

不同场地土条件下地铁引起的环境振动分析

金 峤,张佳宇,孙 丽

(沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 研究城市地铁轨道交通引发周边场地振动的影响规律,从而为邻近建筑物的振动舒适度评价、振害分析以及减隔振措施的有效应用提供环境振动信息。**方法** 基于ABAQUS建立“土层-隧道”有限元模型,计算考虑轨道不平顺因素的地铁列车动力荷载,采用VDLOAD子程序模拟列车的运行过程,进而对不同场地类别、不同列车速度及不同隧道轨道埋深等影响条件下,列车运行诱发的地面振动响应进行比较分析。**结果** 水平向加速度峰值响应在距离地铁轨道中心20 m处达到最大值,随后在横向距离为20~40 m的区间内迅速衰减;垂直向加速度峰值响应的最大值出现在距离地铁轨道中心0 m处,并在横向距离20 m内迅速衰减至其1/10左右。**结论** 场地效应的水平向加速度峰值响应呈现先增大后减小的“驼峰”趋势,而垂直向加速度峰值响应则呈现“单调递减”趋势;场地土类别对不同车速所引发的场地效应的差异性产生影响;场地振动效应总体上随隧道轨道埋深的增加而不断减小。

关键词 地铁列车;场地效应;建筑场地类别;地面振动

中图分类号 TU375 文献标志码 A

Analysis of Environmental Vibration due to Subway under Different Site Soil Conditions

JIN Qiao, ZHANG Jiayu, SUN Li

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

Abstract: In this paper, the influence law of vibration in surrounding sites caused by urban subway rail transit was studied, so as to provide environmental vibration information for the evaluation of vibration comfort of adjacent buildings, analysis of vibration damage, and effective application of vibration absorption and isolation measures. In order to investigate the vibration characteristics of the site surface, a finite element model of "soil-tunnel" based on ABAQUS was established, a dynamic load formula of subway trains considering track irregularities was constructed, and the VDLOAD subroutine was used to simulate train operation. And then the ground vibration responses induced by train operation under different site types, different train speeds, and different buried

收稿日期:2021-08-30

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等方面研究。

depth of tunnel track were analyzed and compared. It is found that the peak response of horizontal acceleration reaches the maximum value at around 20 meters from the center axis of the subway track, and then decayed rapidly in the region from 20 meters to 40 meters laterally. On the contrary, the maximum value of the vertical acceleration peak response appears at 0 meter from the center axis of the subway track, and rapidly attenuates to about one tenth of it within 20 meters from the transverse distance. It is concluded that the horizontal peak acceleration response of site vibration effects presents a "hump" trend of first increasing and then decreasing, while the vertical peak acceleration response presents a "monotonic decreasing" trend. And the site category has an impact on the difference of site effect caused by different vehicle speeds. Meanwhile, the vibration effect of the site generally decreases with the increase of the buried depth of the tunnel track.

Key words: subway train; site effect; construction site category; ground-borne vibration

城市地铁轨道交通已成为世界各国解决现代城市交通问题的主要途径之一。由于城市轨道交通与城市居民生产、生活的房屋建筑和市政性基础设施在地理位置上联系紧密,由轨道交通列车运行诱发的地面振动以及随之而产生的地面噪音问题受到了研究者们的高度重视^[1]。

目前,对于轨道交通的环境振害问题,国内外研究者采用理论分析、现场实测以及数值模拟等方法进行了众多研究。在理论分析方面,X. Sheng 等^[2]建立了列车-轨道-地基耦合理论分析模型,研究了考虑轨道不平顺因素的场地振动。雷晓燕^[3]采用波数-频率域法建立了轨道结构模型,分析了高速列车的轨道及场地振动问题。上述研究表明轨道列车存在一个理论临界上限速度-瑞利波波速,当列车达到此速度时,轨道乃至场地的竖向振动幅值会突然增大。通过现场实测手段,B. Olivier 等^[4]发现刚度较大的路基能大幅降低高速列车的振动水平,并通过有限元建模对结论进行了验证;C. Zou 等^[5]实测了地铁换乘站对其上盖综合体结构的振动和噪声响应,建议距离地铁咽喉区 40 m 内的拟建上覆结构需要进行设计复查;蒋通等^[6]进行了明珠线高架轨道列车的环境振动测试,提出了振级的统计回归公式。近年来,数值模拟方法被广泛运用到轨道交通环境振动领域。洪俊青等^[7]将地铁振动简化为线性简

