夏志强,凌可胜,董克胜,等.地铁列车曲线运行引起学校建筑物振动响应分析[J].地震工程学报,2021,43(6):1377-1386.DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2021.06.1377

XIA Zhiqiang,LING Kesheng,DONG Kesheng,et al.Vibration response analysis of school buildings caused by metro trains running on a curved track[J].China Earthquake Engineering Journal,2021,43(6):1377-1386.DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2021.06.1377

地铁列车曲线运行引起学校建筑物振动响应分析

夏志强[1],凌可胜[1],董克胜[2],徐小扣[1],沈 威[3],方火浪[3]

(1. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司,浙江 杭州 311122;
2. 杭州未来科技城建设有限公司,浙江 杭州 310012;
3. 浙江大学 建筑工程学院,浙江 杭州 310058)

摘要: 地铁以其快捷、准时、运量大等优点,已成为重要的轨道交通形式,但由此引起的环境振动问题日益突出。针对杭州市地铁 3 号线曲线地段的某中学建设工程,利用有限元软件 ABAQUS,对车辆-普通整体道床轨道系统的竖向耦合模型进行振动响应分析,得到考虑轨道高低不平顺影响的轨道振动源强。应用有限元软件 MIDAS GTS/NX,建立双孔平行曲线盾构隧道-土-桩-建筑物系统的三维有限元模型。以轨道支点力作为激励对地铁列车运行时的隧道-土-桩-建筑物系统的振动响应进行计算,研究地铁振动波在地层中的传播规律和建筑物的动力响应特性。根据相关环境振动控制标准对建筑物的振动舒适性进行评价。结果表明:轨道加速度和扣件动支点力的最大值分别约为 40 m/s^2 和 30 kN;地层和建筑物的振动以竖向为主,水平 Y 向振动略大于水平 X 向振动;地面加速度随着距隧道中心线距离的增加而逐渐衰减;各建筑物楼层的振动主频位于 16～40 Hz;部分建筑物楼层的振动响应水平已超出了规范的限值要求,建议对地铁轨道或建筑物采取适当的减振措施。

关键词: 地铁; 环境振动; 建筑物; 数值模拟; 列车荷载

中图分类号: TU311.3;U231 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0844(2021)06－1377－10

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2021.06.1377

Vibration response analysis of school buildings caused by metro trains running on a curved track

XIA Zhiqiang[1], LING Kesheng[1], DONG Kesheng[2], XU Xiaokou[1], SHEN Wei[3], FANG Huolang[3]

(*1. PowerChina Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, Zhejiang, China;*
2. Hangzhou Future Science and Technology City Construction Corporation Limited, Hangzhou 310012, Zhejiang, China;
3. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, Zhejiang, China)

Abstract: Subway has become an important form of rail transit because of its advantages such as fast speed, punctuality, and large traffic volume. However, the problem of environmental vibration caused by metro has become increasingly prominent. In this paper, a middle school construc-

收稿日期: 2020-06-28

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51878605)

第一作者简介: 夏志强(1968－),高级工程师,主要从事建筑工程设计与管理研究。E-mail:xia_zq@ecidi.com。

通信作者: 方火浪(1962－),研究员,主要从事地震工程与工程振动研究。E-mail: fanghuolang@zju.edu.cn。

tion project in the curved section of Hangzhou Metro Line 3 was taken as an example. The vibration response analysis of a vertical coupling model of the vehicle-common monolithic track system was carried out by using the finite element software ABAQUS, and the vibration source of track considering the influence of track vertical profile irregularity was obtained. By using the finite element software MIDAS GTS/NX, a three-dimensional finite element model of the twin-parallel curve shield tunnel-soil-pile-building system was established. The vibration response of the system was calculated under the excitation of track fulcrum force, and the propagation law of metro vibration wave and the dynamic response characteristics of buildings were studied. According to relevant environmental vibration control standards, the vibration comfort of buildings was evaluated. The results showed that the maximum acceleration and dynamic fulcrum force of rail are about 40 m/s^2 and 30 kN, respectively; the vibration of stratum and building are mainly in the vertical direction, and the vibration in the horizontal Y-direction is slightly greater than that in the horizontal X-direction; the ground acceleration decreases gradually with the increase of its distance from the tunnel center line; the dominant frequency of vibration at each building floor is 16—40 Hz; the vibration responses of some building floors exceed the limit requirement of code, and it is suggested that appropriate vibration reduction measures should be taken for metro tracks or buildings.

Keywords: subway; environmental vibration; building; numerical simulation; train load

0 引言

随着社会的发展和城市生活水平的提高,各大城市地铁建设如火如荼。但由于城市地铁线网的不断加密,地铁运行引起的环境振动和噪声问题日益突出。为此,国内外学者对地铁列车振动在土层中的传播规律和沿线建筑物的振动响应进行了研究[1-18]。Fiala 等[1]使用三维有限元模型预测了振动和结构二次噪声在建筑物内的传播。Lopes 等[2]建立了隧道-土-建筑物的 2.5 维有限元模型,通过动力分析研究了地铁运行对邻近建筑物振动响应的影响。郑国琛等[3]建立了车辆-轨道竖向耦合动力分析模型和隧道-土-建筑物三维有限元模型,通过车辆-轨道耦合分析得到的道床加速度时程响应作为地铁激励波施加于隧道结构,对地铁运行引起的邻近建筑物振动响应进行了预测。张啟乐等[4]利用有限元软件 ANSYS,结合南昌地铁某曲线段工程,建立了轨道-隧道-土-建筑物三维有限元模型,分析了地铁曲线运行产生的环境振动对邻近建筑物的影响。高广运等[6]根据实际地层剖面构建了隧道-土-建筑物三维有限元模型,分析了地铁运行引起的邻近建筑物各层水平和竖向振动变化规律。Ma 等[7]建立了列车-轨道-隧道-土-建筑物三维有限元模型,研究了列车速度对地面和西安钟楼振动响应的影响以及桩基减振效果,并与现场实测值进行了比较。邬玉斌等[8]建立了考虑频谱特征和列车运行状态的荷载模型和轨道-隧道-土-建筑物三维有限元模型,分析了地铁邻近新建结构不同建设阶段的振动响应。马晓磊等[10]以天津市 Z2 地铁线一期工程作为实例,利用有限元软件 ABAQUS,建立了轨道-隧道-土-建筑物三维有限元模型,对天津滨海新区饱和软土地带地铁快速运行对沿线建筑物的振动影响进行了分析,研究了桩基础、筏基和条形基础建筑物在不同列车速度和隧道埋深工况下的振动响应规律。Yang 等[11]、袁嘉明等[15]利用有限元软件 ANSYS 构建了有限元模型,通过动力分析研究了地铁上盖建筑物的车致振动响应规律。

