

地铁运行引发临近建筑群低频微振动 及传递规律研究

陈兆玮¹, 徐 鸿², 尹 颢², 朱胜阳³

(1. 重庆交通大学机电与车辆工程学院, 重庆 400074; 2. 中铁二院工程集团有限责任公司, 四川 成都 610036;
3. 西南交通大学牵引动力国家重点实验室, 四川 成都 610031)

摘要: 随着城市建筑群的飞速建设, 由地铁运行引起的建筑群低频微振动问题越来越突出。本研究依托成都某建筑群项目, 研究地铁运行对土体及建筑群振动的影响。考虑轮轨非线性动力相互作用、土体分层特性、土体-建筑相互作用关系等因素, 建立地铁列车-轨道-隧道-土体-建筑群耦合动力学模型; 通过现场测试掌握地铁振动源强特征, 并对模型进行验证; 在此基础上研究地铁动荷载下土体振动的空间传播规律及不同土层界面处的局部振动特性; 评估地铁运行对建筑群的影响。研究表明: 建立的动力学模型可有效用于研究地铁运行下建筑群低频微振动问题; 实测隧道壁加速度卓越频率为 31.5~80 Hz, 实测隧道壁 VL_{zmax} (最大 z 振级) 主要在 70.3~71 dB, 实测道床 VL_{zmax} 则在 94.3~125 dB; 随着振动波在土体中向上传递, 振动能量逐渐衰减, 但是在地表附近存在一定的振动放大; 土体对 80 Hz 以上的振动具有较强的吸收能力, 随着振动横向传播距离的增大, VL_{zmax} 近似线性减小; 该建筑群中的住宅楼和商业楼均未出现振动超标。

关键词: 车辆-轨道耦合动力学; 地铁; 低频振动; 环境振动; 建筑群; 现场试验

中图分类号: U260.11⁺1; TU311.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2023)06-1623-10

DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2023.06.017

引 言

近年来, 随着大中型城市的进一步发展, 城市建筑群得到越来越多的应用^[1], 日本六本木新城、法国巴黎高铁站、上海虹桥交通枢纽、深圳塘朗城等都是国内外知名的建筑群。建筑群周边大多设计有地铁系统^[2], 但是地铁带来的振动则成为了制约建筑群进一步发展的关键问题^[3]。当地铁列车在隧道中运行时, 剧烈的轮轨接触力引起隧道结构振动, 并通过土体传递至地表, 最终在土体-建筑相互作用下导致建筑物的振动^[4]。研究表明, 地铁运营引起的沿线建筑振动属于低频微振动(主频一般在 80 Hz 以下, 加速度幅值一般在 0.01g 以下)^[5], 这种微振动对高精测试仪器、高精度加工设备、古建筑等具有很大影响, 同时还会影响到长期处于该环境下生活和工作的民众身体健康^[6]。因此需要深入研究地铁运行对城市建筑群低频微振动的影响。

目前部分学者开展了地铁运行对沿线建筑的影响研究, 根据其研究方法可以分为三类: (1) 解

析/半解析法: Krylov 等^[7]采用解析方法, 构建了隧道-土体系统的动力学模型, 并结合格林函数法研究了列车移动荷载对轨道-隧道-土体系统振动的影响; Forrest 等^[8]基于 PiP (Pipe in Pipe) 模型, 将隧道和土体都考虑为圆柱形结构, 研究列车通过隧道时系统的振动问题; 袁宗浩等^[9]将隧道模拟为无限长圆柱壳, 用解析法研究了移动简谐荷载下轨道-隧道-土体的振动问题; Hussein 等^[10]、曾晨等^[11]、狄宏规等^[12]也均采用解析/半解析法开展了相关研究。(2) 数值仿真法: 随着有限元(2D/2.5D/3D)、边界元、无限元等方法的出现及发展, 数值仿真法已经成为目前求解车致环境振动问题最为常用的方法。马龙祥等^[6]基于有限元-无限元的方法, 将隧道-土体考虑为纵向薄片周期结构, 利用叠加原理研究了列车对环境振动的影响; 基于有限元技术和车辆-轨道耦合动力学理论, 韦凯等^[13]研究了扣件刚度的频变效应对隧道及环境振动的影响; 郑国琛等^[14]结合实测数据以及数值分析方法, 研究了地铁引起的沿线环境振动问题; 除此之外, 高广运等^[15]、花雨萌等^[16]也采用数值仿真方法开展了车

收稿日期: 2022-03-11; **修订日期:** 2022-05-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52008067); 重庆市自然科学基金资助项目(CSTB2022NSCQ-MSX1193); 重庆市教育委员会科学技术研究项目(KJZD-M202300701)。

致环境振动问题研究。(3)经验公式法:Kurzweil^[17]提出了列车通过时地上建筑振级的预测公式;马蒙等^[18]基于大量实测数据提出了环评预测方法。上述工作均为车致环境振动问题研究提供了很多解决方案,但是既有目标建筑物均较为简单,而针对复杂建筑群的影响研究尚少。因此本文借助应用最为广泛的数值仿真方法,开展土体和大型建筑群系统的振动研究。

本文在介绍目标建筑群的基础上,形成地铁运行诱发城市建筑群低频微振动研究方法,并构造列车-轨道-隧道-土体-建筑群耦合动力学模型;通过实测隧道内振动数据获得地铁振动源强信息,并对建立的动力学模型进行验证;在此基础上研究地铁运行引发的土体和建筑群振动产生及传播规律,为建筑群的振动控制提供理论和数据支撑。

1 地铁运行诱发城市建筑群低频微振动研究方法

首先基于车辆-轨道耦合动力学理论,考虑轮轨非线性接触关系构建地铁列车-轨道系统动力学模型,计算列车通过时的所有扣件力;然后建立轨道-隧道-土体-建筑群系统有限元模型,将计算得到的扣件力施加于道床相应位置,以探讨振动波在隧道和土体中的传播规律及其对建筑群的影响。详细研究路线如图1所示。

