

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.201912085

地铁振动荷载作用下场地动力响应及振动衰减规律研究*

韩俊艳¹, 万宁潭¹, 赵密¹, 卢爱贞²

(1. 北京工业大学城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124;
2. 北京市微振动环境控制工程技术研究中心, 北京 100840)

摘要: 地铁列车运行引起的场地振动对临近建筑、精密仪器等带来不可忽视的影响。为了研究场地在地铁运行振动荷载作用下的动力响应规律, 基于ABAQUS软件建立了地铁隧道-土相互作用系统的二维有限元模型, 并通过现场试验监测数据验证了模型的有效性。在此基础上, 通过对场地表面振动峰值速度和加速度时程分析, 研究了隧道埋置深度、土体阻尼比、土体不均匀性对场地地表振动特性及衰减规律的影响。研究表明: 在一定范围内, 土体表面的动力响应随着隧道埋置深度、土体阻尼比的增大而减小; 不同土质条件下的场地地表的动力响应有一定的差别, 但随着距离的增大, 差别逐渐缩小。基于上述参数分析, 采用MATLAB对峰值速度衰减曲线进行拟合, 给出了场地振动衰减预测公式, 可为振动敏感建筑场地的选择提供参考。

关键词: 土体振动特性; 动力响应; 地铁振动荷载; 有限元分析

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)01-0191-09

Research on Site Dynamic Response and Vibration Attenuation under the Vibration Loading of Subway

HAN Junyan¹, WAN Ningtan¹, ZHAO Mi¹, LU Aizhen²

(1. Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. Beijing Engineering and Technology Research Center of Micro-vibration Environmental Control, Beijing 100840, China)

Abstract: The vibration of the site has a significant impact on adjacent buildings and precision instruments due to the subway operation. A two-dimensional finite element model of the subway tunnel-soil interaction system was established based on the ABAQUS software to study the dynamic response of the site under the vibration loading of the subway, and its validity was verified by field test monitoring data. Then the effects of tunnel burial depth, soil damping ratio, and soil non-uniformity on the soil surface vibration characteristics and attenuation laws are analyzed by analyzing the peak speed and acceleration time history of the site surface vibration. The results show that the dynamic response of the soil surface decreases as the increase of the tunnel burial depth and the damping ratio of the soil within a certain range; the dynamic response of the ground surface of the site under different soil conditions

* 收稿日期: 2019-12-30; 修回日期: 2020-04-10

基金项目: 北京市微振动环境控制工程技术研究中心开放课题(40004012201901)资助

作者简介: 韩俊艳(1983—), 女, 副教授, 博士。主要从事地下结构抗震方面的研究。E-mail: junyanhan@bjut.edu.cn

has some difference, but the differences gradually decrease with the increase of the distance. Based on the above parameter analysis, MATLAB is used to fit the peak velocity attenuation curve, and the prediction formula of site vibration attenuation is given, which provides a reference for the selection of vibration-sensitive building sites.

Keywords: soil vibration characteristics; dynamic response; vibration loading of subway; finite element analysis

引言

电子工业技术发展迅速,精密仪器在工业生产、军事应用、国民生活等领域发挥着不可替代的作用。大批电子厂房、实验室以及高校和科研机构购置了价格昂贵的精密仪器,在其使用过程中不可避免地受到铁路、公路、城市轨道交通(地铁、城铁)运行引起的环境振动,如西雅图海湾运输局轻轨线(LRT)及都柏林北线(Dublin metro north)穿越大学及医院已建和拟建的微振动敏感建筑物^[1],北京4号线、8号线、10号线、14号线、15号线近距离经过高校实验基地、科研院所等单位,地铁振动必然会对单位内精密仪器的正常使用造成影响^[2]。因此,研究地铁运行荷载作用下场地土体的动力响应及其衰减规律可为振动敏感建筑场地选择及减振隔振技术提供理论依据。

地铁运行属于移动荷载类型,许多专家学者以H. Lamb^[3]建立的理论为基础,研究移动荷载下土体的振动响应问题。A. V. Metrikine等^[4]提出的解析模型中,将隧道结构进行简化,将其视为水平无限Euler-Bernoulli梁,列车荷载简化为点荷载匀速运动于该梁上。高光运等^[5]基于薄层法,建立运行列车-轨道-地基的相互作用模型,对饱和分层地基的振动反应规律进行研究。丁智等^[6]以弹性半空间内的R. D. Mindlin解^[7]为基础,分别研究了单个和多个移动轮轴荷载作用下土单元主应力轴发生的变化和旋转问题。吴宗臻等^[8-9]提出了基于土层振动频响函数预测地铁运行引发环境振动的频域解析方法,并通过现场监测数据对北京地铁1号线预测结果进行验证。

在现场监测试验和数值模拟方面,D. P. Connolly等^[10]对不同场地类型的轨道线路进行测试,提出了一种预测轨道交通环境振动的分析模型。S. Gupta等^[11]研究了不同材料阻尼、土体剪切模量、隧