本文以杭州市地铁 3 号线曲线地段的某中学建设工程为研究对象,利用有限元软件 ABAQUS 和 MIDAS GTS/NX,分别建立车辆-轨道系统耦合动力模型和隧道-土-桩-建筑物系统三维有限元动力模型,对地铁列车运行引起的新建学校建筑物振动响应进行计算与分析,并根据相关环境振动控制标准对建筑物的振动舒适性进行评价。

1 分析方法与计算模型

1.1 分析方法

地铁列车引起的环境振动是一个复杂的综合性问题,涉及车辆、轨道、隧道、地层、基础和建筑物的动力相互作用。为了简化该问题的复杂性,把整个动力系统分为车辆-轨道耦合动力子系统和隧道-土-

基础-建筑物耦合动力子系统，两个子系统通过轨道支点(扣件)连接。采用车辆-轨道耦合动力子系统求解轨道支点力，将其应用于轨道与隧道的接触表面作为动力激励，计算隧道-土-基础-建筑物耦合子系统的振动响应。

1.2　车辆-整体道床轨道系统耦合动力模型

根据车辆-轨道耦合动力学理论，建立了图 1 所示的车辆-普通整体道床轨道系统的竖向相互作用动力模型。该模型考虑了车辆、钢轨、扣件和基础之间的相互作用，包括车辆子模型和轨道结构子模型。通过输入轮轨接触处的轨道随机不平顺，利用赫兹非线性接触关系得到轮轨之间的相互作用力，使车辆和轨道系统发生振动，然后利用轮轨之间的位移协调和力平衡条件，通过迭代计算，实现车辆与轨道的耦合，得到系统的动力响应。

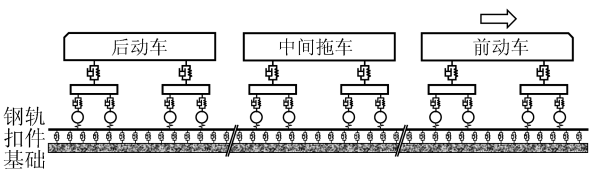


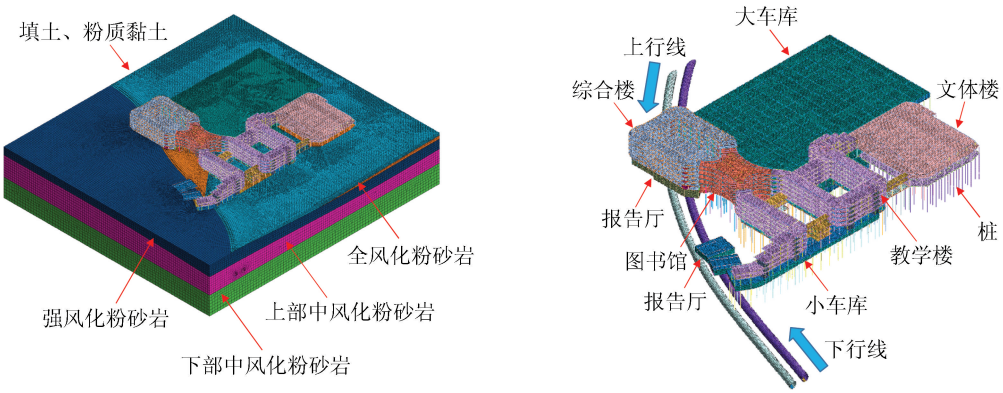
图 1　车辆-普通整体道床轨道系统竖向耦合动力模型

Fig.1　A vertical coupling dynamic model of vehicle-common monolithic track system

杭州市地铁 3 号线地铁列车采用 AH 型 6 车编组(2 动 4 拖)，设计最大时速为 80 km/h，轨道扣件纵向间距为 0.6 m。

1.3　隧道-土-桩-建筑物有限元模型

采用有限元软件 MIDAS GTS/NX 建立了双孔平行曲线盾构隧道-土-桩-建筑物三维有限元精细化模型。图 2(a)为整体有限元模型，图 2(b)为隧道、桩和建筑物有限元模型，土体采用三维实体单元，楼板、地下室外墙、底板、剪力墙和隧道管片采用板单元，钢筋混凝土柱、梁和桩基础采用梁单元。在网格生成过程中考虑了地铁振动主频带、土层和结构的剪切波速以及单元尺寸对波动的影响，控制了各类材料的单元最大尺寸，所建整体有限元模型共741 327个节点，1 289 042个单元。为了尽量降低模型边界反射波对计算结果的影响，采用刘晶波等[19]的三维等效黏弹性边界，在整体模型的 4 个侧向边界和底部边界上设置切向和法向的弹簧-阻尼单元。场地土和建筑物的物理力学参数由岩土工程勘察报告、现场波速测试结果以及地铁与建筑物设计资料确定，计算用的材料参数列于表 1。综合考虑有限元模型的竖向自振频率和地铁列车运行产生的优势频段(1～80 Hz)，选取计算 Rayleigh 阻尼系数 α 和 β 的两个频率为 5 Hz 和 80 Hz，整体有限元模型的系统阻尼比取 0.03(小应变时的土体阻尼比为0.01～0.05，钢筋混凝土阻尼比为 0.02～0.05)，计算得到 Rayleigh 阻尼系数 $\alpha=1.773$，$\beta=1.12\times10^{-4}$。图 3 为阻尼比和频率之间的关系。可以看出，在优势频段，按 Rayleigh 公式计算得到的阻尼比在0.015～0.03 的合理范围内。



(a) 整体有限元模型　　(b) 隧道、桩和建筑物有限元模型

图 2　隧道-土-桩-建筑物系统有限元模型

Fig.2　Finite element model of tunnel-soil-pile-building system

表 1　材料参数

Table 1　Material parameters

名称	容重 /(kN·m^{-3})	泊松比	动弹性模量 /MPa
填土、粉质黏土	18.8	0.35	120
全风化粉砂岩	19.3	0.32	470
强风化粉砂岩	20.4	0.32	1 120
上部中风化粉砂岩	23.0	0.30	3 190
下部中风化粉砂岩	23.0	0.25	4 750
C30-C50 混凝土	25.0	0.20	30 000～34 500

