

地铁隧道上盖建筑振动特性分析

徐永刚

(宁波城建投资集团有限公司, 315010, 宁波)

摘要 [目的]近年来,地铁隧道沿线上盖物业开发迅速,其在充分利用了城市空间的同时,地铁列车运行引起的振动也将对其产生显著的影响。由于上盖物业结构形式复杂,列车振动在上盖建筑中的传播规律尚不明确,故有必要开展相关研究。[方法]依托宁波市轨道交通与区块开发共建综合体工程,建立了列车-隧道-土体-上盖建筑的三维振动有限元模型;通过仿真实验,分析了隧道埋深、隧道距上盖建筑水平间距及建筑物楼层对振动传播的影响。[结果及结论]①当上盖建筑与振源的水平间距位于一定范围之内,随着水平间距的增大,Z振级单值出现增长;当超出该范围后,Z振级单值随水平间距的增大发生了较为明显的衰减;②上盖建筑振动在不同建筑层数下的竖向传播规律在总体上具有一致性,在底部楼层中,振动会先达到一个最大值,而后随着楼层的增加而减小,最后在顶部楼层呈现放大的趋势;③通过1/3倍频程可以发现,上盖建筑振动传播过程中,不同隧道埋深、不同水平距离及不同建筑层数下的同一楼层中心频率振动加速度级分布的趋势相似,其Z振级结果的差异主要是在主频段的衰减幅度,即振动传播过程中衰减的是主频段的振动,不改变主频的分布范围。

关键词 地铁隧道;上盖物业;车致振动;振动响应

中图分类号 F293.2; TU311

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.07.050

Analysis of Metro Tunnel Overhead Building Vibration Characteristics

XU Yonggang

(Ningbo Urban Construction Investment Group Co., Ltd., 315010, Ningbo, China)

Abstract [Objective] In recent years, overhead properties along metro tunnel lines are rapidly developing, making effective use of urban space. However, vibrations caused by metro train operation significantly affect these properties. Due to the complexity of overhead building structures and unclear propagation laws of train vibrations in these buildings, it is necessary to conduct relevant research. [Method] Based on Ningbo an integrated projected by rail transit and block development, a three-dimensional vibration finite element model of train-tunnel-soil-overhead building is established. Through simulation experiments, the impact of tunnel depth, horizontal distance

between the tunnel and overhead buildings, and the number of building floors on vibration propagation is analyzed. [Result & Conclusion] (1) When the horizontal distance between overhead buildings and vibration sources is within a certain range, the Z vibration level increases with increasing horizontal distance. Once exceeding this range, the Z vibration level decreases significantly with increasing horizontal distance. (2) The vertical propagation law of overhead building vibrations under different numbers of building floors generally shows consistency. On the lower floors, vibrations reach a maximum value first, then decrease with increasing floors, and finally show an amplification trend at the top floors. (3) Through 1/3 octave band analysis, it is observed that during the propagation of overhead building vibrations, the trends of vibration acceleration level distribution at the center frequency of the same floor are similar for different tunnel depths, horizontal distances, and building floors. The main difference lies in the attenuation magnitude in the main frequency band, indicating that the vibrations attenuate in the Z-level frequency mainly band during propagation without altering the distribution range of the main frequency.

Key words metro tunnel; overhead property; vehicle-induced vibration; vibration response

随着地铁的快速发展,基于隧道沿线的上盖物业开发成为了一种新的趋势。然而,地铁列车运行引起的振动将通过上盖建筑进行传播,这将严重地影响人们的生活和办公。因此,厘清地铁列车振动在上盖建筑中的传播规律,对上盖物业的减振降噪有着重大的指导意义^[1-2]。

