

橡胶土回填对明挖隧道隔振作用*

殷东昊¹ 金浩¹ 夏瑞萌² 顾兴宇¹

(1. 东南大学交通学院, 211189, 南京; 2. 北京城建设计发展集团股份有限公司, 100037, 北京)

摘要 [目的] 在城市轨道交通运营过程中, 列车运行引起的振动会对沿线建筑物和精密仪器造成损害, 甚至影响人们的日常生活。因此, 需研究有效的减振措施。[方法] 以雄安轨道交通 R1 线大里程明挖段区间隧道为例, 用橡胶土代替素填土, 采用数值模拟方法, 在 ABAQUS 软件中建立相应的隧道-地层有限元模型, 分析橡胶土不同阻尼比对明挖隧道的隔振作用。[结果及结论] 采用阻尼比为 0.04 的橡胶土进行回填, 最大可使地面竖向振动加速度减小 6.2%, 振动加速度级降低 1.1%; 采用阻尼比为 0.06 的橡胶土进行回填, 最大可使地面振动加速度减小 11.4%, 振动加速度级降低 1.3%。两种阻尼比橡胶土对明挖隧道的隔振效果均较为明显。相同测点位置处, 阻尼比为 0.06 的橡胶土对振动加速度、振动加速度级的降低幅度总体大于阻尼比为 0.04 的橡胶土, 最大降低幅度分别可达 5.2% 及 0.667%。

关键词 地铁; 明挖隧道; 橡胶土回填; 隔振效果

中图分类号 U231.94

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2024.12.034

Effect of Rubber Soil Backfill on Vibration Isolation of Open-cut Tunnels

YIN Donghao¹, JIN Hao¹, XIA Ruimeng², GU Xingyu¹

(1. School of Transportation, Southeast University, 211189, Nanjing, China; 2. Beijing Urban Construction Design & Development Group Co., Ltd., 100037, Beijing, China)

Abstract [Objective] During the operation of urban rail transit, the train operation induced vibration can damage buildings and precision instruments along the line, and even affect people's daily lives. Therefore, effective vibration reduction measures need to be studied. [Method] The long-mileage open-cut section tunnel of Xiong'an Rail Transit R1 Line is taken as an example, which uses rubber soil instead of plain fill. With numerical simulation method, a corresponding tunnel-stratum finite element model is established in ABAQUS software to analyze the vibration isolation effect of different rubber soil damping ratios on open-cut tunnels. [Result & Conclusion] Using rubber soil with a damping ratio of 0.04 for backfilling can reduce the ground vertical vibration accelera-

tion by 6.2% and the vibration acceleration level by 1.1% at most; using rubber soil with a damping ratio of 0.06 for backfilling can reduce the ground vibration acceleration by 11.4% and the vibration acceleration level by 1.3% at most. The vibration isolation effect of rubber soil with the above two damping ratios on open-cut tunnels is quite obvious. At the same measuring point, the reduction amount of vibration acceleration and vibration acceleration level by rubber soil with a damping ratio of 0.06 is generally greater than that by rubber soil with a damping ratio of 0.04, with the maximum reduction rates reaching 5.2% and 0.667% respectively.

Key words subway; open-cut tunnel; rubber soil backfill; vibration isolation effect

0 引言

城市轨道交通列车运营过程中所产生的振动会通过轨道结构、土体等向周围传播, 进而影响沿线精密仪器的工作、居民日常生活及建筑物结构安全。目前, 进行振动控制的方法主要包括振源控制、传播路径控制及所受影响对象或结构控制。

对于振源控制方法, 已有研究主要从轨道结构等方面开展研究。文献[1]对比研究了钢弹簧浮置板轨道同非减振轨道及其他减振轨道的减振特性, 研究表明, 在 4~200 Hz 频段内, 钢弹簧浮置板减振效果最为显著。文献[2]对不同减振扣件进行了振动动态频响测试, 研究表明, 在不同频段内, 各扣件的振动特性及减振效果有所差异。文献[3]提出在轨腰处安装一种调频式钢轨减振器, 并进行了现场试验, 研究表明, 该种调频式钢轨减振器能够有效抑制钢轨振动。目前, 针对轨道结构振源控制的设计日趋成熟, 在实际工程中已获得了广泛应用。