2　车辆-整体道床轨道系统耦合动力分析

图4是根据美国六级高低不平顺谱计算的轨道

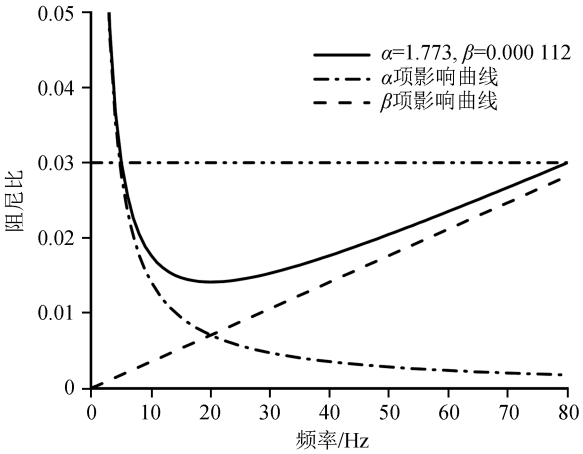


图 3 阻尼比与频率的关系

Fig.3 Relation of damping ratio and frequency

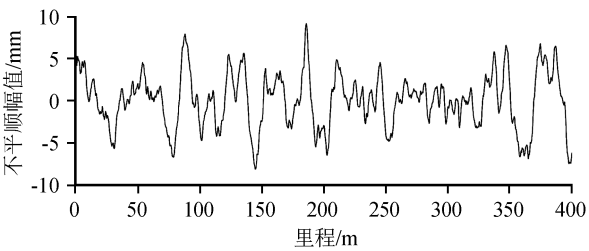


图 4 轨道高低不平顺空间样本

Fig.4 Space sample of track height irregularity

高低不平顺空间样本。利用有限元软件 ABAQUS 计算了在美国六级高低不平顺谱条件下的轨道动力响应，获得了普通整体道床轨道的振动源强。考虑到计算精度和列车长度，时间步长取 0.002 s，总时间取 11.5 s。图 5 为钢轨加速度、钢轨位移、轮轨接触力和扣件支点力的时程曲线。可以看出，当六节车体依次经过轨道观测点时，观测点处的加速度、位移和支点力大幅度增加，最大加速度约为 40 m/s^2，最大动支点力约为 30 kN。并且由于普通整体道床轨道的刚度较大，加速度、位移、接触力和支点力响应的高频成分都比较丰富。

3 隧道-土-桩-建筑物系统有限元动力分析

考虑到上下行列车同时运行对地基和建筑物的振动影响较大，将列车荷载施加在上下行轨道的相应节点上。首先，对图 5(d)的扣件支点力时程曲线进行时间轴左移，并减去静态支点力，得到隧道入口节点处的列车动荷载时程曲线。然后，根据扣件支点间距和行车速度对其进行延时处理，得到其他轨道相应节点的列车动荷载时程曲线。综合考虑计算精度、计算机容量和隧道长度，时间步长取0.005 s，

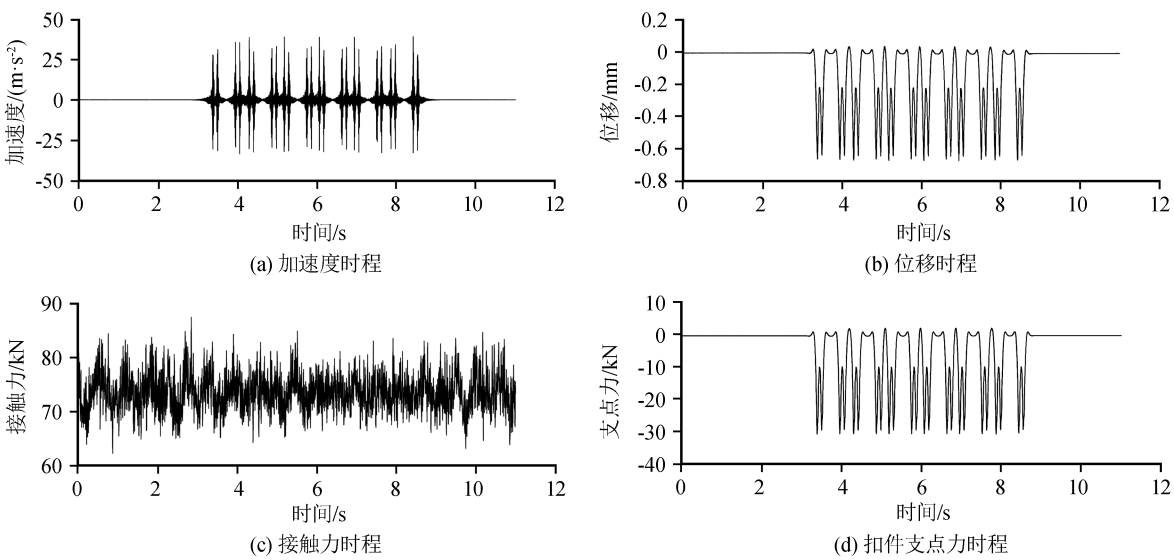


图 5 钢轨竖向加速度、位移、轮轨接触力和扣件支点力的时程曲线

Fig.5 Time history curves of vertical acceleration and displacement of rail, wheel rail contact force and fastener fulcrum force

总时间取 24 s。利用有限元软件 MIDAS GTS/NX 计算了隧道-土-桩-建筑物系统的振动响应，主要结果如下。

3.1 振动加速度峰值分布特性

图 6 为整体地层沿坐标轴正方向各加速度分量的峰值分布。可以看出，总加速度、X 向加速度、Y 向加速度和 Z 向加速度的最大值分别为 1.63×10^{-1} m/s^2、2.71×10^{-2} m/s^2、2.77×10^{-2} m/s^2 和 1.62×10^{-1} m/s^2；Z 向最大加速度明显大于 X 向和 Y 向的最大加速度，Y 向最大加速度略大于 X 向最大加速度。最大值发生在隧道所在的上部中风化层。地表层(填土、粉质黏土、全风化层和强风化层)

总加速度、X 向加速度、Y 向加速度和 Z 向加速度的最大值分别为 2.20×10^{-2} m/s²、1.93×10^{-2} m/s²、1.52×10^{-2} m/s² 和 1.76×10^{-2} m/s²。从地面峰值加速度的分布特征看，图 6(a)与(d)、图 6(b)与(c)基本相似，说明总加速度主要来自 Z 向分量，X 向和 Y 向加速度峰值及其分布特征比较接近。比较正负方向对应分量的加速度分布可以看出，两者基本一致，说明正负向加速度峰值基本相同(限于篇幅，省略了整体地层沿坐标轴负方向各加速度分量的峰值分布图)。地面加速度随着距隧道中心线距离的增加而逐渐衰减，Z 向加速度的衰减速度快于 X 向和 Y 向加速度。