道尺寸、隧道形状等因素对列车振动诱发周边土体动力响应的影响。刘卫丰等^[12]结合现场交通振动测试,对北京地铁8号线运行引起振动敏感建筑物内精密仪器的振动问题进行了数值模拟研究,比较了两种不同轨道形式下楼内外的振动响应。孙晓静等^[13]结合北京地铁16号线规划运行的实际工程案例,在频域定量预测研究中首次采用两位校准法。上述研究大多针对均匀场地进行研究,未能考虑地铁运行振动对非均匀场地的影响。

鉴于此,本文结合实际工程现场监测试验,建立二维地铁隧道-土体相互作用整体分析模型,分析地铁隧道埋深、土体阻尼比、土体非均匀性对场地地表振动的影响,研究了土体的振动衰减规律,给出了不同阻尼比、不同隧道埋深下场地地表振动衰减预测公式,为地铁临近区域的环境振动控制和沿线建筑选址提供参考。

1 地铁运行有限元模型

1.1 模型参数

在利用ABAQUS软件进行土-结动力相互作用有限元模拟时,考虑计算精度及耗时等因素影响,建立二维对称有限元模型,如图1所示。土体模型尺寸取垂向深度70 m,水平宽度300 m,在地面距离隧道中心线不同水平距离处选取了15个拾振点,相邻拾振点间距离为20 m。

为模拟真实土质条件,在建模时将土层简化为4层,各层土厚由地表至模型底部依次为3、17、26、24 m,隧道外半径为3 m,衬砌厚0.3 m,材料参数如表1所示。为保证数值模拟的准确和效率,对振源附近处的网格作加密处理,随距振源距离的增大网格尺寸适当增大。

由于地铁运行时其荷载引起隧道结构及围岩土体的动应变非常小,仍处于弹性状态,因此在进

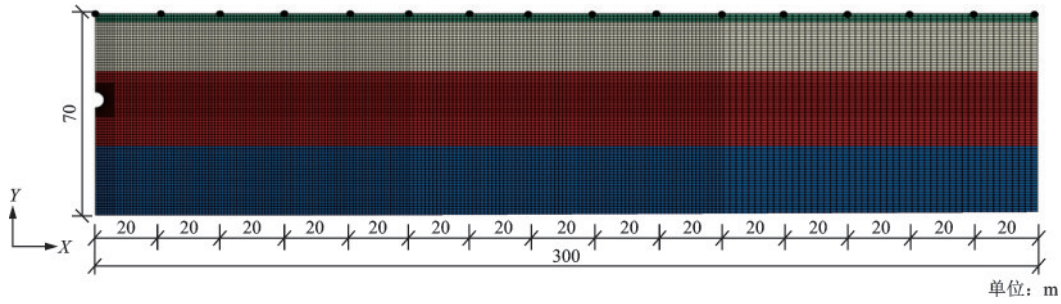


图1 土体沿Y向不均匀的有限元模型

Fig.1 Finite element model of soil inhomogeneous in the Y direction

表1 材料参数

Table 1 Material parameters

材料	密度/ (kg·m ⁻³)	弹性模量/ MPa	泊松比
填土(0~2 m)	1 650	6	0.30
粉质黏土(2~15 m)	1 900	24	0.32
黏土(15~40 m)	2 000	75	0.31
泥岩(40~70 m)	2 100	120	0.20

行有限元动力分析时选择线弹性本构关系。地基土往往存在一定的阻尼,计算分析时采用瑞利阻尼假定,通过下列公式计算不同阻尼比相应的 α 和 β :

$$C = \alpha M + \beta K \quad (1)$$

$$\begin{cases} \alpha = \frac{2\omega_i\omega_j(\omega_j\zeta_i - \omega_i\zeta_j)}{\omega_j^2 - \omega_i^2} \\ \beta = \frac{2(\omega_i\zeta_i - \omega_j\zeta_j)}{\omega_i^2 - \omega_j^2} \end{cases} \quad (2)$$

式中, M 、 K 分别表示质量矩阵和刚度矩阵; α 、 β 分别表示质量系数和刚度系数; ζ_i 、 ζ_j 和 ω_i 、 ω_j 分别表示第 i 、 j 阶模态的阻尼比和固有圆频率。

此外,为考虑土体沿X向(即纵向)的不均匀性,如图2所示将土体沿X向分布的土质参数分为两种,0~100 m和100~300 m范围各取一种土参数,设置两种工况进行对比分析,材料参数设置见表2。