目前,国内外学者采用了多种方法对上述问题进行了研究。文献[3]提出了列车行车振动诱发上盖建筑振动的时域-频域预测方法,指出列车与轨道相互作用会导致建筑物振动超出限值。文献[4]对中国广州地铁地下车站进行了大量的现场测量和分析,结果表明所测建筑物的振动主要集中在20~50 Hz范围内。文献[5]对某地铁车辆段上盖居民楼进行了测量分析,说明了轨道与测点之间的距离

对振动响应的影响。文献[6]通过场地实测,建立三维的振动有限元模型,输入荷载激励,研究建筑内部的振动传播规律,并对建筑进行了环境振动舒适度的评估。文献[7]在广州某地铁站进行了现场测量,发现垂直和水平振动加速度水平与列车速度成正比,聚氨酯枕木在 0 ~ 10 Hz 频段有助于降低垂直振动。文献[8]对北京地铁霸王坟车辆段上盖建筑进行了振动测量,发现竖向振动随楼层增加而减小,且上盖建筑中第一楼层的舒适度不满足要求。文献[9]通过振动台模型试验研究了地下结构-土体-上盖建筑结构相互作用系统的振动响应。上述研究主要集中在地铁车站和车辆段建筑物的振动特性,然而振动在轨道交通隧道沿线的上盖物业传播过程更加复杂,需进一步研究。

因此,本文依托宁波市轨道交通与区块开发共建综合体工程,通过现场实测和数值模拟对地铁隧道沿线的上盖物业振动特性及影响因素展开研究。

1 工程概况

宁波市轨道交通与区块开发共建综合体工程,包括 3 栋 10 层建筑(1 号楼—3 号楼)、2 栋 11 层建筑(4 号楼—5 号楼)和 4 栋 20 层建筑(6 号楼—9 号楼);所有建筑均为剪力墙结构,层高为 2.9 m,桩基础长度在 64 ~ 74 m 之间。服役运营的既有宁波轨道交通 4 号线矮潘区间隧道由东南至西北方向地下穿越本工程地块;处于工程范围内的地铁隧道长度约为 200 m,隧道平均埋深约为 15.5 ~ 21.5 m,左右隧道之间净间距为 10.0 m,隧道管片厚度为 0.35 m,外径为 6.2 m;隧道建设时,采用盾构法施工。宁波轨道交通 4 号线列车为 6 节编组,车厢长度为 19.52 m,轴重为 14 t,穿越该工程段的设计车速为 73 km/h。隧道与上盖建筑的平面位置关系如图 1 所示,土体的典型物理力学参数参考文献[10]。

根据我国现行标准 GB/T 50355—2005《住宅建筑室内震动限制及其测量方法标准》,上盖建筑振动实测以 VAL(振动加速度级)作为评判指标,单位为 dB,计算公式为:

$$V_{AL} = 20 \lg(a_e/a_0) \quad (1)$$

式中:

a_0 ——基准加速度,一般取值为 10^{-6} m/s^2 ;

a_e ——实测振动加速度有效值,单位 m/s^2 。

因此,在下文分析过程中采用的评价量为 1/3

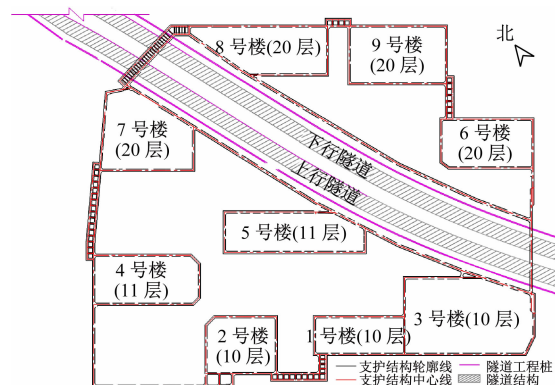


图1 隧道与上盖建筑的平面位置关系图

Fig. 1 Diagram of planar location relation between tunnel and overhead buildings

倍频程铅垂向振动加速度级最大值($V_{AL,max}$)和 Z 振级最大值($V_{AL,Z,max}$)。

2 模型建立与验证

上盖建筑中 3 号楼、5 号楼、7 号楼距离地铁隧道的水平距离较近,为了提高计算效率,选取双线地铁隧道和 3 号楼作为研究对象,建立三维有限元模型如图 2 所示。