在上述研究方法的基础上,分别构建列车-轨道

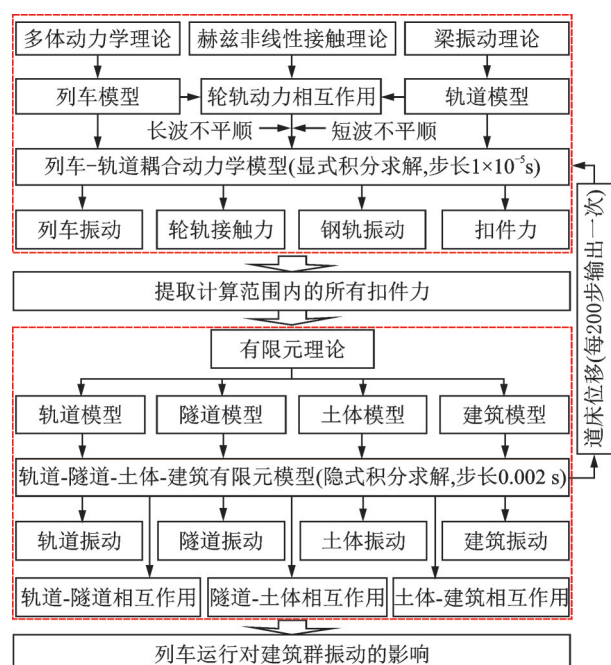


图1 地铁运行诱发城市建筑群低频微振动研究方法

Fig.1 Research method of train-induced low-frequency microvibration of urban building group

耦合动力学模型以及轨道-隧道-土体-建筑群有限元模型。为了保证两模型之间数据的顺利传递,两模型均在ANSYS计算平台中建立。

1.1 地铁列车-轨道耦合动力学模型

基于车辆-轨道耦合动力学理论^[19],构建地铁列车-轨道耦合动力学模型。在建模过程中:

(1)基于多刚体动力学理论建立地铁列车动力学模型,地铁列车考虑为多节车辆按一定间隔等距放置,每一节车辆考虑为多刚体结构,分别包括一个车体、两个构架以及四个轮对,车体和构架考虑沉浮和点头两个自由度,车轮考虑沉浮自由度,因此每个车辆子模型包括10个自由度,各刚体之间采用弹性悬挂元件进行连接^[20]。

(2)整体道床轨道主要包括钢轨和扣件(道床考虑为基础结构),钢轨模拟为离散支撑的欧拉梁,仅考虑其垂向弯曲变形,借助梁振动理论构建钢轨振动微分方程并采用瑞利-里茨法进行降阶,扣件模拟为线弹性弹簧-阻尼元件,弹簧力取决于钢轨位移与道床位移(由有限元模型提取)之差^[21]。

(3)考虑钢轮钢轨之间的弹性压缩,轮轨动力相互作用采用赫兹非线性接触理论进行模拟,考虑轨道不平顺的影响,将轨道不平顺等效为轮轨间的弹性变形量^[22]。

(4)采用显式积分法(翟方法)进行求解,积分步长取位 $1 \times 10^{-5} \text{ s}$ ^[23]。

(5)列车-轨道系统动力学方程采用APDL语言在ANSYS平台中编制并求解,具体编制及实现过程可参见文献[23]。

由于该模型的建模技术较为成熟,因此本文不再赘述,具体信息可参见文献[19,23]。

1.2 轨道-隧道-土体-建筑群有限元模型

有限元法被大量用于研究结构动力学及环境振动问题。借助ANSYS平台,采用SOLID185单元对道床、隧道以及土体等形状较为规则的结构进行建模,采用SHELL181单元对建筑楼板、地下室楼板等扁平型结构进行建模,采用BEAM188单元对建筑支柱进行建模,各部分之间采用共节点的方式进行连接。模型的阻尼考虑为材料阻尼,对每一种结构和材料赋予不同的材料阻尼数值。模型采用隐式积分算法以保证计算稳定性,为了满足计算频率的需求,积分步长取为0.002 s。由于两个模型积分步长存在差异,因此多刚体模型每计算200步与有限元模型进行一次数据交换。

为了消除模型边界处的振动反射效应,在模型最外侧建立一层人工边界,人工边界单元的参数按

照下式进行设置^[4,24]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{泊松比: } \nu = \begin{cases} \frac{\alpha - 2}{2(\alpha - 1)}, & \alpha \geq 2 \\ 0, & \text{other} \end{cases} \\ \text{弹性模量: } E = 2\alpha_T h \frac{G}{R} (1 + \nu) \\ \text{阻尼比: } \eta = \frac{\rho R}{3G} \left(2 \frac{v_s}{\alpha_T} + \frac{v_p}{\alpha_N} \right) \\ \text{等效参数: } \alpha = \frac{\alpha_N}{\alpha_T} \end{array} \right. \quad (1)$$

式中 α_N 和 α_T 为黏弹性人工边界参数,建议分别取为 4.0 和 2.0; ρ 和 G 分别为土体密度和剪切模量; h 和 R 分别为人工边界单元的厚度和振源至边界的距离; v_p 和 v_s 分别为土体压缩波速和剪切波速。

根据上述建模原则,土体单元尺寸取为 0.5 m,得到轨道-隧道-土体-建筑群有限元模型如图 2 所示。该有限元模型中包含 5212353 个单元及 5338612 个节点。

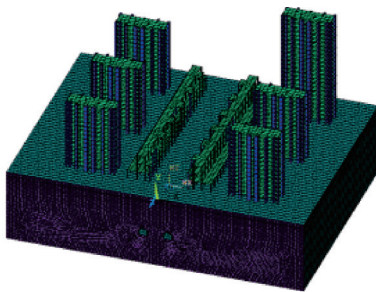


图2 轨道-隧道-土体-建筑群有限元模型

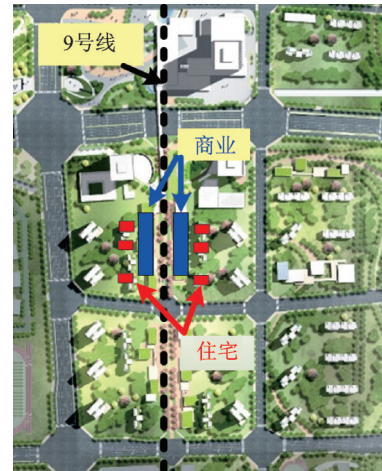
Fig.2 Finite element model of track-tunnel-soil-building group

