

盾构隧道内减振道床评价隧道壁测点位置研究^{*}

金浩, 汤世龙, 孙博旭

(东南大学交通学院 南京, 211189)

摘要 隧道内减振道床的在线测试现行方法不区分隧道的结构形式,且未考虑盾构隧道纵缝在振动传播过程中的影响。针对该问题,结合现场测试和数值模拟,分析盾构隧道纵缝在振动传播过程中的影响。结果表明:振动波在单一管片会随着离振源距离的增加而产生一定程度的衰减;盾构隧道纵缝对振动波有明显的削弱作用,振动波经过纵缝后振动加速度时程最大幅值可下降50%以上;无论哪种拼装角度,在同一振源激励下,盾构隧道被纵缝影响的一侧和未被纵缝影响一侧的振动加速度幅值和频率分布均存在显著差异;即使都位于未被纵缝影响的一侧,不同错缝拼装角度也会造成该侧测点动力响应幅值的不同。因此,在盾构隧道内进行振动测试时,应考虑纵缝位置及管片拼装角度的影响。

关键词 地铁;盾构隧道;浮置板轨道;减振垫道床;振动测试

中图分类号 U231

引言

随着城市化进程不断加速,轨道交通已成为城市交通发展的重要组成部分,其运行时引起的振动问题逐渐成为社会关注的焦点。针对城市轨道交通振动问题,一些研究人员对轨道结构和材料进行了优化,以降低振动产生的源头。徐志强等^[1]通过数值计算和现场实测发现,橡胶支撑浮置板的减振能力可达15 dB。张宝才等^[2]通过设置螺旋钢弹簧浮置板,使浮置板与隧道壁测点上振动响应差值可达50 dB。李元康等^[3]采用一种组合式道床,可使垂向振动减小16.8 dB。Jin等^[4]开发了一种浮置板减振道床。辛涛等^[5]研究了不同减振垫层对无砟轨道动力响应的影响,并提出了垫层优化建议。和振兴等^[6]提出了一种减振扣件与弹性道床垫复合减振结构,其减振性能可达12 dB。王一千等^[7]分析了8种不同轨道减振结构的减振效果以及上盖二次结构噪声的降噪效果。金浩等^[8]通过足尺实验发现,枕下减振垫铺设方式对轨道减振性能存在明显的影响。还有一些学者通过设置缓冲区、隔振墙及隔振梁等结构来减轻振动对建筑物的影响。邓亚虹等^[9]通过数值计算研究了隔振沟对车致振动激励下的动力响应的影响。叶茂等^[10]分析了隔振沟的几何参数及填充材料对减振效果的影响。杨力等^[11]分析了城市轨道槽形梁对桥上轨道结构噪声的遮蔽效果。刘晶磊

等^[12]分析了几种典型隔振屏障结构的隔振效果。一些研究还表明,确保轨道、列车及弹性支撑系统等设备处于良好状态,实施严格的速度限制和平稳驾驶策略,可降低列车行驶过程中产生的振动^[13]。

为了验证相关措施在列车运营阶段中的减振效果,出现了一系列减振效果评价方法。目前,对于隧道内减振措施进行效用评价,主要通过在一些位置安放传感器来测试车辆驶过时加速度响应情况,以判断减振效果。Jin等^[14]指出,具有非连续特性的管片接头对隧道内振动波有明显的削弱作用,因此传感器与接缝的位置关系是一个重要的影响因素,不能忽视接缝在盾构隧道相关动力学分析中的作用。Xu等^[15]发现在相同外源振动激励下,盾构隧道内振动测试动力响应结果呈现出一定的离散性。不同于其他建设方式的隧道,盾构隧道中的管片接缝会对盾构隧道内部的动力响应产生明显的影响^[16]。

