

地铁列车振动对邻近综合体高层建筑的 影响分析

金 峤,任玺茗,孙 丽

(沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘 要 目的 研究城市轨道交通对邻近综合体高层建筑的振动影响,从而为以区域化、功能化为特征的大型综合体结构振动适用性设计提供合理评估方法。方法 建立简化有限元模型,模拟地铁列车运行的振动荷载效应,考察地铁轨道中心与邻近综合体结构之间横向距离远近和不同结构总楼层高度对综合体结构的振动影响,分析综合体结构在地铁列车振动激励下的楼层振动响应及其相应的振动舒适度指标。结果 对于结构竖向加速度反应而言,距离在 10 m 以内,结构竖向峰值加速度反应可达 600 mm/s^2 以上,而距离超过 20 m,则衰减至 300 mm/s^2 ;在距离轨道中心 20 m 处,总楼层数为 10 层结构竖向峰值加速度可达到 100 mm/s^2 ,总楼层数为 34 层时,竖向峰值加速度可达到 350 mm/s^2 左右。结论 依据 ISO 评价标准,可以采用有限元数值分析的方法,对尚处在设计阶段的综合体结构预先进行振动舒适度分析和评估,并适时地对“振动敏感区域”的建筑功能进行重新调整和分配,以规避可能发生的地铁振动干扰。

关键词 地铁振动;综合体高层建筑;振动舒适度;有限元分析

中图分类号 TU973

文献标志码 A

Analysis on Influence of Subway Train Vibration on Adjacent High-rise Complex Buildings

JIN Qiao, REN Ximing, SUN Li

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: In this paper, the impact of urban rail transit vibration on adjacent high-rise complex buildings was studied, to provide a reasonable evaluation method for the vibration-applicability design of large-scale complex structures characterized by regionalization and functionalization, the simplified finite element model was established and the vibration load effect of subway train operation was simulated. The effects of the distance between the subway track center and the

收稿日期:2020-09-26

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC1504303)

作者简介:金峤(1975—),男,副教授,博士,主要从事建筑结构振动舒适度方面研究。

adjacent complex structure and the total floor height of different structures on the vibration of the complex structure was investigated. The floor vibration response of the complex structure under the vibration excitation of metro train and the corresponding vibration comfort index was analyzed. It is found that when the distance is less than 10 m, the vertical peak acceleration response of the structure can reach more than 600 mm/s^2 , when the distance is more than 20 m, it will decay to 300 mm/s^2 ; At 20 m away from the track center, the vertical peak acceleration of the 10 storey structure can reach 100 mm/s^2 , and that of the 34 storey structure can reach 350 mm/s^2 . Meanwhile, according to the ISO evaluation standard, the method of finite element numerical analysis can be used to analyze and evaluate the vibration comfort of the complex structure that is still in the design stage, and timely readjust and allocate the building functions of the "vibration sensitive areas", thereby avoiding possible interference from subway vibration.

Key words: subway vibration; high-rise complex building; vibration comfort; finite element analysis

综合体高层建筑是商业、办公、居住等多种使用功能集成的一种建筑形式,从现代城市规划的普遍趋势来看,通常被建设在城市轨道交通系统的枢纽节点上,形成建筑内部交通与城市公共交通相联系的“通道树型”交通体系。因此,由地铁轨道振动所引起的邻近综合体高层建筑振动舒适性问题,越来越受到人们重视^[1-2]。

近年来,研究者对轨道交通产生振动机理及相关振动传播理论进行了广泛研究^[3-5],普遍认为地铁车辆、车轮和轨道系统三者的动力相互作用产生振动,并通过结构传递到周围的地层,从而诱发附近地下结构以及建筑物的二次振动。G. Kouroussis 等^[6]在现场对轨道列车进行实测的基础上,利用数值分析的方法,对地铁列车振动传播特性进行了评估;郑国琛等^[7]通过建立地铁整体计算分析模型,利用 Euler 地基无限长梁进行动力方程求解得到了振源加速度;张楠等^[8]建立了列车-轨道-地基土相互作用理论分析模型进行了耦合分析。在建筑物的振动舒适度研究方面,K. Azrah 等^[9-10]利用振动烦恼率模型,对列车振动激励下的结构振动舒适性问题进行了分析和评估;宗琳等^[11-12]通过现场实测,采集了城市轨道交通附近大型建筑的楼盖振动响应数据,对结构动力响应进行了研究;黄世明^[13]利用