需要说明的是,如果单元长度设置合理,有限元方法在求解结构振动时可以获得很高的精确度,但是计算量过大、计算效率过低^[25]。作者采用 PCG 算法,借助高性能工作站(性能:两颗 Intel Xeon Platinum 8249C 处理器,52 核,104 线程,主频 2.1 GHz,睿频 3.6 GHz,128G DDR4 内存,RECC 技术),本文模型一个工况大概需要计算 23 天左右。

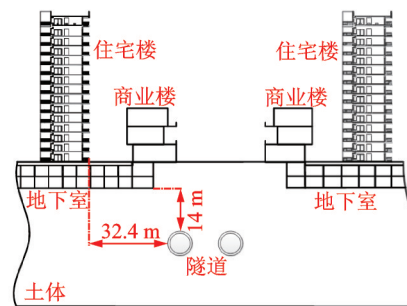
2 目标建筑群简介

成都龙泉驿区在地铁 9 号线沿线规划有一建筑群,该建筑群占地 734 亩,总建筑面积 126.1 万平方米,与地铁线路的位置关系如图 3 所示。从图 3 中可以看出,地铁线路下穿该建筑群,线路两边分别规划有一栋商业楼和三栋住宅楼(含地下室)。左侧商业楼正好位于地铁左线的正上方,左侧住宅楼距离隧道约 32.4 m,地下室二层的底板距离隧道约 14 m。

该建筑群的商业楼和住宅楼距离地铁线路非常



(a) 平面布局图
(a) Layout profile



(b) 断面图
(b) Cross-section profile

图3 建筑与地铁9号线的位置关系

Fig.3 Location relation between architecture and metro line 9

近,因此亟需开展地铁运行对该建筑群低频微振动的影响研究。

该地铁线路运行车型为 6 节编组的地铁 A 型车,最高运行速度为 100 km/h,轨道为普通整体道床轨道,列车、轨道及土体参数如表 1,2 所示。在后续理论研究中,轨道随机不平顺波长范围为 0.1~100 m,其中 0.1~1 m 波长不平顺选用 Sato 短波谱,1~100 m 波长不平顺为美国六级高低不平顺谱^[19]。

3 地铁振动源强测试

在成都地铁某运营线路中开展振动源强测试,该线路中运行车型为 A 型车,运行速度为 70~80 km/h,铺设普通钢筋混凝土整体道床轨道,扣件类型为 DZ III 型。本次测试在直线段进行,测试内容为:钢轨轨底加速度、道床加速度、隧道壁加速度(高于轨面 1.25 m),布点位置如图 4 所示。

采集 10 次列车通过时的振动,测试结果如图 5 所示。根据分频加速度级可以看出,隧道实测振动加速度的频率主要集中在 31.5~80 Hz,最大分频振级为 65 dB,出现在 63 Hz 处。对于 VL_{zmax} (最大 z 振

表1 列车-轨道系统动力学参数

Tab. 1 Dynamics parameters of train-track system

名称	数值	单位
列车编组	6	—
列车运行速度	100	km/h
车体质量	41860	kg
构架质量	7358	kg
轮对质量	1780	kg
车体点头惯量	1959	$t \cdot m^2$
构架点头惯量	1.47	$t \cdot m^2$
一系悬挂刚度	1384	kN/mm
一系悬挂阻尼	1300	$N \cdot s/m$
二系悬挂刚度	355	kN/mm
二系悬挂阻尼	1300	$N \cdot s/m$
车辆长度	22.8	m
车辆定距	15.7	m
转向架轴距	2.5	m
车轮滚动圆半径	0.43	m
钢轨弹性模量	2.06×10^{11}	N/m^2
钢轨截面惯量	3.22×10^{-5}	m^4
钢轨单位长质量	60.64	kg/m
扣件间距	0.6	m
轨下胶垫刚度	4.0×10^7	N/m
轨下胶垫阻尼	3.0×10^4	$N \cdot s/m$

表2 土体参数

Tab. 2 Parameters of soil

深度/m	土体性质	密度/ ($kg \cdot m^{-3}$)	弹性模 量/MPa	泊松比
0~2.6	全风化砂质 泥岩	2050	385	0.348
2.6~3.8	强风化砂质 泥岩	2300	1036	0.315
3.8~9	全风化砂质 泥岩	2050	385	0.348
9~15.8	强风化砂质 泥岩	2300	1036	0.315
15.8以下	中风化砂质 泥岩	2510	6490	0.282

级),道床 VL_{zmax} 在 94.3~125 dB,而隧道壁 VL_{zmax} 主要在 70.3~71 dB。在该 10 次测试中,列车速度均为 73~74 km/h,但是道床 VL_{zmax} 具有较大离散性,相比之下隧道壁振级离散性较小,表明隧道壁振动更为稳定。

由于本次测试仅在地铁隧道内开展而并未在地面进行同步测试,因此采用该地铁振动源强测试数据对上一节中的动力学模型进行验证。隧道壁实测与计算结果如图 6 所示。从图 6 中可以看出,计算结果与实测结果在 2 Hz 以下的低频段与 120 Hz 以上的高频段存在一定的差别,除此之外两结果吻合度

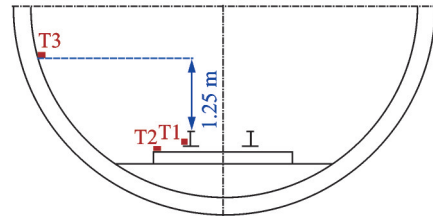
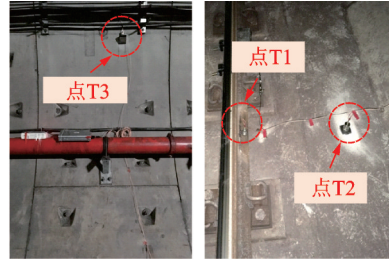
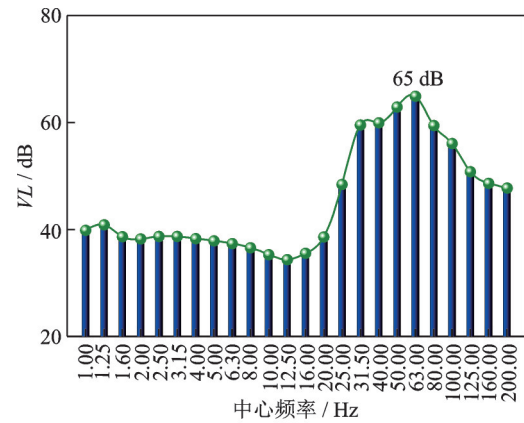