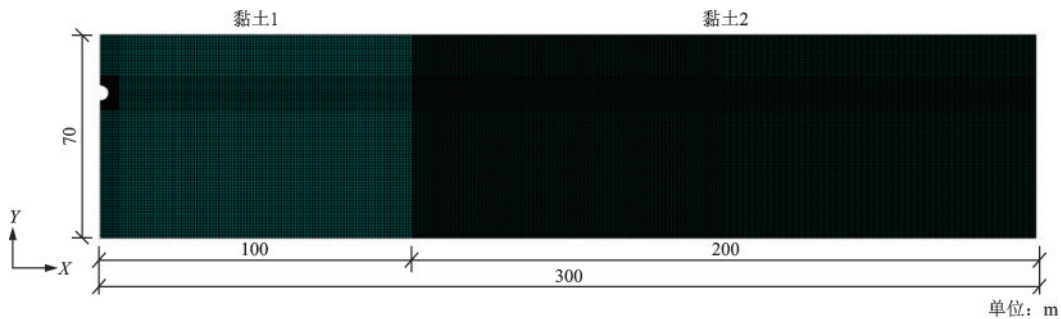


图2 土体沿X向不均匀的有限元模型

Fig.2 Finite element model of non-uniform soil in the X direction

表2 不同工况的材料参数

Table 2 Material parameters of different working conditions

	材料	密度/ (kg·m ⁻³)	弹性模量/ MPa	泊松比
工况一	黏土1	1 900	24	0.32
	黏土2	2 000	75	0.31
工况二	黏土1	2 000	75	0.31
	黏土2	1 900	24	0.32

1.2 人工边界设置

目前,黏弹性边界^[14]、黏性边界^[15]、弹性边界^[16]

等是有限元建模中较为常用的人工边界。本文在建模时选用弹性边界,应用MATLAB软件编制程序,最终在ABAQUS中实现边界的输入。该边界在模拟半无限介质的弹性恢复能力具有一定优越性^[16],不易发生低频飘移失稳、高频振荡失稳问题。该人工边界上的每个节点包含法向和切向的弹簧,人工边界上节点在法向和切向的弹簧(K_m 和 K_s)可以表示为:

$$\begin{cases} K_m = A_l \frac{1}{(1+A)} \frac{\lambda + 2G}{2R} \\ K_s = A_l \frac{1}{(1+A)} \frac{G}{2R} \end{cases} \quad (3)$$

式中, n 和 s 分别表示法线和切线方向; R 为波源与人工边界之间的距离; A_l 为节点 l 在人工边界上的影响面积; λ 和 G 为介质拉梅常数; ρ 为介质的质量密度; A 为修正系数, 可取 0.8。

1.3 模型验证

某实际工程在振动敏感建筑物与铁路中间修建地铁车站, 基坑长 163.6 m, 标准段宽度 36 m, 开挖深度 20.05 m, 安全等级为一级, 监测点布置图如图 3 所示, 材料参数见表 3。以实际工程场地为标准建立有限元模型见图 4, 通过在列车运行处输入监测数据来对比监测点处的地表振动响应。由图 5 可知, 本文所建立有限元模型的方法具有一定的适用性。

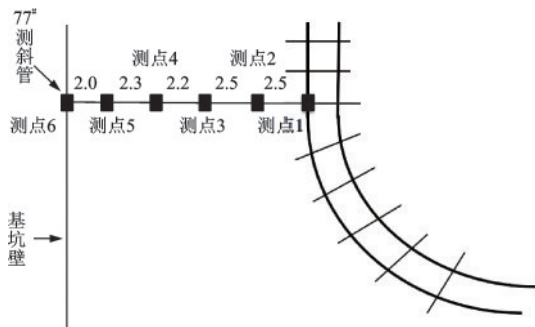


图 3 监测点布置

Fig.3 Layout of monitoring points

表 3 监测试验土体材料参数

Table 3 Material parameters of the test soils

材料	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/ MPa	泊松比
填土	1 930	30	0.2
粉质黏土	1 950	20	0.3
黏土	1 970	50	0.35
粗砂	2 160	70	0.22
泥岩	1 870	50	0.25

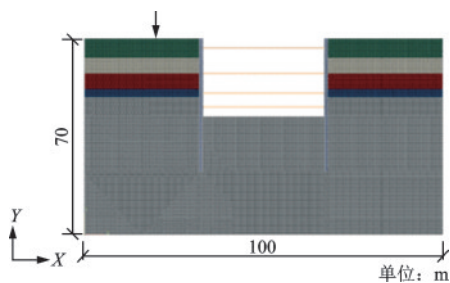


图 4 工程场地有限元模型

Fig.4 Finite element model of engineering site

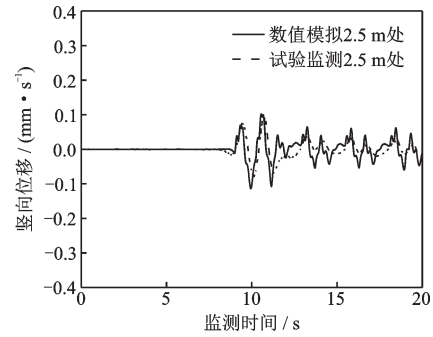


图 5 试验监测与数值模拟的对比

Fig.5 Comparison between experimental and numerical simulation results

1.4 列车振动荷载

目前, 确定列车振动荷载的方法主要有通过现场实测分析、列车-钢轨-路基相互作用模型以及激振力函数拟合。本文采用激振力函数拟合的方法, 激励模拟函数如下:

$$F(t) = A_0 + A_1 \sin \omega_1 t + A_2 \sin \omega_2 t + A_3 \sin \omega_3 t \quad (4)$$

