

◇ 研究报告 ◇

地铁车辆段咽喉区上盖建筑振动影响

程保青¹ 郭婧怡^{2†} 蒋浩杰²

(1 中国铁路设计集团有限公司 天津 300142)

(2 浙江大学环境与资源学院 杭州 310058)

摘要: 城区地铁车辆段进行上盖物业开发可节约、集约利用地铁用地。地铁车辆段特别是其咽喉区振动是上盖物业开发的环境制约因素。为研究地铁车辆段咽喉区对上盖建筑的振动影响,建立轨道-地基土-上盖建筑有限元模型,利用已建成上盖平台但未建上盖建筑的某地铁车辆段实测结果,验证仿真模型合理性,在此基础上,定量研究了上盖平台厚度和高度、不同结构类型上盖建筑及其层数等因素对建筑室内环境振动(铅垂向 Z 振级 VL_{Zmax})的影响。结果表明,地铁车辆段咽喉区对高层建筑的振动影响整体大于多层建筑;由于振动波在屋顶自由端发生反射并与入射波叠加,不同楼层楼板中央 VL_{Zmax} 随楼层升高略有增加;框架结构建筑室内 VL_{Zmax} 大于剪力墙结构;增加上盖平台厚度可减小建筑室内 VL_{Zmax} ;上盖建筑室内 VL_{Zmax} 随上盖平台离地高度增加而增加(即随建筑楼层绝对离地高度增加而增大)。研究结果可为地铁车辆段上盖物业开发振动污染防治提供理论和工程技术依据。

关键词: 地铁车辆段;上盖建筑;有限元仿真;环境振动

中图法分类号: X593 文献标识码: A 文章编号: 1000-310X(2021)06-0911-07

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2021.06.014

The influence of environmental vibration from the trains in the throat area of metro depot

CHENG Baoqing¹ GUO Jingyi² JIANG Haojie²

(1 China Railway Design Corporation, Tianjin 300142, China)

(2 College of Environments & Resource Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: Over-track building construction in subway depots has the advantage of comprehensive utilization of land resources. The vibration caused by trains in depots, especially in throat areas, is an environmental constraint in the development of over-track buildings. To study the influence of environmental vibration from the trains in throat area, a 3D track-soil-building finite element model was established. Based on the measurement results of a metro depot over which only a vacant over-track platform was built, the rationality of the simulation model is verified. The influences of story number and structure of buildings and the influences of thickness and height of over-track platform above ground on the vibration (the maximum vertical Z-weighted VL_{Zmax}) in over-track buildings were quantitatively studied. Results showed that the vibration in high-rise buildings was higher than that in multi-story buildings. The VL_{Zmax} at the center of different floor increased with the rise of building floor, which was mainly induced by the superposition of incident wave and vibration wave reflected at the free end of roof. The VL_{Zmax} of floor in frame building is higher than that in shear wall building. It decreased when the thickness of the over-track platform increased, but increased when the absolute height of floor increased. The above results can provide theoretical and engineering references for vibration pollution prevention in the development of over-track construction.

Keywords: Metro depot; Over-track building; Finite element method; Environmental vibration

2021-04-12 收稿; 2021-08-13 定稿

作者简介: 程保青 (1980-), 女, 河北唐山人, 本科, 研究方向: 轨道结构。

† 通信作者 E-mail: jyguo@zju.edu.cn

0 引言

地铁车辆段占地面积大,进行上盖物业开发可节约、集约利用土地,有效缓解城市土地资源稀缺问题。地铁列车通过时产生的振动是上盖物业开发的环境制约因素。有别于地铁正线段,地铁车辆段(特别是咽喉区)轨道线路复杂,道岔和轨道接头较多,存在转弯半径不同的轨线。由于地铁列车在上盖平台立柱间通过,振动未经土层有效衰减即传递至上盖建筑结构,振动强度大、频带宽,成分复杂^[1]。