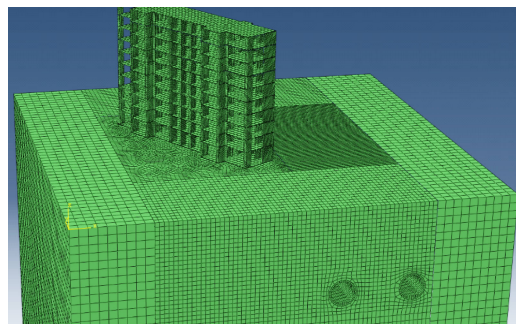


图2 地铁隧道上盖建筑振动有限元模型

Fig. 2 Finite element model of metro tunnel overhead building vibration

其中,3 号楼采用剪力墙结构,该隧道为整体建模,模型土层尺寸设置为 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m} \times 70 \text{ m}$;采用线弹性本构和 Rayleigh(瑞利)阻尼,该阻尼系数 α 和 β 由下式确定:

$$\xi_n = \frac{\alpha}{4\pi f_n} + \beta \pi f_n \quad (2)$$

式中:

ξ_n ——模态振型阻尼比;

f_n ——第 n 阶固有频率。

将 5 Hz 和 100 Hz 的阻尼比 0.05 代入式(2),得到阻尼系数 $\alpha = 2.99199$, $\beta = 1.5157 \times 10^{-4}$ 。

同时,以 80 Hz 的横波波长作为最小弹性波长,计算有限元网格应满足的最大尺寸,横波波速为:

$$\beta = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (3)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (4)$$

式中:

G ——弹性介质的拉梅常数;

ρ ——弹性介质密度;

E ——介质弹性模量;

ν ——泊松比。

将土体相关参数代入式(3)和式(4),可知本模型中网格的最大尺寸为 0.71 m。基于此,将本模型中有限元网格尺寸由计算域的 0.5 m 逐渐过渡到远场的 2 m。在本模型中,通过在地铁相邻扣件之间施加具有一定相位差的扣件力来实现对地铁列车移动荷载的模拟。该荷载模拟了 6 节车厢的地铁列车以速度 54 km/h 运行,在模型中地铁列车扣件力施加长度为 60 m;采用动力隐式积分算法对模型进行时域求解,考虑计算的时间成本和硬件条件限制,计算地铁列车运行时,动力计算时间步长取为 0.004 5 s。

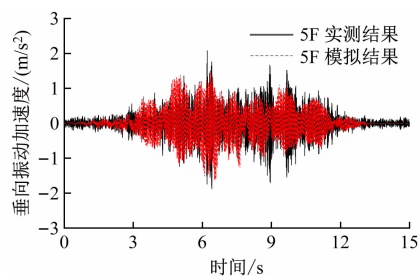
有限元模型中,提取 5 楼楼层(以下简称“5F”,余类同)中心处的垂向振动加速度与现场实测上盖建筑振动进行对比,如图 3 所示。如无特殊说明,本文中分析的垂向振动加速度均使用楼层中心处的垂向振动加速度。由图 3 可以看出:上盖建筑中模拟的振动响应的时长与实测的振动响应时长是一致的;模拟的各楼层 Z 振级单值随楼层的升高而衰减,进而在顶部楼层有回升趋势,这与实测结果的规律具有一致性。

3 数值模拟结果分析

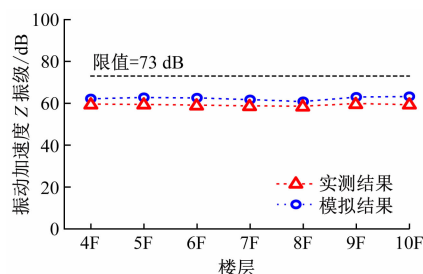
基于 3 号楼建立的列车-隧道-土体-建筑的三维振动有限元模型,进一步探究不同地铁隧道埋深、楼层数和水平距离下上盖建筑内部的振动分布情况。