对于传播路径控制方法, 已有研究主要包括排桩、减隔振沟墙等设计形式。文献[4]对隔振空沟、填充泡沫塑料及地下连续墙(以下简称“地连墙”)

* 国家自然科学基金项目(52378443); 江苏省自然科学基金项目(BK20211173)

三种设计形式进行了有限元数值模拟,得出了不同设计形式下隔振措施的振动特性。文献[5]采用混凝土排桩对高速铁路进行减隔振研究,分析了混凝土排桩埋深、间距及截面尺寸等因素对减隔振效果的影响。文献[6]通过建立有限元模型对高速铁路空沟设计进行了减振分析,研究结果表明,空沟设计能够有效阻隔振动的传播。对于明挖隧道而言,其上部回填土在一定程度上也可以作为一种隔振设计,阻隔振动在土层中的传播,但目前相关研究较少,需进一步进行分析。

基于此,本文在回填土中掺入橡胶颗粒形成橡胶土,利用橡胶弹性材料的特征改进回填土,提高整体阻尼比,并用所得橡胶土代替原有回填土,对不同阻尼比工况下的土体振动响应进行分析,研究在列车荷载作用下,橡胶土回填的隔振效果。本文研究可为城市轨道交通运营过程中的减振措施提供一定的理论基础。

1 橡胶土回填设计

以雄安轨道交通 R1 线大里程明挖段区间隧道为例,对隧道上部回填土进行橡胶土设计,研究不同工况下回填土的隔振效果。明挖段原先采用素填土作为回填土,阻尼比为 0.02,通过掺入橡胶制成的橡胶土代替素填土,改变回填土阻尼比,本文设置了两种工况:橡胶土阻尼比为 0.04、橡胶土阻尼比为 0.06,其他材料参数保持不变。不同阻尼比下的橡胶土设计示意图如图 1 所示。

2 隧道隔振有限元模型

2.1 几何模型

明挖段采用双洞矩形隧道,门洞整体宽度约为 7.65 m,高度为 8.10 m。道床部分主要包括钢轨、轨道板、自密实混凝土、底座和弹性减振垫等,围护结构采用放坡 + TRD(混合搅拌壁式地连墙)工法桩支护形式。综合考虑实际工程背景,采用 ABAQUS 有限元分析软件建立隧道-地层模型。

不同土体所对应的边界与振源之间的距离 λ 可以表示为:

$$\lambda = C_s / (2f_{\min}) \quad (1)$$

式中:

C_s ——地层剪切波速,单位 m/s^2 ;

f_{\min} ——最小关心频率,单位 Hz。

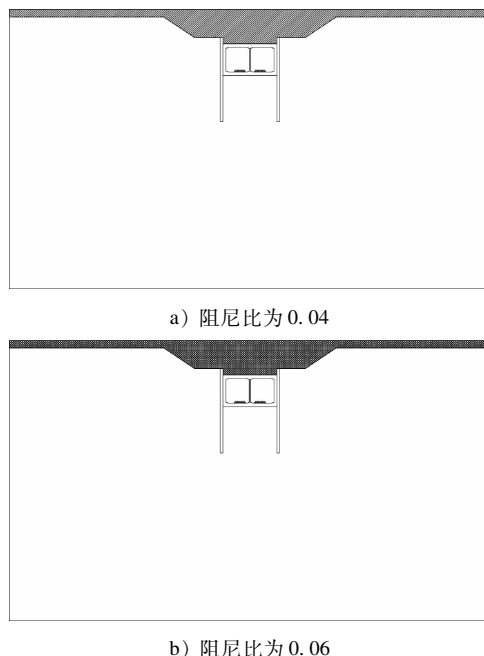


图 1 不同阻尼比下的橡胶土设计示意图

Fig. 1 Schematic diagram of rubber soil design under different damping ratios

在确定几何模型整体尺寸时,由于实际地层是弹性半空间体,而有限元模型通常会设置边界,通常根据地层中的土体剪切波速,计算不同 λ ,再选择最大的 λ 作为整体有限元模型的边界。但将有限元模型左、右两侧设置为无限边界后,不会产生振动回弹现象,则 λ 可取最小值。结合地勘资料,本文取最小剪切波速为 143.33 m/s^2 ,最小关心频率为 1,通过计算可得 λ 约为 70 m,即模型边界与振源距离为 70 m。将隧道整体视为振源,在建立几何模型时,隧道外壁距离左侧、右侧及下部边界均为 70 m。在设置地层时,根据土体大类合并原则,将其自上而下简化为不同厚度的土层,其取值如表 1 所示。隧道-地层有限元模型示意图如图 2 所示。