式中, A_0 是车轮静荷载; A_1 、 A_2 、 A_3 分别表示对应低频 (0.5~5 Hz)、中频 (30~60 Hz)、高频 (200~400 Hz) 范围的荷载振动峰值。其中 $A_i = m \alpha_i \omega_i^2$, α_i 为 L_i 对应的矢高; m 为簧下质量; $\omega_i = \frac{2\pi v}{L_i}$, v 为车辆速度, L_i 为车辆不同速度下的钢轨基本振动波长。

本文研究选用地铁车辆车型 B 型, 最大轴重 14 t, 单边静荷载 $A_0 = 70$ kN, 单边簧下质量 $m = 750$ kg, 采用英国统计的轨道不平顺管理值中的不平顺波长及对应矢高, $L_1 = 10$ m, $\alpha_1 = 5$ mm, $L_2 = 2$ m, $\alpha_2 = 0.6$ mm, $L_3 = 0.5$ m, $\alpha_3 = 0.005$ mm, 取地铁列车行驶速度 30 m/s。地铁列车激振力如图 6 所示。

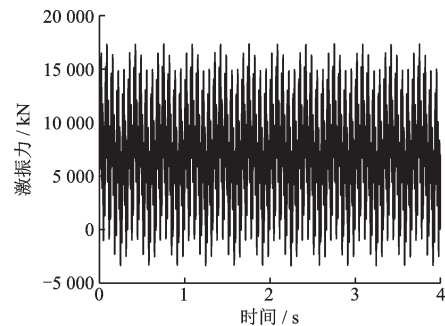


图 6 列车激振力

Fig.6 Subway excitation force

2 影响因素分析

2.1 隧道埋置深度

图7是Y向(即竖向)不均匀的场地条件下,土体阻尼比0.15时,地铁在不同埋深的隧道中运行速度30 m/s时的水平向及竖向峰值速度曲线,并与相关规范^[17]要求的微振动限值进行对比。图8是沿X向(即水平向)不均匀的工况一中阻尼比0.15时距离振源中心线20~220 m处的加速度时程曲线。由图可知:

(1)与隧道埋深10 m时的地表水平峰值速度相比,埋深20、30、40 m时的地表水平峰值速度在距离振源20 m处,分别减少48.0%、65.1%、74.6%;在距离振源220 m处,分别减少1.0%、1.8%、1.9%。与隧道埋深10 m时的地表竖向峰值速度相比,埋深20、30、40 m时的地表水平峰值速度在振源位置处,分别减少47.8%、60.9%、63.6%;在距离振源220 m处,分别减少2.1%、5.7%、9.2%。由此可知,地表的振动响应在不同隧道埋深下具有一定的差异性,但随着距振源距离的进一步扩大,这种差异性逐渐减弱。

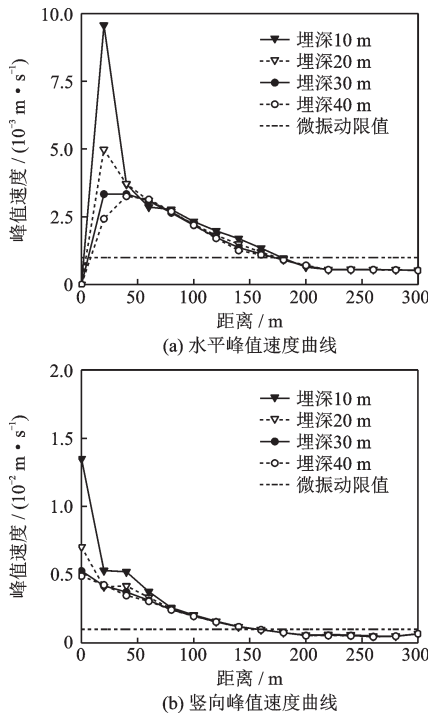


图7 不同隧道埋深下地表峰值速度曲线

Fig.7 Surface peak velocity curves under different tunnel depths

(2)由图7可得水平向峰值速度与竖向峰值速度分别在约180 m及140 m处满足微振动限值要求。

由图8可以看出,在距离振源20~60 m处存在先增大后减小的变化,在隧道埋深较浅时尤为显著。可见,在距离隧道一定范围存在振动响应放大区,这容易造成建筑振动超出规范要求,在选址时应尽量避免。