谐荷载,并通过二维含土层的建筑结构有限元模型,分析了不同频率地铁列车振动对周边建筑物的影响规律;王福星^[8]通过高速列车-无砟轨道-地基土动力耦合的三维有限元模型,分析了地基土软硬土对高速列车通过时引起的自由场地的振动特性和传播规律。

综上所述,对于列车运行引起的环境振动问题,针对高速列车(时速 ≥ 200 km)运行引起的振动问题研究较多,而对于设计时速在 80~160 km 内的城市轨道交通列车引起的振动问题研究相对匮乏。同时,已有研究在场地土类别上也缺乏系统的考量。基于此,笔者通过 ABAQUS 有限元软件建立了“土层-隧道”振动模型,对 I 类、II 类和 III 类场地土条件下城市轨道交通列车的环境振动特性和传播规律进行研究,以为沿线现代建筑结构和古建筑结构的振害分析、评估及防护提供基础性振源信息。

1 建立有限元模型

1.1 地铁振动荷载的模拟

目前,学者认为列车运行所产生的竖向振动荷载主要与轨道不平顺密切相关^[9]。考虑静力荷载和列车平稳性、动力附加荷载以及轨面波形磨耗等因素,可以采用一系列正弦函数叠加形式的激振力函数来模拟列车振动荷载^[10]:

$$F(t) = P_0 + P_1 \sin\omega_1 t + P_2 \sin\omega_2 + P_3 \sin\omega_3 t. \quad (1)$$

式中: $F(t)$ 为列车荷载; P_0 为车轮静载; t 为荷载作用时间; $P_i = M_0 a_i \omega_i (i = 1, 2, 3)$ 分别为考虑列车平稳性、动力附加荷载以及轨道波形对应某一控制频率的振动荷载幅值,其中 M_0 为列车簧下质量, a_i 为振动波型的矢高, $\omega_i (2\pi v/L_i)$ 为圆频率,其中 v 为列车速度, L_i 为振动的波长。

在有限元模型中,采用ABAQUS用户子程序VDLOAD实现列车振动荷载的施加。VDLOAD子程序采用Fortran语言进行编程,能够实现荷载在指定路径的相应单元上的定速移动。

国内地铁设计时速多为80 km/h、100 km/h、120 km/h以及160 km/h。笔者取60 km/h、80 km/h和100 km/h三种地铁车速进行分析。地铁振动荷载时程曲线见图1。

1.2 “土层-隧道”振动模型

为了研究城市轨道交通列车对于不同类型场地所产生的振动响应问题,笔者建立了“土层-隧道”有限元模型,并根据土体的软硬程度选取I类、II类和III类三种场地条件以

及0 m、10 m、20 m和30 m四种隧道轨道埋深进行研究,文中的“隧道轨道埋深”系指地铁列车轨道与地表之间的垂直距离。

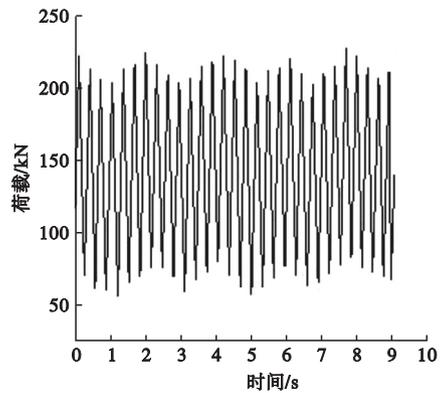
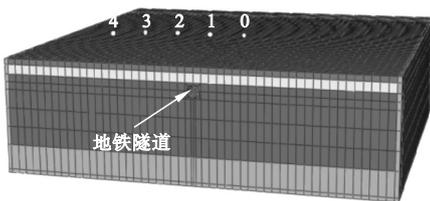


图1 地铁振动荷载时程曲线

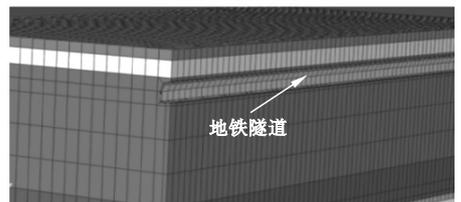
Fig. 1 Time history curve of subway vibration load