图 7 为建筑物沿坐标轴正方向各加速度分量的峰值分布。可以看出，总加速度、X 向加速度、Y

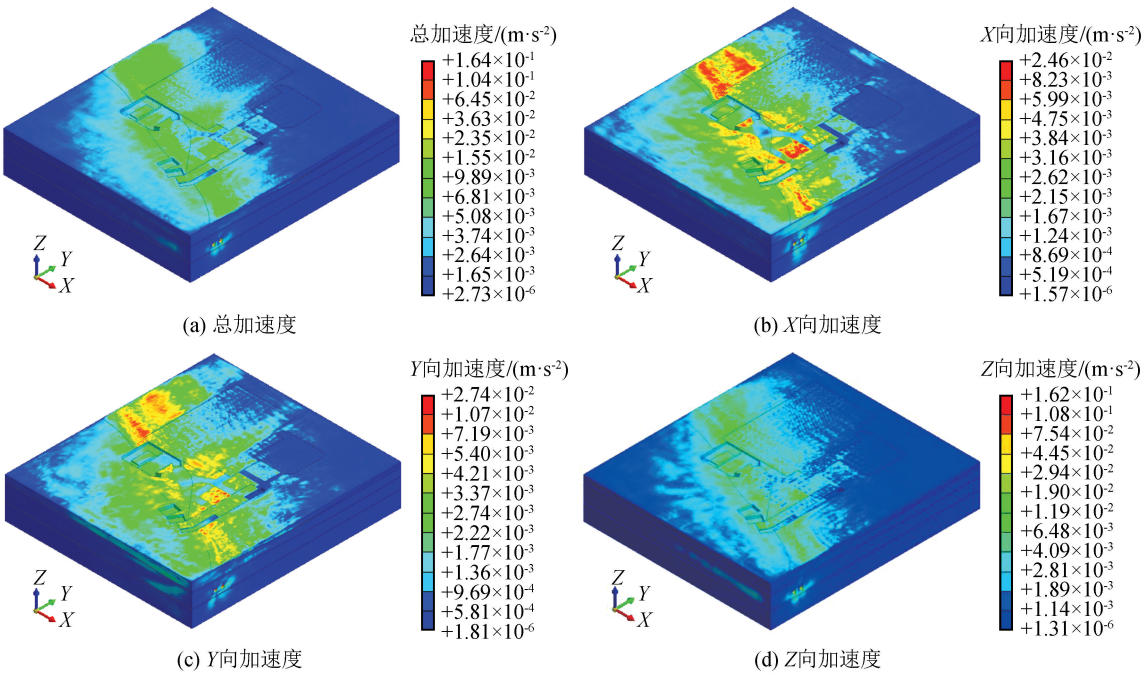


图 6　整体地层加速度峰值分布

Fig.6　Peak distributions of whole stratum accelerations

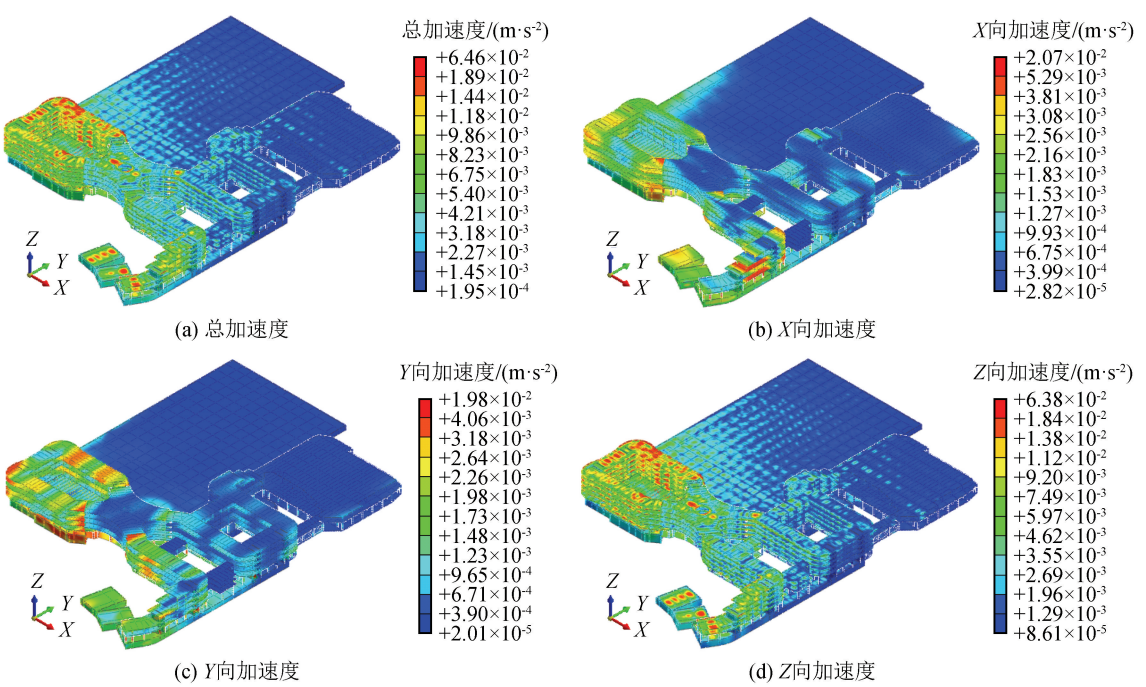
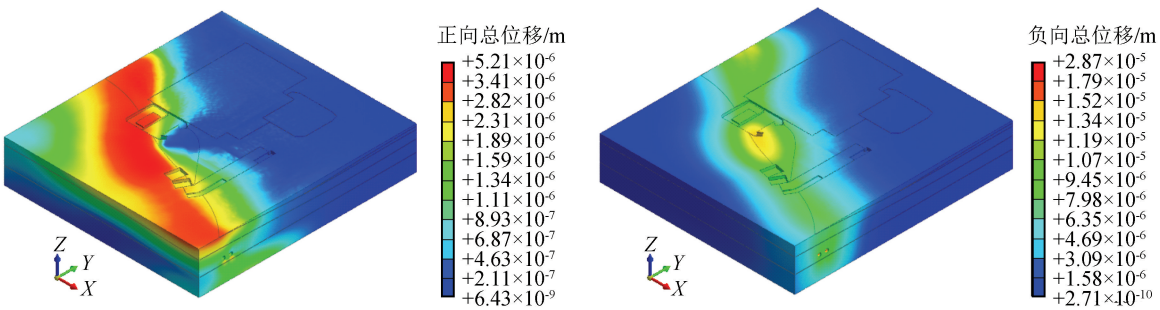