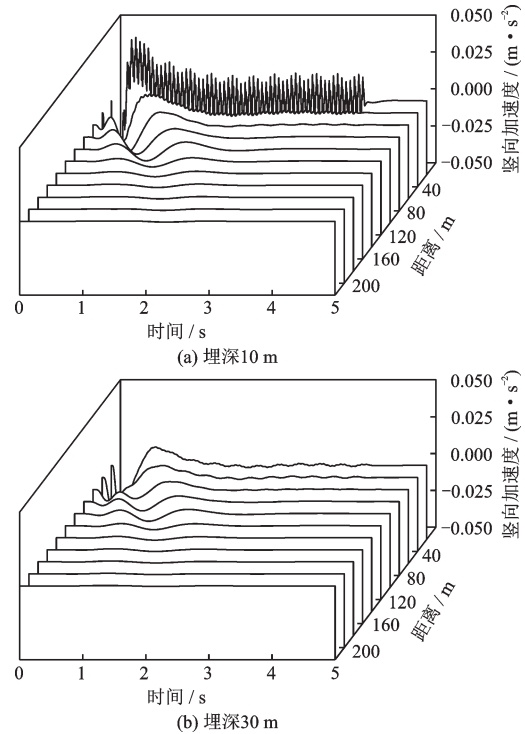


图8 不同隧道埋深下地表加速度时程曲线

Fig.8 Time-history curves of surface acceleration under different tunnel depths

2.2 土体阻尼比

现行国家标准相应规范^[18]中提出目前地基土的阻尼比取值偏小,宜适当提高至0.15~0.35。在结构动力分析时,材料阻尼采用瑞利阻尼,本文分别选用阻尼比0.05、0.15和0.25,研究工况一中地铁运行速度30 m/s时的场地地表动力响应,隧道埋深20 m时水平向及竖向峰值振动响应曲线如图9所示,取距离振源中心线20~220 m处的加速度时程曲线如图10所示。由图可知:

(1)随着阻尼比的增大,振动响应峰值逐渐减小,满足防微振要求的距离逐渐缩短。在隧道埋深20 m条件下,水平向速度响应峰值在阻尼比0.05条件下于100 m处满足限值要求,阻尼比0.15和0.25

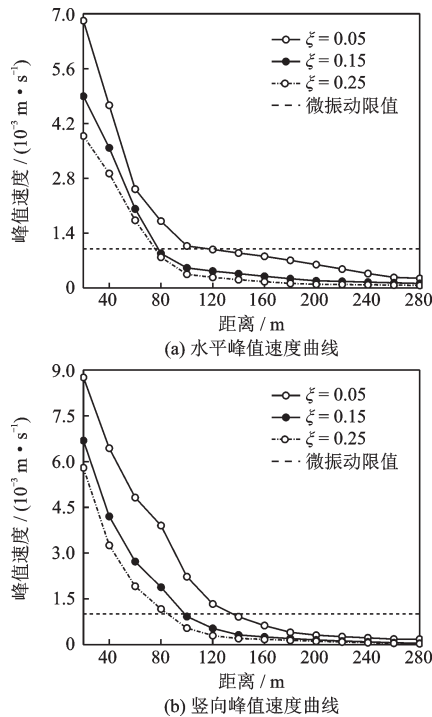


图9 不同阻尼比下振动响应峰值曲线

Fig.9 Peak response curves for different damping ratios

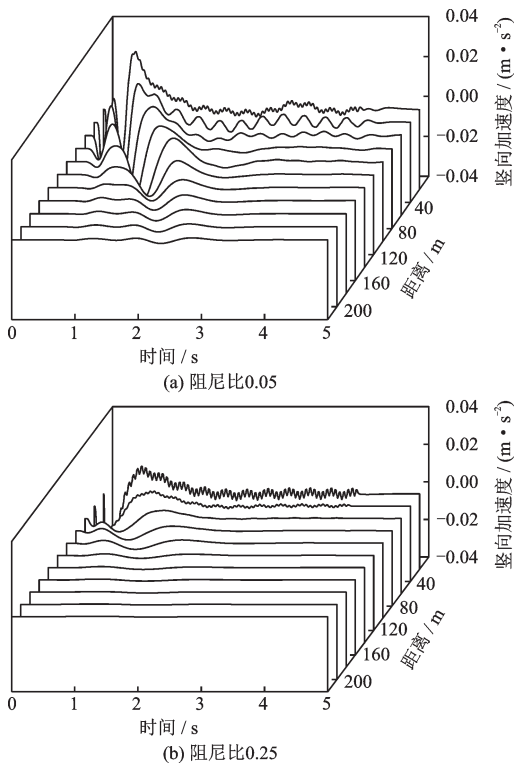


图10 不同阻尼比下地表加速度时程曲线

Fig.10 Time-history curves of surface acceleration under different damping ratios