1.2.1 模型参数确定

文献[11-12]研究表明,当模型的宽度大于15倍的隧道直径、深度达到7倍的隧道埋深时,模型的自振周期趋于稳定,且计算精度较好。因此,文中“土层-隧道”模型尺寸取 $200\text{ m} \times 200\text{ m} \times 60\text{ m}$,隧道直径为6 m。沿垂直于地铁轨道轴向的横断面方向上,在地表设置了5个振动特征点,其与地铁轨道中心横向水平距离分别为0 m、20 m、40 m、60 m和80 m(见图2)。



(a)整体模型



(b)隧道局部

图2 “土层-隧道”有限元模型

Fig. 2 Finite element models of "soil layer-tunnel"

采用C3D8R单元类型将模型细分,使模型发生扭曲变形时精度不受影响,共48 960个单元。当振动传递至模型边界时,振动波会由于反射效应而导致结果产生误差,笔者对模型边界条件采用等效三维一致黏弹性边界单元进行处理^[13],以消除人工边界效应。将土体视为均匀、连续的弹塑性介质,采

用摩尔-库伦屈服准则作为其本构模型。

由于实际土体情况十分复杂,在竖直方向上的分层也因时因地而异,笔者将实际土层结构简化为四层(见图2(b))。

场地的软硬程度与土体的等效剪切波速有关。不同土的剪切波波速可按式(2)进行计算:

$$V_s = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \quad (2)$$

式中: E 为介质的弹性模量; ν 为泊松比; ρ 为密度。

通过式(2)可以得出不同土层的剪切波速,再由式(3)、式(4)计算得到场地土的等效剪切波速:

$$t_0 = \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{v_{si}} \quad (3)$$

$$v_{sc} = \frac{d_0}{t_0} \quad (4)$$

式中: t_0 剪切波由地表到达计算深度处的时

间; d_i 为计算深度范围内第*i*土层的厚度; v_{si} 为计算深度范围内第*i*土层的剪切波速; v_{sc} 为场地土的等效剪切波速; d_0 为场地的计算深度。

通过式(2)~式(4)可计算得到场地土的等效剪切波速,再根据《建筑抗震设计规范》(GB50011—2010)^[14]的相关规定,确定其建筑场地类别。文中共设计了三种场地土土层参数,分别对应于I类、II类和III类建筑场地类别,具体参数见表1。

表1 土层参数

Table 1 Parameters of soil layers

场地类别	土层深度/m	重力密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/ MPa	泊松比	内摩擦角/($^\circ$)	剪切波速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
I类场地	0~3(杂填土)	18	160	0.3	25	184.9
	3~8(粗砂)	18	180	0.3	37	208
	8~44(砾砂)	18	200	0.3	39	219.3
	44~60(砾石)	18.1	200	0.3	39	219.3
II类场地	0~3(杂填土)	17.8	18	0.2	25	65
	3~8(粗砂)	18	80	0.3	37	138.7
	8~44(砾砂)	18	190	0.3	38	213.7
	44~60(砾石)	18.1	200	0.3	39	219.3
III类场地	0~3(杂填土)	17.8	18	0.2	15	65
	3~8(粗砂)	18	20	0.31	25	65.4
	8~44(砾砂)	18	100	0.31	37	154.5
	44~60(砾石)	18.1	200	0.3	39	219.3

1.2.2 阻尼参数

振动波在土体中的传播是一个逐渐衰减的过程,在分析中需要正确设置阻尼参数。笔者采用瑞利阻尼来进行动力学分析^[15-16]。对于文中I类(硬土)、II类(中硬)和III类(软土)场地类别,阻尼比分别取经验值0.03、0.05和0.08^[17]。通过设定满足阻尼比的两个频率值,可得到与三种场地相对应的 α 、 β 值,进而得到其瑞利阻尼。

2 计算结果与分析

2.1 加速度时程响应与分析

通过“土层-隧道”三维有限元模型,在10 m隧道轨道埋深、80 km/h的列车车速的

振动荷载及II类场地土的条件下,各振动特征点的加速度时程曲线如图3、图4所示。

各特征点的加速度峰值响应结果见表4。由表可知,随着与地铁轨道中心横向距离的增加,水平向加速度峰值响应呈现先增大后减小的“驼峰”趋势。在距离地铁轨道中心20 m处达到最大值,然后在横向距离20~40 m的区间迅速减小,在40 m以外的衰减速度变缓。垂直向加速度峰值响应呈“单调递减”趋势。峰值响应的最大值出现在距离地铁轨道中心0 m处(即轨道中心处的垂直向加速度峰值响应最大),在横向距离20 m内迅速衰减至其1/10左右。