图 7　建筑物加速度峰值分布

Fig.7　Peak acceleration distribution of the building

向加速度和 Z 向加速度的最大值分别为 7.63×10^{-2} m/s²、2.11×10^{-2} m/s²、1.98×10^{-2} m/s² 和 7.60×10^{-2} m/s²；Z 向最大加速度明显大于 X 向和 Y 向的最大加速度，Y 向最大加速度大于 X 向最大加速度。从建筑物峰值加速度的分布特征看，图 7(a)与(d)、图 7(b)与(c)比较相似，说明总加速度主要来自 Z 向分量。比较正负方向对应分量的加速度分布可以看出，两者基本一致，说明正负向加速度峰值基本相同(限于篇幅，省略了建筑物沿坐标轴负方向各加速度分量的峰值分布图)。由于地铁穿越综合楼下方的地层，综合楼的峰值加速度大于图书馆和教学楼的峰值加速度。

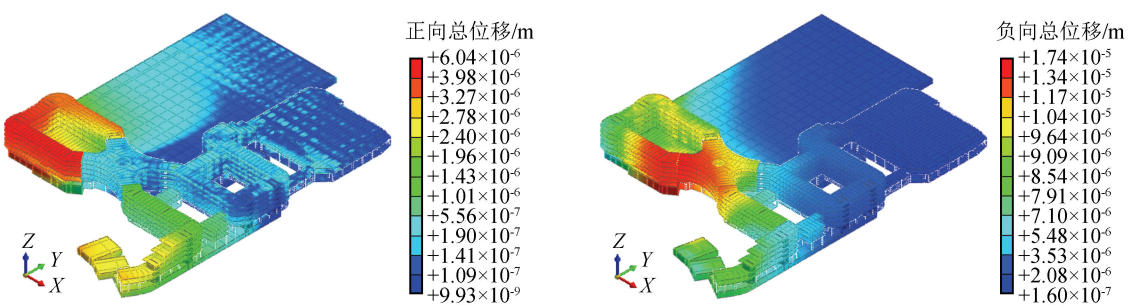
图 8 为整体地层沿坐标轴正、负方向总位移的峰值分布。从图中可以看出，正、负方向总位移的最大值分别为 5.21×10^{-6} m 和 2.87×10^{-5} m，地层沿坐标轴负方向位移大于正方向位移，隧道上方地面位移较大。图 9 为建筑物沿坐标轴正、负方向总位移的峰值分布。从图中可以看出，正、负方向总位移的最大值分别为 6.04×10^{-6} m 和 1.74×10^{-5} m，建筑物沿坐标轴负方向位移大于正方向位移，综合楼和图书馆的位移较大。上述结果表明，地铁运行产生的地层和建筑物位移均很小。



(a) 正向总位移 (b) 负向总位移

图 8 整体地层位移峰值分布

Fig.8 Peak displacement distribution of the whole stratum



(a) 正向总位移 (b) 负向总位移

图 9 建筑物位移峰值分布

Fig.9 Peak displacement distribution of the building

3.2 建筑物楼层加速度时程曲线

图 10 为综合楼各楼层最大加速度节点的竖向加速度时程曲线。可以看出，楼层 2～楼层 4 的加速度波形特征比较相似，楼层 5 和屋顶的加速度波形特征比较相似，楼层 4 的峰值加速度最大，楼层 2 的峰值加速度最小。

图 11 为图书馆各楼层最大加速度节点的竖向加速度时程曲线。可以看出，楼层 4 和楼层 5 的加速度波形特征比较相似，屋顶的峰值加速度最大，楼层 1 的峰值加速度最小，楼层 3～楼层 5 的峰值加速度比较接近。

图 12 为教学楼各楼层最大加速度节点的竖向加速度时程曲线。可以看出，楼层 2 和楼层 3 的加速度波形特征比较相似，楼层 3 的峰值加速度最大，楼层 1 的峰值加速度最小，楼层 2、楼层 4 和屋顶的峰值加速度比较接近。