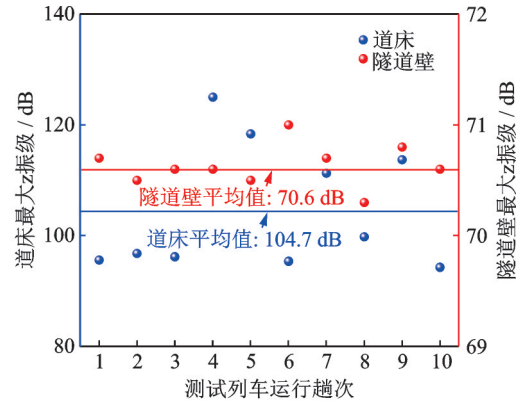
图4 测试布点

Fig. 4 Arrangement of sensors in field test



(a) 隧道壁分频振级

(a) Vibration level in frequency division of tunnel wall



(b) 道床与隧道壁最大z振级

(b) VL_{zmax} of track bed and tunnel wall

图5 地铁线路动力学测试结果

Fig. 5 Dynamics test results of metro line

较高,表明本文所建立的模型在地铁振动源强方面的模拟较为准确,能有效应用于地铁运行对建筑振动的影响研究。

4 地铁运行引发现场土体振动及传播规律

借助前文建立的动力学模型,研究地铁运行引

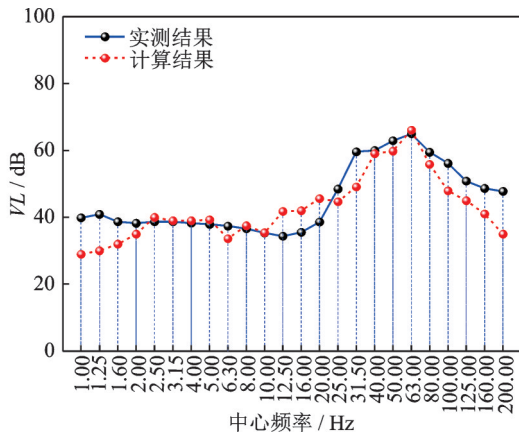


图 6 地铁振动源强对比

Fig. 6 Comparison between tested and calculated source strength

发土体振动的规律。本节着重研究两方面内容:(1) 土体振动的垂向传播规律;(2)土体振动的横向传播规律。研究中所选取的观测点如图 7 所示。图 7 中: 土体振动垂向分布研究中共选择 6 个点,自隧道壁至地表分别编号为 V1,V2,V3,V4,V5,V6;振动横向分布选取 6 个点,自隧道壁向左编号分别为 L1, L2,L3,L4,L5,L6。

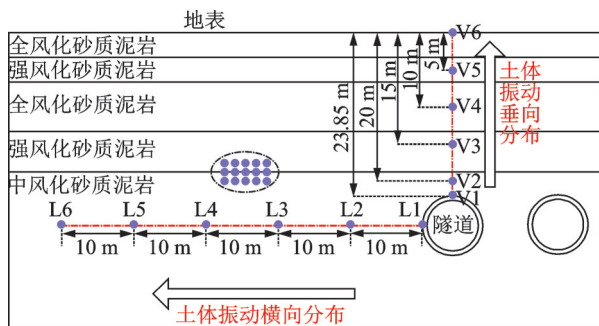


图 7 观测点位置

Fig. 7 Observation location

4.1 土体振动垂向传播规律

当列车在隧道内运行时,轮轨动力荷载通过轨道结构引起隧道壁振动,进而诱发土体振动并向四周传播。图 8 给出了列车通过时土体振动在垂向的分布特性,从图中可以清晰地看出列车的通过信息。整体来看,随着振动波在土体中向上传递,振动能量在衰减,加速度幅值在降低。不过需要说明的是,当土体靠近地面时(点 V6),振动存在略微放大的趋势。垂向各位置处的振动加速度幅值如图 9 所示,从图中可以明显地看出,随着振动波在土体中向上传递,加速度幅值在降低(点 V6 除外),其中点 V3 至点 V4 区间衰减最快。当振动波传递至地表时,由于表层土体较软而出现一定的放大现象^[4]。

垂向各位置处土体振动加速度级如图 10 所示。

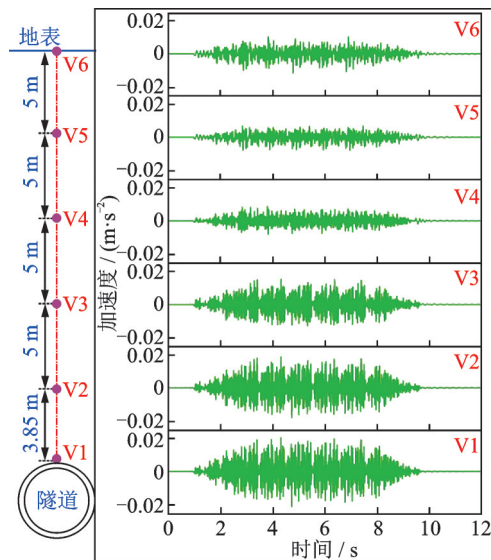


图 8 土体振动垂向分布特性

Fig. 8 Vertical distribution characteristics of soil vibration

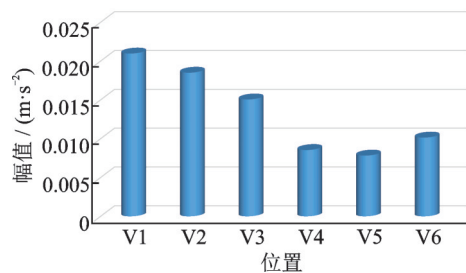


图 9 不同位置土体加速度幅值变化

Fig. 9 Acceleration amplitude of soil at different locations

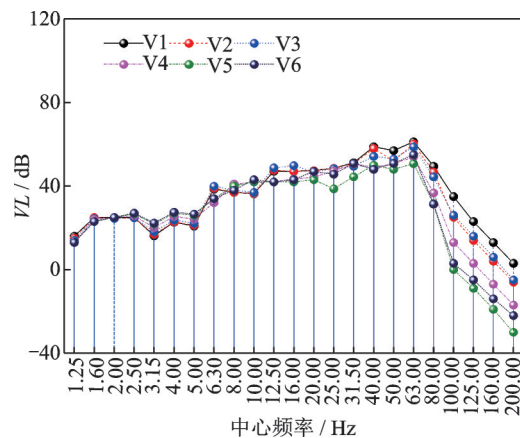


图 10 土体垂向不同位置处加速度级

Fig. 10 Acceleration level of soil at different vertical locations

从图 10 中可以看出,各位置处加速度级随中心频率的变化规律相近,卓越频率区间为 40~63 Hz;除此之外,在 10~31.5 Hz 频带也具有较大的能量,而频率为 80 Hz 以上的振动剧烈衰减,表明土体对较高频能量具有很强的吸收能力。