条件下于70~80 m处满足限值要求。竖向速度响应峰值随着阻尼比的增大,分别在140、100、80 m左

右处满足限值要求。

(2)竖向加速度响应要比水平向加速度响应剧烈,随着阻尼比的加大,响应强度逐渐变弱,曲线更加平缓。

2.3 土体纵向不均匀性

为考虑土体材料纵向不均匀性的影响,设置两种不同工况,在阻尼比0.05、速度30 m/s、隧道埋深30 m条件下比较不同土质条件的地面振动衰减规律。

图11为距离振源中心线20~220 m处不同工况的加速度时程曲线。从图中可以看出,阻尼比为0.05时,在距离振源较近处,工况一的振动衰减响应要略强于工况二,但随着距离的增大,工况二中竖向振动的波动效应与工况一相比要更加显著。

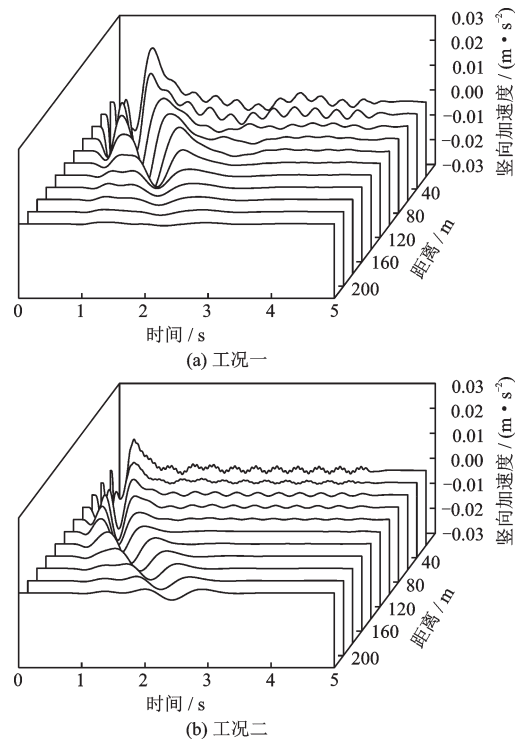
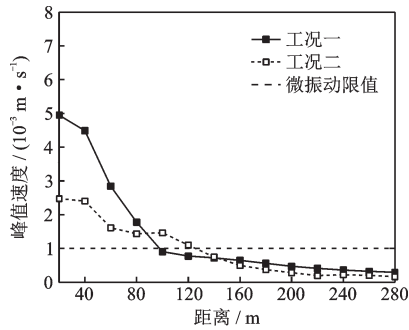


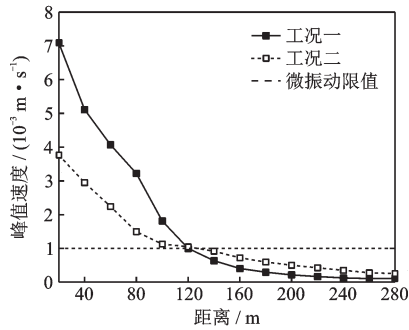
图11 不同工况的加速度时程曲线

Fig.11 Acceleration time-history curves under different working conditions

图12为不同工况的振动响应峰值曲线。从图中可以看出,工况一在一定距离范围内的振动响应峰值要大于工况二,但其衰减要快于工况二的反应,因此在超过这一距离范围之后,其振动响应要弱于工况二。由图可知,振动响应作用在较软的黏土时要比作用在相对较硬的黏土上剧烈。



(a) 水平峰值速度曲线



(b) 竖向峰值速度曲线

图 12 不同工况下振动响应峰值曲线

Fig.12 Peak vibration response curves under different working conditions

3 振动衰减曲线拟合

通过划分不同工况和土的参数条件,考虑阻尼比大小的影响,采用如式(5)所示振动衰减的计算公式:

$$V = ae^{bx} + ce^{dx} \quad (5)$$

其中, V 为地铁运行荷载作用时场地地表的速度峰值; X 为距离地铁运行处的水平距离; a 、 b 、 c 、 d 为影响系数。

表4~5为不同工况下的系数取值。通过查表可知在特定埋深和阻尼比条件下,任一水平距离位置 X 处土体表面速度峰值的大小。图13给出工况一在埋深30 m、阻尼比0.05时的水平峰值速度拟合曲线。式(5)能够较好地反应地铁运行下场地地表振动速度峰值随水平距离的变化。

4 结论

采用数值模拟与现场监测试验相结合的方法,

表 4 工况一振动速度衰减公式系数取值

Table 4 Values of the coefficients of vibration velocity attenuation formula in working condition 1