ANSYS 有限元软件进行了模拟分析,研究了地铁等列车振源加速度荷载对城市综合体结构的影响。

综上所述,关于地铁列车运行对建筑结构的振动影响研究已经比较完善,但是关于综合体高层结构的振动舒适度适用性分析和评估方法还没有系统的研究。基于此,笔者以一毗邻地铁车站的综合体结构为研究对象,针对城市轨道交通振动影响下的建筑结构振动舒适性问题,以 ABAQUS 及 SAP2000 有限元软件为分析平台,分别建立了地铁运行振动模型和综合体高层建筑结构模型,对地铁运行引起周边综合体建筑物的振动响应问题进行数值模拟,并对综合体建筑结构内部各区域的振动舒适度级别进行分析和评价。

1 工程背景

背景工程为沈阳嘉里中心企业广场。该综合体建筑结构位于辽宁省沈阳市沈河区青年大街 123 号,地处沈河区青年大街与文化路交汇处,连接城市主要干道,毗邻沈阳地铁 2 号线工业展览馆站,总建筑面积约 $86\,482 \text{ m}^2$,总占地面积约 $2\,007 \text{ m}^2$ 。其中 1~5 层为商业配套,7~34 层为办公层,6 层、21 层为消防避难层,建筑结构为框架-核心筒结构。

2 综合体结构有限元振动分析

2.1 地铁运行振动模型

基于 ABAQUS 软件平台,建立了“土层-隧道”有限元模型,以模拟地铁运行所引起的地表振动响应。

2.1.1 土体-隧道模型建立及参数

模型采用 C3D8R 单元类型,共 28 600 个单元,模型整体长宽高为 100 m × 80 m × 60 m,地铁隧道顶部到地表距离为 20 m,隧道直径为 3 m。沿垂直于地铁隧道轴向的横断面方向上,在地表设置 6 个振动特征点,与地铁轨道中心横向水平距离分别为 0 m、10 m、20 m、30 m、40 m 和 50 m(见图 1)。土体采用摩尔-库伦屈服准则作为本构模

型,建立实体并将实际土层结构简化为三层,修改土层参数见表 1^[14]。采用无限元边界法对边界条件进行人工设定,对无限单元的节点数进行编号修改,继而使模型的两侧和底部为无线边界,模拟实际土体振动传播。

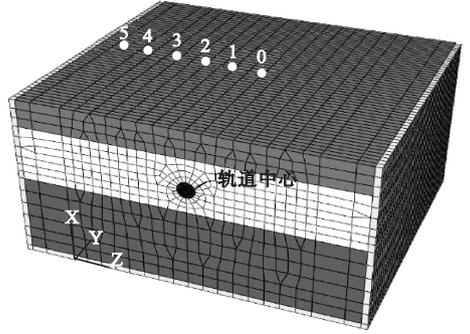


图 1 土层-隧道有限元模型

Fig. 1 Finite element model of soil and tunnel

表 1 简化后的土层参数

Table 1 Simplified soil parameters

土质	深度/m	密度/(kg·m ⁻³)	泊松比	弹性模量/MPa	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
粉土	0~15	1 730	0.32	12	16.4	22
粉土	15~35	2 030	0.31	16.7	17.4	25
粉质黏土	35~60	1 990	0.30	22	19.1	21