4.2 土体振动横向传播规律

当列车在隧道中运行时,土体振动的横向分布

特性如图11所示。从图11中可以明显地看出列车的荷载信息。由于各位置处振动波形较为相近,只是幅值有差别,因此图11中仅给出了L1和L4位置的时域波形。另外,图11中同样给出了横向不同位置处的加速度幅值,可以看出从L1到L2振动衰减最为剧烈,且随着与隧道距离的增加,加速度幅值呈现为近似指数衰减的趋势,L3~L6位置处的加速度幅值差别则相对较小。土体振动的横向分布规律较之垂向更为清晰。

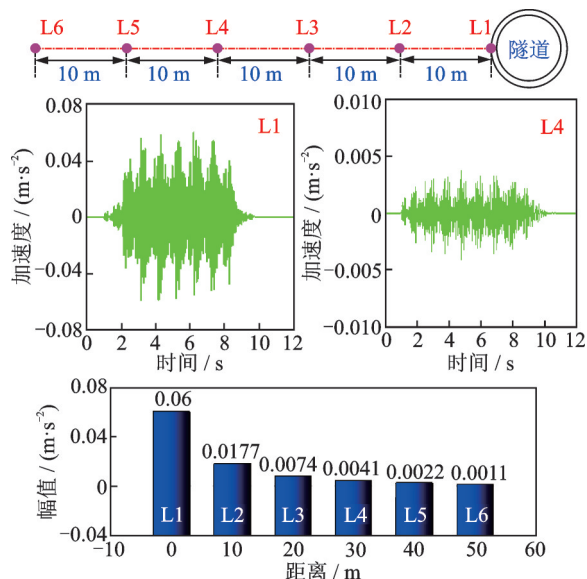


图11 土体振动横向分布特性

Fig. 11 Lateral distribution characteristics of soil vibration

更进一步,土体在横向不同位置处的加速度级如图12所示。从图12中可以清晰地看出,随着距离隧道越来越远,各中心频率处的振动均在衰减,规律性较振动的垂向分布更强。各位置的振动加速度卓越频率仍然在63 Hz左右。另外,L1位置处的 VL_{zmax} 为70.1 dB,而L6位置处的 VL_{zmax} 仅为42 dB,且随着距离的增大, VL_{zmax} 呈近似线性减小的变化趋势。

5 地铁运行引发临近建筑群振动及传播规律

地铁引起的隧道振动通过土体传递至建筑群,导致住宅楼和商业楼产生低频微振动,本节针对建筑振动开展研究。

基于标准《城市区域环境振动标准》(GB 10070—88)^[26]和《城市轨道交通引起建筑物振动与二次辐射噪声限值及其测量方法标准》(JGJ/T 170—2009)^[27]的规定,住宅楼分频振级限值为65/62 dB(昼/夜),最大z振级标准为70/67 dB(昼/夜);商业楼分频振级限值取70/67 dB(昼/夜),最大z振级标准为75/72 dB(昼/

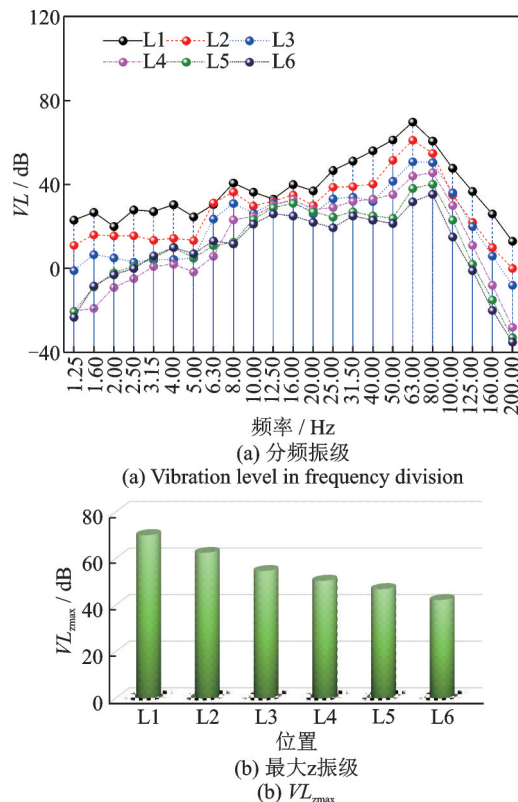


图12 土体横向不同位置处加速度级

Fig. 12 Acceleration level of soil at different lateral locations

夜)。计权因子按照文献[27]进行设置。

5.1 住宅楼振动传递规律

首先探讨振动在同一住宅楼层内的分布。本研究选取住宅楼1楼和2楼之间的楼板进行深入研究,该楼板在不同时刻的振动如图13所示。从图13中可以看出,当列车在隧道内运行时,楼板靠近地铁线路一侧首先振动(1 s),然后振动逐渐在楼板内扩散,直至5 s时楼板振动达到最大。

