

地铁上盖建筑振动响应预测及舒适度分析

——以南京地铁 1 号线停车维修库综合体上盖住宅项目为例

魏晓斌, 郭建祥, 孙正华

(江苏省建筑工程质量检测中心有限公司, 南京 210033; 江苏省建筑科学研究院有限公司, 南京 210008)

摘要: 对南京市地铁 1 号线车库段上部待建住宅楼进行研究, 探讨地铁上盖建筑受地铁出入库振动的影响。通过现场测试与数值模拟, 预测不同工况下待建建筑的振动响应以及室内振动加速度限值范围。模拟结果表明, 采用底部加速度法将所测轨道、混凝土柱的振动输入计算模型中, 可以获得待建建筑三向位移变化, 并进行结构易损部位及预警分析, 判断建筑安全性。通过模拟 8 种工况, 计算得到 1~80 Hz 频率范围内各建筑楼板 1/3 倍频程中心频率下的加速度响应有效值和加速度振级, 获取了住宅舒适度影响较大区域的具体坐标。研究成果对结构减振及舒适度提升具有参考意义。

关键词: 地铁; 振动响应; 数值模拟; 建筑结构; 舒适度; 底部加速度法

中图分类号: TU311 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2024)03-0255-08

地铁作为公共交通的重要组成部分, 线路的建设需要占用较大的土地面积。为了能够使得土地利用效益最大化, 一些城市在车库段上部建设商业及住宅建筑^[1-3]。地铁上盖建筑通常由框架结构搭建而成, 其底部通常用作商业及地铁车辆车库, 这种多功能建筑在使用过程中往往会出现相互干扰的问题。例如, 在车辆进出车库过程中, 其引起的铁轨振动由基础结构体系传递至上部建筑, 易对上部结构的安全和居民居住舒适度产生影响^[4-5]。因此在设计建造阶段, 就需要对结构的抗振能力及舒适度进行评估^[6], 目前常采用的手段是现场实测结合有限元计算的方法^[7]。

现有的研究表明, 在高层建筑振动分析中, 采用动力时程分析方法能够计算结构构件内力和变形^[8], 满足结构设计阶段的抗振评价要求^[9]。这种方法的关键在于对所建模型施加振动波的模式, 常见的施加方式包括质量加速度施加法、底部位移法、底部加速度法 3 种^[10-11]。质量加速度法是通过达朗贝尔原理, 将振动源振动波转化为施加在质点上的惯性力^[12]; 底部位移法是在结构底部地面位置输入位移振动波, 模拟地面振动传输模式, 计算上

部结构响应^[13]; 底部加速度法则是将振动加速度从结构模型底部基础位置输入, 进而获取上部结构的振动响应参数^[14]。对于这 3 种输入方式的取舍, 达朗贝尔原理表明, 由于地面加速度产生的结构相对位移(或变形)将与地基不动并承受外力作用产生的结构位移相同, 因此结构分别承受两种激励(地面加速度和外力)的运动方程相同, 该力等于质量与地面加速度的乘积, 方向与加速度方向相反, 因此在应用时需要考虑到结构的实际施工阶段^[15]。在地铁上盖建筑振动分析中, 在结构底部承受随时间变化的振动, 结构的反应来源有两部分: 由受力引起的拟静力反应和底部基础振动惯性力所引起的振动反应。从理论上可以看出, 这 3 种振动输入方法均能够满足地铁上盖建筑振动分析, 在考虑选用方法时应当结合实际情况和计算简便性进行选择。在实际工程中, 对于既有铁路, 其振动模拟可以通过振动测试设备获取, 且振动加速度测试更为容易, 评价方法也有相应标准参考, 因此采用底部加速度施加法计算效率更优, 结算结果也能够更加符合实际情况。

现通过对南京地铁 1 号线已建成地铁项目车库

收稿日期: 2023-10-27

基金项目: 住房和城乡建设部项目(K20221278);“十四五”国家重点研发计划项目(2021YFF0602000)

作者简介: 魏晓斌(1985—), 男, 江苏兴化人, 高级工程师, 硕士, 研究方向为建筑结构质量检测鉴定和智慧监测诊断; 郭建祥(1992—), 男, 江苏扬州人, 工程师, 硕士, 研究方向为建筑结构质量检测; 孙正华(1976—), 女, 江苏扬州人, 正高级工程师, 博士, 研究方向为建筑结构质量检测监测和智慧监测诊断。

段上部待建建筑进行振动分析,验证底部加速度法的适用性。同时结合该工程现场实测数据,通过有限元计算,获取地铁车库上盖建筑列车出入库的振动引起上振动响应并进行舒适度分析,以期减振措施提供依据和建议。