2.1.2 列车振动荷载

目前学者们普遍认为,列车运行时的竖向振动荷载主要由轨道不平顺等因素产生,而激振力通常会出现在低频(0.5~5 Hz)、中频(30~60 Hz)和 高频(200~400 Hz) 范围内,其主要振动频段多发生在低频区^[15-17]。因此,可以用激振力函数来模拟列车振动荷载^[18-19]:

$$F(t) = A_0 + A_1 \sin \omega_1 t + A_2 \sin \omega_2 t + A_3 \sin \omega_3 t. \quad (1)$$

式中: A_0 为轮静荷载; $A_i = ma_i \omega_i^2$ ($i = 1, 2, 3$) 分别为列车平稳性、动力附加荷载以及轨面波形磨耗等三种因素引起的振动荷载幅值, a_i 为振动波形的矢高; $\omega_i = 2\pi \frac{v}{L_i}$, 其中 ω_i 为圆频率, v 为列车速度, L_i 为振动波长。

假定地铁运行速度为 60 km/h,运行时间为 4.9 s,根据式(1)得出相应的地铁运行

荷载(见图 2)。根据地铁列车的运行时间,在列车轨道上每 0.2 s 施加一组振动激励荷载,共 25 组,将此 25 组荷载依次施加到地铁运行轨道模型上,并进行时程分析,从而得出各特征点的振动响应。