针对地铁运行产生的振动污染,现有研究采用现场测试和数值仿真相结合方法,分析其对沿线临近建筑的振动影响^[2],研究建立振动预测模型^[3],提出振动防治措施^[4]。针对车辆段地铁振动问题,何卫等^[5]实测分析了车辆段不同轨线振动荷载的时频特性及其影响因素;Zou等^[1]对振动在临近土地及建筑中的衰减规律进行了实测研究;Yu等^[6]研究了车辆段运用库上盖建筑楼板的振动响应;谢伟平等^[7]建立精细化建筑结构模型,研究了运用库列车产生的振动在上盖建筑中的传播规律;冯青松等^[8]通过仿真预测了检修库和试车线双振源激励下的上盖建筑内振动。

上盖建筑室内振动响应与建筑结构类型有关^[9]。本文拟建立轨道-地基土-上盖建筑有限元模型,利用已建成上盖平台但未建上盖建筑的某地铁车辆段实测结果,验证仿真模型合理性。在此基础上,选取振动影响最大的咽喉区轨线,定量研究上盖平台厚度和高度、不同结构类型上盖建筑及其层数等对建筑室内环境振动的影响。研究结果可为地铁车辆段上盖物业振动污染防治提供理论和工程技术依据。需要指出的是,本研究结果仅适用于地铁车辆段框架和剪力墙类型的上盖建筑,不适用于钢结构类型建筑。

1 地铁车辆段及其上盖平台振动测试

选取已建成上盖平台但未建上盖建筑的某地铁车辆段,在运用库、咽喉区、小半径曲线段和试车线分别设置振动测试断面。咽喉区轨线、小半径曲线段轨线和试车线均为有砟道床,运用库内各检修线采用混凝土立柱架空。运用库、咽喉区和试车线均采用6节编组的B型车,测试时列车运行速度

分别为5 km/h、20 km/h和40 km/h。小半径曲线段运行工程车,速度为25 km/h。在各测试断面的钢轨、距轨线最近的上盖平台立柱离地1.25 m高度处和上盖平台上邻近立柱处设置采样点,采集列车通过时各采样点的振动加速度,采样频率为5000 Hz。

上述钢轨振动测试数据用于确定各轨线振动荷载,上盖平台立柱及上盖平台上邻近立柱处振动测试数据用于仿真模型合理性验证。

2 列车铅垂向振动荷载确定

研究表明,地铁列车通过时上盖建筑铅垂向振动加速度远大于水平向振动加速度^[10],我国《城市区域环境振动标准》规定的是铅垂向Z振级限值^[11],故本研究只考虑铅垂向振动荷载。

2.1 列车铅垂向振动加速度表达式

钢轨振动具有随机特性,可视为具有零均值的平稳各态历经的高斯过程。通过傅里叶级数展开,可将钢轨铅垂向振动加速度时域信号分解为不同频率的正弦波和余弦波,其表达式见式(1)。

$$a(t) = \sum_{n=0}^{N/2-1} (C_n \cos n\omega t + D_n \sin n\omega t), \quad (1)$$

$$C_n = \frac{2}{N} \sum_{\theta=0}^{N-1} a(t_\theta) \cos \frac{2\pi n\theta}{N} \quad (n=0, 1, 2, \dots, N/2-1), \quad (2)$$

$$D_n = \frac{2}{N} \sum_{\theta=0}^{N-1} a(t_\theta) \sin \frac{2\pi n\theta}{N} \quad (n=0, 1, 2, \dots, N/2-1), \quad (3)$$

其中, N 为采样点数; ω 为基频($\omega = \frac{2\pi}{N\Delta t}$); Δt 为采样间隔; t_θ 为采样点对应时间。

2.2 列车铅垂向振动荷载模拟

地铁列车每节车厢前后各有一个转向架,每个转向架设有两个轮对,列车质量呈前后、左右对称分布。根据对称性,可只选取一个转向架一侧进行分析,将其简化为单自由度质量-弹簧-阻尼模型(见图1)。其中, M_1 为单节车厢及附属构架总质量的1/4, M_2 为单个轮对质量; z_1 和 z_2 分别为车厢和轮对的竖向振动位移, k 和 c 分别为悬挂刚度和悬挂阻尼。列车以一定速度在轨道上行驶,轮轨间相互作用力为 $P(t)$ 。