2.2 材料参数

本文旨在研究车致振动加速度在隧道区间内的传播规律,因此在有限元模型中,赋予各部件一定的弹性模量。隧道外侧地连墙采用 C30 混凝土,隧道主体结构采用 C40 混凝土,轨道板采用 C60 混凝土,隧道及土体结构材料参数如表 2 所示。

2.3 列车荷载及边界条件

雄安轨道交通 R1 线整体采用市域 D 型车,8 节编组。在 ABAQUS 软件中构建车轨模型,不考虑轨道不平顺,计算列车荷载。轮轨力随时间的变化规律如图 3 所示。在模型底部设置边界条件,限制

表 1 不同厚度土层取值

Tab. 1 Thicknesses values for different soil layers

土体名称	厚度/m
素填土	1.878
粉质黏土 1	8.232
粉细砂 1	2.200
粉质黏土 2	1.183
粉细砂 2	3.842
粉质黏土 3	7.910
粉细砂 3	4.806
粉质黏土 4	7.709
粉质黏土 5	—

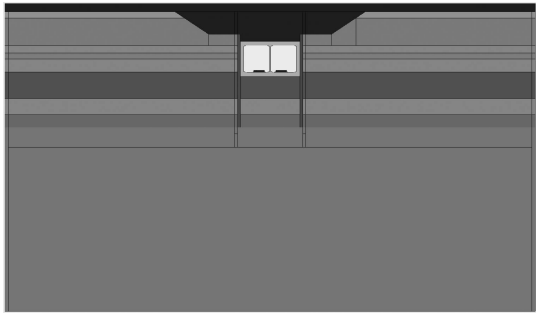


图 2 隧道-地层有限元模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the tunnel-stratum finite element model

表 2 隧道及土体结构材料参数

Tab. 2 Material parameters of tunnels and soil structures

项目	密度/(kg/m ³)	弹性模量/Pa	泊松比
素填土	1.950	2.80×10^7	0.150 0
粉质黏土 1	1.980	2.90×10^7	0.311 1
粉细砂 1	2.030	6.50×10^7	0.286 9
粉质黏土 2	2.020	2.90×10^7	0.311 1
粉细砂 2	2.030	6.50×10^7	0.286 9
粉质黏土 3	2.020	3.00×10^7	0.311 1
粉细砂 3	2.030	6.50×10^7	0.286 9
粉质黏土 4	2.020	3.10×10^7	0.311 1
粉质黏土 5	2.020	3.25×10^7	0.311 1
C30 混凝土	2.400	3.15×10^{10}	0.200 0
C40 混凝土	2.400	3.60×10^{10}	0.200 0
C60 混凝土	2.400	3.25×10^{10}	0.200 0

整体模型的位移和转角。

2.4 测点设置

为研究橡胶土回填对传播至地面振动的阻隔作用,在地面设置相应的振动测点。隧道左侧外壁

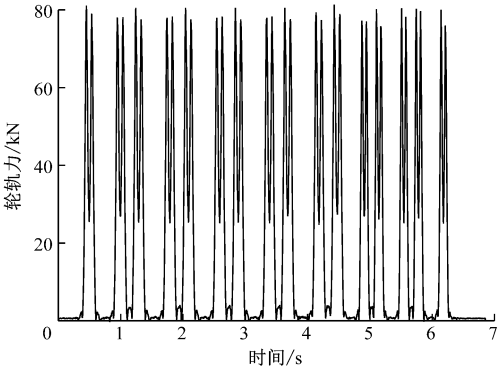


图 3 轮轨力随时间的变化规律

Fig. 3 Changing law of wheel-rail force over time

向上投影至与地面相交,将其交点设置为基准点,由基准点出发沿地面向左,每隔 10 m 设置一个测点,共计 5 个测点(测点 5-1—测点 5-5)。测点设置示意图如图 4 所示。

