

DOI: 10.7672/sgjs2025180013

地铁下穿某建筑物的结构变形性能及 振动影响评估*

王炯文¹, 张伟², 孙永民¹, 王子月³, 胡晓锋¹, 韩路平¹, 李东¹

(1. 陕西省建筑科学研究院有限公司, 陕西 西安 710082; 2. 中联西北工程设计研究院有限公司, 陕西 西安 710077; 3. 西安工业大学, 陕西 西安 710021)

[摘要] 某下穿新建地铁既有建筑使用过程中多处开裂, 为分析地铁行驶时振动对该建筑的影响, 进行现场踏勘和检测, 持续监测墙体裂缝宽度、倾斜变形和沉降变形, 并在地铁未运行和运行时分别测试动力特性与振动响应, 根据国家规范进行该建筑安全性和抗震性鉴定以及振动对上部承重结构影响的安全性和使用性等级评定, 综合分析地铁振动影响下建筑物结构变形性能和振动影响, 并对后续加固处理提出建议。

[关键词] 地铁; 振动; 裂缝; 监测; 变形; 共振

[中图分类号] TU362

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)18-0013-07

Structural Deformation Performance and Vibration Impact Assessment of Subway Underpassing a Building

WANG Jiongwen¹, ZHANG Wei², SUN Yongmin¹, WANG Ziyue³,
HU Xiaofeng¹, HAN Luping¹, LI Dong¹

(1. Shaanxi Architecture Science Research Institute Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710082, China;

2. China United Northwest Institute for Engineering Design & Research Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710077, China;

3. Xi'an Technological University, Xi'an, Shaanxi 710021, China)

Abstract: During the service life of an existing building that was crossed by a newly constructed subway from below, multiple cracks occurred. In order to analyze the impact of the vibrations generated by the subway during operation on this building, on-site surveys and inspections were carried out. The width of the cracks on the walls, the inclined deformation, and the settlement deformation were continuously monitored. The dynamic characteristics and vibration responses were respectively tested when the subway was not in operation and when it was in operation. In accordance with national codes and standards, the safety and seismic performance of the building were appraised, and the safety and serviceability grade evaluation of the impact of the vibrations on the upper load-bearing structure was conducted. A comprehensive analysis was made of the structural deformation performance and vibration influence of the building under the influence of the subway vibrations, and suggestions were put forward for the subsequent reinforcement treatment.

Keywords: subways; vibrations; cracks; monitoring; deformation; resonance

0 引言

地铁往往横穿城市, 新建轨道交通工具行驶过程中产生的振动与噪声不仅对建筑物造成累积损

伤, 还会影响建筑物内居民的舒适度^[1-2]。为探究地铁运行振动对建筑物的影响, 国内众多学者开展了大量现场实测和有限元分析^[3-9]。

本文针对某下穿新建地铁的既有建筑, 根据现场监测和调查结果, 对其结构变形性能和振动影响展开分析。

* 陕西省省级国有资本经营预算科技创新专项资金项目(ZXZJ-2024-015); 陕西省建筑科学研究院科研项目(2023-11-458, 2024-1-503, 2025-1-545)

[作者简介] 王炯文, 工程师, E-mail: 840628203@qq.com

[收稿日期] 2025-05-16

1 工程概况

某既有建筑为地上 3 层砌体结构,采用烧结普通砖和混合砂浆砌筑,楼面板和屋面板均为钢筋混凝土预制板,楼盖和屋盖处设有圈梁,1 层设有构造柱;建筑平面呈凹形,主要用途为居住,建造于 2007 年,长 15.7m、宽 11.1m,建筑高度为 9.9m,建筑面积为 499.4mm²,1 层建筑平面如图 1 所示。