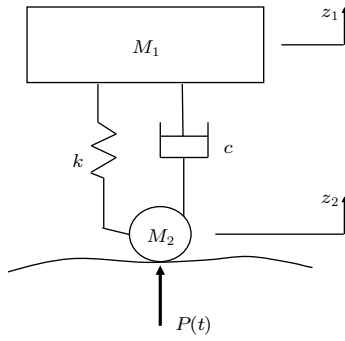


图1 列车竖向振动简化模型

Fig. 1 The simplified model of the vertical vibration of trains

根据图1建立铅垂向轮系运动平衡方程见式(4)。

$$M_1 \ddot{z}_1 + c(\dot{z}_1 - \dot{z}_2) + k(z_1 - z_2) = 0. \quad (4)$$

设车厢和轮对相对位移为 z_r , $z_r = z_1 - z_2$, 式(4)可改写为式(5)。

$$M_1 \ddot{z}_r + c\dot{z}_r + kz_r = -M_1 \ddot{z}_2. \quad (5)$$

忽略轮轨间竖向弹跳, 轮对的铅垂向振动加速度 $\ddot{z}_2$ 与钢轨的铅垂向振动加速度 $a(t)$ 可视为相等,

则方程(5)可改写为式(6)。

$$M_1 \ddot{z}_r + c\dot{z}_r + kz_r = -M_1 \left[\sum_{n=0}^{N/2-1} (C_n \cos n\omega t + D_n \sin n\omega t) \right]. \quad (6)$$

根据式(6), 可求解出 $\ddot{z}_r$ 。

根据达朗贝尔原理, $P(t)$ 表达式见式(7)。

$$P(t) = M_1 g + M_2 g + M_2 \ddot{z}_2 + M_1 (\ddot{z}_2 + \ddot{z}_r). \quad (7)$$

假设 $P(t)$ 以均匀分布的线荷载施加于钢轨上, 列车作用于钢轨的铅垂向振动线荷载 $F(t)$ 见式(8)。

$$F(t) = \frac{n}{L} P(t), \quad (8)$$

式(8)中, n 和 L 分别为单节车厢转向架数和长度。

咽喉区、试车线、小半径曲线和运用库列车振动荷载见图2。由图2可知, 在各种荷载中, 以咽喉区列车运行产生的铅垂向振动荷载为最大, 且具有明显周期性。本文选取咽喉区列车振动荷载, 研究其对上盖建筑的振动影响。咽喉区列车通过时钢轨铅垂向振动加速度谱见图3。