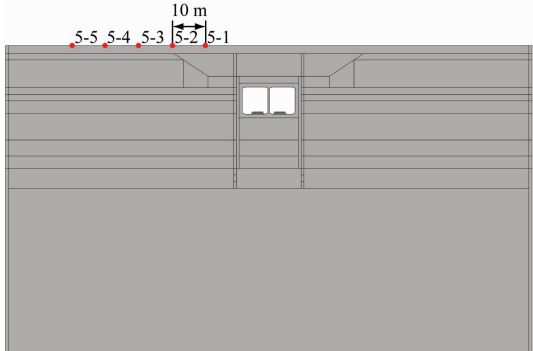


图 4 测点设置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of measurement points setup

3 振动结果分析

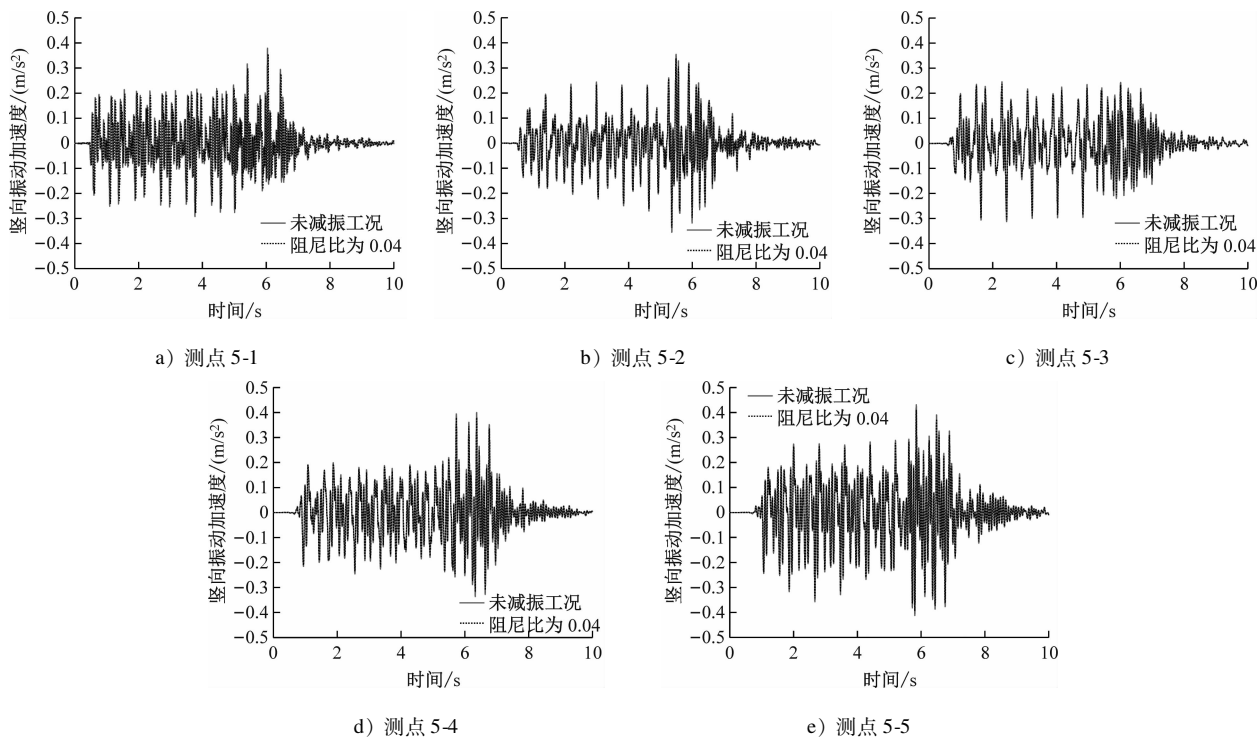
3.1 橡胶土阻尼比为 0.04

设置未减振工况,即橡胶土阻尼比为 0.02。阻尼比为 0.04 及未减振工况下,各测点竖向振动加速度时程曲线对比如图 5 所示。

由图 5 可知:当阻尼比为 0.04 时,各测点竖向振动加速度均呈下降趋势;测点 5-1 处的竖向振动加速度减小最为显著,最大振动加速度减小了 0.024 m/s^2 ,降幅为 6.2%。