1 项目概况

1.1 项目简介

南京某地铁停车维修车库上盖大型商住两用建筑,一层、二层为商业用房,三层及以上为住宅楼,由变形缝将整体住宅分为8个区域(A~H区),共规划建设16幢住宅楼,项目整体分区及车道相对位置示意如图1所示。停车场上盖物业项目规划占地面积8万 m^2 ,总建筑面积超13万 m^2 。考虑到地铁车辆进行日常停放和定期检修作业时,会产生较大的振动,经由道床、立柱及平台传播至上部建筑物,易引起结构和构件的振动,影响工作效率和生活质量。为评估地铁列车进出维修库时所产生的振动对上部结构的影响,采用车库振动现场实测结合上部结构数值计算的方法评估地铁列车在出入库时引起上部拟建住宅的振动。

1.2 振动测试

综合体A区~D区为清洗库,共有10个车道,E区~H区为维修库,共有11个车道,每个车道编号均为从北向南进行编号,A区~D区为1~10车道,E区~H区为11~21车道。

评估待建建筑的振动,首先需要获得列车运行所产生的振动参数。目前在振动测试中,拾振器是最常用的振动测试装置,结合动应变测试系统,可以获得测试节点处的振动加速度、位移等参数。本工程以H区建筑为测试对象,振动的响应程度随传输距离的增加而衰减,可知11车道和18车道列车进出站时,其上部建筑所产生的振动最为显著,于12号楼底部、16-2号楼底部共布置6个振动测点,包括轨道2个点,柱根部1个点,柱顶3个点。柱测点编号为Z,Z1、Z3、Z5为柱根部测点,Z2、Z4、Z6为柱顶测点,G代表轨道测点。Z-1~Z-4测点位于12号楼下部,Z-5、Z-6测点位于16-2号楼下部,柱顶、柱根部测点布置示意图如图2、图3所示;G-1、G-2布置于11车道,轨道测点布置示意图如图4所示;测点整体布置示意图如图5所示。



图1 综合体分区及车道示意图



图2 柱顶部振动测点



图3 柱根部振动测点



图4 轨道振动测点

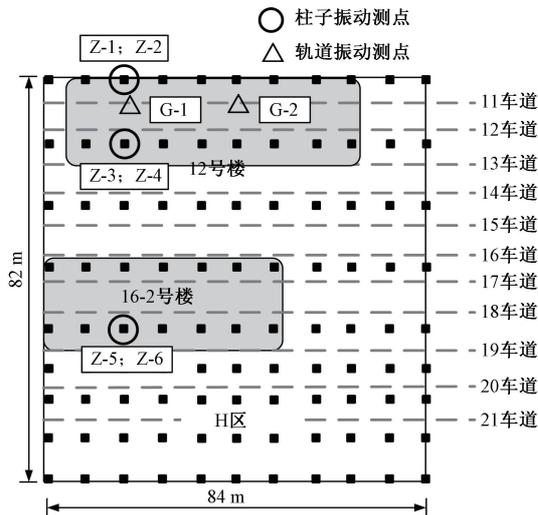


图5 振动测点布置示意图

通过所布设的振动传感器,检测列车进出站时振动测点的加速度值,获取4种工况下的振动加速度。工况1:11车道列车入库;工况2:11车道列出库;工况3:18车道列车入库;工况4:18车道列车出库。各工况下12号楼底部、16-2号楼底部振动曲线如图6、图7所示。

2 数值模拟

2.1 模型建立、修正与验证

模型计算以地铁车库上盖H区住宅进行列车进出库及不同工况下列车进出库对上部住宅舒适度进行相关研究与评估。

首先利用有限元软件对综合体H区结构模型进行模态分析,并根据测试结果对基频进行修正。H区综合体下部的地铁停车场部分为3层钢筋混凝土框架结构。根据设计图纸,取框架结构的柱、梁、板进行有限元建模。由于填充墙在框架结构体系中不起承重、支撑和抗剪切作用,只起围护和隔断作用,故在建模中不考虑。对结构中的柱和梁均选取梁单元进行建模,不考虑偏心,楼板选取板单元进行建模。各构