提取楼板中5个观测点进行振动分析,如图14

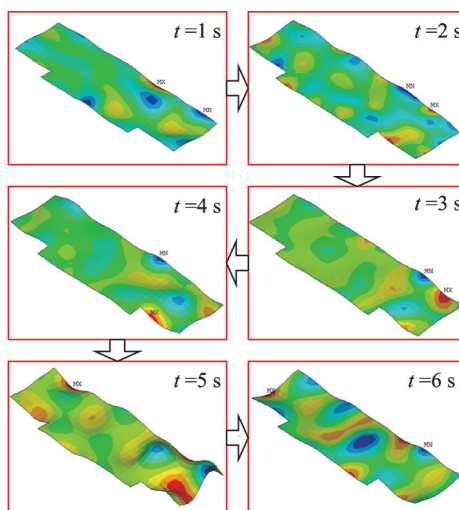


图13 楼板不同时刻的振动

Fig. 13 Floor vibration at different time

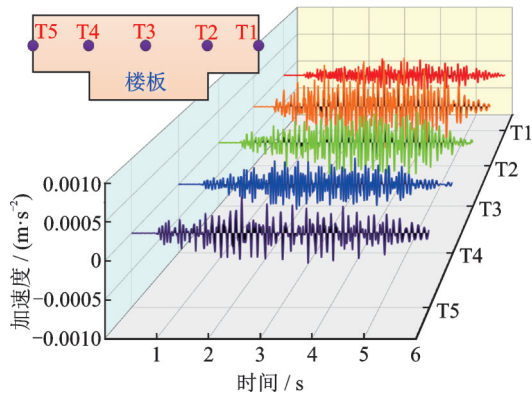


图 14 同一楼板中不同观测点的振动

Fig. 14 Vibrations of different observation points on the same floor

所示。从图 14 中可知,同一楼板中振动最大处并非最靠近线路的点 T1,而是靠内的点 T2,这一现象在图 13 中第 5 s 的振动云图中也可以清楚地看出。

在此基础上,借助前文建立的动力学模型,研究住宅楼不同楼层 T2 位置处的振动,如图 15 所示,其中提取 1 楼、5 楼、10 楼的振动。1 楼楼板振动加速度为 0.00093 m/s^2 ,10 楼楼板加速度为 0.00036 m/s^2 ,表明地铁引起的建筑振动属于结构微振动范畴。另外值得注意的是,由于建筑结构形式和参数的不同,振动并不一定会随着楼层的增加而减小,针对本文的计算参数,随着楼层的升高,同一位置处楼板的振动呈现逐渐减小的趋势。

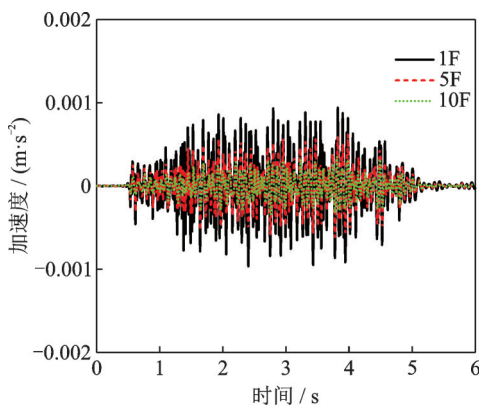


图 15 住宅楼不同楼层的振动

Fig. 15 Vibrations of different floors of residential building

住宅楼不同楼层的分频振级如图 16 所示。从图 16 中可以看出最大分频振级为 59.5 dB,略小于国家标准规定的数值,表明从分频振级角度来看建筑振动未超标。另外,建筑振动的卓越频率与土体振动略有不同,在 12.5 Hz 附近也出现了较大的峰值,而在 25 Hz 附近则略有降低。

在上述结果的基础上计算各楼层的最大 z 振级,1 楼、5 楼、10 楼的 VL_{zmax} 分别为 62.8, 59.4, 55.6 dB,均未超出 70/67 dB(昼/夜)的标准限值。

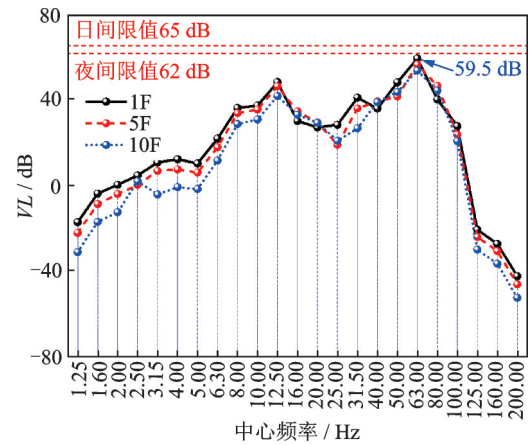


图 16 住宅楼不同楼层振动加速度级

Fig. 16 Vibration acceleration levels of different floors of residential building

因此在地铁运行条件下,该目标建筑群中的住宅楼振动并未超标。

5.2 商业楼振动传递规律

不同时刻的商业楼振动云图如图 17 所示。从图 17 中可以看出,当列车通过时各层楼板靠近线路一侧开始振动,但是商业楼各楼层中间位置振动最为剧烈,因此着重针对商业楼每层楼板中间位置开展深入分析,如图 18 所示。由结果可知,随着楼层的升高,商业楼楼板振动在逐渐降低。1 楼楼板振动加速度为 0.0024 m/s^2 ,3 楼楼板加速度为 0.0019 m/s^2 ,表明地铁引起的商业楼振动也属于结构微振动范畴。

更进一步在频域内讨论商业楼的振动,如图 19 所示。商业楼振动低频区域同样被激起,特别是 6.3~16 Hz 的振动,不过能量最大处仍位于 63 Hz,振级达到 65.6 dB,濒临超限。而三层楼相对应的最大 z 振级分布也达到了 69.6, 67.1 和 65.0 dB,不过均小于国家标准所规定的限值。因此在地铁运行条件