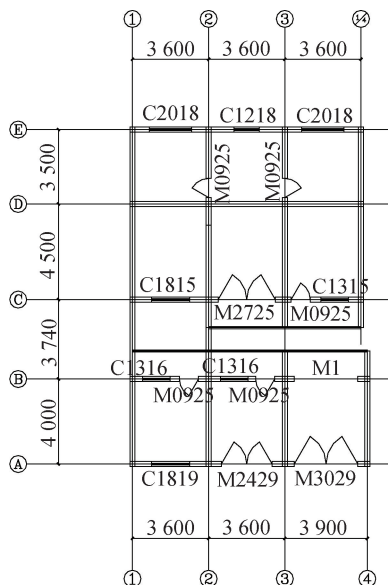


图 1 1 层建筑平面

Fig. 1 Plan of the first floor

经现场调查,该既有建筑位于新建地铁上方,在使用过程中易受地铁行驶时振动影响,相对位置关系如图 2 所示。此外,建筑物各层主体结构及装饰面多处开裂:主要表现为墙体竖向开裂,踢脚线开裂,墙体和楼板交接处开裂,挑梁保护层开裂及钢筋锈蚀并严重胀裂,预制板拼缝处开裂。为综合分析地铁列车行驶时振动对该建筑的结构变形性能及主体结构安全和正常使用的影响,对该建筑上部主体结构构件强度、倾斜变形、沉降变形、裂缝宽度进行检测或监测,并在地铁列车未运行和运行时分别对该建筑进行振动测试。

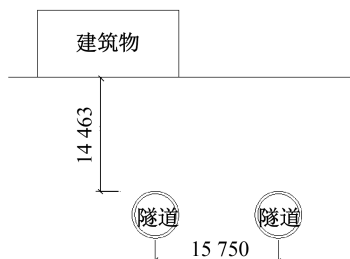


图 2 建筑物与地铁隧道相对关系

Fig. 2 Relative relationship between the building and the subway tunnel

2 建筑物检测鉴定

分别采用贯入法和砖回弹法检测砌筑混合砂浆和烧结砖的抗压强度,采用回弹法检测混凝土抗压强度。根据检测结果,该房屋砌筑混合砂浆强度值取 5.0MPa,烧结砖抗压强度等级取 MU10,混凝土抗压强度取 15.6MPa。用 YJKS 软件(5.1.0 版)对该建筑进行结构验算,验算模型如图 3 所示。经计算,该建筑上部主体结构部分构件承载力、局部受压承载力不满足要求,上部主体结构安全性等级评为 D_{su} 级;抗震承载力和抗震构造措施均不满足要求。

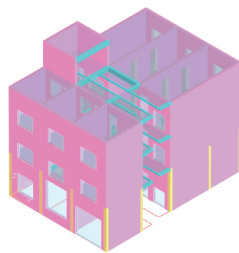


图 3 结构验算模型

Fig. 3 Structural checking model

采用水准仪对该建筑相对不均匀沉降趋势进行检测,相邻测点间地基基础局部最大倾斜率为 0.001,未超出 GB 50007—2011《建筑地基基础设计规范》中第 5.3.4 条砌体承重结构地基基础局部倾斜 0.002 的限值要求。

采用电子经纬仪对该建筑侧向位移进行检测,最大倾斜值为向南 24mm,未超出 GB 50292—2015《民用建筑可靠性鉴定标准》的限值要求($H/300 = 33\text{mm}$)。

3 建筑物裂缝与变形监测

3.1 墙体裂缝宽度变化监测

根据该建筑现状,对墙体裂缝宽度变化情况进行实时监测,即采用 ZRQ-L050 型裂缝传感器自动化采集数据,选取典型的 3 条裂缝每小时采集 1 次,监测时间共计 103d。裂缝传感器布置部位为:1 层 ①/③~④轴墙体,3 层 ①~②/③轴墙体,3 层 ③~④/④轴墙体。对建筑物裂缝宽度变化监测数据进行数据化处理,结果如图 4 所示。

由裂缝宽度监测结果可知,监测期内受监测墙体裂缝宽度总体发展趋势为波浪形跳动,规律性较强,其中,1 层 ①/③~④轴墙体裂缝宽度变化在 $-0.04 \sim 0.02\text{mm}$ 浮动,墙体裂缝宽度变化极差为 0.06mm;3 层 ③~④/④轴墙体裂缝宽度变化在 $-0.04 \sim 0.05\text{mm}$ 浮动,墙体裂缝宽度变化极差为 0.09mm;3 层 ①~②/③轴墙体裂缝宽度变化在

