12 Vibration responses of typical floors with different numbers of stories

3.4.2 楼层高度

楼层高度对结构响应的影响机理与楼层数量的影响相似,均通过改变结构的竖向整体模态,从而影响

车致振动响应的空间分布。本节研究层高的影响规律,保持其他参数不变,只改变层高为 2.8、3.0、3.2、3.4、3.6 m, 计算楼板振动响应。

图 13 为典型楼板振动响应的高度分布随层高的变化。由图中可以看出,层高变化对振动响应随高度的变化趋势影响较小,但会改变中间层放大区的增加值,层高越矮,放大效应越明显。

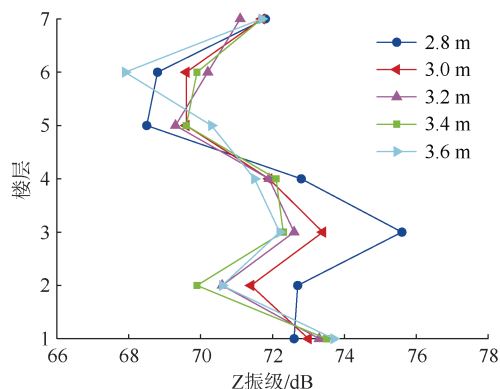


图 13 不同层高时典型楼板振动响应的高度分布
Figure 13 Height distribution of vibration responses of typical floors with different floor heights

3.4.3 楼板厚度

板厚的增加同时提高质量和刚度,但主要改变楼板的局部模态。本节研究板厚的影响规律,保持其他参数不变,只改变板厚为 100、120、140、160、180 mm, 计算楼板振动响应。

图 14 为典型楼板振动响应的高度分布随板厚的变化。由图中可以看出,板厚变化对振动响应随高度的变化趋势影响较小,但会明显改变各层楼板的振动响应水平,板厚越小,振动响应越大。

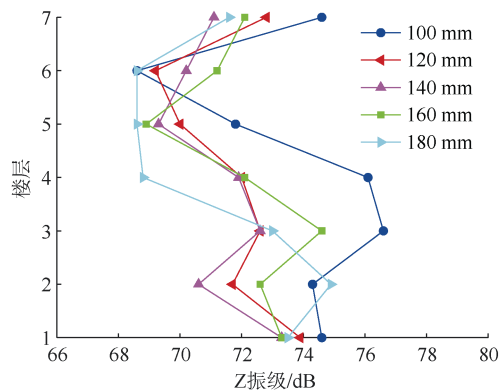


图 14 不同板厚时典型楼板振动响应的高度分布
Figure 14 Height distribution of floor vibration response with different plate thicknesses

3.4.4 墙体厚度

砖混结构的墙体是重要的竖向承重构件。墙厚的变化会影响结构的质量、刚度分布,从而改变结构的竖向整体模态。本节研究墙厚的影响规律,保持其他参数不变,只改变墙厚为200、220、240、260、280 mm,计算楼板振动响应。

图15为典型楼板振动响应的高度分布随墙厚的变化。由图中可以看出,墙厚变化对振动响应随高度的变化趋势影响较小,但墙体厚度对于低楼层放大区的楼板振动响应影响明显,墙厚越大,楼板振动响应越大。

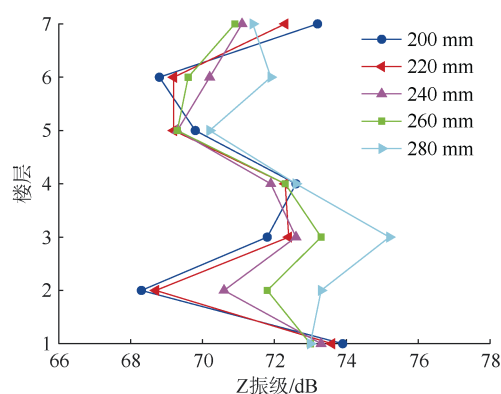


图15 不同墙厚时典型楼板振动响应的高度分布
Figure 15 Height distribution of floor vibration response with different wall thicknesses