因此,有必要对盾构隧道内部振动测点位置进行进一步探讨,以规避因盾构隧道内部结构等因素造成的测量误差。

1 盾构隧道内隧道壁测点的特殊性

《浮置板轨道技术规范》规定:在评估隧道中浮置板轨道减振效果时,隧道壁测点高度应在轨面上1.25 m ± 0.25 m范围。另外,《机械振动列车通过

^{*} 国家自然科学基金资助项目(52378443);江苏省自然科学基金资助项目(BK20211173)

收稿日期:2023-12-12;修回日期:2024-02-22

时引起铁路隧道内部振动的测量》也规定:隧道壁测点位于轨面上约 1.2 m 的位置,且预制构件隧道在振动测量时也应遵循此规范。因此,盾构隧道作为典型的预制构件隧道,在振动测试中,隧道壁测点均应遵循上述规范所推荐的位置。

传感器与纵缝位置的关系见图 1。其会产生两种位置关系:①传感器位于纵缝下侧(图中 A 点位置);②位于纵缝上侧(图中 B 点位置)。实际安装过程中,大多数并未将传感器与纵缝的位置关系纳入振动测试的影响因素,对于在 A、B 两个位置获得的数据,视为相同并统一进行后处理。

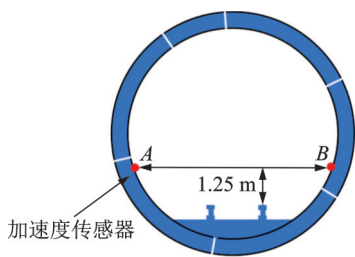


图 1 传感器与纵缝位置的关系

Fig.1 Relationship between sensor and joint position

城市轨道交通区间盾构隧道主要采用错缝拼装的形式,典型错缝拼装角度工况示意图如图 2 所示。因线路条件不同,错缝拼装角度也不同,进而会导致纵缝与传感器安放位置的间距不同。图 2 给出了 4 种典型间距情况,图中间距为管片接缝隧道内开口与规范推荐测点位置的铅垂向距离。其中,0.4 m 所示工况为地铁建设常见错缝拼装形式,即相邻两环错开 45°,相较于中心面顺时针或逆时针旋转了 22.5°。

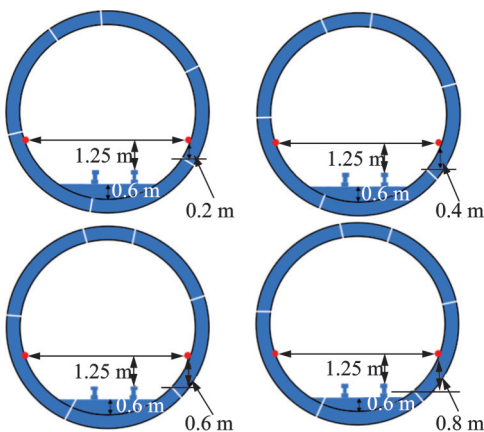


图 2 典型错缝拼装角度工况示意图

Fig.2 Schematic diagram of working conditions for different staggered joint assembly angles

振动波在盾构隧道内的传播路径如图 3 所示。在道床与底部管片没有出现明显脱空现象时,车致振动将在道床顶面产生,并通过道床、管片及管片间

接缝传递至规范推荐的测量点附近。由图 3 可以看出,在振动传播过程中,可能导致两侧测试结果产生差异的主要影响因素是道床和管片的混凝土部分及管片接头。

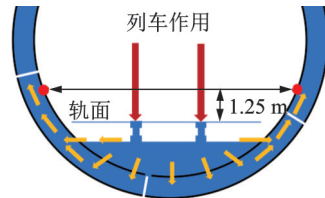


图 3 振动波在盾构隧道内的传播路径

Fig.3 Propagation path of vibration waves in shield tunnels

2 现场测试概况

为了研究振动波在管片及管片接头上的传播规律,笔者通过南京地铁某在建线路,分别对振动波在管片及管片接头上的传播进行了现场测试。测试线路照片如图 4 所示。此段线路隧道结构为盾构隧道,内径为 5.5 m,外径为 6.2 m。采用错缝拼装形式,相邻两环间夹角为 45°。为排除其他因素对测试结果的影响,每种均选取 3 个不同断面进行测试,前后相邻两测试断面间的距离均为 12 m。