阻尼比为 0.04 及未减振工况下,各测点振动加速度级的 1/3 倍频程图如图 6 所示。

由图 6 可知:各测点振动加速度级峰值所对应的中心频率几乎均为 12.5 Hz;当阻尼比为 0.04 时,地面整体的振动加速度级均有不同程度的降低;测点 5-3 处的最大振动加速度级降低了 0.99 dB,降幅为 1.1%。



注:竖向振动加速度以垂直向上为正,以垂直向下为负;余类推。

图5 阻尼比为 0.04 及未减振工况下各测点竖向振动加速度时程曲线对比

Fig. 5 Comparison of vertical vibration acceleration time-history curves at each measuring point under working conditions with damping ratio of 0.04 and without vibration reduction

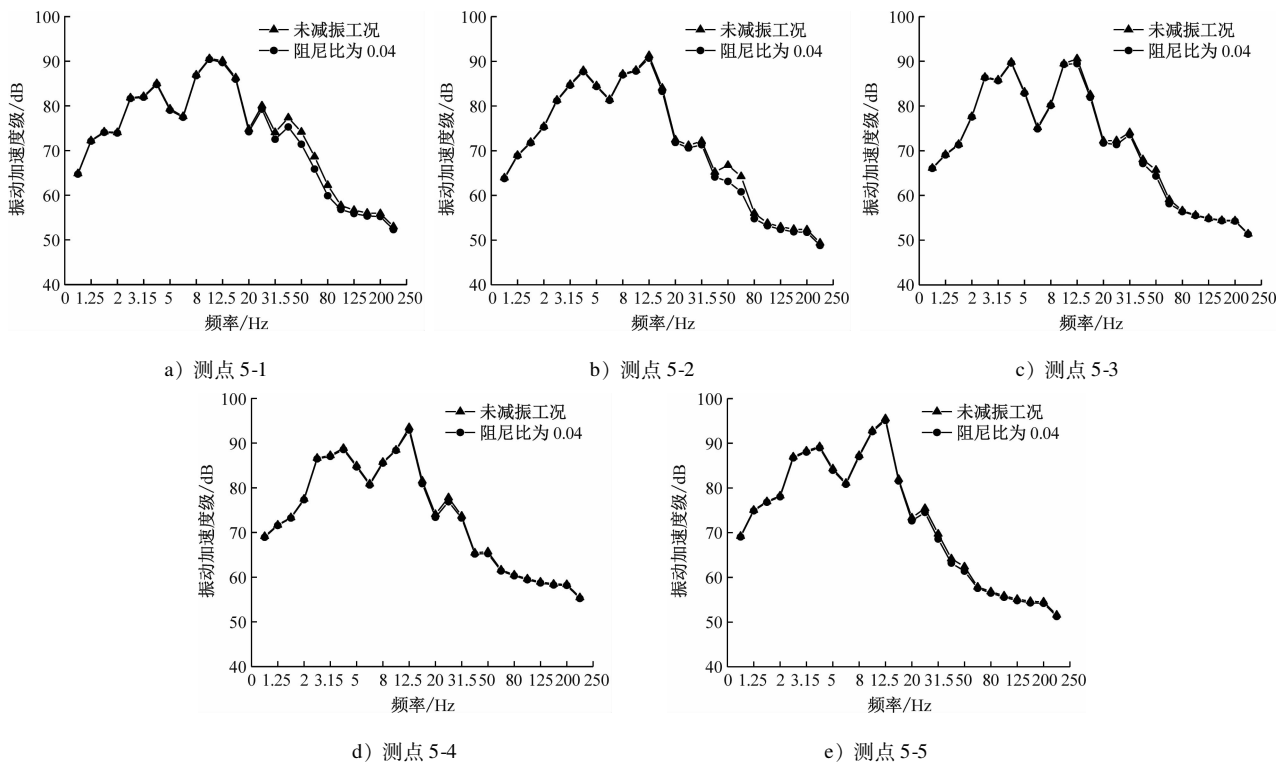


图6 阻尼比为 0.04 及未减振工况下各测点振动加速度级的 1/3 倍频程图

Fig. 6 1/3 octave frequency diagram of vertical vibration acceleration levels at each measuring point under working conditions with damping ratio of 0.04 and without vibration reduction