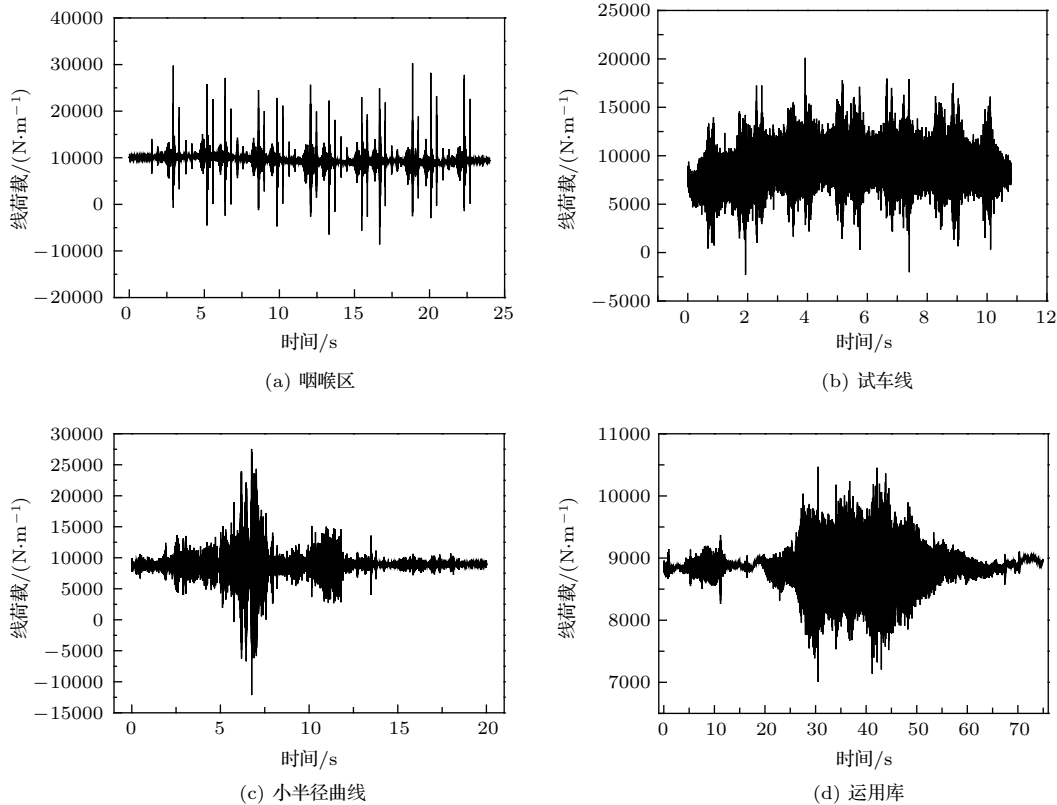


图2 列车竖向振动线荷载

Fig. 2 The line load of vertical vibration from trains

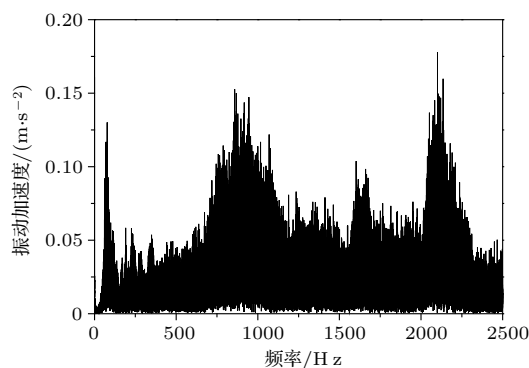


图3 咽喉区钢轨铅垂向振动加速度谱

Fig. 3 The spectrum of vertical vibration acceleration of rail in throat area

3 有限元模型及合理性验证

根据拟进行上盖物业开发区域地质条件、列车轨线分布及上盖建筑参数,建立轨道-地基土-上盖平台三维有限元模型(见图4)。将地基土简化为3层,分别为5 m高的素填土层、25 m高的粉质黏土层和15 m高的粉细砂层,地基土模型横截面大小为140 m × 140 m。地基土底部和四周均设有1 m厚的黏弹性实体单元。轨道模型参数如下:钢轨轨距为1.435 m;轨枕为III型轨枕,轨枕间距为0.6 m;道床底宽为4 m,高度为0.35 m。上盖平台高度为8.5 m,厚度为0.25 m,立柱截面半径为0.6 m。上盖建筑采用C40混凝土,钢轨、轨枕、道床、各层地基土和混凝土等材料参数见表1^[9]。网格尺寸取0.2 ~ 2 m。采用Rayleigh阻尼,阻尼比取0.03。

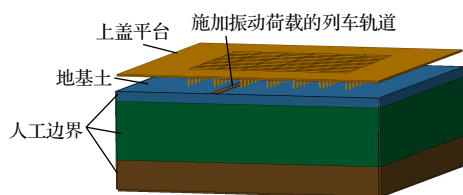


图4 轨道-地基土几何模型

Fig. 4 The geometric model of track, soil and over-track platform

将2.2节中咽喉区地铁列车铅垂向振动线荷载施加于钢轨上,线荷载时间步长为0.002 s。在施加振动荷载的列车轨道附近立柱和上盖平台地面分别设置验证点1和验证点2(见图5)。根据相关标准^[11],振动评价量采用振动加速度级和铅垂向Z振级,基准加速度取 10^{-6} m/s²。验证点处仿真和实测铅垂向最大Z振级对比见表2,1/3倍频程谱对比见