测试所用数据采集仪器为 INV3018CT 型采集仪,采样频率为 4 kHz,采样时长为 1 s。振动激励装置采用 DFC 系列力锤并搭配铝制锤头。



图 4 测试线路照片

Fig.4 Overview of on-site testing tunnel

3 振动波在单一管片上的传递规律

现场测试测点安放示意及锤击力见图 5。加速度传感器安装在 3 个测量点上,其中最上方测量点距离隧道底面 1.8 m。3 个测量点沿管片内圆弧面向上按 0.6 m 间距布置,每个测量点上放置加速度传感器。由于管片圆弧面特性和传感器体积的限制,加速度传感器的指向并非标准的铅垂方向,而是指向隧道圆心的方向。实验过程如下:首先,在荷载加载点使用重锤敲击;其次,通过传感器获取 A、B、C 点的径向加速度;最后,将所得波形数据进行傅里叶变换,分析 3 点间径向加速度频谱的变化规律。

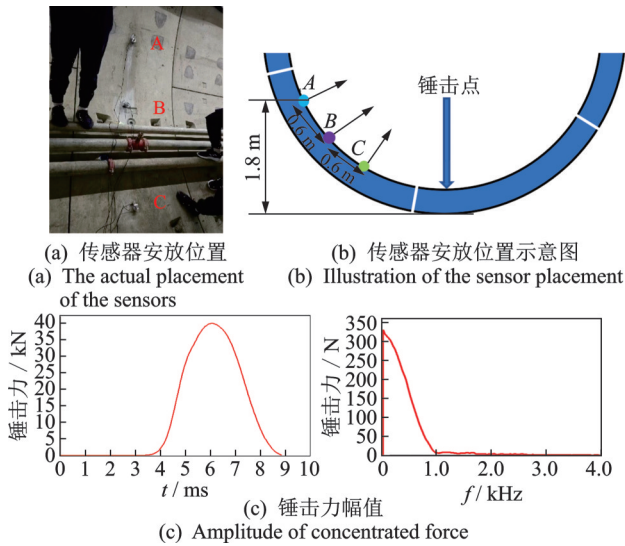


图5 现场测试测点安放示意及锤击力

Fig.5 Schematic diagram of on-site testing and measurement point placement and amplitude of concentrated force

本研究共进行了3次锤击,3个测点振动响应对比如图6所示。从图6(a)可以发现,C点的最大振动响应(绝对值)明显大于B点的最大振动响应(绝对值),而B点又明显大于A点。从图6(b)可以发现,3个测点的径向振动主要在250~500 Hz范围内产生了差异,但最大差值仅在0.2 m/s²左右,同样是C>B>A。振动波在单一管片的衰减随距离增大而减弱,但振动波在单一管片上的衰减并不明显。