3.3 建筑物楼层竖向振动加速度级分频特性

根据各楼层最大加速度节点的竖向加速度时程曲线，将其进行频域分析，转化为 1/3 倍频程振动加速度级，定义为：

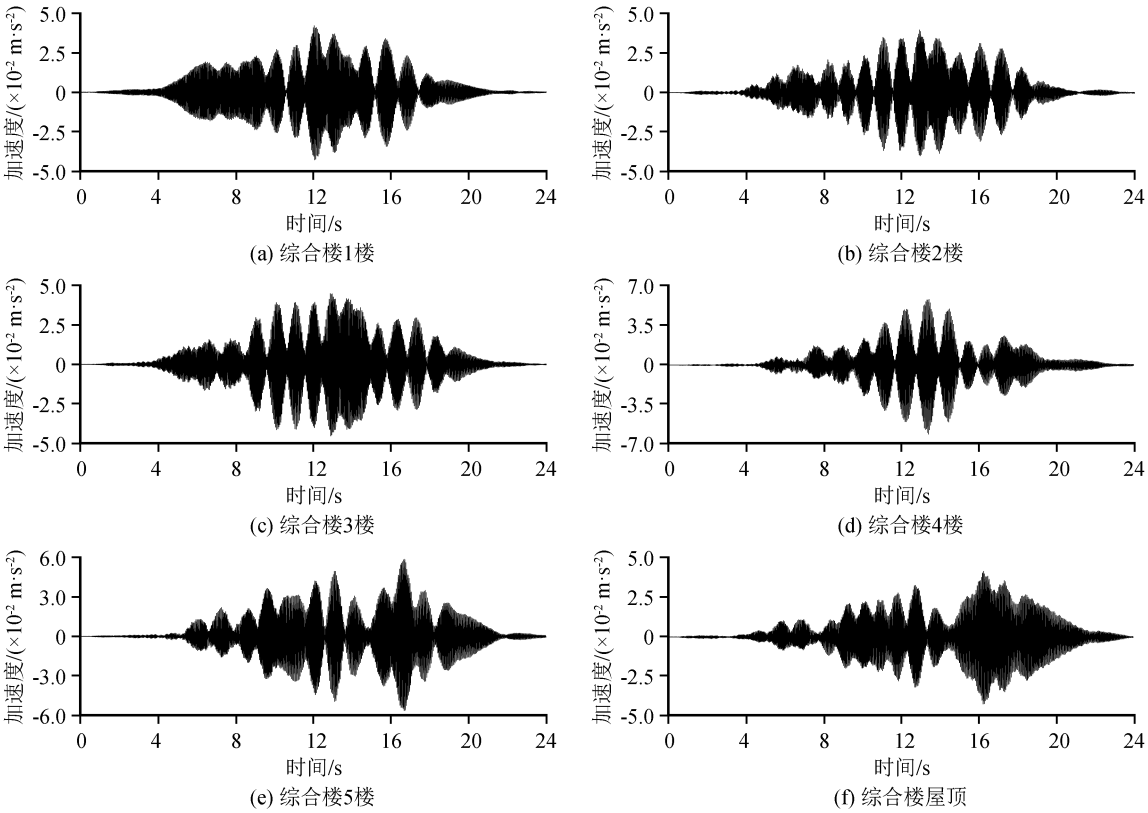


图 10　综合楼各楼层竖向加速度时程曲线

Fig.10　Vertical acceleration time history curves of complex building floors

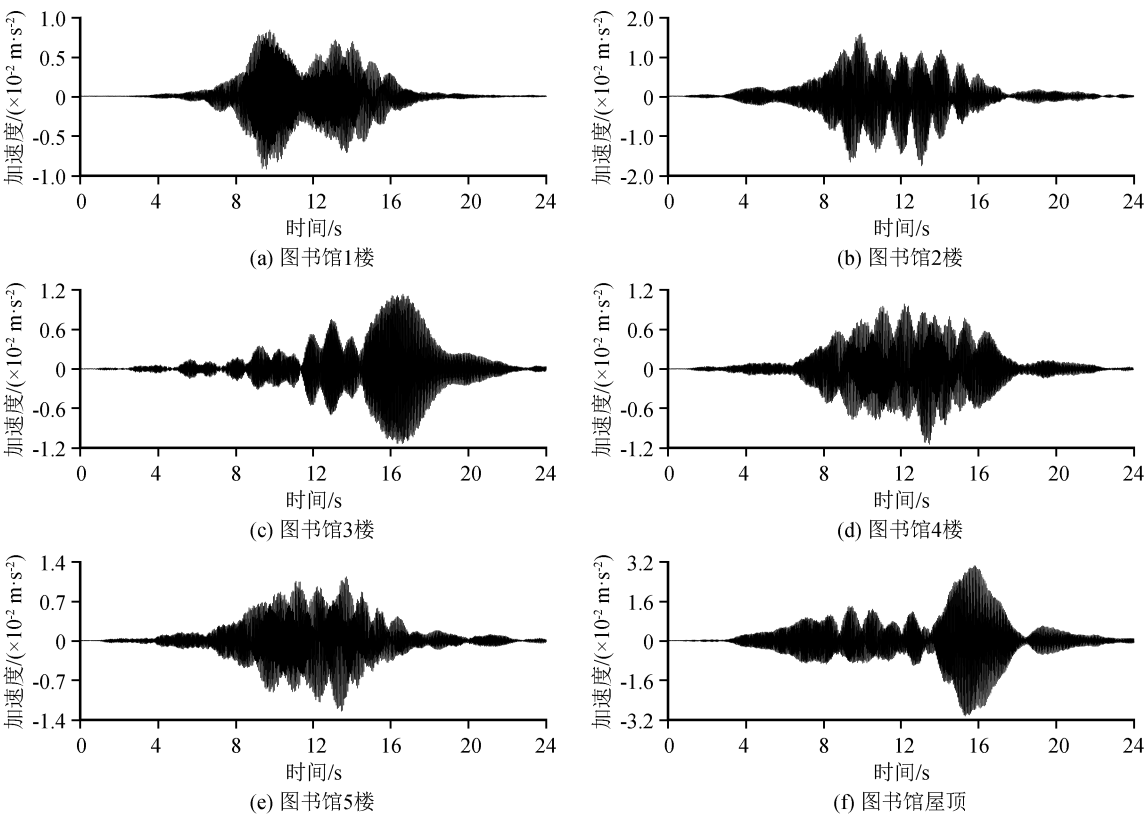


图 11　图书馆各楼层竖向加速度时程曲线

Fig.11　Vertical acceleration time history curves of library floors

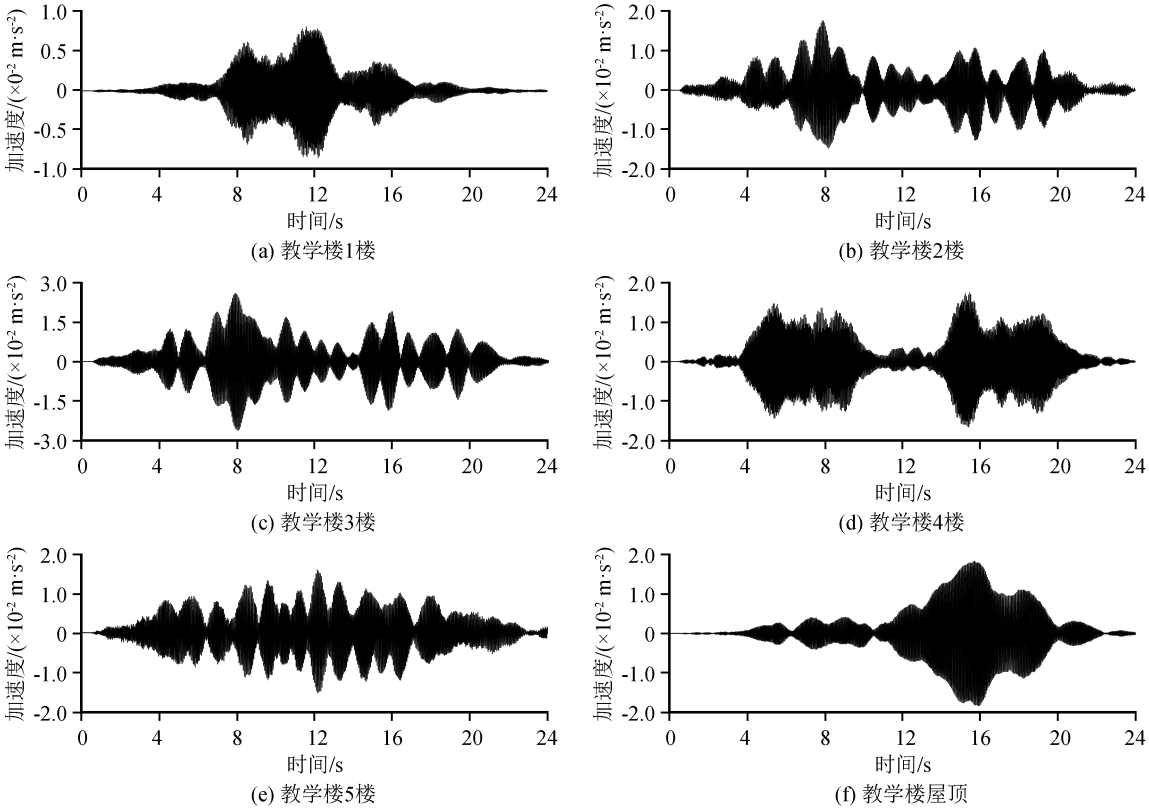


图 12 教学楼各楼层竖向加速度时程曲线

Fig.12 Vertical acceleration time history curves of teaching building floors

$$VAL = 20\lg(a_{\mathrm{rms}}/a_0) + C \tag{1}$$

式中：VAL 为频率计权振动加速度级(dB)；a_{rms} 为加速度有效值(m/s²)；a_0 为基准加速度(=10^{-6} m/s²)；C 为中心频率处的计权因子(dB)。