图6。两验证点处仿真结果和实测结果相对误差均小于3%,且1/3倍频程谱较为吻合,表明仿真模型建模较为准确,参数设置较为合理。

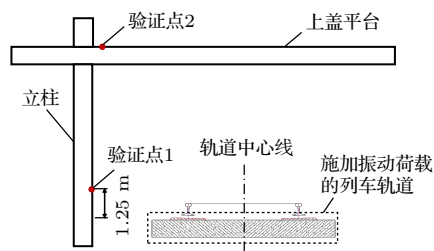
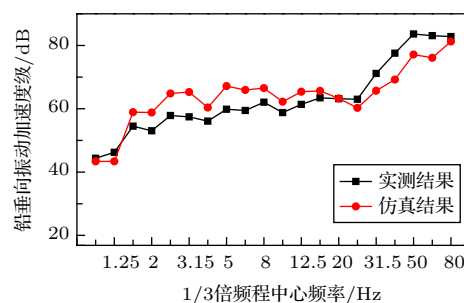
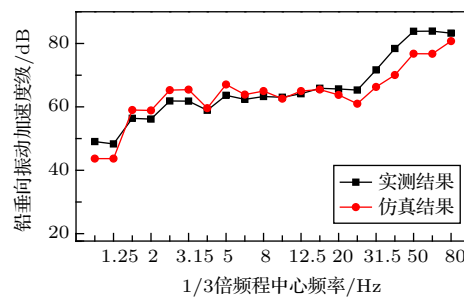


图5 验证点位置

Fig. 5 The locations of verification points



(a) 验证点1



(b) 验证点2

图6 1/3倍频程谱对比

Fig. 6 A comparison of 1/3 octave spectrum between prediction results and simulation results

表1 轨道、地基土和上盖建筑各构件材料参数

Table 1 The material parameters of each component of in track, soil and over-track building

材料名称	密度/(kg·m ⁻³)	弹性模量/MPa	泊松比
钢轨	7850	210000	0.25
轨枕	2500	30000	0.20
道床	2500	42000	0.30
素填土层	1980	205	0.31
粉质黏土层	1530	120	0.35
粉细砂层	1940	175	0.44
C40	2500	32500	0.20

表2 实测结果与仿真结果对比
Table 2 A comparison between measured results and simulated results

验证点	铅垂向最大Z振级/dB			
	实测结果	仿真结果	差值	相对误差/%
验证点1	73.2	74.4	1.2	1.62
验证点2	74.7	76.5	1.8	2.36

4 上盖建筑环境振动影响因素分析

4.1 仿真模型及参数设置

为研究地铁列车对上盖建筑的振动影响,在所建轨道-地基土-上盖平台仿真模型基础上增加上盖建筑模型(见图7)。依据拟开发上盖物业设计方案,上盖建筑中心与轨线中心线间距40 m,建筑为

多层框架结构,各楼层层高3 m。根据表3给出的上盖建筑层数、上盖建筑结构、上盖平台厚度 T 、上盖平台离地高度 H 参数,研究单因素改变对上盖建筑的振动影响。

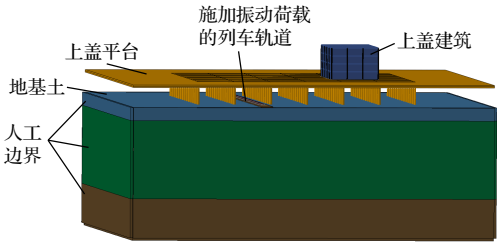


图7 轨道-土体-上盖建筑几何模型(以4层上盖建筑为例)

Fig. 7 The geometric model of track, soil and over-track buildings

表3 各仿真情景预测参数
Table 3 The prediction parameters of each simulation circumstance

影响因素	仿真情景预测参数			
	上盖建筑高度	上盖建筑结构类型	上盖平台厚度 T/m	上盖平台离地高度 H/m
上盖建筑楼层	4层、8层、12层、16层	框架	0.25	8.5
上盖建筑结构	4层	框架、剪力墙	0.25	8.5
上盖平台厚度	4层	框架	0.25、0.5、1	8.5
上盖平台离地高度	4层	框架	2.5	8.5、13.5、18.5