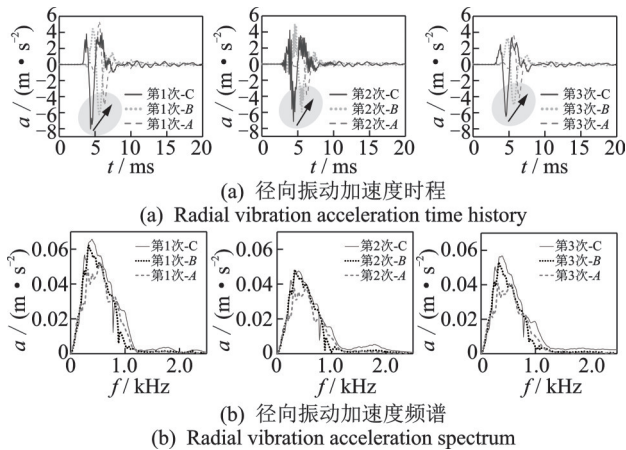


图6 3个测点振动响应对比

Fig.6 Comparison of vibration responses at three measuring points

4 振动波在纵缝上下的传递规律

盾构隧道左右侧测点位置如图7所示,可见盾构隧道纵缝会落入规范推荐的测点范围。笔者针对纵缝进行了现场测试,测试时纵缝两侧测点均距离

纵缝10 cm,并沿纵缝对称布置。每个测点的传感器数量、数据采集和处理方式以及测试流程与第3节相同。纵缝测点安装示意图如图8所示,其中纵缝上侧测点为D点,纵缝下侧测点为E点。标准块间接缝两侧加速度变化如图9所示。

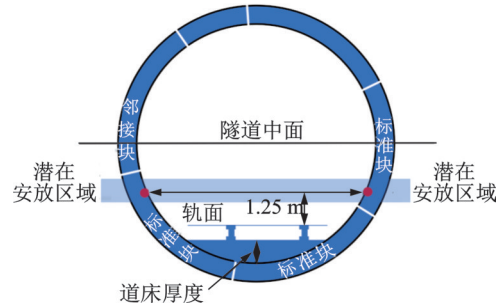


图7 盾构隧道左右侧测点位置

Fig.7 Measurement point position changes caused by changes in rail surface height

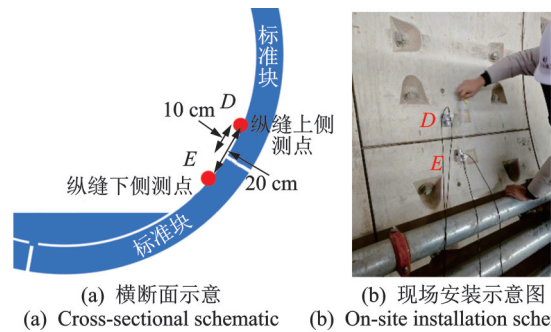


图8 纵缝测点安装示意图

Fig.8 Installation diagram of longitudinal joint measurement points

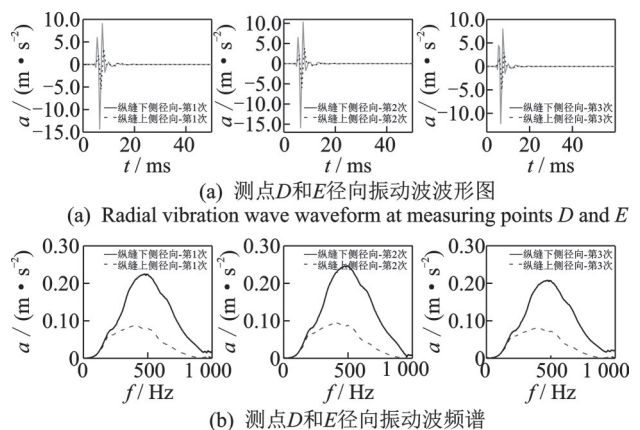


图9 标准块间接缝两侧加速度变化

Fig.9 Acceleration changes on both sides of the standard inter block joint

由图9可以发现,管片接头两侧测点加速度时程幅值差异明显大于单一管片部分的幅值差异,其中径向最大加速度幅值之差可达7 m/s²以上。频谱

结果显示,接缝对振动波有明显的削弱作用,尤其是对 250~1 000 Hz 范围内的振动波,平均削弱幅值可达 0.15 m/s^2 以上,削弱幅度达 50% 以上。

此外,纵缝两侧测点间距离为 20 cm,而管片上测点间距离为 60 cm,这说明在更短的距离内振动波幅值出现了更大的衰减,进一步验证了接缝对振动波有明显的削弱作用,且其影响远远大于单一管片部分对振动波的影响。