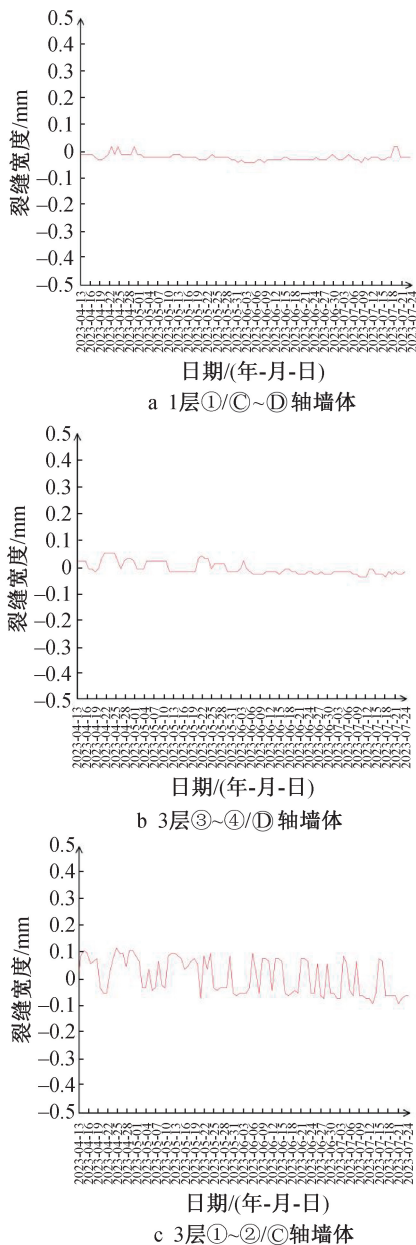


图4 裂缝宽度监测结果

Fig. 4 Monitoring results of crack width

-0.09~0.12mm 浮动,墙体裂缝宽度变化极差为 0.21mm。

墙体裂缝宽度监测数据表明,监测期间 1 层①/C~④轴墙体、3 层③~④/D 轴墙体裂缝宽度变化绝对值较小,3 层①~②/C 轴墙体裂缝宽度变化绝对值较大,且均呈波浪形跳动,说明地铁列车行驶产生的振动对受监测墙体的裂缝宽度变化有一定影响。

3.2 建筑物倾斜变形监测

采用 ZRQ-MEM 型倾角仪对建筑物倾斜变化情况进行实时监测,倾角仪布置在外墙①/B~③轴墙体和①/③~④轴墙体,结果如图 5 所示。

由监测结果可知,①/B~③轴墙体东西向倾斜

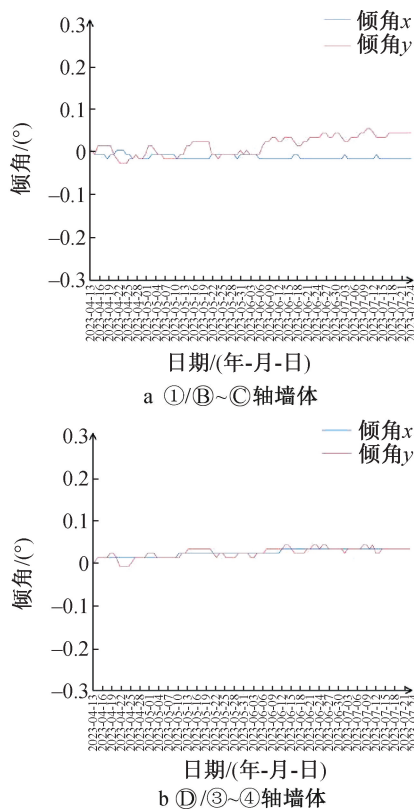


图5 倾斜变形监测结果

Fig. 5 Monitoring results of oblique deformation

度最大值向西 0.05° ,南北向倾斜度最大值向南 0.02° ;①/③~④轴墙体东西向倾斜度最大值向西 0.03° ,南北向倾斜度最大值向南 0.04° 。①/B~③轴墙体东西向倾斜度随时间呈轻微增大趋势,南北向倾斜度随时间变化不大,①/③~④轴墙体南北向、东西向倾斜度随时间变化不大。综上所述,监测期间内倾斜总体发展趋势为波浪形跳动,规律性较强,墙体倾斜度变化值较小,该建筑侧向位移变化较平稳。

3.3 建筑物沉降变形监测

根据 JGJ 8—2016《建筑变形测量规范》,在建筑物周边区域布置 3 个基准点,组成闭合环,建立独立高程系统,假设基准点 BM1 点高程为 0.000m;根据测绘图纸及现场情况,在建筑物的墙体上共布置变形观测点 10 个,布置平面如图 6 所示。变形观测采用水准测量方法,所用仪器为 Trimble DiNi03 型电子水准仪配合天宝电子沉降观测标贴,对该建筑共 10 个观测点进行了 7 次沉降观测,累计沉降量监测结果如表 1 所示。