4 结论

针对某7层砖混结构,本文通过现场实测和数值模拟研究了地铁导致的结构振动传递规律,并分析得到了超标原因,研究结论如下。

1) 地铁振动从隧道壁传递至地面及建筑物室内不同房间时,1/3倍频程谱在不同频段内的传递规律有所不同,隧道壁至地面过程中,5~63 Hz频段处振级衰减小,在5 dB以下;地面传至建筑内,1~25 Hz频段内振级先减小后随楼层升高而增大。

2) 地铁运营后周边典型建筑物有振动超标,分析原因如下:隧道埋深浅、建筑与隧道距离近且处于同个土层使得土体对振动的衰减效果较差;由于地铁振动激励诱发结构部分楼板共振,从而导致楼板发生较大的动力响应。

3) 目前环评中将室外地面0.5 m处作为评价位置,实测及数值分析表明即使室外地面振动评价结果未超标,结构振动也可能超标。建议考虑结构振动最大的位置作为补充评价点。

4) 砖混结构的车致振动响应具有空间分布差异。由于车致振动激励的频谱特性以及结构整体模态和楼板局部模态特性的影响,振动最大位置不一定处于建筑底层,而在中间楼层或顶层存在放大效应。对楼层数量、层高、板厚、墙厚4个影响因素的分析表明:楼层数量对响应随高度变化趋势有明显影响,决定了最大振动响应的出现位置;层高和墙厚对放大区楼层的影响大于其他楼层;板厚对所有楼层的动力响应产生影响。

参考文献

- [1] 夏禾. 交通环境振动工程[M]. 北京: 科学出版社, 2010. XIA He. Traffic induced environmental vibrations and controls[M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [2] 生态环境部. 环境影响评价技术导则 城市轨道交通: HJ 453—2018[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2018. Technical guidelines for environmental impact assessment—Urban rail transit: HJ 453—2018[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2018.
- [3] 花雨萌, 谢伟平, 陈斌. 地铁振动对建筑物竖向楼层响应的影响研究[J]. 建筑结构学报, 2023, 44(3): 122-129. HUA Yumeng, XIE Weiping, CHEN Bin. Research on influence of metro vibration on vertical floor response of buildings[J]. Journal of building structures, 2023, 44(3): 122-129.
- [4] ZOU Chao, MOORE J A, SANAYEI M, et al. Impedance model for estimating train-induced building vibrations[J]. Engineering structures, 2018, 172: 739-750.
- [5] LÓPEZ-MENDOZA D, ROMERO A, CONNOLLY D P, et al. Scoping assessment of building vibration induced by railway traffic[J]. Soil dynamics and earthquake engineering, 2017, 93: 147-161.
- [6] XIA H, ZHANG N, CAO Y M. Experimental study of train-induced vibrations of environments and buildings[J]. Journal of sound and vibration, 2005, 280(3/4/5): 1017-1029.
- [7] LOPES P, COSTA P A, FERRAZ M, et al. Numerical modeling of vibrations induced by railway traffic in tunnels: from the source to the nearby buildings[J]. Soil dynamics and earthquake engineering, 2014, 61: 269-285.
- [8] XIA Qian, QU Wenjun. Experimental and numerical studies of metro train-induced vibrations on adjacent masonry buildings[J]. International journal of structural stability and dynamics, 2016, 16(10): 1550067.
- [9] 裴强, 陶夏新. 轨道交通振动对邻近建筑物的影响及其