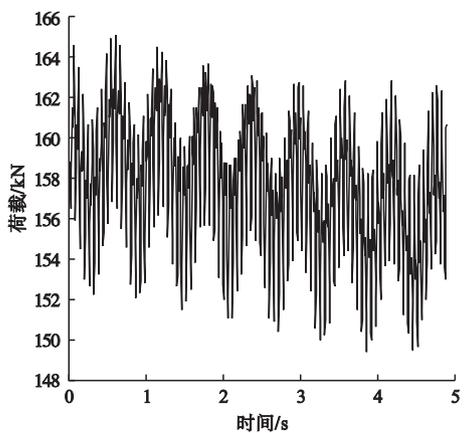


图 2 地铁振动荷载历程曲线

Fig. 2 History curve of subway vibration load

2.1.3 地铁振动加速度时程

通过地铁运行振动模型,以列车振动荷载作为输入,分别计算了地表6个振动特征

点的水平向及竖向加速度时程结果,并将其作为综合体高层建筑的振动输入数据。各振动特征点的加速度曲线如图3所示。

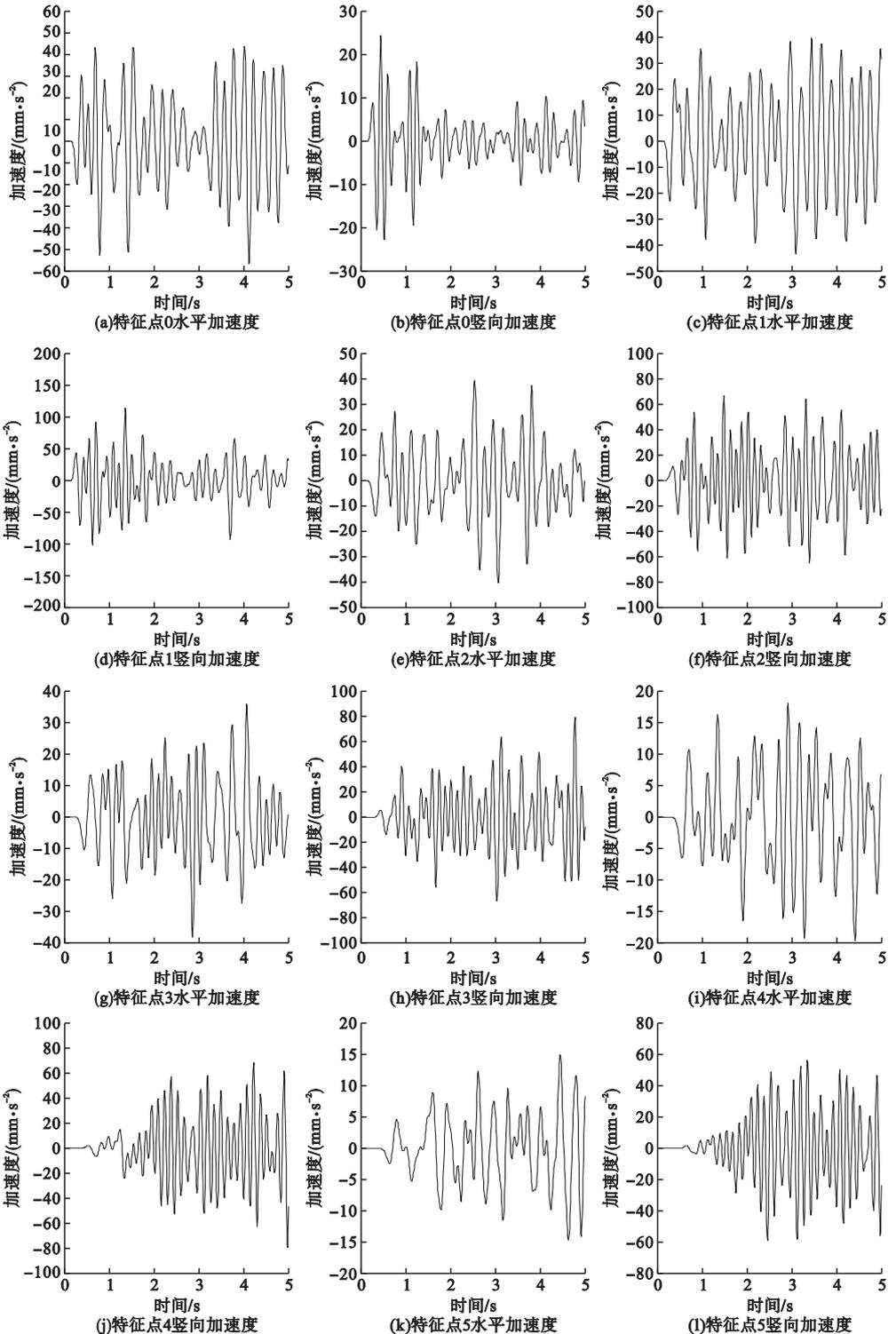


图3 各特征点加速度时程

Fig. 3 Acceleration time histories of each characteristic point

各特征点的加速度峰值见表2。由表可知,同一地表特征点的水平加速度峰值相比于竖向加速度峰值低;同时0号特征点的水平向加速度峰值与竖向加速度峰值的差异性较大;而随着与轨道中心横向距离的增加,5号特征点的水平向加速度峰值与竖向加速度峰值的差异性已经减小,这符合土体深处振源向地表传播的振动规律。

表2 振动特征点加速度峰值

Table 2 Summary of peak accelerations of vibration characteristic points mm/s^2

特征点	水平向加速	垂直向加
	度峰值	速度峰值
0	56.60	245.73
1	43.32	114.38
2	40.24	66.36
3	38.02	79.30
4	19.55	79.04
5	14.98	58.83

2.2 综合体高层有限元模型

基于SAP2000软件平台,建立综合体高层模型。结构形式采用框架-核心筒结构,计算模型如图4所示。结构模型的各楼层层高均为3 m,混凝土强度等级为C30,混凝土弹性模量 $E_c = 3.0 \times 10^4 \text{ MPa}$,泊松比 $\nu_c = 0.2$,纵筋为HRB400,箍筋为HRB335,框架