图 13 为综合楼、图书馆和教学楼各楼层最大加速度节点的计权竖向振动加速度级 1/3 倍频程谱。可以看出，3 建筑物各楼层的频率分布特征基本相似，主频均位于中心频率 16、20 和 40 Hz 附近。综合楼的最大竖向振动加速度级发生在屋顶，其值为 80.3 dB。图书馆的最大竖向振动加速度级发生在屋顶，其值为 74.6 dB。教学楼的最大竖向振动加速度级发生在楼层 3，其值为 73.9 dB。

3.4 基于环境振动控制标准的振动舒适性评价

由于振动舒适性具有较强的主观性，不同控制指标的计算公式具有经验性。现行的用于评价轨道交通环境振动水平的标准主要为《城市区域环境振动标准(GB 10070—88)》[20]，评价指标为按照全身振动不同频率计权因子修正后得到的计权竖向振动加速度级，即 Z 振级，定义为

$$VL_Z = 20\lg\left(\sum_{i=1}^{n} 10^{0.1VAL_i}\right) \tag{2}$$

式中：VL_Z 为Z振级(dB)；VAL_i ($i=1,2,\cdots,n$) 为第 i 个中心频率处的计权振动加速度级(dB)。

根据《城市区域环境振动标准(GB 10070—88)》，取时间积分常数为 1 s，重叠系数为 3/4，将时程信号依次分为若干幅波形，对每一幅波形进行 1/3 倍频程分析得到各个中心频率对应的分频振级。通过序贯计算可获得 Z 振级随时间的变化过程，即运行 Z 振级 $VL_Z(t)$，最大 Z 振级即为列车通过时间内多个时段的 Z 振级最大值。表 2 给出了建筑物各楼层的 Z 振级最大值，结果表明大部分楼层的 Z 振级已超过该标准中关于城市轨道交通运行对文教类建筑产生振动白天不大于 70 dB，夜间不大于 67 dB 的限值要求。

4 结语

针对杭州地铁 3 号线运营期间可能给某新建学校建筑带来的环境振动问题，利用有限元软件 ABAQUS 和 MIDAS GTS/NX，分别对车辆-轨道系统竖向耦合模型和隧道-土-桩-建筑物系统三维有限元模型的振动响应进行了计算，研究了地铁振动波在地层中的传播规律和建筑物的振动响应特性，评价了建筑物的振动水平和振动舒适性，得出以下结论：

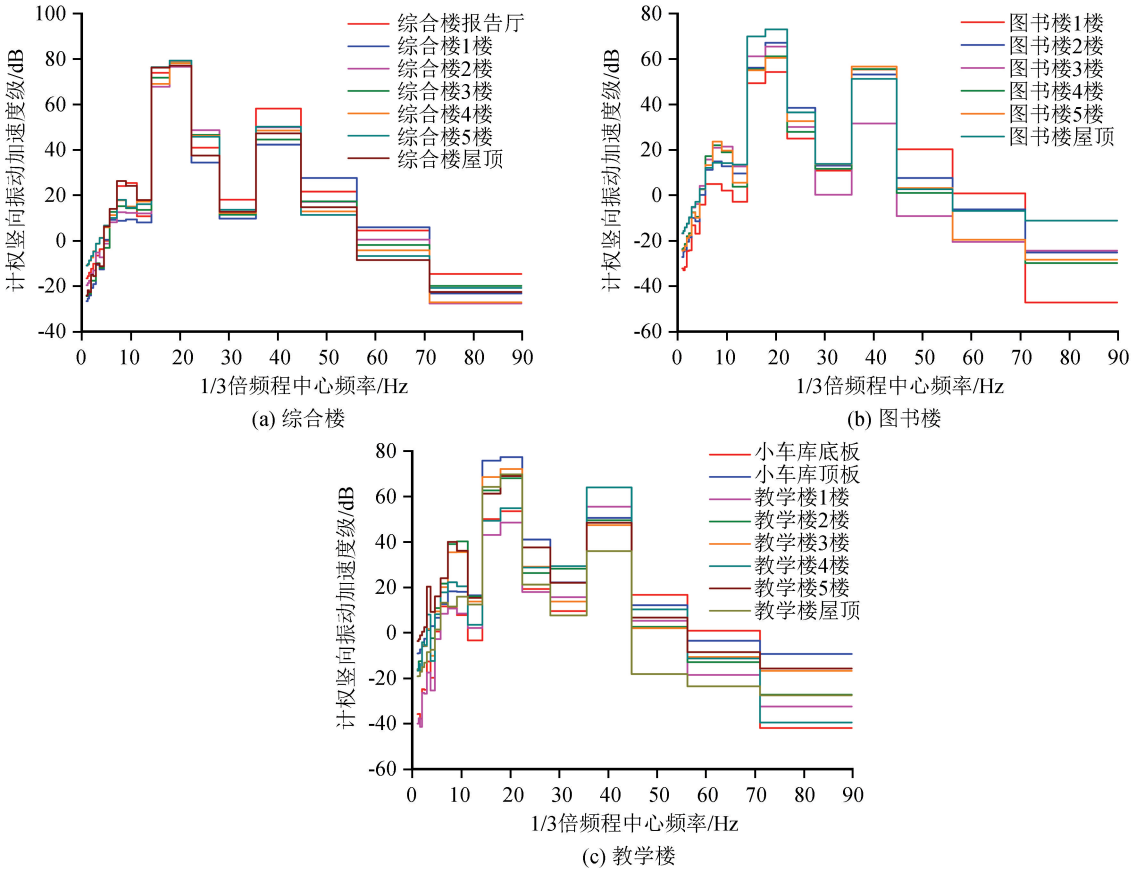


图 13　建筑物各楼层计权竖向振动加速度级 1/3 倍频程谱

Fig.13　1/3 octave spectra of weighted vertical vibration acceleration level for building floors

表 2　建筑物各楼层 Z 振级最大值

Table 2　Maximum values of Z vibration level for building floors

楼层	Z 振级/dB		
	综合楼	图书馆	教学楼
1	84.6	64.8	64.7
2	83.7	75.0	77.3
3	85.5	75.7	81.7
4	87.4	68.6	70.7
5	88.2	69.7	76.4
屋顶	86.0	84.1	79.9

（1）当车辆通过时，普通整体道床轨道的加速度、位移和支点力响应均大幅增加。最大加速度约为 40 m/s^2，最大动支点力约为 30 kN。由于轨道刚度较大，其加速度、位移、接触力和支点力响应的高频成分均比较丰富。