3.1 不同隧道埋深

将上盖建筑与隧道间水平距离设置为 5 m,上盖建筑层高为 10 层,分别取隧道埋深为 6 m、8 m、12 m、14 m、18 m、20 m、22 m、24 m 及 26 m;探究不同的隧道埋深对上盖建筑振动响应的影响,其计算结果如图 4 所示。由图 4 a)可以看出:各楼层的 Z



a) 时程曲线对比图



b) Z 振级单值对比图

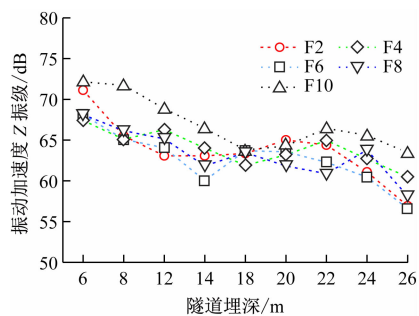
图 3 模拟结果与实测数据对比图

Fig. 3 Comparison diagram of simulation results and field-measured data

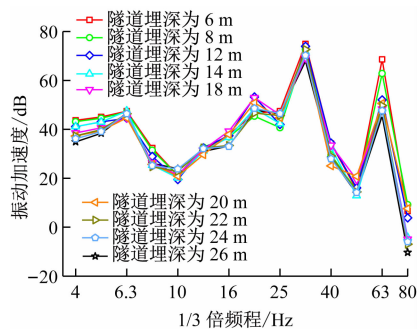
振级单值在总体上均随隧道埋深的增大而减小;其中,隧道埋深在 6 ~ 18 m 范围内,各楼层 Z 振级单值的衰减尤为明显,减小的量级达到了 8 dB;而隧道埋深大于 18 m 时,振级甚至会出现放大现象,这是由于隧道埋深的改变,导致隧道处在不同的土层中,而所处土层参数的变化会直接影响最终的振动响应。由图 4 b)可以看出:随着隧道埋深的增加,1/3 倍频程下各频段的分频振级均有所减小;其中,中心频率为 63 Hz 的频段的分频振级衰减最为明显。

3.2 不同水平间距

将隧道埋深设置为 20 m 不变,上盖建筑层数为 10 层不变,分别取上盖建筑与隧道外径的最短水平距离为 5 m、7 m、9 m、11 m、13 m、15 m、20 m、25 m、30 m、35 m;探究上盖建筑与隧道间水平距离的不同对上盖建筑振动响应的影响,计算结果如图 5 所示。由图 5 a)可以看出:当水平间距在 5 ~ 11 m 范围内,Z 振级单值随水平间距的增大并不发生衰减,甚至会发生放大的现象;而上盖建筑与隧道间水平距离在 11 ~ 35 m 范围时,Z 振级单值随水平间距的增大发生了较为明显的衰减。由图 5 b)可以看出:随着水平间距的增加,1/3 倍频程下各频段的分频振级均有所减小;其中,中心频率为 50 ~ 80 Hz 的频段的分频振级衰减最为明显。