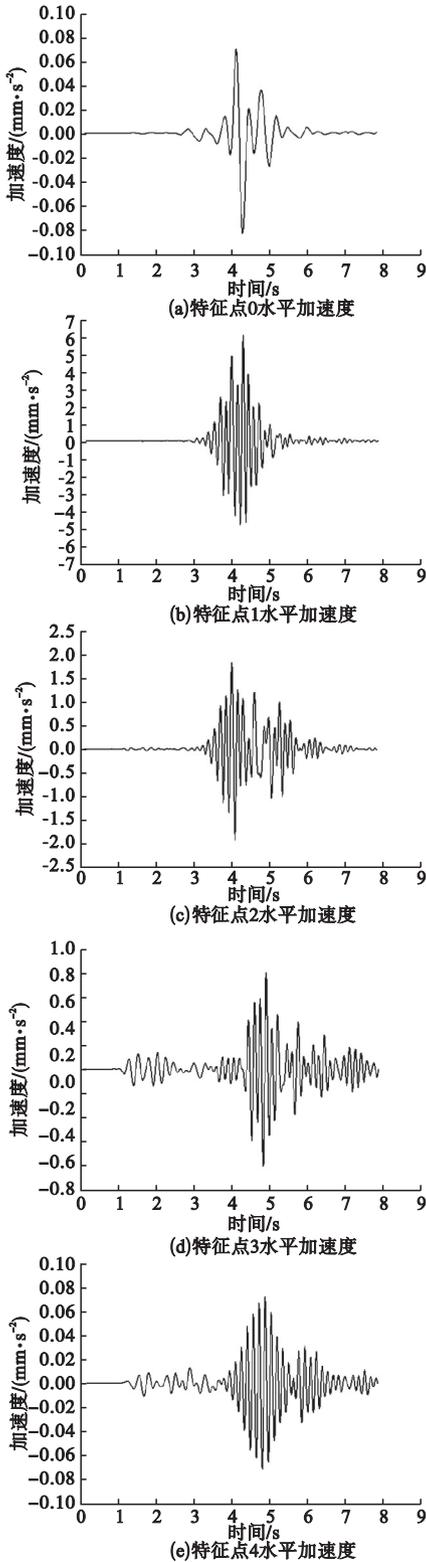


图3 各特征点水平加速度历程

Fig. 3 Horizontal acceleration time histories of each characteristic point

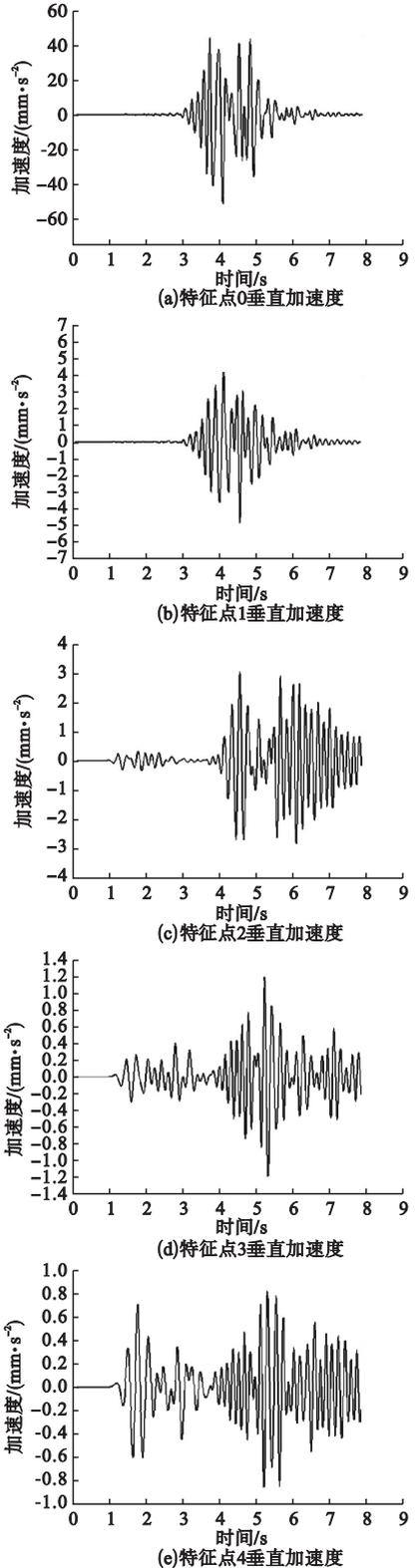


图4 各特征点垂直加速度历程

Fig. 4 Vertical acceleration time histories of each characteristic point

表4 振动特征点加速度峰值汇总

Table 4 Summary of peak acceleration of vibration characteristic points mm/s^2

特征点	水平向加速度峰值	垂直向加速度峰值
0	0.069	44.740
1	6.073	4.349
2	1.823	3.071
3	0.801	1.236
4	0.724	0.829

2.2 列车车速对场地振动效应的影响

在三种场地类别条件下,分别以60 km/h、

80 km/h 和 100 km/h 的列车车速所形成的振动荷载为条件,计算地表5个振动特征点加速度时程响应,以通过特征点的振动响应数据来分析列车车速对场地振动效应的影响。隧道轨道埋深被设置为距地表10 m。

各地表振动特征点在不同场地条件下的加速度峰值响应结果见表5。不同场地条件下水平加速度峰值响应与竖直加速度峰值响应对比情况如图5、图6所示,不同场地条件下水平加速度峰值响应与竖直加速度峰值响应对比情况如图7、图8所示。

表5 地表特征点的加速度峰值响应

Table 5 Peak acceleration response of surface feature points

场地类别	特征点	水平加速度峰值/ $(\text{mm}\cdot\text{s}^{-2})$			垂直加速度峰值/ $(\text{mm}\cdot\text{s}^{-2})$		