由沉降监测数据可知,在 100d 内最大累积沉降量为 2.66mm,沉降速率为 0.026 6mm/d,满足《建筑变形测量规范》中沉降速率 ≤ 0.04 mm/d 的规定,说明受检建筑物在监测期内沉降量处于平稳状态,

表 1 沉降监测结果

Table 1 Settlement monitoring results

项目	观测点编号									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1 次	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2 次	-2.40	-1.87	-3.08	-3.70	-3.62	-3.55	-3.00	-2.45	-2.21	-2.59
3 次	-2.77	-2.42	-2.03	-3.06	-3.09	-3.07	-2.62	-2.24	-2.03	-2.54
4 次	-2.90	-2.76	-2.67	-3.52	-3.26	-3.17	-2.72	-2.38	-2.36	-2.94
5 次	-3.04	-3.42	-3.10	-3.76	-3.52	-3.34	-2.84	-2.57	-2.50	-3.17
6 次	-2.09	-1.51	-2.72	-3.50	-3.50	-3.27	-2.82	-2.28	-2.56	-2.85
7 次	-2.44	-1.77	-1.56	-2.47	-2.66	-2.66	-2.02	-1.70	-2.10	-2.20
沉降速率/ (mm · d ⁻¹)	-0.024 4	0.017 7	0.015 6	0.024 7	0.026 6	0.026 6	0.020 2	0.017 0	0.021 0	0.022 0

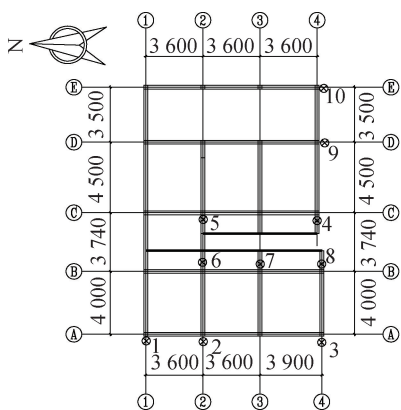


图 6 沉降观测点布置平面

Fig. 6 Layout plan of settlement observation points

地基土竖向变形均匀、稳定。

4 建筑物振动测试

根据《民用建筑可靠性鉴定标准》中第 4.4.2 条,当可能存在共振现象时,应进行结构动力特性检测。为更真实、更准确获取地铁通过时对该建筑物的振动影响,采用 DH5907G 无线模态测试分析系统对地铁未运行时建筑物结构动力特性和地铁运行时建筑物振动响应进行测试,采用 DHDAS 动态信号采集分析系统平台软件进行数据分析。根据该建筑结构类型与现场情况,本次测试在各层同一竖向位置布置 1 台采集仪,各采集仪在测点处进行持续振动测试并记录 x, y, z 三向数据,采集仪布置平面如图 7 所示。

4.1 动力特性测试

为最大限度减少人员、车辆走动和地铁运行等影响,测试时间段选择为 00:00—01:00。首先对仪器进行调试并进行预采集,确保各通道数据采集正常。本次测试采集仪采用小速度挡,采样频率为 1 000Hz。对该建筑在地铁未运行时进行动力特性测试,通过低通滤波(50Hz)后,截取包含地面振动峰值且持时 1 800s 的信号作为本次振动测试的频

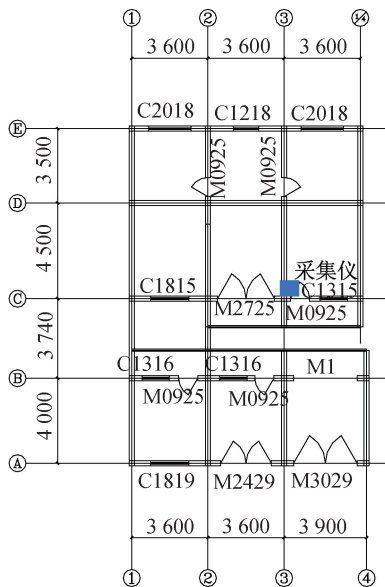


图 7 采集仪布置平面

Fig. 7 Layout plan of acquisition devices

域分析代表值。采集完成后,根据实测数据和测试系统的标定结果,将各测点各时段最大振幅的记录数据分别经过软件进行快速傅里叶变换计算,得到各测点的频谱曲线,如图 8 所示。由动力特性测试结果可知,该建筑在 x, y, z 方向上的一阶频率分别为 2.930, 2.930, 1.953Hz,二阶频率分别为 4.883, 5.859, 6.836Hz,三阶频率分别为 9.766, 9.766, 10.742Hz,其 x, y 向初始刚度基本相同。