- 评价[J]. 地震工程与工程振动, 2011, 31(4): 77-83.
- PEI Qiang, TAO Xiaxin. Effect of vibration from rail traffic on nearby buildings and its assessment[J]. Journal of earthquake engineering and engineering vibration, 2011, 31(4): 77-83.
- [10] 李政, 金浩, 郑军. 轨道交通引起沿线砌体结构振动局部放大分析[J]. 振动与冲击, 2021, 40(15): 263-270.
- LI Zheng, JIN Hao, ZHENG Jun. Analysis of local amplification of masonry structure vibration caused by rail transit[J]. Journal of vibration and shock, 2021, 40(15): 263-270.
- [11] 岳建勇. 地铁交通引起的建筑物振动实测与数值模拟分析[J]. 岩土力学, 2020, 41(8): 2756-2764.
- YUE Jianyong. In situ measurement and numerical simulation for the environmental vibration induced by urban subway transit[J]. Rock and soil mechanics, 2020, 41(8): 2756-2764.
- [12] 杨维国, 李昊, 郝景凯. 地铁致某近代建筑振动分析及减隔振措施研究[J]. 振动工程学报, 2023, 36(1): 147-158.
- YANG Weiguo, LI Hao, XI Jingkai. Vibration analysis of a modern building caused by metro and research on vibration reduction measures[J]. Journal of vibration engineering, 2023, 36(1): 147-158.
- [13] 国家环境保护局. 城市区域环境振动标准: GB 10070—1988[S]. 北京: 中国标准出版社, 1989.
- State Bureau of Environmental Protection of the People's Republic of China. STANDARD of environmental vibration in urban area: GB 10070—1988[S]. Beijing: Standards Press of China, 1989.
- [14] 何卫, 谢伟平. 基于舒适度评价的大跨度车站结构精细化模型研究[J]. 土木工程学报, 2014, 47(1): 13-23.
- HE Wei, XIE Weiping. Study on sophisticated calculation model of large-span railway station structures based on vibration serviceability evaluation[J]. China civil engineering journal, 2014, 47(1): 13-23.

(编辑: 傅依萱)

(上接第 71 页)

- [3] KAWASHIMA K, KANAI S, DATE H. As-built modeling of piping system from terrestrial laser-scanned point clouds using normal-based region growing[J]. Journal of computational design and engineering, 2014, 1(1): 13-26.
- [4] LU Qiuchen, LEE S. Image-based technologies for constructing As-is building information models for existing buildings[J]. Journal of computing in civil engineering, 2017, 31(4): .
- [5] 黄明, 张岩岩, 盛国君, 等. 三维管网自动建模研究[J]. 地理信息世界, 2016, 23(2): 55-61.
- HUANG Ming, ZHANG Yanyan, SHENG Guojun, et al. Study on the automatic modeling of 3D pipe network[J]. Geomatics world, 2016, 23(2): 55-61.
- [6] 尹宝昌, 白驹, 崔宇佳. 管线三维建模及可视化分析[J]. 交通科技与经济, 2010, 12(1): 119-121.
- YIN Baochang, BAI Ju, CUI Yujia. Study on 3D modeling and visualization of pipeline[J]. Technology & economy in areas of communications, 2010, 12(1): 119-121.
- [7] ZHAO Yunfan, DENG Xueyuan, LAI Huahui. Reconstructing BIM from 2D structural drawings for existing buildings[J]. Automation in construction, 2021, 128: 103750.
- [8] XIE Yuan, LI Siyi, LIU Tianrui, et al. As-built BIM reconstruction of piping systems using PipeNet[J]. Automation in construction, 2023, 147.
- [9] 赖华辉, 邓雪原, 陈鸿, 等. 基于 BIM 的城市轨道交通运维模型交付标准[J]. 都市快轨交通, 2015, 28(3): 78-83.
- LAI Huahui, DENG Xueyuan, CHEN Hong, et al. Research on delivery standard of maintenance model for urban rail transit based on building information modelling[J]. Urban rapid rail transit, 2015, 28(3): 78-83.
- [10] 李海润. 智慧管道技术现状及发展趋势[J]. 天然气与石油, 2018, 36(2): 129-132.
- LI Hairun. The status quo & development trend of smart pipeline technology[J]. Natural gas and oil, 2018, 36(2): 129-132.
- [11] 史永飞. 厦门轨道交通建设数字化转型实践与思考[J]. 都市快轨交通, 2023, 36(4): 35-39.
- SHI Yongfei. Digital transformation in Xiamen rail transit construction: practices and reflections[J]. Urban rapid rail transit, 2023, 36(4): 35-39.
- [12] 汪晴晴, 杨秀芝, 蔺玉璞. 基于图层自动识别算法的 BIM 结构模型生成方法研究[J]. 土木建筑工程信息技术, 2022, 14(3): 80-88.
- WANG Qingqing, YANG Xiuzhi, LIN Yupu. Research on automatic generation of BIM model from structural CAD drawings[J]. Journal of information technology in civil engineering and architecture, 2022, 14(3): 80-88.
- [13] YANG Lin, LI Qiming, PAN Wei. A domain model for geometric modeling in support of the automated BIM modeling[J]. Engineering, construction and architectural management, 2023.

(编辑: 傅依萱)