3.2 橡胶土阻尼比为 0.06

动加速度时程曲线对比,如图 7 所示。

阻尼比为 0.06 及未减振工况下,各测点竖向振

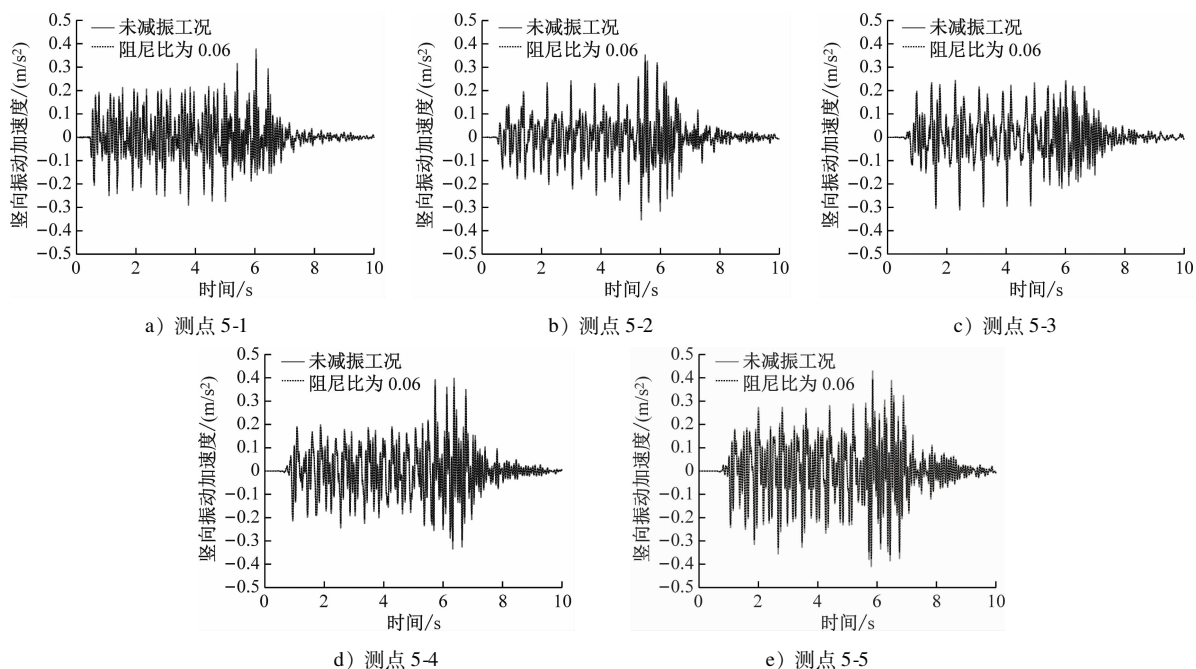


图 7 阻尼比为 0.06 及未减振工况下各测点竖向振动加速度时程曲线对比

Fig. 7 Comparison of vertical vibration acceleration time-history curves at each measuring point under working conditions with damping ratio of 0.06 and without vibration reduction

由图 7 可知:当阻尼比为 0.06 时,各测点的竖向振动加速度呈进一步下降趋势;在测点 5-1 处竖向振动加速度减小量最大,减小了 0.043 m/s^2 ,降幅