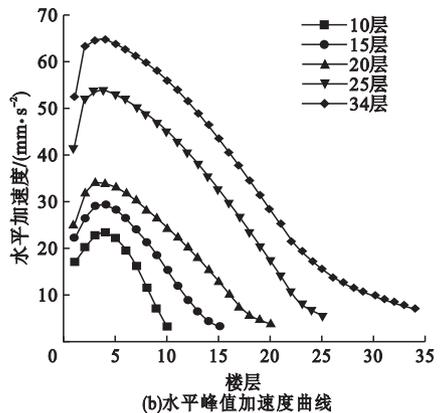
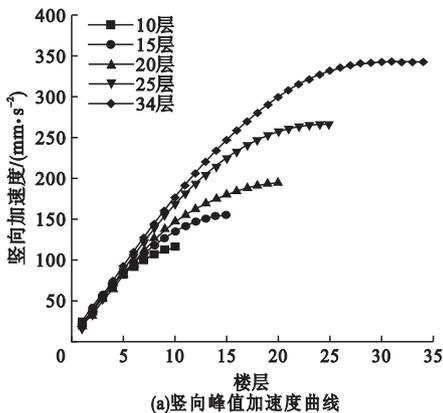


图5 不同工况下结构峰值加速度曲线

Fig. 5 Peak acceleration curves of structure under different conditions

从图5(a)中可以看出,各工况的5层及5层以下的各楼层竖向峰值加速度反应基本相同,而5层以上的各相应楼层的竖向峰值加速度反应则随着结构总楼层数的增加而增大。

梁截面宽高为 $300 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$,框架柱截面宽高为 $500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$,剪力墙厚度为 200 mm 。在动力分析中,采用瑞利阻尼假定,结构阻尼比取0.03。

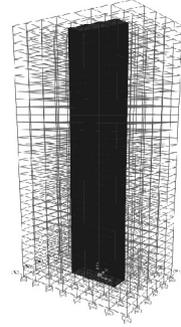


图4 有限元模型

Fig. 4 Finite element model

3 地铁运行对综合体高层建筑的振动影响分析

3.1 综合体结构总楼层数的影响

文中共考虑5种总楼层数工况,分别为10层、15层、20层、25层及34层。在该综合体建筑模型与地铁轨道中心横向距离为20 m的条件下,计算得到5种不同总楼层数的综合体结构在地铁振动荷载作用下的竖向和水平向加速度时程反应,结果见图5。

若单看其中每条曲线,其各层的竖向峰值加速度虽然随着楼层数的增加而增大,但其变化率不断降低,从而导致结构顶部若干楼层的竖向峰值加速度反应基本趋于一致。从图5(b)

中可以看出,5条曲线的各相应楼层水平峰值加速度反应均随着结构总楼层数的增加而增大,而各条曲线的水平向峰值加速度反应的变化规律均呈先增大再减小的趋势,并且5种工况均在结构第5层左右出现峰值,之后便随结构层数的增加而逐渐衰减。研究表明,结构竖向峰值加速度反应的量级要远远大于水平向峰值加速度反应的量级。

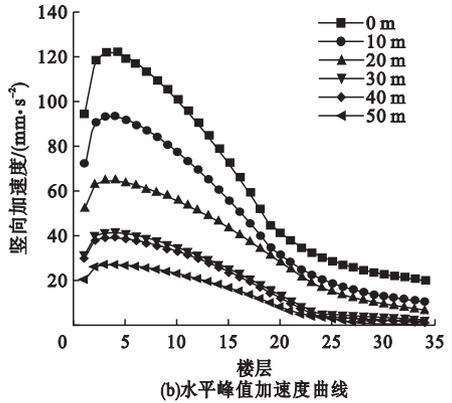
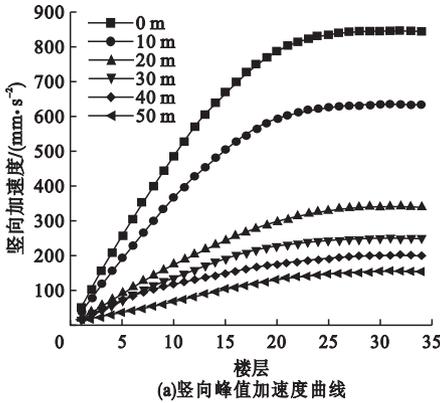