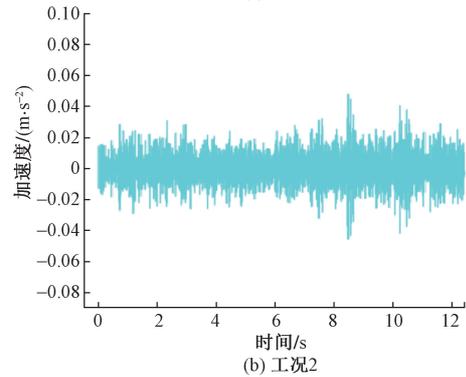
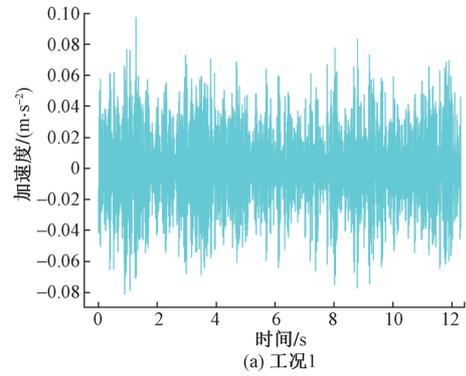


图6 12号楼底部振动曲线

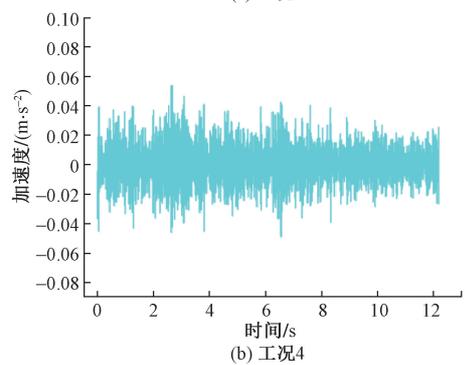
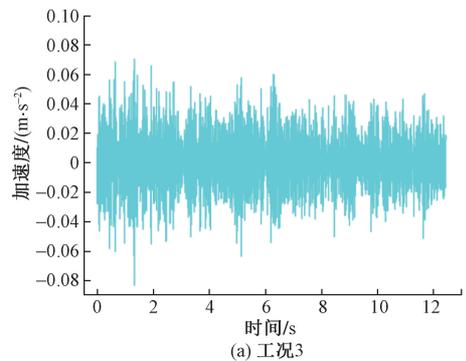


图7 16-2号楼底部各工况振动曲线

件之间采用固接,柱脚采用固端支座。

基频修正后的模型材料参数如下:混凝土强度等级为C40的钢筋混凝土材料,等效弹性模量为36.8 GPa,密度为2 400 kg/m³;混凝土强度等级为C50的钢筋混凝土材料,等效弹性模量为37.8 GPa,

密度为 2400 kg/m^3 ; 混凝土强度等级为 C55 的钢筋混凝土材料, 等效弹性模量为 38.8 GPa , 密度为 2400 kg/m^3 。地铁停车场 H 区所建结构模型如图 8 所示。

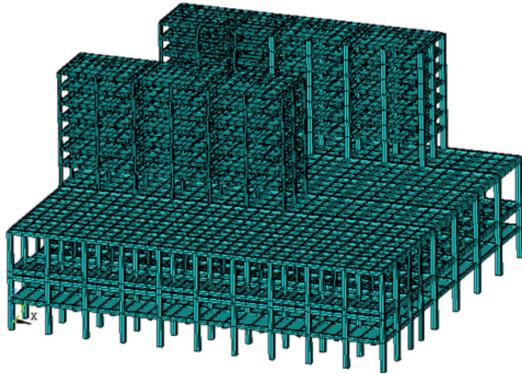


图 8 地铁停车场 H 区结构模型

统计地铁停车场 H 区结构模型的计算基频与现场实测基频, 现场实测基频为 2.54 m/s^2 , 数值模拟获得基频为 2.316 m/s^2 , 误差值为 8.81% 。综合体 H 区的数值模拟与现场实测的基频误差不超过 10% 。因此按上述方法所建数值模型在对动态响应的分析中有效可行, 可以验证模型是可用的。

2.2 底部加速度施加

综合体下部车库列车进出站均为空载, 根据轨道数量, 每条轨道有列车进站和出站两种工况, 采取实地测量的列车进出站加速度数据进行计算, 得到综合体的响应。施加振动曲线之前, 均对综合体进行最大静载作用的施加, 考虑在危险工况下的位移及沉降变化。通过提取结构位移数据, 确定结构危险位置, 得到结构沉降及倾角预警值。

底部加速度主要施加于 12 号楼和 16-2 号楼底部位置, 其中在 12 号楼主要施加在 1# ~ 12# 柱, H2 处主要施加在 31# ~ 36# 柱, 如图 9 所示。