为 11.4%。

阻尼比为 0.06 及未减振工况下,各测点振动加速度级的 1/3 倍频程图,如图 8 所示。

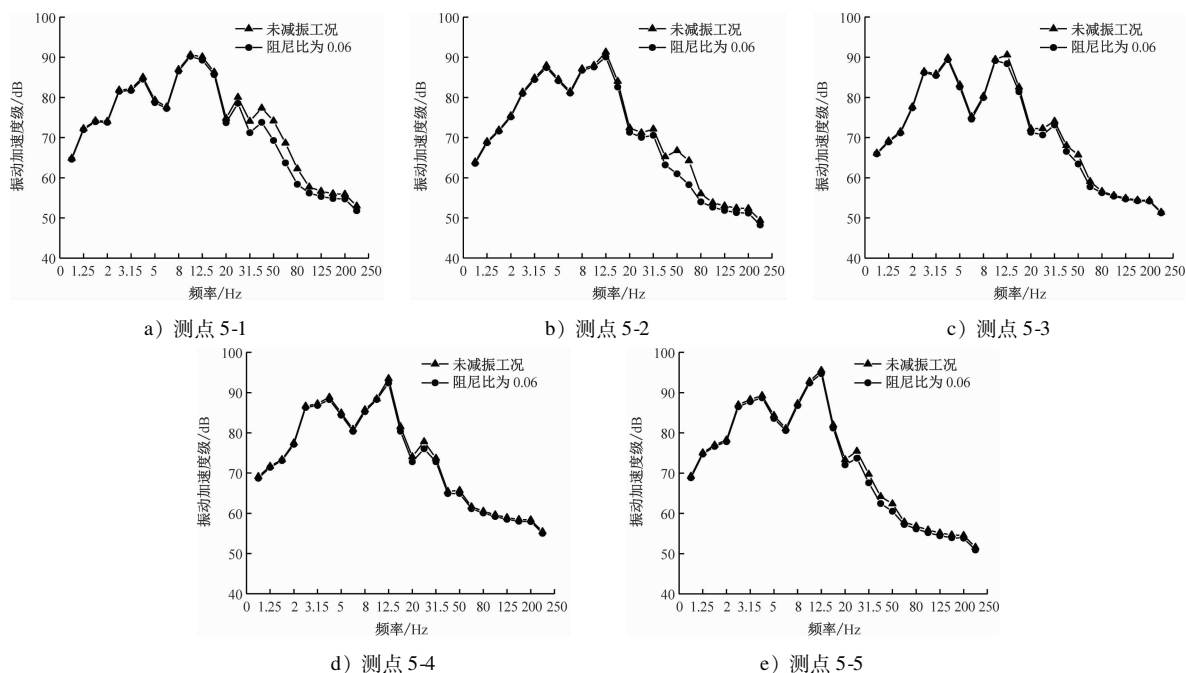


图 8 阻尼比为 0.06 及未减振工况下各测点振动加速度级的 1/3 倍频程图

Fig. 8 1/3 octave frequency diagram of vertical vibration acceleration levels at each measuring point under working conditions with damping ratio of 0.06 and without vibration reduction

由图 8 可知:阻尼比为 0.06 的橡胶土对车致振动的阻隔效果更为明显;当中心频率为 12.5 Hz 时,在测点 5-2 处的振动加速度级减小最大,降低了 1.2 dB,降幅为 1.3%。

4 结语

本文以雄安轨道交通 R1 线大里程明挖段区间隧道为例,针对明挖隧道回填土进行阻尼比设计,设置了橡胶土阻尼比为 0.04 和 0.06 两种工况,分析了列车荷载作用下,不同阻尼比回填土对隧道的隔振作用。主要获得以下几个结论:

1) 当橡胶土阻尼比为 0.04 时,最大可使地面振动加速度减小 6.2%,振动加速度级降低 1.1%。

2) 当橡胶土阻尼比为 0.06 时,最大可使地面振动加速度减小 11.4%,振动加速度级降低 1.3%。

3) 阻尼比为 0.06 的回填橡胶土对隧道整体的隔振效果优于阻尼比为 0.04 的回填橡胶土。在相同测点位置处,阻尼比为 0.06 的橡胶土对竖向振动加速度、振动加速度级的降幅总体大于阻尼比为 0.04 的橡胶土,最大降幅分别可达 5.2% 及 0.667%。

参考文献

- [1] 周志军,刘玉涛,李伟,等. 地铁钢弹簧浮置板轨道振动特性和减振效果研究[J]. 铁道标准设计, 2022, 66(5): 57.
ZHOU Zhijun, LIU Yutao, LI Wei, et al. Study on vibration characteristics and vibration reduction effect of steel spring floating slab track in metro[J]. Railway Standard Design, 2022, 66(5): 57.
- [2] 高晓刚,王安斌,鞠龙华,等. 不同减振扣件的轨道结构横向振动测试与分析[J]. 噪声与振动控制, 2020, 40(1): 191.