5 错缝拼装角度对测试结果的影响

研究表明,当纵缝处于不同位置时,其对振动波的削弱能力会不同。为了研究错缝拼装角度对测试结果的影响,笔者建立了图 2 中 4 个具有不同拼装角度的三维盾构隧道有限元模型。其中,第 2 个工况为直线段典型的错缝拼装形式(相邻两环间错开角度为 45° ,与中心面夹角均为 22.5°)。

笔者通过南京某在建地铁线路建立了计算模

型,如图 10 所示。为能准确反映振动波在盾构隧道中的传播规律,盾构隧道模型中间 3 环考虑了管片接头的密封条、传力衬垫及其他几何细节。盾构隧道和管片的几何参数及材料属性与文献[14]相同。土层为单一均质土层,其密度为 $1\,990 \text{ kg/m}^3$,动弹性模量为 70 MPa,泊松比为 0.33,阻尼比为 0.05。管片、传力衬垫及密封条采用 C3D10 单元进行模拟,土层采用 C3D8R 单元进行模拟,土层周边无限单元采用 CIN3D8 单元进行模拟。

不同测点动力响应如图 11 所示。由图 11(a)可知:与其他工况相比,20 cm 工况下盾构隧道左右两侧测点的水平向振动加速度时程幅值之差较大,约为 2.5 m/s^2 ;其他工况下,盾构隧道左右两侧测点的水平向振动加速度时程幅值差并不显著。由图 11(b)可知:盾构隧道左右两侧测点铅垂向振动加速度时程幅值之差分别为 0.202, 0.211, 0.109 和 0.112 m/s^2 ,时程幅值相差较小。由图 11(c)可知:除 20 cm 工况外,其他工况下盾构隧道左右两侧测点

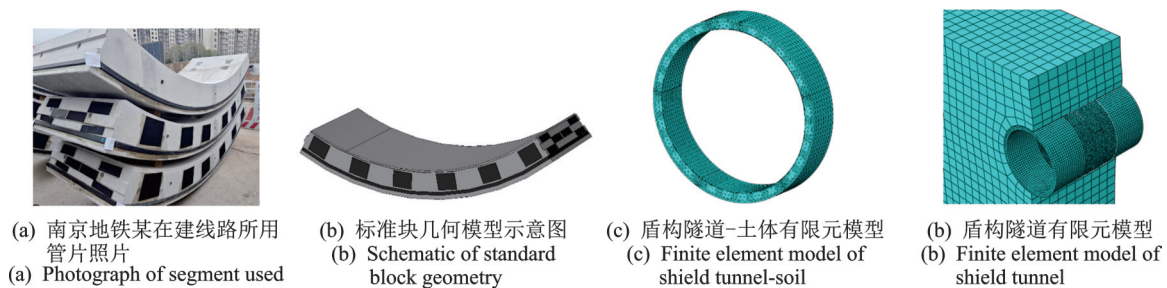
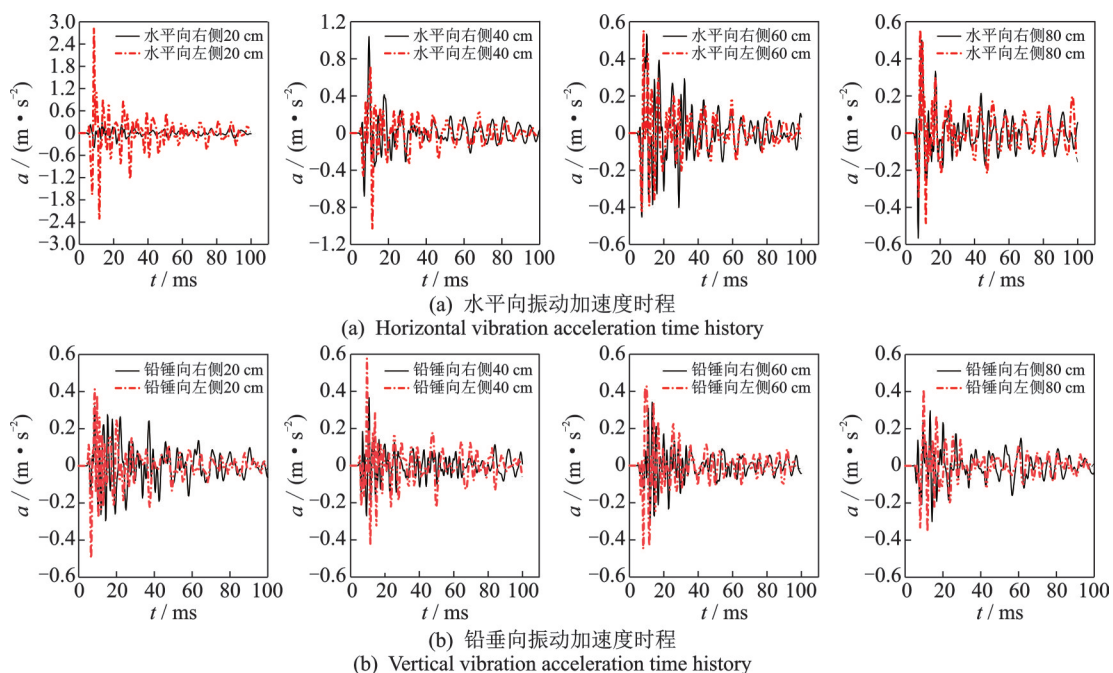