		60 km/h	80 km/h	100 km/h	60 km/h	80 km/h	100 km/h
Ⅲ类场地	0号	0.022	0.042	0.552	10.051	19.330	21.250
	1号	2.156	2.584	2.120	1.021	6.160	8.350
	2号	0.942	1.522	1.123	0.541	3.134	4.578
	3号	0.446	0.525	0.512	0.227	1.943	2.036
	4号	0.402	0.385	0.391	0.192	1.257	1.052
Ⅱ类场地	0号	0.012	0.069	0.080	12.195	44.740	50.150
	1号	2.551	6.073	5.132	1.082	4.349	6.575
	2号	0.687	1.823	1.324	0.670	3.071	6.465
	3号	0.545	0.801	0.986	0.307	1.236	3.504
	4号	0.508	0.724	0.592	0.160	0.829	2.085
Ⅰ类场地	0号	0.002	0.042	0.079	20.050	49.330	68.640
	1号	3.234	6.620	8.654	2.521	8.160	13.760
	2号	1.459	1.722	1.640	1.242	3.134	6.285
	3号	0.848	1.025	1.234	0.827	1.943	2.616
	4号	0.615	0.785	0.523	0.592	1.257	1.851

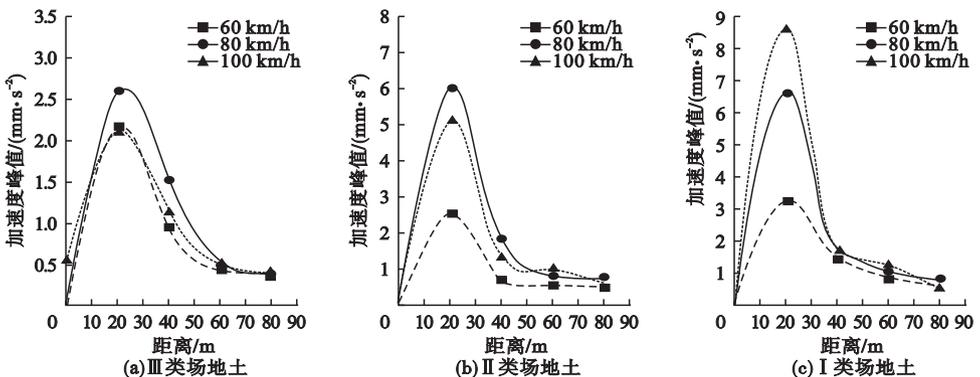


图5 不同场地土类别下水平加速度峰值响应对比

Fig. 5 Comparison of peak horizontal acceleration response under different soil types