（2）地铁列车运行引起的地层振动以竖向为主，水平 Y 向振动略大于水平 X 向振动，正负向加速度峰值基本相同。地面加速度随着距隧道中心线距离的增加而逐渐衰减，Z 向加速度的衰减速度快于 X 向和 Y 向加速度。

（3）地铁列车运行引起的建筑物振动以竖向为主，水平 Y 向振动略大于水平 X 向振动，正负向加速度峰值基本相同。各建筑物楼层的振动主频位于 16～40 Hz。综合楼的峰值加速度大于图书馆和教学楼的峰值加速度，楼层峰值加速度与层高的关系随着建筑物的变化而变化。

（4）地铁列车运行引起的部分建筑物楼层的振动响应水平已超出了规范的限值要求，建议对地铁轨道或建筑物采取适当的减振措施。

参考文献(References)

[1] FIALA P, DEGRANDE G, AUGUSZTINOVICZ F. Numerical modelling of ground-borne noise and vibration in buildings due to surface rail traffic[J]. Journal of Sound and Vibration, 2007, 301(3-5): 718-738.

[2] LOPES P, ALVES COSTA P, FERRAZ M, et al. Numerical modeling of vibrations induced by railway traffic in tunnels: from the source to the nearby buildings[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2014, 61-62: 269-285.

[3] 郑国琛，祁皑. 地铁运行引起的建筑物振动响应预测[J]. 噪声与振动控制，2015，35(1)：176-181.
ZHENG Guochen, QI Ai. Prediction of vibration response of buildings induced by subway operations[J]. Noise and Vibra-

tion Control,2015,35(1):176-181.

[4] 张啟乐,刘林芽,李纪阳.曲线地段地铁振动对邻近建筑的影响分析[J].噪声与振动控制,2015,35(4):115-120.
ZHANG Qile,LIU Linya,LI Jiyang.Analysis of the impact induced by vibration of curved segment of subways on adjacent buildings [J].Noise and Vibration Control,2015,35(4):115-120.

[5] XU Q Y,XIAO Z C,LIU T,et al.Comparison of 2D and 3D prediction models for environmental vibration induced by underground railway with two types of tracks[J].Computers and Geotechnics,2015,68:169-183.

[6] 高广运,陈娟,朱林圆.上海地铁荷载作用下邻近建筑物振动响应分析[J].噪声与振动控制,2016,36(6):136-141.
GAO Guangyun,CHEN Juan,ZHU Linyuan.Numerical analysis of the vibration impact induced by underground moving trains on surrounding buildings in Shanghai[J].Noise and Vibration Control,2016,36(6):136-141.

[7] MA M,LIU W N,QIAN C Y,et al.Study of the train-induced vibration impact on a historic Bell Tower above two spatially overlapping metro lines[J].Soil Dynamics and Earthquake Engineering,2016,81:58-74.

[8] 邬玉斌,宋瑞祥,吴雅南,等.建筑结构地铁振动响应数值预测分析方法研究[J].铁道科学与工程学报,2018,15(11):2939-2946.
WU Yubin,SONG Ruixiang,WU Yanan,et al.Study on numerical prediction method for building vibration response caused by the subway train[J].Journal of Railway Science and Engineering,2018,15(11):2939-2946.

[9] 刘维宁,杜林林,刘卫丰.地铁列车曲线运行振动源强特性分析[J].铁道学报,2019,41(7):26-33.
LIU Weining,DU Linlin,LIU Weifeng.Study on characteristics of vibration sources of metro trains running in a curved track [J].Journal of the China Railway Society,2019,41(7):26-33.

[10] 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(增刊 2):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(Supp02):177-180.

[11] 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,2019,668:485-499.

[12] MA L X,OUYANG H J,SUN C,et al.A curved 2.5D model for simulating dynamic responses of coupled track-tunnel-soil system in curved section due to moving loads[J].Journal of Sound and Vibration,2019,451:1-31.

[13] 高广运,姚哨峰,孙雨明.2.5D 有限元分析高铁荷载诱发非饱和土地面振动[J].地震工程与工程振动,2019,39(5):28-39.
GAO Guangyun,YAO Shaofeng,SUN Yuming.Investigating ground vibration induced by high-speed train loads on unsaturated soil using 2.5D FEM[J].Earthquake Engineering and Engineering Vibration,2019,39(5):28-39.

[14] 薛富春.移动荷载下高速铁路轨道路基的动位移分析[J].地震工程学报,2019,41(5):1105-1113.
XUE Fuchun.Dynamic Displacement of the track-subgrade of highspeed railways subjected to moving loads [J]. China Earthquake Engineering Journal,2019,41(5):1105-1113.

[15] 袁嘉明,张路遥.基于 ANSYS 的地铁上盖建筑物车致振动研究[J].城市建筑,2020(1):122-124.
YUAN Jiaming, ZHANG Luyao. Study on the vibration caused by building vehicles on subway based on ANSYS[J]. Urbanism and Architecture,2020(1):122-124.

[16] 邬玉斌,宋瑞祥,何蕾,等.地面列车荷载作用下地屏障对建筑楼板的隔振效果分析[J].振动工程学报,2020,33(2):322-330.
WU Yubin,SONG Ruixiang,HE Lei,et al.Isolation effect of barriers on building floor under the vibration induced by trains of ground line[J].Journal of Vibration Engineering,2020,33(2):322-330.

[17] 高盟,高运昌,徐晓,等.青岛岩质地基地铁 3 号线与上海软土地基地铁 10 号线振动实测对比分析[J].地震工程学报,2020,42(2):468-474.
GAO Meng, GAO Yunchang, XU Xiao, et al. Comparative analysis of vibration measurement between Qingdao Metro Line 3 on rock foundation and Shanghai Metro Line 10 on soft foundation[J].China Earthquake Engineering Journal,2020,42(2):468-474.

[18] ZHOU S H,HE C,GUO P J,et al.Three-dimensional analytical model for coupled track-tunnel-soil system in a multilayered half-space[J].Journal of Engineering Mechanics,2020,146(2):04019121.

[19] 刘晶波,王振宇,杜修力,等.波动问题中的三维时域粘弹性人工边界[J].工程力学,2005,22(6):46-51.
LIU Jingbo, WANG Zhenyu, DU Xiuli, et al. Three-dimensional visco-elastic artificial boundaries in time domain for wave motion problems[J]. Engineering Mechanics, 2005, 22 (6):46-51.

[20] 国家环境保护局.城市区域环境振动标准:GB 10070—1988 [S].北京:中国标准出版社,1989.
State Bureau of Environmental Protection of the People's Republic of China.Standard of environmental vibration in urban area:GB 10070—1988[S].Beijing:Standards Press of China,1989.