4.2 结果及分析

4.2.1 上盖建筑层数对上盖建筑振动影响

研究发现,建筑室内楼板跨中铅垂向振级高于柱边^[7]。为研究环境振动在上盖建筑内铅垂向传播规律,取上盖建筑各层楼板中央作为观测点。4层、8层、12层、16层建筑不同楼层楼板中央铅垂向最大Z振级(简称不同楼层 $VL_{Z\max}$)见图8。由图8可知,4层、8层、12层和16层建筑不同楼层 $VL_{Z\max}$ 分别为79.3~80.0 dB、82.8~83.5 dB、85.2~86.3 dB和84.2~85.0 dB。可见,地铁列车通过对上盖高层建筑室内环境振动影响整体大于多层建筑。上盖建筑1层 $VL_{Z\max}$ 显著高于其他楼层 $VL_{Z\max}$,主要是因为建筑1层直接与上盖平台连结,离振源更近。从第2层起, $VL_{Z\max}$ 随楼层增高而略有增大。与本研究相似,马晓磊等^[12]研究表明地铁沿线多层建筑中首层楼板振动响应最大,2层以上振动强度随楼层升高而略微增加;谢伟平等^[13]发现多层上盖

建筑中低频振动沿层高有放大趋势。这主要是振动波在屋顶自由端发生反射与入射波叠加,使得较高楼层振动较大^[13]。16层建筑中部振动强度突然减小,与入射波与反射波传至该处时位相相差近180°有关。

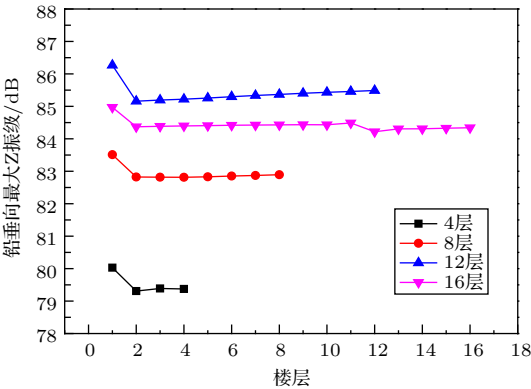


图8 不同层数上盖建筑各层楼板铅垂向最大Z振级
Fig. 8 The $VL_{Z\max}$ of different floor in buildings with different story number

4.2.2 上盖建筑结构对上盖建筑振动影响

4层框架和剪力墙结构建筑不同楼层 VL_{Zmax} 见图9。由图9可知, 4层框架和剪力墙结构建筑不同楼层 VL_{Zmax} 分别为79.3 ~ 80.0 dB和75.6 ~ 76.0 dB。可见, 地铁列车通过对框架结构上盖建筑室内环境振动影响高于剪力墙结构建筑, 4层框架结构建筑不同楼层 VL_{Zmax} 比剪力墙结构高3.7 ~ 4.0 dB。与本仿真结果相似, Di等^[9]研究表明, 铁路列车运行对上盖多层、小高层和高层框架结构住宅的振动影响均高于剪力墙结构。

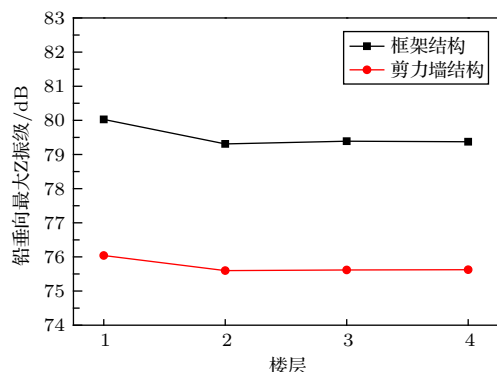


图9 框架和剪力墙结构上盖建筑各层楼板铅垂向最大Z振级

Fig. 9 The VL_{Zmax} of different floor in buildings with frame or shear wall structure