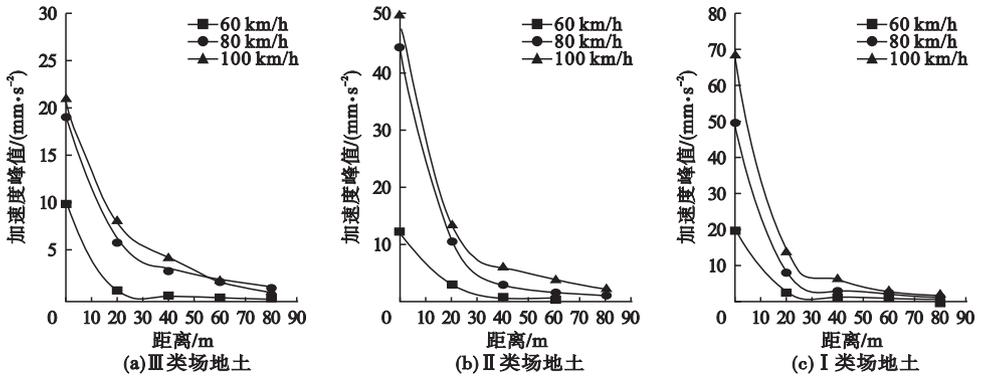


图6 不同场地土类别下垂直加速度峰值响应对比

Fig. 6 Comparison of vertical peak acceleration response under different soil types

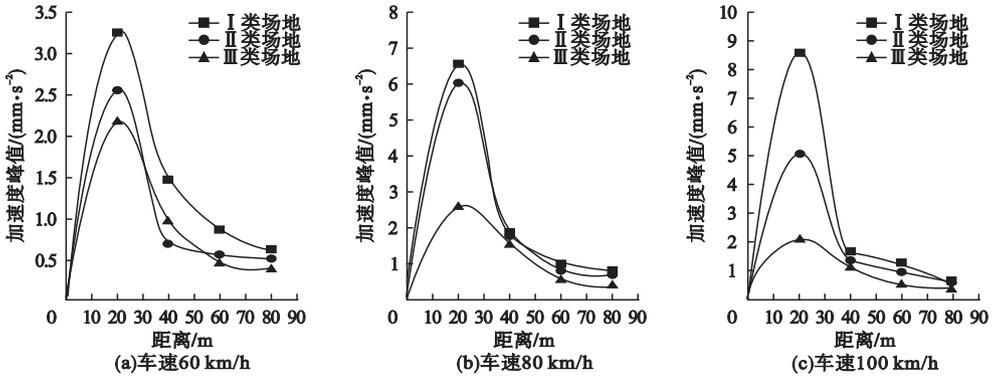


图7 不同车速下水平加速度峰值响应对比

Fig. 7 Comparison of peak horizontal acceleration response at each vehicle speed

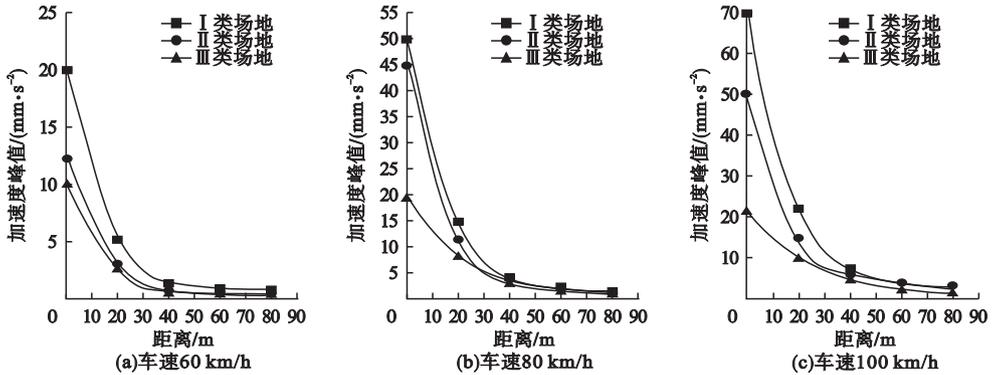


图8 不同车速下垂直加速度峰值响应对比

Fig. 8 Comparison of peak vertical acceleration response at each vehicle speed

由图5~图8可知,场地土的软硬程度和列车车速并不能改变场地振动效应的总趋势,场地土类别仅对不同车速列车所引发的场地效应的差异性产生影响。在较软的场地土条件下,不同车速所引发的场地振动加速度峰值响应差别较小;而在较硬的场地土条件下,不