图6 不同工况下结构峰值加速度曲线

Fig. 6 Peak acceleration curves of structure under different conditions

从图6(a)中可以看出,结构各层竖向峰值加速度反应与结构相距轨道中心的横向距离呈现反比关系,且结构距离地铁轨道中心在10 m以内时,结构受到的振动影响较大,其顶部若干楼层的竖向峰值加速度可达 600 mm/s^2 以上,而距离超过20 m,则衰减至 300 mm/s^2 左右,其原因是由于与轨道中心距离变远导致结构顶层振动衰减。对于图6(b)所反映的结构水平向峰值加速度反应规律,则类似于图5(b),各条曲线的水平向峰值加速度反应的变化规律均呈先增大再减小的趋势,在结构第3层左右出现峰值,然后随结构层数的增加而降低,并且距离轨道中心越远水平向峰值加速度也越小。综合比较竖向结构峰值加速度反应和水平向结构加速度反应,前者的振动影响更大。

4 综合体高层建筑振动舒适性评价

笔者基于《建筑工程容许振动标准》

3.2 综合体结构与地铁轨道中心横向距离的影响

以结构总楼层数为34层的综合体结构模型为算例,计算并分析结构与地铁轨道中心距离分别为0 m、10 m、20 m、30 m、40 m及50 m六种工况下的结构竖向向及水平向振动反应,结果如图6所示。

(GB 50868—2013)对综合体建筑结构的振动舒适度问题进行研究^[20]。建筑物内人体舒适性的容许振动计权加速度级见表4。通过计算6种横向距离工况下,34层综合体结构各楼层的振动加速度级(见图7),并与表4所示规范给出的各种工况条件下的加速度级限值进行对比,从而对楼层振动舒适性进行评价。

从图7(a)可以看出,结构楼层越高,由地铁列车振动引发的楼板竖向振动加速度级越大,即可能受到的振动干扰越严重。而当结构与地铁轨道中心的横向距离在10 m以内时,结构第10层及以上的楼板竖向振动加速度级均大于74 dB,已超过表4中“振动要求严格的工作区”的竖向振动加速度级限值要求。而结构第20层及以上的楼板竖向振动加速度级均大于80 dB,已超过表4中“住宅区”的竖向振动加速度级限值要求。当结构与地铁轨道中心的横向距离在20~30 m时,综合体结构的第25层及以上的楼板竖向

表4 建筑物内人体舒适性的容许振动加权加速度级

Table 4 Human comfort inside the building permit weighted vibration acceleration levels dB

地点	时段	连续振动、间歇振动和重复性冲击 振动容许振动加权加速度级			每天只发生数次的冲击振动容许 振动加权加速度级		
		水平向	竖向	混合向	水平向	竖向	混合向
医院手术室和振动 要求严格的工作区	昼间	71	74	71	71	74	71
	夜间	71	74	71	71	74	71
住宅区	昼间	77	80	77	101	104	101
	夜间	74	77	74	74	77	74
办公室	昼间	83	88	83	107	110	107
	夜间	83	88	83	107	110	107

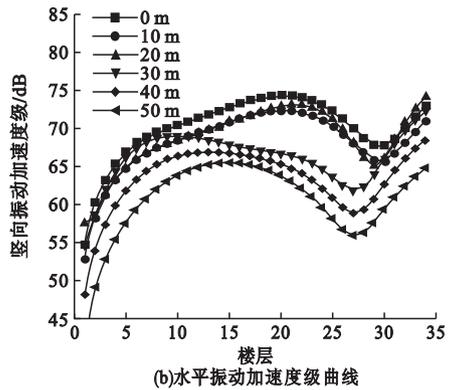
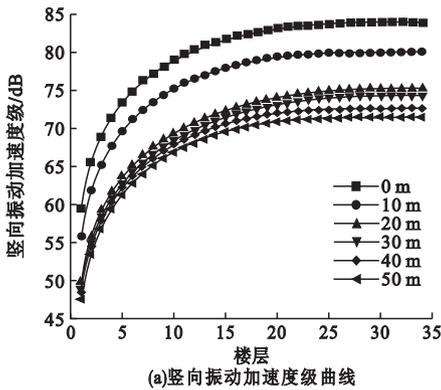