	埋深 10 m					
	水平			竖向		
	阻尼比 0.05	阻尼比 0.15	阻尼比 0.25	阻尼比 0.05	阻尼比 0.15	阻尼比 0.25
a	1.201E-5	0.013 83	0.010 75	0.015 94	0.014 61	0.006 887
b	-4.062	-0.045 87	-0.035 37	-0.017 84	-0.028	-0.044 9
c	0.000 890 9	0.001 868	0.000 321	0.003 578	0.000 155	0.005 958
d	-0.807 8	-0.010 47	-0.005 38	-0.146 6	-0.000 990 2	-0.021 92
	埋深 20 m					
	水平			竖向		
	阻尼比 0.05	阻尼比 0.15	阻尼比 0.25	阻尼比 0.05	阻尼比 0.15	阻尼比 0.25
a	0.010 18	0.006 243	0.006 16	0.012 59	0.010 24	0.017 35
b	-0.047 34	-0.045 8	-0.033	-0.015 96	-0.021 08	-0.018 09
c	0.003 787	0.003 554	0.001 229	-0.000 119 8	-9.67E-5	-0.008 574
d	-0.010 31	-0.014 85	-0.011 39	0.001 228	-0.000 842 1	-0.013 73
	埋深 30 m					
	水平			竖向		
	阻尼比 0.05	阻尼比 0.15	阻尼比 0.25	阻尼比 0.05	阻尼比 0.15	阻尼比 0.25
a	0.005 731	0.011 85	0.004 298	-0.021 65	0.009 01	-0.006 533
b	-0.020 22	-0.023 93	-0.014 91	-0.010 51	-0.023 43	-0.012 08
c	0.001 821	4.45E-5	-0.000 194 5	0.031 21	8.38E-6	0.013 38
d	-0.010 06	0.002 86	-0.000 599 3	-0.011 9	0.004 575	-0.016 33

表5 工况二振动速度衰减公式系数取值

Table 5 Values of the coefficients of vibration velocity attenuation formula in working condition 2

埋深 10 m						
	水平			竖向		
	阻尼比 0.05	阻尼比 0.15	阻尼比 0.25	阻尼比 0.05	阻尼比 0.15	阻尼比 0.25
<i>a</i>	0.003 552	5.00E-3	4.00E-3	0.004 875	0.003 307	0.002 256
<i>b</i>	-0.009 208	-2.17E-2	-0.022 02	-0.046 78	-0.048 42	-0.047 47
<i>c</i>	0.079 06	0	0	0.004 665	0.003 999	0.003 931
<i>d</i>	-0.180 5	-0.021 73	-0.022 02	-0.010 85	-0.016 49	-0.019 78
埋深 20 m						
	水平			竖向		
	阻尼比 0.05	阻尼比 0.15	阻尼比 0.25	阻尼比 0.05	阻尼比 0.15	阻尼比 0.25
<i>a</i>	0.002 954	0.011 45	-1.10E-3	0.003 753	0.002 449	-0.000 208 7
<i>b</i>	-0.008 235	-2.07E-2	-0.030 85	-0.027 84	-0.027 45	-0.025 61
<i>c</i>	0.004 718	-0.009 154	0.003 222	0.002 859	0.002 796	0.004 712
<i>d</i>	-0.078 74	-0.026 76	-0.014 9	-0.008 58	-0.014 69	-0.020 23
埋深 30 m						
	水平			竖向		
	阻尼比 0.05	阻尼比 0.15	阻尼比 0.25	阻尼比 0.05	阻尼比 0.15	阻尼比 0.25
<i>a</i>	0.004 59	0.012 67	-0.142 3	0.003 208	-0.141 6	-0.002 685
<i>b</i>	-0.012 79	-2.14E-2	-0.026 16	-0.018 59	-0.015 92	-0.026 33
<i>c</i>	-0.002 151	-0.011 88	0.142 6	0.001 834	0.145 8	0.006 342
<i>d</i>	-0.035 47	-0.029 04	-0.025 53	-0.008 079	-0.015 95	-0.020 45

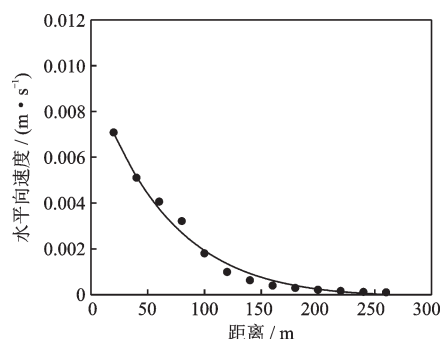


图13 拟合曲线

Fig.13 Fitting curve

首先验证了数值模拟方法的适用性,在此基础上结合相关规范^[18]中微振动限制的要求,分别对不同隧道埋置深度、不同土体阻尼比以及土体材料纵向不均匀的情况下,地铁列车荷载对场地地表振动衰减的规律进行了探讨,得出结论如下:

(1) 隧道埋深在距离振源0~75 m范围内,对地表的振动响应有较大影响。超过这一范围,各埋深下的地表振动响应总体上趋于一致,该因素的影响不再明显。

(2) 在列车荷载作用位置附近的竖向振动响应

要强于水平向振动响应,但是随着距离的增大,竖向振动衰减更快。由竖向振动响应峰值曲线可以看出,在距离振源20~60 m左右处存在先增大后减小的变化。

(3) 土体阻尼比的大小对地铁列车荷载下地表振动衰减有着显著的影响。随着阻尼比的增大,振动响应逐渐减弱,满足微振动限制要求的距离也逐渐缩短。

(4) 土体材料纵向不均匀性对地铁列车荷载下地表振动衰减有一定的影响,这种影响在水平向振动上表现得不明显,但在竖向振动响应上,较软的黏土要比相对较硬的黏土上的反应更强烈。