图 10 计算模型

Fig.10 Numerical computational model



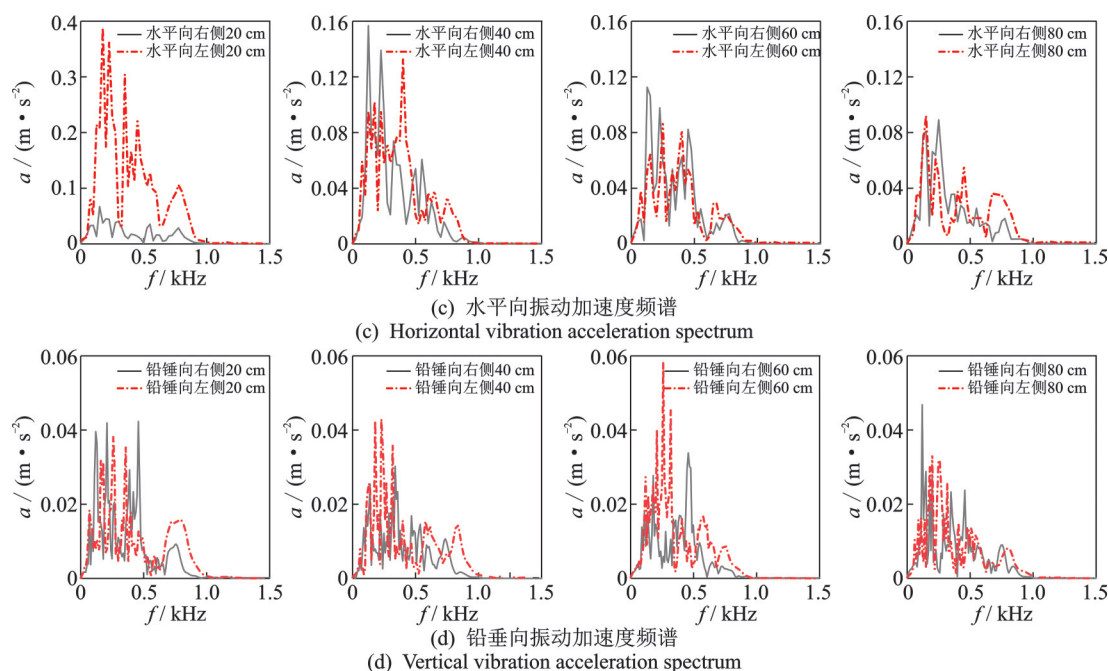


图11 不同测点动力响应

Fig.11 Dynamic response results of different measurement points

的水平向振动加速度频谱幅值基本一致。由图11(d)可知:盾构隧道左右两侧测点的铅垂向振动加速度频谱幅值基本一致。针对幅值进行分析,频谱与时程所得结论相同。

另外,从图11(c,d)可以看出:不管是哪种工况,盾构隧道左右两侧测点的振动加速度频谱分布存在显著差异,该差异还会随着管片错缝拼装角度的变化而变化,这说明忽略纵缝的存在而将盾构隧道左右两侧测点所得数据视为相同并进行均值处理是不合理的;在相同荷载激励下,即使都处于理论上不被纵缝影响的左侧测点,不同错缝拼装角度下盾构隧道产生的动力响应也并不相同。

6 结论

1) 振动波在管片混凝土部分的衰减呈现出随高度升高而减弱的趋势,但振动波在管片混凝土部分的衰减并不明显。

2) 管片纵缝对振动波的削弱能力远远大于管片的混凝土部分,振动波经过纵缝后幅值可下降50%以上。在盾构隧道内进行振动测试时,纵缝的影响不能被忽略。

3) 不同拼装角度下盾构隧道左右两侧测点的振动加速度频谱分布存在显著差异。

4) 即使都处于理论上不被纵缝影响的单一管

片上,不同错缝拼装角度下盾构隧道产生的动力响应也并不相同。

参 考 文 献

- [1] 徐志强,姚京川,杨宜谦,等.橡胶支承浮置板式轨道结构动力计算分析[J].铁道标准设计,2003(8): 11-13.
XU Zhiqiang, YAO Jingchuan, YANG Yiqian, et al. An analysis of dynamic computation for rubber bearing floating slab track structure [J]. Railway Standard Design, 2003(8): 11-13.(in Chinese)
- [2] 张宝才,徐祯祥.螺旋钢弹簧浮置板隔振技术在城市轨道交通减振降噪上的应用[J].中国铁道科学,2002,23(3): 68-71.