3 计算结果分析

3.1 振动响应预测

计算 4 种工况下建筑的振动响应, 选取 12 号楼和 16-2 号楼每层的边角位置及中心位置节点处的三向振动位移时程曲线, 定义 x 向为东西向, y 向为南北向, z 为竖直向。12 号楼及 16-2 号楼在施加振动曲线后的位移云图如图 10、图 11 所示; 各工况下楼层最大位移变化曲线如图 12 所示。

通过图 12 可以得知, 振动曲线加载过程中, 随着楼层的增加, 两楼房位移逐渐增大。4 种工况下, 12 号楼 x 方向的位移均大于 16-2 号楼, 12 号楼 x

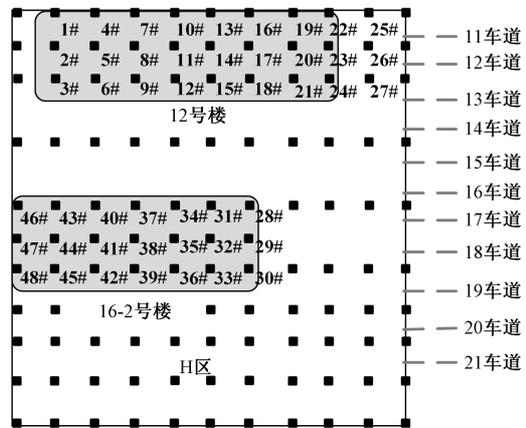


图 9 H 区建筑桩号图

方向最大位移为 0.756 mm ; 12 号楼在 y 方向位移均小于 16-2 号楼, 16-2 号楼在 y 方向的最大位移为 3.65 mm ; 在 z 方向的位移 12 号楼均小于 16-2 号楼, 最大沉降为 10.032 mm 。

根据《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ 3—2010)^[16]可知, 在风荷载或遇地震作用下, 按弹性方法计算的楼层层间最大水平位移与层高之比不宜大于 $1/250$, 即最大倾斜度不能超过 0.4% 。所计算的 x 、 y 、 z 方向楼层位移均在此范围内, 因此对于该计算结果下的位移对于建筑楼层来说是安全的。

3.2 易损部位及预警值分析

通过对 12 号楼和 16-2 号楼施加 4 种工况下的典型振动曲线, 计算得出了加载过程中建筑的最大位移曲线。由上文可知, 在 x 方向上, 最大位移不超过 1 mm , 所产生的影响较小; 对于 y 方向, 12 号楼在位移小于 16-2 号楼, y 方向的最大位移均产生在第 7 楼层顶部, 位移值均在 3.600 mm 左右, 所产生的位移基本相差不大; 而各工况下建筑 z 方向的位移要远大于 x 、 y 方向, 分别为 10.032 、 9.787 、 9.349 、 9.200 mm 。相关的易损部位的具体位置及对应的变形值见表 1。

表 1 易损具体位置及各工况对应的变形值

工况	项目	易损部位对应建筑楼及楼层	变形最大值/mm
工况 1	y 方向	16-2 号楼第 7 层	3.650
	z 方向	16-2 号楼第 7 层	10.032
工况 2	y 方向	16-2 号楼第 7 层	3.655
	z 方向	16-2 号楼第 7 层	9.787
工况 3	y 方向	16-2 号楼第 7 层	3.644
	z 方向	16-2 号楼第 7 层	9.349
工况 4	y 方向	16-2 号楼第 7 层	3.645
	z 方向	16-2 号楼第 4 层	9.200