(5) 考虑土质条件、土体阻尼比和隧道埋深,对峰值速度衰减曲线进行拟合,拟合公式计算结果与模拟结果良好吻合,具有一定的工程实用价值。

参考文献:

[1] Wolf S. Potential low frequency ground vibration (< 6.3Hz) impacts from underground LRT operations [J]. Journal of sound and vibration, 2003, 267 (3) :

- 651-661.
- [2] 马蒙,刘维宁,丁德云,等. 地铁列车振动对精密仪器影响的预测研究[J]. 振动与冲击, 2011, 30(3): 185-190.
Ma M, Liu W N, Ding D Y, et al. Prediction of influence of metro trains induced vibrations on sensitive instruments[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(3): 185-190. (in Chinese)
- [3] Lamb H. On the propagation of tremors over the surface of an elastic solid[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1904, 203: 1-42.
- [4] Metrikine A V, Vrouwenvelder A. Surface ground vibration due to a moving train in a tunnel: two-dimensional model[J]. Journal of Sound and vibration, 2000, 234(1): 43-66.
- [5] 高广运,赵宏,张博,等. 饱和分层地基上列车运行引起的地面振动分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013, 41(12): 1805-1811.
Gao G Y, Zhao H, Zhang B, et al. Analysis of ground vibration induced by trains on saturated Layered Ground [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2013, 41(12): 1805-1811. (in Chinese)
- [6] 丁智,葛国宝,魏新江,等. 地铁列车运营引起的地基土应力状态变化分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增2): 647-651.
Ding Z, Ge G B, Wei X J, et al. Variation of stress state of foundation soils induced by running subway[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(Sup2): 647-651. (in Chinese)
- [7] Mindlin R D. Force at a point in the interior of a semi-infinite solid[J]. Physics, 1936, 7(5): 195-202.
- [8] 吴宗臻,刘维宁,马龙祥,等. 基于土层振动频响函数预测地铁环境振动的频域解析方法[J]. 中国铁道科学, 2014, 35(5): 105-112.
Wu Z Z, Liu W N, Ma L X, et al. Frequency domain analytical method for predicting metro environmental vibration based on soil frequency response function [J]. China Railway Science, 2014, 35(5): 105-112. (in Chinese)
- [9] 吴宗臻,刘维宁,马龙祥,等. 地铁浮置式轨道引起地表振动响应解析预测模型研究[J]. 振动与冲击, 2014, 33(17): 132-137.
Wu Z Z, Liu W N, Ma L X, et al. Analytical prediction model of ground vibration response induced by metro floating-type track[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(17): 132-137. (in Chinese)
- [10] Connolly D P, Kouroussis G, Giannopoulos A, et al. Assessment of railway vibrations using an efficient scoping model[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2014, 58: 37-47.
- [11] Gupta S, Stanus Y, Lombaert G, et al. Influence of tunnel and soil parameters on vibrations from underground railways[J]. Journal of Sound and Vibration, 2009, 327(1/2): 70-91.
- [12] 刘卫丰,刘维宁,聂志理,等. 地铁列车运行引起的振动对精密仪器影响的预测研究[J]. 振动与冲击, 2013, 32(8): 18-23.
Liu W F, Liu W N, Nie Z L, et al. Prediction of effects of vibration induced by running metro trains on sensitive instruments[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(8): 18-23. (in Chinese)
- [13] 孙晓静,袁扬,马蒙,等. 地铁列车运行引起远场低频振动响应预测研究[J]. 振动与冲击, 2017, 36(4): 198-202.
Sun X J, Yuan Y, Ma M, et al. Prediction of metro train-induced low frequency vibration responses in far field [J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(4): 198-202. (in Chinese)
- [14] 杜修力,赵密,王进廷. 近场波动模拟的人工应力边界条件[J]. 力学学报, 2006, 38(1): 49-56.
Du X L, Zhao M, Wang J T. A stress artificial boundary in FEA for near-field wave problem[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2006, 38(1): 49-56. (in Chinese)
- [15] Lysmer J, Kuhlemeyer R L. Finite dynamic model for infinite media[J]. Journal of the Engineering Mechanics Division, 1969, 95(4): 759-877.
- [16] 徐源,丛龙,胡颖鹏,等. 考虑土-结构相互作用体系地震反应谱分析[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2013, 34(11): 1656-1659.
Xu Y, Cong L, Hu Y P, et al. Earthquake response spectrum analysis of considering soil-structure interaction [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2013, 34(11): 1656-1659. (in Chinese)
- [17] 电子工业防微振工程技术规范: GB 51076—2015[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.
- [18] 动力机器基础设计规范: GB 50040—96[S]. 北京: 中国计划出版社, 1996.

(本文责编:周小潭)