图7 不同工况下结构振动加速度级

Fig. 7 Acceleration levels of structural vibration under different conditions

振动加速度级接近 74 dB,一些“振动要求严格”的工作区将会受到振动影响。当结构与地铁轨道横向距离大于 40 m 时,整体结构的振动舒适性才可以得到保证。

从图 7(b)可以看出,结构振动加速度级沿楼层变化呈不规则状态,其中若干楼层的水平向振动间隔地超出振动加速度级限值的现象,其原因是结构水平向振动反应受多方向振型耦合效应影响,类似于结构“鞭梢效应”。以本算例为例,当结构与地铁轨道中心的横向距离在 20 m 以内时,结构第 15~25 层、顶部第 33~34 层的楼板竖向振动加速度级大于 71 dB,超过表 4 中“振动要求严格的工作区”的水平向振动加速度级限值要求。

5 结论

(1)地铁列车运行振动激励下,结构越高,竖向及水平向的楼层峰值加速度反应极值也越大;竖向峰值加速度反应沿结构高度

不断增加,但变化率逐渐减小,而水平向峰值加速度呈现先增大后减小的趋势。与水平向峰值加速度反应相比,竖向峰值加速度反应的量级较大。

(2)综合体结构振动响应也与结构和地铁轨道中心的横向距离相关。距离地铁运行轨道中心距离越远,结构竖向和水平向峰值加速度则随之逐渐减小。

(3)从舒适度角度分析,综合体结构的竖向振动加速度级随楼层的增高而增大,而水平向振动加速度级在靠近结构顶层附近位置处达到最大。

参考文献

- [1] JOLANTA T, JUOZAPAS Š, AUDRIUS B, et al. Complex model for the assessment of the location of high-rise buildings in the city urban structure[J]. International journal of strategic property management, 2013, 17(1): 93-109.
- [2] DAVID P C, GRZEGORZ P M, GEORGES K, et al. The growth of railway ground