4.2 振动响应测试

在地铁运行早、晚高峰分别选取反应最大的 3 个工况,对该建筑的动力特性进行测试,历时 3d,测试时间段选择为早高峰 7:00—8:30,晚高峰 17:00—19:00。本次测试采集仪采用小速度挡,采样频率为 200Hz。进行低通滤波(50Hz)后,截取包含地面振动峰值且持时 10~15s 的信号作为本次振动测试的时域和频域分析代表值。采集完成后,根据实测数据和测试系统的标定结果,将各测点各时段最大振幅的记录数据分别经过软件进行快速傅里叶

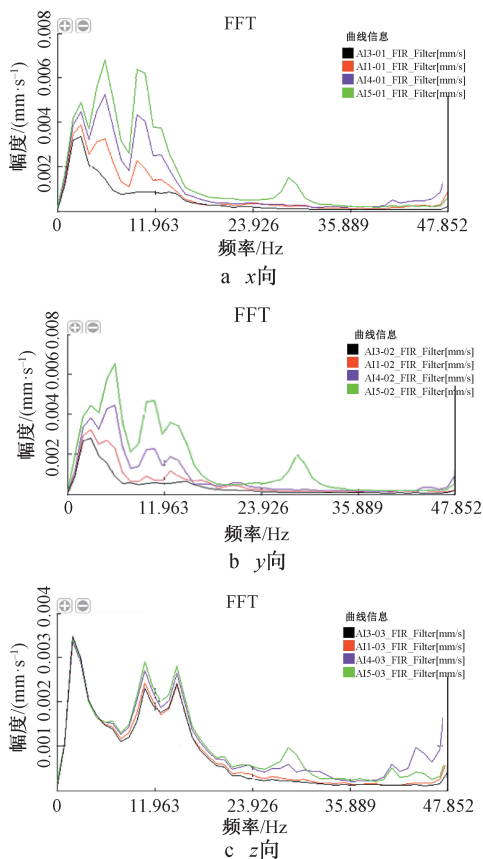


图8 各向频谱曲线

Fig. 8 Spectrum curves in all directions

变换计算,得到各测点的频谱曲线。时域曲线和频谱曲线如图9,10所示。

由振动响应测试结果可知,地铁运行时该建筑

地面最大振动速度峰值为 0.164mm/s,2层响应最大振动速度峰值为 0.155mm/s,3层响应最大振动速度峰值为 0.260mm/s,屋面层响应最大振动速度峰值为 0.390mm/s,总体而言,该建筑各层相对于下一层的振动响应呈放大趋势。

此外,地铁运行时该建筑各测点振动频率集中在 0~10Hz,地面输入房屋的地震动主振频率分别为 1.953,2.930,4.883,5.859Hz,2层至屋面层的主振频率分别为 1.953,2.930,4.883,5.859Hz,由动力特性测试结果可知,建筑物结构自振频率为 1.953,2.930,4.883,5.859,9.766,10.742Hz,地铁运行时建筑物的振动响应主振频率与建筑物自振频率接近或相同,达成共振,易对建筑物结构产生损伤或致使原损伤进一步发展。

4.3 振动影响安全性评价

根据《民用建筑可靠性鉴定标准》中附录 M.0.3条,当进行振动对上部承重结构影响的安全性等级评定时,采用现场测量的方法获取结构振动的峰值、频率等相关参数。该建筑为砌体结构,在时域范围内的水平及竖向容许振动速度峰值取 15mm/s。测试结果表明,受检建筑物响应最大振动速度峰值为 0.390mm/s,未超过容许振动速度限值。

根据《民用建筑可靠性鉴定标准》中附录 M.0.4条,当建筑结构的振动速度小于容许振动速度限值,但已引起使用者对结构安全的担心时,应对建筑结构产生的裂缝和其他损伤进行检查。