4.2.3 上盖平台厚度对上盖减振振动影响

上盖平台厚度为0.25 m、0.50 m和1.00 m时, 4层框架建筑不同楼层 VL_{Zmax} 见图10。由图10可知, 上盖平台厚度分别为0.25 m、0.5 m和1 m时, 4层框架建筑不同楼层 VL_{Zmax} 分别为79.3 ~ 80.0 dB、78.5 ~ 79.0 dB和78.2 ~ 78.5 dB。可见, 增加上盖平台厚度可降低上盖建筑室内 VL_{Zmax} , 且上盖平台厚度每增加一倍, 不同楼层 VL_{Zmax} 可减少0.2 ~ 1.0 dB。与本研究类似, Sanayei等^[3]研究表明, 增加建筑底层楼板厚度可降低传播至上部楼层的振动, 且楼板厚度每增加0.5 m, 楼层振动减少约4.0 ~ 5.6 dB。

4.2.4 上盖平台高度对上盖建筑振动影响

对于上盖平台上方建筑的相同楼层, 楼层的绝对离地高度随上盖平台离地高度增加而增加。以上盖平台上方建筑各楼层的绝对高度为横坐标, 楼层中央 VL_{Zmax} 为纵坐标, 上盖平台离地高度为8.5 m、13.5 m和18.5 m时, 4层框架建筑不同楼层 VL_{Zmax}

见图11。由图11可知, 上盖平台离地高度分别为8.5 m、13.5 m和18.5 m时, 4层框架建筑不同楼层 VL_{Zmax} 分别为79.3 ~ 80.0 dB、80.3 ~ 81.0 dB和82.0 ~ 82.9 dB。可见, 不同楼层 VL_{Zmax} 随上盖平台离地高度增加而增加, 即随建筑楼层绝对离地高度增加而增大。上盖平台离地高度每增加5 m, 不同楼层 VL_{Zmax} 增加1.0 ~ 1.9 dB。

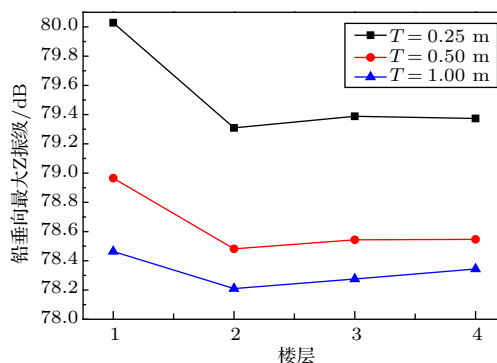


图10 不同上盖平台厚度情况下上盖建筑各层楼板铅垂向最大Z振级

Fig. 10 The VL_{Zmax} of different floor in buildings with different thickness of over-track platform

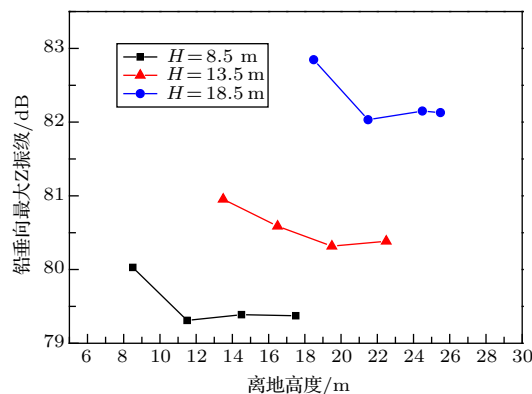


图11 不同上盖平台高度情况下上盖建筑各层楼板铅垂向最大Z振级

Fig. 11 The VL_{Zmax} of different floor in buildings with different height of over-track platform above ground

5 结论

为研究地铁车辆段咽喉区对上盖建筑的振动影响, 建立轨道-地基土-上盖建筑有限元模型, 在利用实测数据验证模型合理性基础上, 定量研究了上盖平台厚度和离地高度、上盖建筑结构类型及其层数对建筑室内环境振动的影响。主要研究结论如下:

(1) 咽喉区地铁列车通过对上盖高层建筑室内环境振动大于多层建筑。建筑1层因与上盖平台直接连结,且离振源较近,故楼板中央 VL_{Zmax} 显著高于上层楼板;由于振动波在屋顶自由端发生反射与入射波叠加,导致不同楼层楼板中央 VL_{Zmax} 随楼层升高略有增加。

(2) 框架结构建筑室内 VL_{Zmax} 大于剪力墙结构,4层框架结构建筑不同楼层中央 VL_{Zmax} 比剪力墙结构高3.7~4.0 dB。

(3) 增加上盖平台厚度可减小建筑室内 VL_{Zmax} 。上盖平台厚度每增加1倍,4层框架结构建筑不同楼层中央 VL_{Zmax} 减少0.2~1.0 dB。

(4) 上盖建筑室内 VL_{Zmax} 随上盖平台离地高度增加而增加,即随建筑楼层绝对离地高度增加而增大,建筑所在上盖平台离地高度每增加5 m,不同楼层中央 VL_{Zmax} 增加1.0~1.9 dB。

参 考 文 献

- [1] Zou C, Wang Y, Moore J A, et al. Train-induced field vibration measurements of ground and over-track buildings[J]. Science of the Total Environment, 2017, 575: 1339-1351.
- [2] Kouroussis G, Mouzakis H P, Vogiatzis K E. Structural impact response for assessing railway vibration induced on buildings[J]. Mechanics & Industry, 2018, 18(8): 703.
- [3] Sanayei M, Anish K P, Moore J A, et al. Measurement and prediction of train-induced vibrations in a full-scale building[J]. Engineering Structures, 2014, 77: 119-128.
- [4] Yarmohammadi F, Rafiee-Dehkharghani R, Behnia C, et al. Design of wave barriers for mitigation of train-induced vibrations using a coupled genetic-algorithm/finite-element methodology[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, 121: 262-275.
- [5] 何卫, 谢伟平. 地铁车辆段列车动荷载特性实测研究[J]. 振动与冲击, 2016, 35(8): 132-137.
He Wei, Xie Weiping. Field measurement of the subway train loading in a car depot[J]. Journal of Vibration and Control, 2016, 35(8): 132-137.
- [6] Yu B, Zhang B, Ying H, et al. Field measurement and numerical simulation of vibration effect on metro depot superstructure caused by passing trains[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 303-306: 2893-2897.
- [7] 谢伟平, 陈艳明, 姚春桥. 地铁车辆段上盖物业车致振动分析[J]. 振动与冲击, 2016, 35(8): 110-115.
Xie Weiping, Chen Yanming, Yao Chunqiao. Vibration analysis of train depot over-track buildings induced by train load[J]. Journal of Vibration and Control, 2016, 35(8): 110-115.
- [8] 冯青松, 王子玉, 刘全民, 等. 双振源激励下地铁车辆段上盖建筑物振动特性[J]. 交通运输工程学报, 2019, 19(4): 59-69.
Feng Qingsong, Wang Ziyu, Liu Quanmin, et al. Vibration characteristics of metro depot upper building under double vibration source excitation[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2019, 19(4): 59-69.
- [9] Di G, Xie Z, Guo J. Predict the influence of environmental vibration from high-speed railway on over-track buildings[J]. Sustainability, 2021, 13(6): 3218.
- [10] 邹超. 地铁车辆段及上盖建筑物振动传播规律及减振技术研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
- [11] 城市区域环境振动标准: GB 10070-88[S].
- [12] 马晓磊, 巴振宁, 高愈辉, 等. 滨海软土地区地铁运营对沿线建筑物振动影响分析[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(S2): 177-180.
Ma Xiaolei, Ba Zhenning, Gao Yuhui, et al. Vibration effect of metro operation on buildings along Tianjin Binhai New Area in soft soil areas[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(S2): 177-180.
- [13] 谢伟平, 袁葵, 孙亮明. 地铁车辆段上盖建筑车致振动试验[J]. 建筑科学与工程学报, 2020, 37(3): 99-107.
Xie Weiping, Yuan Kui, Sun Liangming. Train-induced vibration test of metro depot over-track buildings[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2020, 37(3): 99-107.