- vibration problems; a review [J]. *Science of the total environment*, 2016, 568: 1276 - 1282.
- [3] 贾颖绚, 刘维宁, 马蒙, 等. 地铁列车运行振动对环境影响因素的参数分析 [J]. *城市轨道交通研究*, 2016, 19(1): 30 - 34.
(JIA Yingxuan, LIU Weining, MA Meng, et al. Parameters analysis on environmental vibrations induced by subway trains [J]. *Urban mass transit*, 2016, 19(1): 30 - 34.)
- [4] GAETANO L, LUCA F, DAVIDE P, et al. Annoyance evaluation due to overall railway noise and vibration in Pisa urban areas [J]. *Science of the total environment*, 2016, 568: 1315 - 1325.
- [5] 陈建国, 夏禾, 曹艳梅. 高架轨道交通引起的环境振动影响分析与预测 [J]. *工程力学*, 2012, 29(6): 285 - 291.
(CHEN Jianguo, XIA He, CAO Yanmei. Analysis and prediction on environmental vibration induced by elevated rail transit [J]. *Engineering mechanics*, 2012, 29(6): 285 - 291.)
- [6] KOUROUSSIS G, PAUWELS N, BRUX P, et al. A numerical analysis of the influence of tram characteristics and rail profile on railway traffic ground-borne noise and vibration in the Brussels region [J]. *Science of the total environment*, 2014, 482/483: 452 - 460.
- [7] 郑国琛, 祁皓, 颜学渊. 考虑车轨垂向耦合福州地铁振源加速度研究 [J]. *振动·测试与诊断*, 2015, 35(2): 328 - 333.
(ZHENG Guochen, QI Ai, YAN Xueyuan. Research on acceleration of vibration source from Fuzhou metro considering vehicle-track vertical coupled model of vibration [J]. *Journal of vibration, measurement & diagnosis*, 2015, 35(2): 328 - 333.)
- [8] 张楠, 夏禾, 程潜, 等. 制动力作用下车辆-车站结构耦合系统分析 [J]. *振动与冲击*, 2011, 30(2): 138 - 143.
(ZHANG Nan, XIA He, CHENG Qian, et al. Analysis method for a vehicle structure coupled system under braking force [J]. *Journal of vibration and shock*, 2011, 30(2): 138 - 143.)
- [9] AZRAH K, MIRZAEI R, SHARIFI A R, et al. The study of whole-body vibration effects on the passenger's comfort commuting in Tehran metro system [J]. *Journal of health and safety at work*, 2016, 6(1): 81 - 94.
- [10] ANITA G, MIKAEL Ö, TOMAS J, et al. Railway noise annoyance and the importance of number of trains, ground vibration, and building situational factors [J]. *Noise and health*, 2012, 14(59): 190 - 201.
- [11] 宗琳. 地铁运行引起的建筑结构振动响应分析 [D]. 广东: 华南理工大学, 2014.
(ZONG Lin. Vibration response analysis of building structure induced by running subway [D]. Guangdong: South China University of Technology, 2014.)
- [12] 崔聪聪. 综合交通枢纽振动响应特性与舒适度分析 [D]. 南昌: 华东交通大学, 2018.
(CUI Congcong. Based on the analysis of transport hub vibration response characteristics and comfort [D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2018.)
- [13] 黄世明. 轨道交通与建筑物共建结构车致振动舒适度评价 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.
(HUANG Shiming. Comfort of evaluation of the jointly-structure of train traffic and buildings under the train loading [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2013.)
- [14] 刘涛. 地下轨道交通影响的地表振动实测分析与数值模拟 [D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2019.
(LIU Tao. Analysis and numerical simulation of ground vibration caused by underground rail transit [D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2019.)
- [15] 张允士, 张楠, 樊华, 等. 交通荷载作用下古木建筑结构的振动预测方法与验证 [J]. *西南交通大学学报*, 2017, 52(5): 902 - 909.
(ZHANG Yunshi, ZHANG Nan, FAN Hua, et al. Method to predict vibrations induced in ancient wooden structures by traffic loads and its validation [J]. *Journal of southwest jiaotong university*, 2017, 52(5): 902 - 909.)
- [16] SEYED-AL I, MORTEZA E, JABBAR-ALI Z. Numerical investigation of the effects of unsupported railway sleepers on train-induced environmental vibrations [J]. *Journal of low frequency noise, vibration and active control*, 2017, 36(2): 160 - 176.)
- [17] 张谦, 陈文化. 地铁列车出、进站加、减速的轴向激励引起出平面振动 [J]. *振动与冲击*, 2016, 35(24): 96 - 101.
(ZHANG Qian, CHEN Wenhua. Out-of-plane vibration induced by axial excitation while a metro train arriving at or leaving a station [J]. *Journal of vibration and shock*, 2016, 35(24): 96 - 101.)
- [18] 李磊, 张孟喜, 吴惠明. 地铁列车荷载计算方法对盾构隧道动力响应的影响 [J]. *上海交通大学学报*, 2015, 49(7): 1030 - 1034.
(LI Lei, ZHANG Mengxi, WU Huiming. Influence of metro train loading calculation methods on dynamic responses of Shield tunnel [J]. *Journal of Shanghai jiaotong university*, 2015, 49(7): 1030 - 1034.)
- [19] 孙雅珍, 李卿辰, 岳青青, 等. 基坑开挖对近接既有地铁隧道的影响分析 [J]. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*, 2020, 36(6): 1055 - 1063.
(SUN Yazhen, LI Qingchen, YUE Qingqing, et al. Analysis on influence of foundation pit excavation on adjacent existing subway tunnels [J]. *Journal of Shenyang jianzhu university (natural science)*, 2020, 36(6): 1055 - 1063.)
- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑工程容许振动标准: GB 50868—2013 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for allowable vibration of building engineering: GB50868—2013 [S]. Beijing: China Planning Press, 2013.)

(责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)