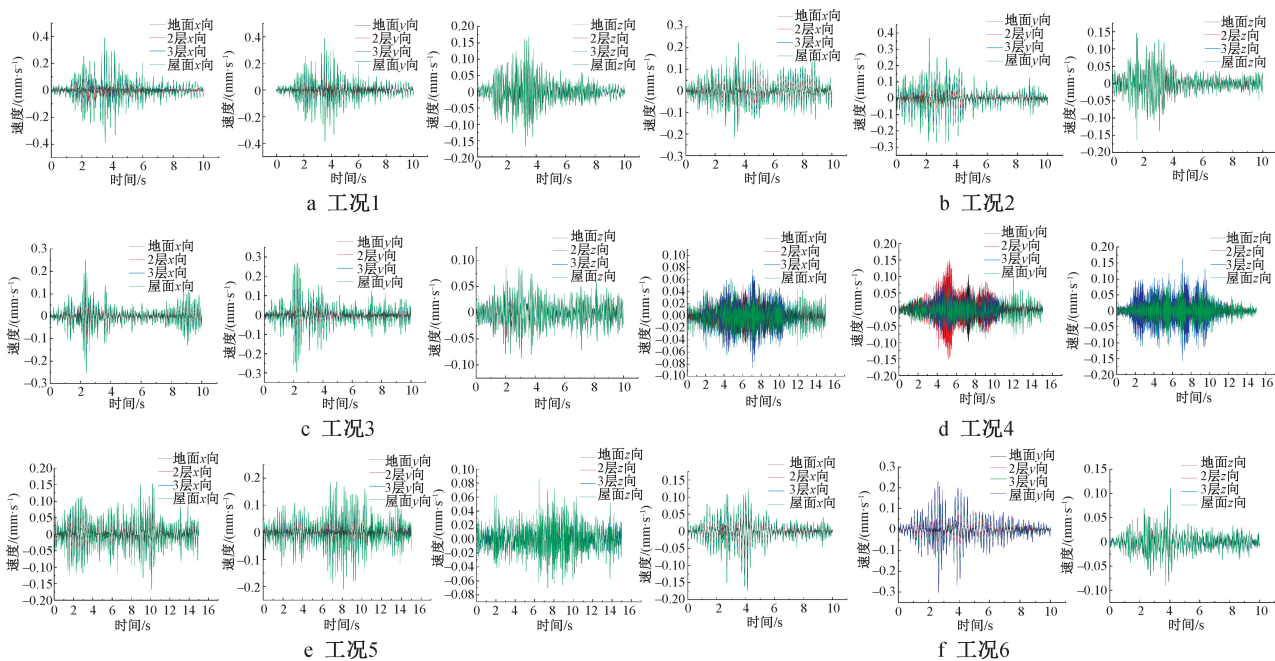


图9 不同工况各向时域曲线

Fig. 9 Time domain curves in all directions under different working conditions

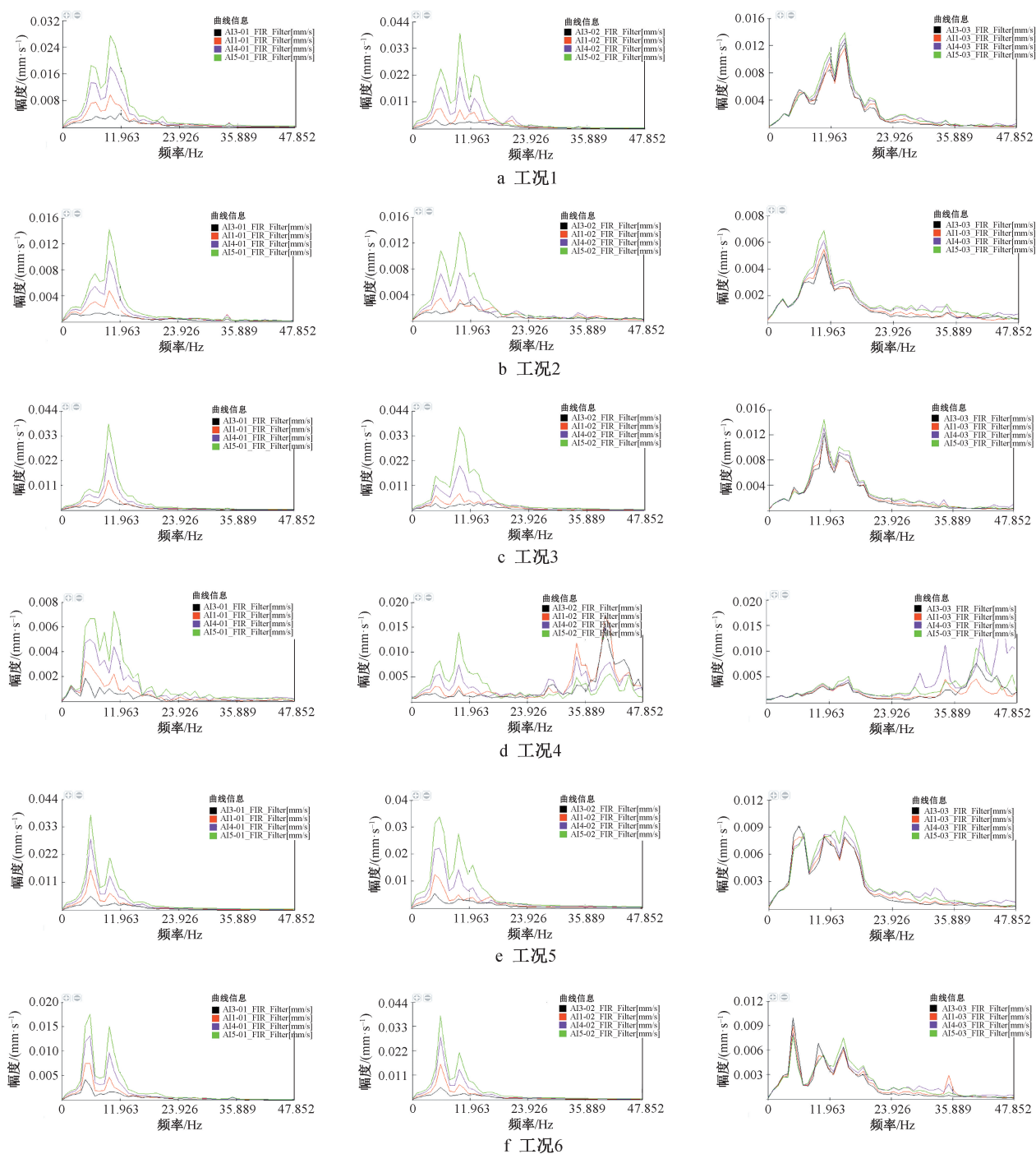


图 10 不同工况各向频谱曲线

Fig. 10 Spectrum curves in all directions under different working conditions

根据 3.1 节裂缝宽度变化监测结果,受监测墙体的裂缝宽度有跳跃性变化。因此,建筑物结构考虑振动影响的安全性等级为 C_u 级。

根据 GB 50868—2013《建筑工程容许振动标准》中第 7.1.2 条和第 7.1.3 条规定,交通振动对建筑结构影响在时域范围内的容许振动值,居住建筑为 5.0mm/s 。由于该建筑未经正规设计院设计,而是自行建造,其容许振动值按 70% 确定。

由 4.2 节振动响应测试结果可知,屋面层响应

最大振动速度峰值为 0.390mm/s ,该建筑顶层楼面处容许振动速度峰值为 $5.0 \times 70\% = 3.5\text{mm/s}$,未超过《建筑工程容许振动标准》规定。