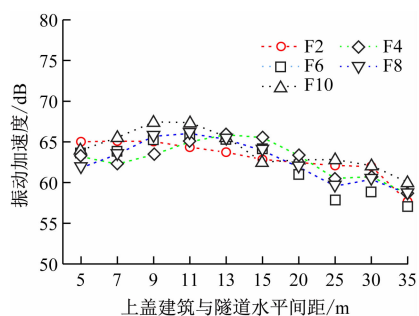
a) 不同楼层测点的 Z 振级单值图



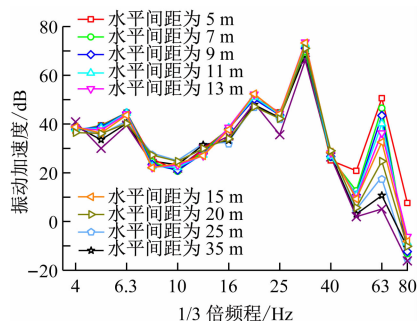
b) 4F 结点在不同隧道埋深下 1/3 倍频程图

图 4 隧道埋深对上盖建筑振动响应的影响

Fig. 4 Influence of tunnel buried depth on overhead building vibration response



a) 不同楼层测点的 Z 振级单值图



b) 4F 结点在不同水平间距下 1/3 倍频程图

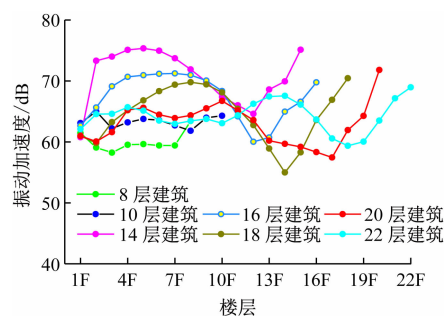
图 5 水平间距对上盖建筑振动响应的影响

Fig. 5 Influence of horizontal spacing on overhead building vibration response

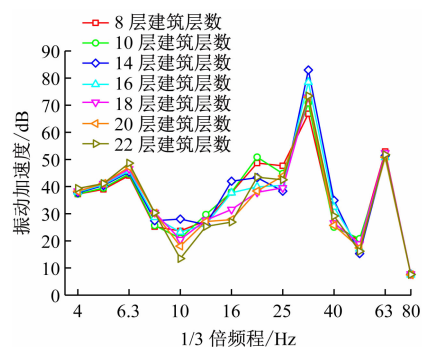
3.3 不同上盖建筑楼层数

将隧道埋深设置为 20 m 不变,水平间距为 5 m

不变,设置上盖建筑层数分别为 8 层、10 层、14 层、16 层、18 层、20 层及 22 层;探究上盖建筑层数的不同对上盖建筑振动响应的影响,计算结果如图 6 所示。由图 6 a) 可以看出:振动在不同建筑层数下的竖向传播规律在总体上具有一致性,在底部楼层中,振动会先达到一个最大值,而后随着楼层的增加而减小,最后在顶部楼层呈现放大的趋势。由图 6 b) 可以看出:随着建筑层数的增加,波动明显的频段主要集中在 10.0 ~ 31.5 Hz,但 1/3 倍频程总体的能量分布规律没有较大的变化。



a) 不同楼层测点的 Z 振级单值图



b) 4F 结点在不同建筑层数下 1/3 倍频程图

图 6 上盖建筑层数对振动响应的影响

Fig. 6 Influence of overhead building floor numbers on vibration response

4 结语

本文建立了三维有限元模型,并通过实测数据验证,分析了上盖建筑的车致振动响应特性,主要结论如下:

1) 上盖建筑不同楼层振动在不同隧道埋深下的竖向传播规律在总体上具有一致性,会随着隧道埋深的增加而衰减。当上盖建筑与振源的水平间距位于一定范围之内,随着水平间距的增大,Z 振级单值并不发生衰减,反而会出现增长;当超出该范围后,Z 振级单值随水平间距的增大发生了较为明

显的衰减。

2) 上盖建筑振动在不同建筑层数下的竖向传播规律在总体上具有一致性,在底部楼层中,振动会先达到一个最大值,而后随着楼层的增加而减小,最后在顶部楼层呈现放大的趋势,这是由于在振动传播过程中,各频率成分的振动加速度级随楼层先减小后增大。