同车速所引发的场地振动加速度峰值响应差别较大。以峰值响应的最大值为例,对于Ⅲ类场地,三种车速对应的水平加速度峰值响应最大值在2.120~2.584 mm/s^2 ;对于Ⅱ类场地,其峰值响应最大值在2.551~6.073 mm/s^2 ;而对于Ⅰ类场地,其峰值响应最大值在3.234~

8.654 mm/s²。同时,从图5~图8可以看出,在不同场地土条件下列车运行产生的场地振动响应并不是随着速度的增加而增大,列车车速与列车运行产生的场地振动响应并不是简单的线性递增关系。

2.3 隧道轨道埋深对场地振动效应的影响

在0 m、10 m、20 m及30 m隧道轨道埋深条件下,以80 km/h的列车车速所形成的振

动荷载为条件,计算地表5个振动特征点的水平向及垂直向加速度时程响应,进而分析隧道轨道埋深对场地振动效应的影响。在不同隧道轨道埋深条件下,各地表振动特征点的加速度峰值响应结果见表6。根据表中数据,得到地表各点的水平向、垂直向峰值加速度最大值随隧道轨道埋深变化的曲线如图9、图10所示。

表6 不同轨道埋深下地表特征点的峰值加速度最大值

Table 6 Maximum peak accelerations of characteristic points under different track buried depth conditions

埋深/m	水平加速度峰值/(mm·s ⁻²)			垂直加速度峰值/(mm·s ⁻²)		
	I类场地	II类场地	III类场地	I类场地	II类场地	III类场地
0	10.810	9.608	7.334	105.800	75.820	56.180
10	6.620	6.073	2.584	49.330	44.740	19.330
20	3.025	2.948	1.525	30.540	18.259	14.250
30	2.206	1.875	1.383	6.748	7.090	7.608

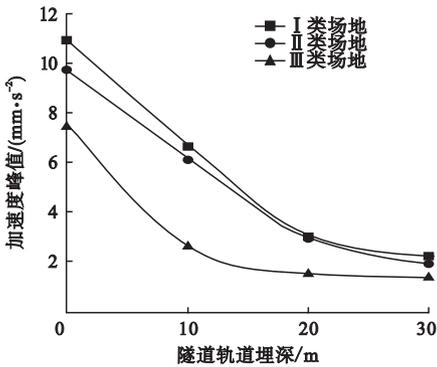


图9 不同轨道埋深下水平加速度峰值变化曲线

Fig. 9 Variation curves of horizontal peak acceleration under different buried depths

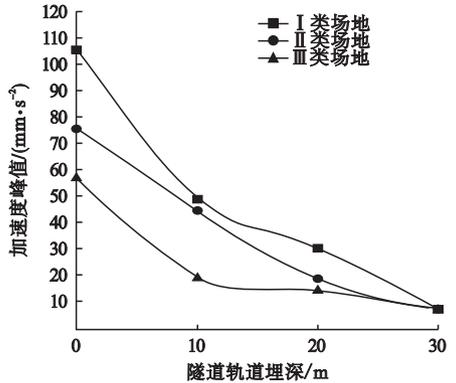


图10 不同轨道埋深下垂直加速度峰值变化曲线

Fig. 10 Variation curves of vertical peak acceleration under different buried depths

由图9和图10可知,场地振动效应总体上随隧道轨道埋深的增加而不断减小。对于场地的水平向加速度振动响应,I类和II类场地在隧道轨道埋深0~20 m内呈现高衰减率趋势,而III类场地振动响应的高衰减率在0~10 m;对于场地的垂直向加速度振动响应,I类场地振动响应的高衰减率在0~10 m,II类场地振动响应的高衰减率在0~20 m,III类场地振动响应的高衰减率在0~10 m。

3 结论

(1)地铁列车运行能够在垂直于其行进方向的横断面土体中产生水平向和垂直向振动效应。其中水平向振动加速度的峰值响应呈现先增大后减小的“驼峰”趋势,而垂直向振动加速度的峰值响应则为“单调递减”趋势,且前者的振动能量远低于后者。