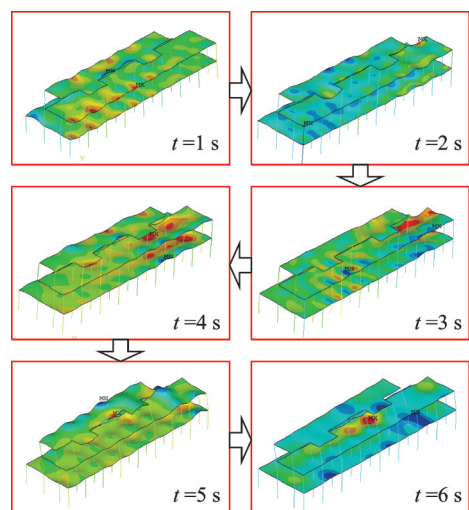


图 17 不同时刻的商业楼振动

Fig. 17 Vibration of business building at different time

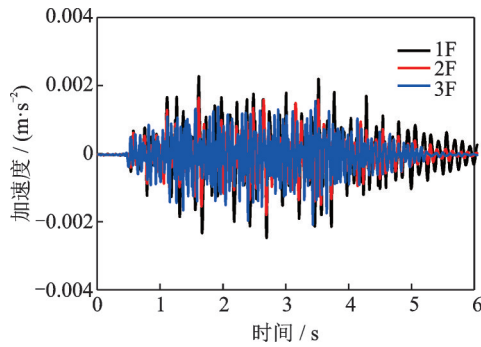


图18 商业楼不同楼层的振动

Fig. 18 Accelerations of different floors of business building

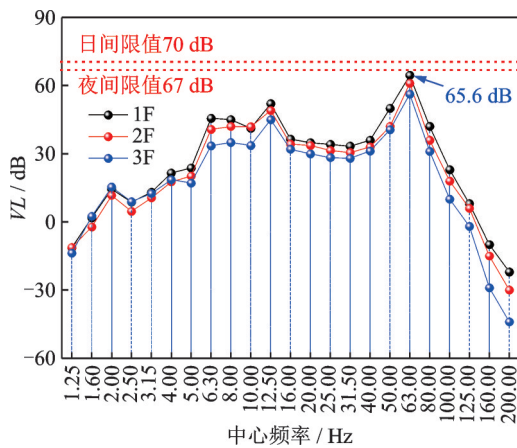


图19 商业楼不同楼层振动加速度级

Fig. 19 Vibration acceleration level of different floors of business building

下,该目标建筑群中的商业楼振动也未超标。

6 结论与展望

6.1 结论

针对地铁运行引起建筑群低频微振动问题,本文建立了列车-轨道-隧道-土体-建筑群耦合动力学模型,研究了地铁运行引发土体和建筑群振动产生及传播规律。通过本研究可得到如下结论:

(1)实测隧道壁加速度卓越频率为31.5~80 Hz,实测隧道壁 VL_{zmax} (最大z振级)主要在70.3~71 dB,实测道床 VL_{zmax} 则在94.3~125 dB。

(2)随着振动波在土体中向上传递,振动能量逐渐衰减,但是在地表附近存在一定的振动放大;土体振动卓越频率在63 Hz左右,土体对80 Hz以上的振动具有很强的吸收能力,随着振动横向传播距离的增大, VL_{zmax} 近似线性减小。

(3)地铁运行下,建筑在12.5和63 Hz左右均出现能量集中,住宅楼和商业楼最大z振级分别为62.8和69.6 dB,最大分频振级分别为59.5和65.6 dB,均未超出国家标准规定限值,表明地铁运行对

目标建筑群的影响在可接受范围之内。

6.2 展望

在后续工作中可从以下两方面进一步开展研究:

(1)从振动角度,建筑群并未超标,但是由于二次结构噪声的限值更为严苛,后续工作中应进一步开展建筑群二次噪声的分布特性研究。

(2)本文建立的有限元模型计算量过于庞大,在后续研究中应考虑缩减模型以及采用并行计算等方式提高计算效率。另外,本文研究中将土体考虑为线性结构,在后续研究中会进一步考虑其非线性特性,以更精确地模拟振动在土体中的传播。

参考文献:

- [1] 林艳,邓卫,葛亮.以公共交通为导向的城市用地开发模式(TOD)研究[J].交通运输工程与信息学报,2004,2(4):90-94.
LIN Yan, DENG Wei, GE Liang. Study on the urban land use pattern based on transit oriented development (TOD)[J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2004,2(4):90-94.
- [2] 俞洁,杨晓光,尹瑞,等.基于TOD模式的成长型城市公共交通规划[J].交通运输工程学报,2007,7(3):106-110.
YU Jie, YANG Xiaoguang, YIN Rui, et al. Public transport planning of developing city based on TOD model[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2007,7(3):106-110.
- [3] 何文福,罗昊杰,许浩,等.轨交沿线建筑三维隔震/振支座力学性能试验研究及应用分析[J].振动工程学报,2020,33(6):1112-1121.
HE Wenfu, LUO Haojie, XU Hao, et al. Experimental study and application analysis of mechanical performance of 3D isolation/vibration bearings along railway lines[J]. Journal of Vibration Engineering, 2020,33(6):1112-1121.
- [4] YANG J J, ZHU S Y, ZHAI W M, et al. Prediction and mitigation of train-induced vibrations of largescale building constructed on subway tunnel[J]. Science of the Total Environment, 2019, 668: 485-499.
- [5] 高广运,耿建龙,毕俊伟,等.地铁环境振动对建筑场地影响实测分析[J].工程地质学报,2019,27(5):1116-1121.
GAO Guangyun, GENG Jianlong, BI Junwei, et al. Effect of subway induced environmental vibration on building site through in-situ measurement[J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27(5): 1116-1121.
- [6] 马龙祥,刘维宁,刘卫丰,等.地铁列车振动环境影响预测的薄片有限元-无限元耦合模型[J].岩石力学与工