3) 通过1/3倍频程可以发现上盖建筑振动传播过程中,不同隧道埋深、不同水平距离以及不同建筑层数下的同一楼层中心频率振动加速度级分布的趋势相似,其Z振级结果的差异主要是在主频段的衰减幅度,即振动传播过程中衰减的是主频段的振动,不改变主频的分布范围。

参考文献

- [1] 谢艳花,黄子颀,郑钰钰,等. 地铁下穿上盖高层建筑振动响应预测与分析[J]. 浙江工业大学学报, 2024, 52(1): 35.
XIE Yanhua, HUANG Zikuang, ZHENG Yuyu, et al. Prediction and analysis of vibration response of high-rise buildings caused by subways[J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2024, 52(1): 35.
- [2] 冯青松,余超,唐柏赞,等. 双层车辆段上盖建筑振动与结构噪声预测分析[J]. 振动与冲击, 2023, 42(9): 304.
FENG Qingsong, YU Chao, TANG Baizan, et al. Prediction and analysis of vibration and structural noise of upper cover building of double-deck depot[J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(9): 304.
- [3] YANG J, ZHU S, ZHAI W, et al. Prediction and mitigation of train-induced vibrations of large-scale building constructed on subway tunnel[J]. The Science of the Total Environment, 2019, 668: 485.

- [4] ZOU C, WANG Y, WANG P, et al. Measurement of ground and nearby building vibration and noise induced by trains in a metro depot[J]. The Science of the Total Environment, 2015, 536: 761.
- [5] GUO T, CAO Z, ZHANG Z, et al. Numerical simulation of floor vibrations of a metro depot under moving subway trains[J]. Journal of Vibration and Control, 2018, 24(18): 4353.
- [6] 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.
XIE Weiping, CHEN Yanming, YAO Chunqiao. Vibration analysis of train depot over-track buildings induced by train load[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(8): 110.
- [7] FENG Q, ZHANG Y, JIANG J, et al. Field measurement and evaluation of vibration in different areas of a metro depot[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2022, 21(2): 529.
- [8] 赵娜. 地铁上盖物业的振动舒适度研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.
ZHAO Na. Vibration serviceability research on top head estates of subway[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2012.
- [9] WANG G, YUAN M, MIAO Y, et al. Experimental study on seismic response of underground tunnel-soil-surface structure interaction system[J]. Tunnelling and Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research, 2018, 76: 145.
- [10] DI H, SU G, YU J, et al. Field measurement and evaluation of vibrations inside buildings above metro tunnels[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2023, 166: 107767.

· 收稿日期:2024-03-10 修回日期:2024-03-21 出版日期:2024-07-10
Received:2024-03-10 Revised:2024-03-21 Published:2024-07-10
· 通信作者:徐永刚,高级工程师,xyg863@163.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

交通运输部、国家铁路局发文要求加强城际、市域(郊)铁路监管

2024年6月3日,交通运输部、国家铁路局发布《关于加强城际铁路、市域(郊)铁路监督管理的意见》(交铁路发[2024]31号)。

城际铁路、市域(郊)铁路是综合交通运输体系的重要组成部分。近年来,我国城际铁路、市域(郊)铁路发展取得显著成效,对便利人民群众出行、支撑和引领经济社会发展发挥了重要作用。但同时存在监管界面不清晰、监管制度不健全、衔接协调不顺畅等问题。要求:立足新发展阶段,完整、准确、全面贯彻新发展理念,服务加快构建新发展格局;以推动高质量发展为主题,统筹发展和安全;坚持目标导向和问题导向相统一,厘清监管界面、落实监管责任,完善制度规则、强化标准供给,加强系统治理。从而确保城际铁路、市域(郊)铁路规范有序、健康持续发展,为加快构建现代综合交通运输体系、服务中国式现代化建设提供有力支撑。

文件指出,加强城际、市域(郊)铁路的监管需要明确监管责任、完善监管制度、突出监管重点、提升监管效能。

(来源:交通运输部官网)