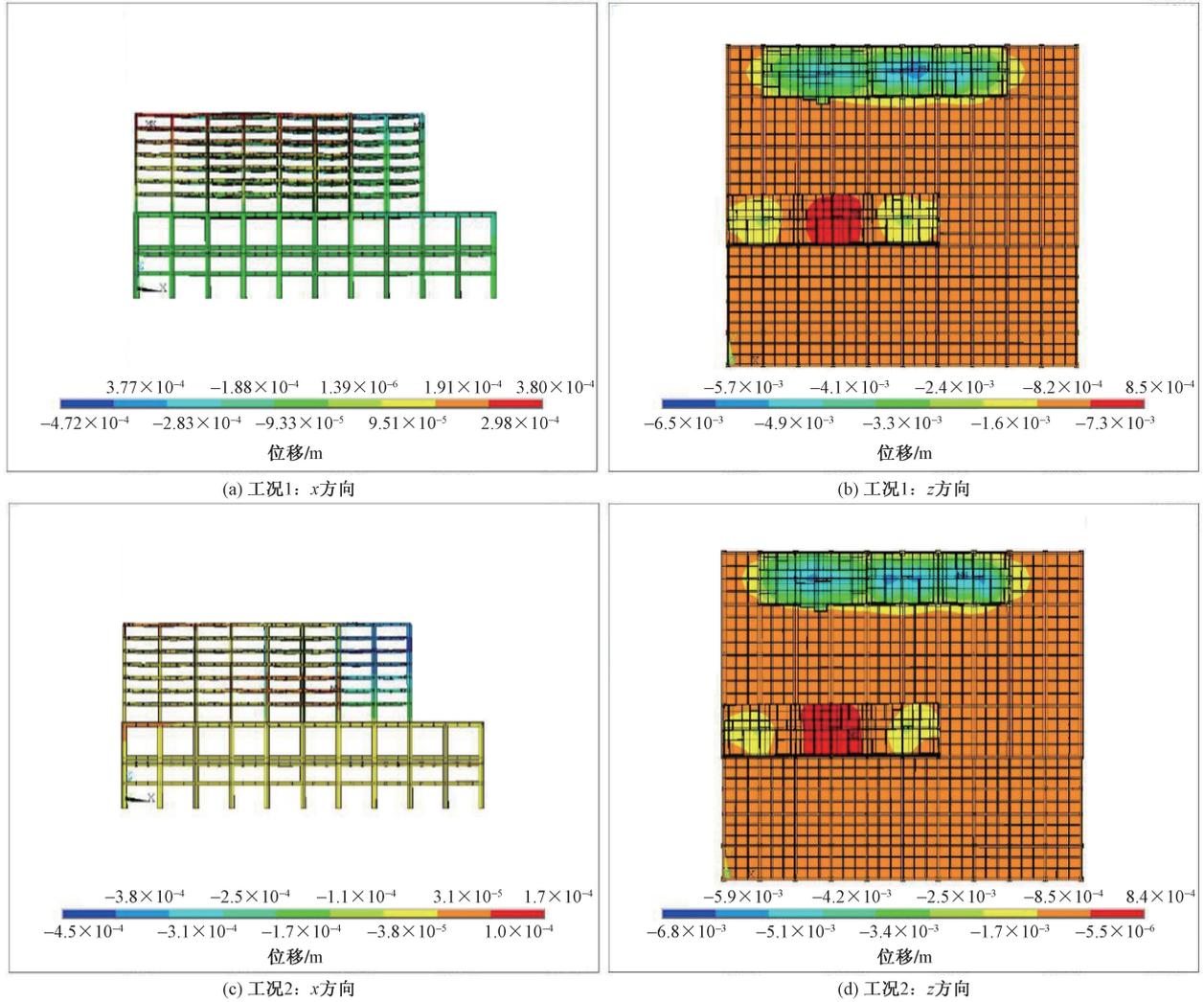


图 10 12 号楼位移云图

3.3 振动舒适度分析

为评估待建上盖住宅楼在列车入库、出库过程中的舒适度,分别对 H 区综合体的不同工况进行动力响应计算。共计 8 种工况:①12 车道地铁入库;②12 车道地铁出库;③8 车道地铁入库;④7 车道车辆入库;⑤11、12 车道车辆同时入库;⑥11、12 车道车辆同时出库;⑦7、8 车道车辆同时入库;⑧7、8 车道车辆同时出库。在各区段上部对应住宅楼模型底部输入实测的柱头上的竖直方向振动加速度时程,进行动力响应计算,时步 $1/256$ s,时长 12 s。

对于工况①~工况④,根据楼板的位移云图,选取开间较大的楼板中响应较大的单元上的点,提取位移时程,并计算出加速度时程,每一层提取 3 个较大位移时间曲线,从而得到每层较大的加速度时程曲线,进而计算得到 $1\sim 80$ Hz 频率范围内 $1/3$ 倍频段中心频率下的加速度响应有效值和加速度振级,并参照规范中的预警值评价各综合体在列车入

库、出库过程中的舒适度。楼板位移云图如图 13 所示。

对于工况⑤~工况⑧,主要是针对 12 号楼和 16-2 号楼进行工况加载。根据楼板的加速度云图,选取开间较大的楼板中响应较大的单元上的点,直接提取加速度时程, z 方向加速度云图如图 14 所示。

通过以上易损位置和舒适度预警指标的分析,结果显示,加速度振级基本都在二级限值内,住宅舒适度总体较高,部分区域振动偏高。因此在实际健康监测过程中可以针对所提供的具体位置坐标点进行监测,把实际监测数据与模拟数值进行对比,从而保证建筑楼的舒适度。