- 程学报,2016,35(10):2131-2141.
- MA Longxiang, LIU Weining, LIU Weifeng, et al. Sliced finite element-infinite element coupling model for predicting environmental vibration induced by metro train[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(10): 2131-2141.
- [7] Krylov V V, Ferguson C. Calculation of low-frequency ground vibrations from railway trains[J]. Applied Acoustics, 1994, 42(3): 199-213.
- [8] Forrest J A, Hunt H E M. A three-dimensional tunnel model for calculation of train-induced ground vibration [J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 294(4-5): 678-705.
- [9] 袁宗浩,蔡袁强,史吏,等.移动简谐荷载作用下饱和土体中圆形隧道和轨道结构的动力分析[J].岩土工程学报,2016,38(2):311-322.
- YUAN Zonghao, CAI Yuanqiang, SHI Li, et al. Response of rail structure and circular tunnel in saturated soil subjected to harmonic moving load[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(2): 311-322.
- [10] Hussein M F M, Francois S, Schevenels M, et al. The fictitious force method for efficient calculation of vibration from a tunnel embedded in a multi-layered half-space [J]. Journal of Sound and Vibration, 2014, 333(25): 6996-7018.
- [11] 曾晨,孙宏磊,蔡袁强,等.饱和土体中衬砌隧道在移动荷载下的动力响应[J].浙江大学学报(工学版), 2015, 49(3): 511-521.
- ZENG Chen, SUN Honglei, CAI Yuanqiang, et al. Dynamic response of lined tunnel in saturated soil due to moving load [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2015, 49(3): 511-521.
- [12] 狄宏规,周顺华,陕耀,等.基于改进壳-柱模型的盾构隧道饱和地基动力解[J].同济大学学报(自然科学版), 2016, 44(9): 1384-1390.
- DI Honggui, ZHOU Shunhua, SHAN Yao, et al. Solution for dynamic stress of saturated soil surrounding shield tunnel based on modified shell-cylinder model [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2016, 44(9): 1384-1390.
- [13] 韦凯,杨帆,王平,等.扣件胶垫刚度的频变性地对地铁隧道环境振动的影响[J].铁道学报,2015,37(4):80-86.
- WEI Kai, YANG Fan, WANG Ping, et al. Influence of frequency-dependent stiffness of rail pads on environment vibration induced by subway in tunnel[J]. Journal of the China Railway Society, 2015, 37(4): 80-86.
- [14] 郑国琛,许航莉,祁皑,等.地铁及地面交通环境振动实测与数值模拟研究[J].中国环境科学,2020,40(9): 4146-4154.
- ZHENG Guochen, XU Hangli, QI Ai, et al. Field measurement and numerical simulation on environmental and vibration effects induced by metro and ground traffic loads[J]. China Environmental Science, 2020, 40(9): 4146-4154.
- [15] 高广运,穆曾焱,耿建龙,等.地铁环境振动对拟建住宅办公楼影响实测分析[J].噪声与振动控制,2020,40(5):180-186.
- GAO Guangyun, MU Zengyi, GENG Jianlong, et al. Investigation of the effects of subway induced environmental vibration on proposed residential and office buildings through in-situ measurement[J]. Noise and Vibration Control, 2020, 40(5): 180-186.
- [16] 花雨萌,谢伟平,陈斌.地铁振动对建筑物竖向楼层响应的研究[J].建筑结构学报,2023,44(3): 122-129.
- HUA Yumeng, XIE Weiping, CHEN Bin. Research on influence of metro vibration on vertical floor response of buildings[J]. Journal of Building Structures, 2023, 44(3): 122-129.
- [17] Kurzweil L G. Ground-borne noise and vibration from underground rail systems[J]. Journal of Sound and Vibration, 1979, 66(3): 363-370.
- [18] 马蒙,刘维宁,王文斌.基于敏感度的地铁振动动态预测评价体系[J].都市快轨交通,2012,25(6):65-69.
- MA Meng, LIU Weining, WANG Wenbin. Dynamic prediction and evaluation system based on sensitivity of environmental vibration induced by metro trains[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2012, 25(6): 65-69.
- [19] 翟婉明.车辆-轨道耦合动力学:上册[M].4版.北京:科学出版社,2015.
- ZHAI Wanming. Vehicle-track Coupled Dynamics: Volume 1[M]. 4th ed. Beijing: Science Press, 2015.
- [20] ZHAI W M, SUN X. A detailed model for investigating vertical interaction between railway vehicle and track [J]. Vehicle System Dynamics, 1994, 23: 603-615.
- [21] CHEN Z W, ZHU G. Dynamic evaluation on ride comfort of metro vehicle considering structural flexibility[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2021, 21(4): 1-16.
- [22] CHEN Z W. Evaluation of longitudinal connected track under combined action of running train and long-term bridge deformation[J]. Journal of Vibration and Control, 2020, 26(7-8): 599-609.
- [23] CHEN Z W, FANG H. An alternative solution of train-track dynamic interaction[J]. Shock and Vibration, 2019, 2019: 1859261.
- [24] 谷音,刘晶波,杜义欣.三维一致粘弹性人工边界及等效粘弹性边界单元[J].工程力学,2007,24(12): 31-37.
- GU Yin, LIU Jingbo, DU Yixin. 3D consistent viscous-spring artificial boundary and viscous-spring boundary element[J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(12): 31-37.
- [25] 苗新强.有限元结构分析多层并行算法研究及应用

- [D]. 上海:上海交通大学, 2015.
- MIAO Xinqiang. Research and application of multi-layer parallel computing approach for finite element structural analysis[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2015.
- [26] 国家环境保护局. 城市区域环境振动标准: GB 10070—88[S]. 北京: 中国标准出版社, 1989.
- State Environmental Protection Administration. Standard of environmental vibration in urban area: GB 10070—88[S]. Beijing: Standards Press of China, 1989.
- [27] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市轨道交通引起建筑物振动与二次辐射噪声限值及其测量方法标准: JGJ/T 170—2009[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- MOHURD. Standard for limit and measuring method of building vibration and secondary noise caused by urban rail transit: JGJ/T 170—2009[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009.

Low-frequency microvibration and its transfer law of nearby building group caused by running metro train

CHEN Zhao-wei¹, XU Hong², YIN Qiang², ZHU Sheng-yang³

(1.School of Mechatronics and Vehicle Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2.China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610036, China;

3.State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: With the rapid development of building groups, the low-frequency microvibration caused by running metro train has become a serious problem. Aiming at a practical building group in Chengdu, the influences of running train on soil vibration and building vibration are investigated. A detailed train-track-tunnel-soil-building group coupled dynamic model is established by considering the nonlinear wheel-rail dynamic interaction, the layered structure of soil and the soil-building interaction. A field test is conducted to study the source strength of metro system, which is also adopted to validate the dynamic model. On this basis, the train-induced soil vibration and local vibration at interface of different layers are studied. The influence of running train on building group is evaluated. Results show that, the established dynamic model is effective to solve low-frequency microvibration caused by running train. The predominant frequency of tested tunnel acceleration is 31.5~80 Hz, the VL_{zmax} of tunnel wall is 70.3~71 dB, and the VL_{zmax} of track bed is 94.3~125 dB. When the wave travels upwards in soil, the energy is absorbed while vibration nearby earth surface is amplified. Soil can absorb vibration above 80 Hz, and with the lateral distance increases, VL_{zmax} decreases linearly. The train-induced building vibration is not beyond the limit values. Conclusions provide vibration control theory for building groups.

Key words: vehicle-track coupled dynamics; metro; low-frequency vibration; environmental vibration; building group; field test

作者简介: 陈兆玮(1988—),男,博士,副教授。E-mail: chenzhaowei_cq@163.com。