综合以上检测结果,建筑物振动速度峰值满足《民用建筑可靠性鉴定标准》《建筑工程容许振动标准》关于容许振动速度的要求;但地铁运行时该建筑的振动响应主振频率与其自振频率接近或相同,易引发建筑物产生共振现象,对建筑物结构产生不利影响,造成其装饰层开裂及门窗、屋顶颤动,灰土

掉落,房屋部分墙体原有裂缝继续扩展;建筑物结构考虑振动影响的安全性等级为 C_u 级。

4.4 振动影响使用性评价

根据《民用建筑可靠性鉴定标准》中附录 M.0.8 条,结合对建筑物的现场调查结果,粉刷层出现掉皮、开裂或剥落现象,承重墙体存在裂缝宽度跳跃性变化现象。所以,地铁运行时振动对上部承重结构的使用性影响的评级为 C_s 级。

5 建筑物结构变形性能及振动影响评估

1) 该建筑 1 层①/③~⑤轴墙体、3 层③~⑤/⑦轴墙体裂缝宽度变化绝对值较小,3 层①~②/④轴墙体裂缝宽度变化绝对值较大,且均呈波浪形跳动,地铁列车行驶产生的振动对受监测墙体的裂缝产生了一定影响。

2) 该建筑倾斜变形总体发展趋势为波浪形跳动,规律性较强,墙体倾斜度变化值较小,建筑物侧向位移变化较平稳。监测期内沉降变形总体处于平稳状态,地基土竖向变形均匀、稳定,地铁列车行驶产生的振动对该建筑倾斜和沉降变形影响较小。