(上接第 212 页)

- ZHAO Hongguo. Research on the influence of caves on the stability of new subway tunnels and construction technology[J]. Construction Technology, 2012, 41(15): 88.
- [5] 常洲,魏研博,冷浩,等. 隐伏充填型溶洞对隧道稳定性影响与防治技术[J]. 公路, 2022, 67(9): 439.
CHANG Zhou, WEI Yanbo, LENG Hao, et al. Influence of concealed filling karst cave on tunnel stability and its prevention technology[J]. Highway, 2022, 67(9): 439.
 - [6] 周超月. 富水岩溶地层大断面公路隧道开挖稳定性及失稳特征研究[D]. 成都:西南交通大学, 2016.
ZHOU Chaoyue. Study on excavation stability and instability characteristics of large section highway tunnel in water-rich karst stratum[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.
 - [7] 潘东东,李术才,许振浩,等. 岩溶隧道承压隐伏溶洞突水模型试验与数值分析[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(5): 828.

GAO Xiaogang, WANG Anbin, JU Longhua, et al. Testing and analysis of lateral vibration of metro tracks with different rail baseplates[J]. Noise and Vibration Control, 2020, 40(1): 191.

- [3] 刘卫丰,张厚贵,孟磊,等. 北京地铁采用调频式钢轨减振器抑制钢轨振动的试验研究[J]. 振动工程学报, 2016, 29(1): 105.
LIU Weifeng, ZHANG Hougui, MENG Lei, et al. A test of suppressing rail vibration by tuned rail damper for Beijing metro[J]. Journal of Vibration Engineering, 2016, 29(1): 105.
- [4] 朱宁,马龙祥. 不同型式地铁隔振沟墙隔振性能研究[J]. 工程与建设, 2018, 32(6): 799.
ZHU Ning, MA Longxiang. Study on the vibration isolation effects of metro vibration isolation barriers with different types[J]. Engineering and Construction, 2018, 32(6): 799.
- [5] 刘晶磊,张瑞恒,冯桂帅,等. 高速铁路混凝土排桩减隔振效果研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(2): 302.
LIU Jinglei, ZHANG Ruiheng, FENG Guishuai, et al. The research on the vibration isolation effect about concrete pile in high speed railway[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15(2): 302.
- [6] 陈昆,贾霄,刘彬,等. 高速铁路空沟隔振措施隔振效果的有限元分析[J]. 地震工程学报, 2014, 36(3): 575.
CHEN Kun, JIA Xiao, LIU Bin, et al. Finite element analysis of reducing the high-speed railway vibration effect on the environment using open trenches[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2014, 36(3): 575.

· 收稿日期:2022-09-29 修回日期:2022-10-19 出版日期:2024-12-10
Received:2022-09-29 Revised:2022-10-19 Published:2024-12-10
· 第一作者:殷东昊,硕士研究生,2908931861@qq.com
通信作者:金浩,副研究员,jinhao@seu.edu.cn
· ©《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

PAN Dongdong, LI Shucai, XU Zhenhao, et al. Model tests and numerical analysis for water inrush caused by karst caves filled with confined water in tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(5): 828.

- [8] 苏鹏,王海涛,祁可录,等. 岩溶区隧道盾构法施工的相似模型试验设计[J]. 公路, 2019, 64(7): 310.
SU Peng, WANG Haitao, QI Kelu, et al. Similar model test design for tunnel shield construction in karst area[J]. Highway, 2019, 64(7): 310.

· 收稿日期:2022-10-11 修回日期:2022-12-01 出版日期:2024-12-10
Received:2022-10-11 Revised:2022-12-01 Published:2024-12-10
· 通信作者:黄松,高级工程师,278176245@qq.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