4 结论

基于底部加速度法,建立了待建地铁上盖住宅楼的有限元模型,开展了现场振动测试和结构整体

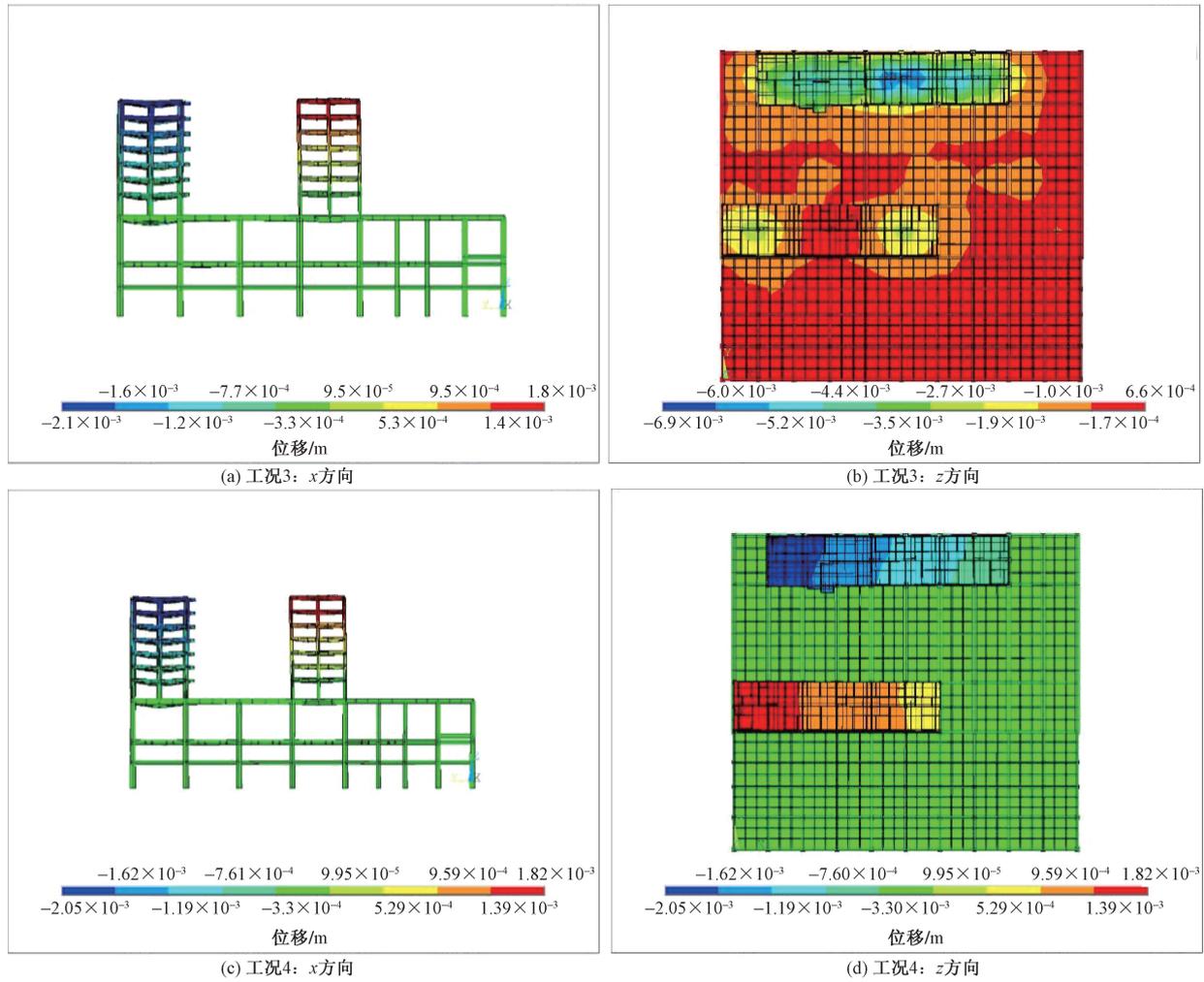


图 11 16-2 号楼位移云图

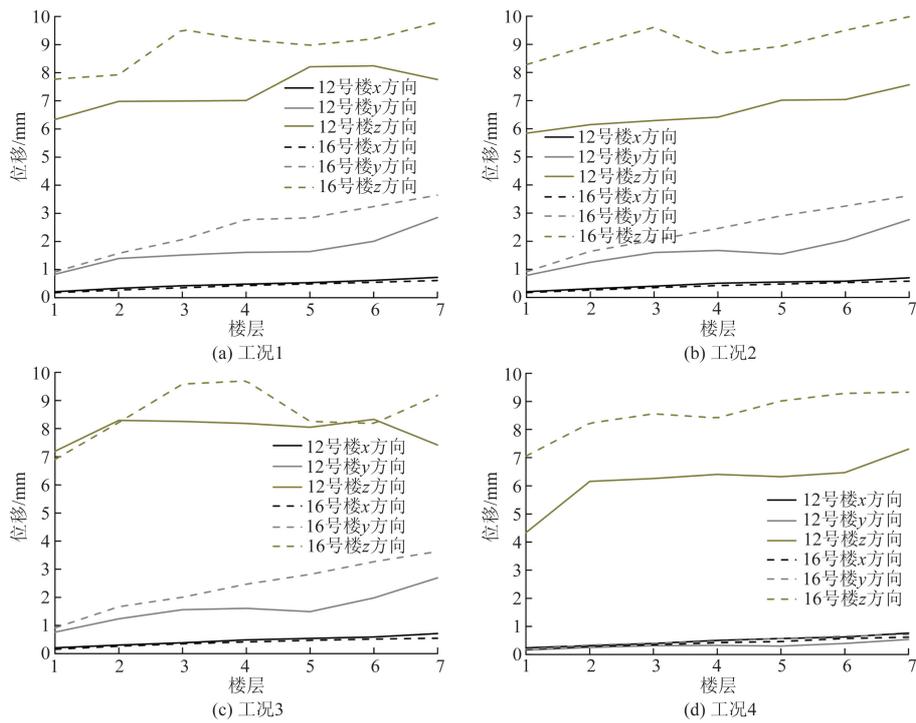