3) 目前状态下,建筑物振动作用未超过《民用建筑可靠性鉴定标准》中结构振动速度限值要求,顶层楼面处最大振动速度未超过《建筑工程容许振动标准》中容许振动峰值的限值要求。但地铁列车运行时该建筑振动响应主振频率与其自振频率接近或相同,易引发建筑物产生共振,在叠振作用下对主体结构产生不利影响,造成粉刷层出现掉皮、开裂或剥落等现象,房屋部分墙体原有裂缝宽度跳跃性变化,原有裂缝损伤继续扩展或产生新损伤。建筑物结构考虑振动影响的安全性等级为 C_u 级,考虑振动影响的使用性影响的评级为 C_s 级。

6 建议

1) 对该建筑物开裂构件和承载力不满足要求的构件进行加固处理,如采用灌浆材料对开裂墙体进行裂缝修复处理并用钢丝网水泥砂浆面层进行加固,采用包钢或粘贴碳纤维布等方法对承载力不满足的构件进行加固处理。

2) 采取适当的减振、隔振措施减小地铁列车行驶时振动对该建筑物的影响,如在该建筑的底层设置隔振层,采用弹簧隔振器、空气弹簧等隔振设备,有效隔离振动向上传播。

3) 通过改变自振频率的方式减小共振对该建筑物的影响。增加墙体厚度或增设构造柱和圈梁,提高建筑物的整体刚度;安装阻尼器,通过阻尼器耗能机制将振动能量转变为其他形式,减小振动幅度,抑制共振现象。

参考文献:

- [1] 熊义磊. 地铁列车振动对长春某文物建筑安全性与完整性影响研究[D]. 北京:北京交通大学,2021.
XIONG Y L. Study on the impact of subway train vibration on the safety and integrity of a historic building in Changchun [D]. Beijing:Beijing Jiaotong University,2021.
- [2] 盛涛,张善莉,单伽程,等. 地铁振动的传递及对建筑物的影响实测与分析[J]. 同济大学学报(自然科学版),2015,43(1):54-59.
SHENG T,ZHANG S L,SHAN J Z, et al. In-situ measurement and analysis of subway vibration's transmission and the influence to nearby buildings [J]. Journal of Tongji University (natural science),2015,43(1):54-59.
- [3] 张少雄,田鹏刚,张凤亮,等. 城市轨道交通振动下西安鼓楼动力响应分析[J]. 应用基础与工程科学学报,2021,29(5):1292-1307.
ZHANG S X,TIAN P G,ZHANG F L, et al. Analysis of the dynamic response for Xi'an drum-tower under the vibration of urban rail transit [J]. Journal of basic science and engineering,2021,29(5):1292-1307.
- [4] 胡卫兵,王鑫,于海平. 城市轨道交通微幅振动对西安南城墙的影响分析[J]. 地震工程与工程振动,2012,32(4):88-95.
HU W B,WANG X,YU H P. Effect of micro vibration of urban rail transit on south city wall in Xi'an [J]. Journal of earthquake engineering and engineering dynamics,2012,32(4):88-95.
- [5] 俞翔,张启迪,柏文,等. 地铁运行振动对周边建筑影响监测及分析[J]. 地震工程与工程振动,2024,44(6):161-172.
YU X,ZHANG Q D,BAI W, et al. Analysis and monitoring of subway-induced vibration on a surrounding building [J]. Earthquake engineering and engineering dynamics,2024,44(6):161-172.
- [6] 艾楠,宋辰宁,王培森. 地铁运行对邻近建筑振动响应研究[J]. 山东建筑大学学报,2025,40(1):32-40.
AI N,SONG C N,WANG P S. Study on the vibration response of subway operation to adjacent buildings [J]. Journal of Shandong Jianzhu University,2025,40(1):32-40.
- [7] 路德春,高泽军,孔凡超,等. 地铁列车运行诱发地面邻近建筑振动的数值模拟研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文),2023,45(6):113-124.
LU D C,GAO Z J,KONG F C, et al. Numerical study on vibration of ground building adjacent to metro induced by operation of subway train [J]. Journal of civil and environmental engineering,2023,45(6):113-124.
- [8] 张宝安. 地铁上盖建筑物振动预测及评价[J]. 铁道建筑技术,2020(12):33-38.
ZHANG B A. Vibration prediction and evaluation of buildings on subway lines [J]. Railway construction technology,2020(12):33-38.
- [9] 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 W G,LI H,XI J K. 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.