(2)场地土类别和地铁列车车速与场地的振动效应均具有相关性。相较于软土地场,硬土地场的振动效应对列车车速的敏感

性更高。

(3)隧道轨道埋深的增加能够减小场地振动效应,且对于硬土地面而言,场地振动效应的衰减更加显著。

参考文献

- [1] 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.
- [2] SHENG X, JONES C J C, THOMPSON D J. A theoretical model for ground vibration from trains generated by vertical track irregularities [J]. Journal of sound and vibration, 2004, 272: 937 - 956.
- [3] 雷晓燕. 高速铁路轨道振动与轨道临界速度的傅里叶变换法[J]. 中国铁道科学, 2008, 28(6): 30 - 34.
(LEI Xiaoyan. Fourier transform method of high-speed railway track vibration and track critical velocity [J]. China railway science, 2008, 28(6): 30 - 34.)
- [4] OLIVIER B, DAVID P C, PEDRO A C. The effect of embankment on high speed rail ground vibrations [J]. International journal of rail transportation, 2016(4): 229 - 246.
- [5] ZOU Chao, WANG Yimin, JAMES A M, et al. Train-induced field vibration measurements of ground and over-track buildings [J]. Science of the total environment, 2017, 575: 1339 - 1351.
- [6] 蒋通, 张昕. 高架轨道交通引起环境振动的实测与数值模拟[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2004, 32(5): 565 - 569.
(JIANG Tong, ZHANG Xi. Measurement and numerical simulation of environmental vibration caused by elevated rail transit [J]. Journal of tongji university (natural science edition), 2004, 32(5): 565 - 569.)
- [7] 洪俊青, 刘伟庆. 地铁对周边建筑物振动影响分析[J]. 振动与冲击, 2006, 25(4): 142 - 145.
(HONG Junqing, LIU Weiqing. Analysis of the influence of subway on the vibration of surrounding building [J]. Vibration and impact, 2006, 25(4): 142 - 145.)
- [8] 王福星. 基于 ABAQUS 对高速铁路环境振动的数值模拟及振动特性分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
(WANG Fuxing. Numerical simulation and vibration characteristics analysis of environmental vibration of high-speed railway based on ABAQUS [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.)
- [9] 夏禾. 车辆与结构动力相互作用[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
(XIA He. Vehicle-structure dynamic interaction [M]. Beijing: Science Press, 2002.)
- [10] 张志强, 孙健, 罗俊忠, 等. 列车振动对黄土地铁隧道结构影响研究现状[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(增刊1): 66 - 74.
(ZHANG Zhiqiang, SUN Jian, LUO Junzhong, et al. Review of the influence of train-induced vibratory load on metro tunnel in loess area [J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2016, 12(S1): 66 - 74.)
- [11] 杨永斌. 高速列车所引致之土壤振动分析[R]. 台北: 台湾大学, 1995.
(YANG Yongbin. Analysis of soil vibration induced by high-speed trains [R]. Taipei: Taiwan University, 1995.)
- [12] 张宝才. 浅埋地下工程及相关系统振动控制的工程实践和理论分析[D]. 北京: 铁道部科学研究院, 2002.
(ZHANG Baocai. Engineering practice and theoretical analysis of vibration control of shallow underground engineering and related systems [D]. Beijing: Ministry of Railways Research Institute, 2002.)
- [13] 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 Ying, LIU Jingbo, DU Yixin. Three-dimensional uniform viscoelastic artificial boundary element and equivalent viscoelastic boundary element [J]. Engineering mechanics, 2007, 24(12): 31 - 37.)
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范: GB50011—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
(Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China. Code for seismic design of buildings: GB50011—2010 [S]. Beijing: China Building Industry Publication, 2010.)
- [15] 宋福春, 张军, 李宁. 高架轨道交通引起地面振动有限元分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2012, 28(4): 612 - 618.
(SONG Fuchun, ZHANG Jun, LI Ning. The finite element analysis of ground vibration caused by rail traffic on viaduct [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2012, 28(4): 612 - 618.)
- [16] 金峤, 任玺茗, 孙丽. 地铁列车振动对邻近综合体高层建筑的影响分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2021, 37(2): 227 - 234.
(JIN Qiao, REN Ximing, SUN Li. Analysis on influence of subway train vibration on adjacent high-rise complex building [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2021, 37(2): 227 - 234.)
- [17] 杨尚福. 不同土体条件下地铁列车引起的环境振动及建筑物二次结构噪声分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
(YANG Shangfu. Analysis of environmental vibration and secondary structure noise caused by subway trains under different soil conditions [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.)

(责任编辑:杨永生 英文审校:刘永军)