图 12 各工况建筑各楼层最大位移

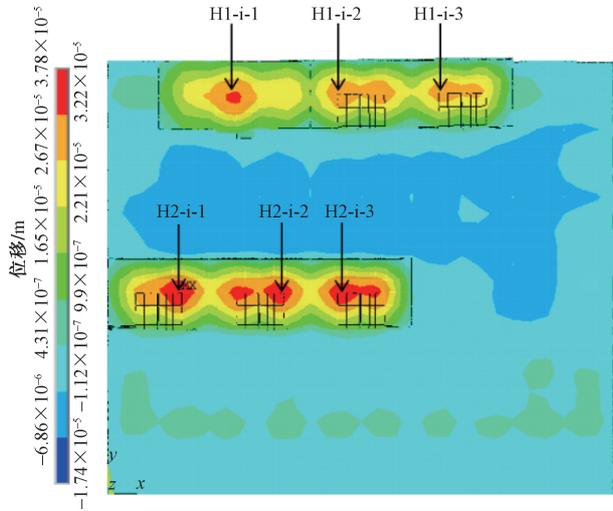
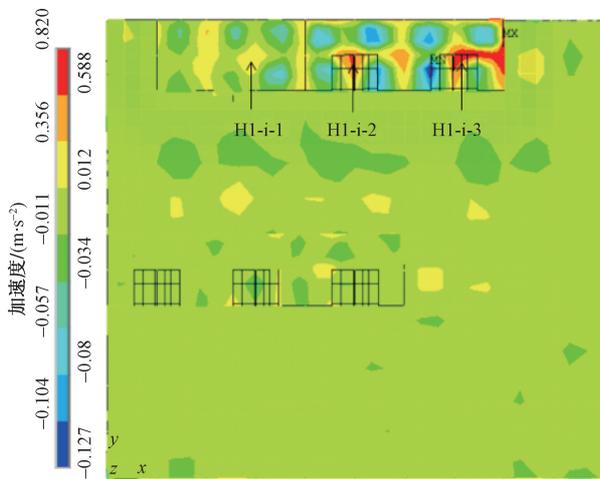
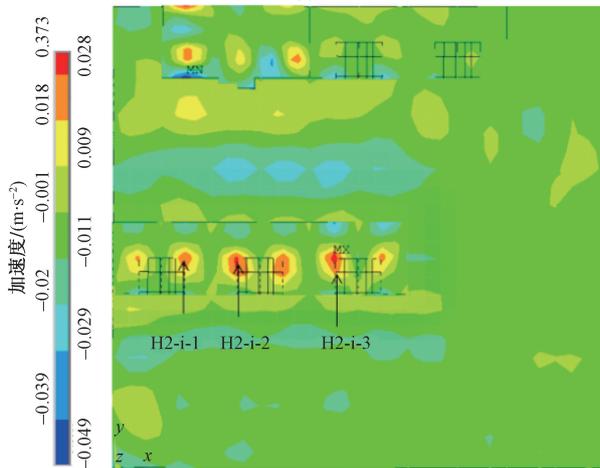


图 13 H 区住宅楼板位移云图



(a) 12号楼



(b) 16-2号楼

图 14 H 区住宅楼板加速度云图

振动响应分析,获取了结构易损部位和舒适度监测关键点,得到了以下结论。

(1)最大静载作用下列车出入库所引起的振动

模拟结果显示,振动曲线加载过程中,随着楼层的增加,两楼房位移逐渐增大,数值方向最大沉降为 10.032 mm。

(2)舒适度计算结果显示,地铁进出库对于楼层的振动影响较小,加速度振级基本都在二级限值内,住宅舒适度总体较高,但是局部振动偏高,建议采取相应的减振措施。

参考文献

- [1] 郭东. 西安火车站东配楼地铁上盖结构设计[J]. 建筑结构, 2023, 53(15): 105-111.
- [2] 马乾瑛, 吴宗欢, 李帅, 等. 地铁上盖建筑车致振动竖向二级动力响应研究[J/OL]. 建筑科学与工程学报, 1-10 [2023-12-11]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1442.tu.20230110.1712.001.html>.
- [3] 林楚娟, 庄毅璇, 戚月昆. 香港地铁及上盖物业开发情况调研及其对深圳市地铁上盖物业开发建设的启示[J]. 科技和产业, 2011, 11(12): 143-146.
- [4] 孙亮明, 林鸿钦, 田丰, 等. 地铁振动诱发上盖住宅室内结构噪声的实测研究[J]. 武汉理工大学学报, 2023, 45(6): 63-68.
- [5] 邹超, 冯青松, 何卫. 列车运行引起地铁车辆段与上盖建筑环境振动研究综述[J]. 交通运输工程学报, 2023, 23(1): 27-46.
- [6] 赖森华, 陈春俊, 闫磊, 等. 基于层次分析法的地铁列车乘客综合舒适度评价体系[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(36): 296-301.
- [7] 姜博龙, 何宾, 刘冀钊, 等. 地铁车辆段周期性桩基础隔振效果研究[J]. 噪声与振动控制, 2023, 43(4): 216-221.
- [8] 张献兵, 雷军, 张秀玲, 等. 深圳赛格大厦异常振动成因分析[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(25): 10588-10602.
- [9] 周颖, 郭启航, 张增德, 等. 地铁上盖隔震建筑车致振动实测与模拟分析[J]. 建筑结构学报, 2023, 44(9): 83-92.
- [10] 徐琨鹏. 地下结构地震反应推覆试验及数值模拟研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2023.
- [11] 李明, 安军海, 张学辉, 等. 上盖框架建筑的大底盘地铁车站结构抗震计算的振型分解法: 反应加速度法[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(8): 3403-3413.
- [12] 张居敏, 王鹏. 基于刚体平面运动微分方程的达朗贝尔原理推导[J]. 武汉轻工大学学报, 2021, 40(6): 52-57.
- [13] 赵晨盼. 顶层无柱大跨地铁车站的地震响应特性和破坏模式研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2022.
- [14] 王兴威. 基于坡向加速度法的边坡稳定分析及应用研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2019.
- [15] 梅凤翔. 关于达朗贝尔原理: 理论力学札记之六[J]. 力学与实践, 2009, 31(5): 61-63.
- [16] 高层建筑混凝土结构技术规程: JGJ 3—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.

Prediction of Vibration Response and Comfort Analysis of the Metro Superstructure: Taking Nanjing Metro Line 1 Parking Maintenance Depot Complex Building Residential Project as an Example

WEI Xiaobin, GUO Jianxiang, SUN Zhenghua

(Jiangsu Testing Center for Quality of Construction Engineering Co., Ltd., Nanjing 210033, China;
Architecture Science and Technology Research Institute Co., Ltd., Nanjing 210008, China)

Abstract: A residential building under construction on top of a garage section of an underground metro line one in Nanjing is taken as the research object, exploring the impact of vibration from the metro entering and exiting the garage on the overlying building. Through field testing and numerical simulation, the vibration response of the under-construction building under different working conditions and the limit range of indoor vibration acceleration are predicted. The simulation results show that by using the bottom acceleration method to input the vibration of the measured track and concrete columns into the computational model, the three-directional displacement changes of the under-construction building can be obtained, and the structural vulnerable locations and early warning analysis can be conducted to determine the building's safety. Through simulating eight working conditions, the acceleration response effective values and acceleration levels at the center frequencies of one-third octave bands within the frequency range of 1~80 Hz for each building floor are calculated, obtaining the specific coordinates of areas with significant impact on residential comfort. The research results have reference significance for structural damping and improving comfort.

Keywords: metro; vibration response; numerical simulation; building structure; degree of comfort; bottom acceleration