ZHANG Baocai, XU Zhenxiang. Applications of the steel spring floating track bed for vibration and noise control in urban rail traffic [J]. China Railway Science, 2002, 23(3): 68-71.(in Chinese)
- [3] 李元康,王安斌,张喆玉,等.轨道交通高性能减振道床系统减振效果分析[J].材料开发与应用,2016,31(3): 13-17.
LI Yuankang, WANG Anbin, ZHANG Zheyu, et al. Analysis of high performance vibration reduction slab system in vibration reduction [J]. Development and Application of Materials, 2016, 31(3): 13-17.(in Chinese)
- [4] JIN H, WANG H, LI Z, et al. Vibration-reduction optimization of the point-supporting floating-slab track based on local resonance mechanism [J]. Journal of

- Vibration and Control, 2023, 29(5/6): 1176-1190.
- [5] 辛涛, 张琦, 高亮, 等. 高速铁路CRTSⅢ型板式无砟轨道减振垫层动力影响及结构优化[J]. 中国铁道科学, 2016, 37(5): 1-7.
XIN Tao, ZHANG Qi, GAO Liang, et al. Dynamic effects and structure optimization of damping layers of CRTSⅢ slab ballastless track for high speed railway[J]. China Railway Science, 2016, 37(5): 1-7.(in Chinese)
- [6] 和振兴, 陈馨超, 周华龙, 等. 减振扣件与弹性道床垫组合减振关键参数研究[J]. 铁道工程学报, 2019, 36(6): 38-44.
HE Zhenxing, CHEN Qingchao, ZHOU Hualong, et al. Theoretical research on the key dynamic parameters of the fastener-mattress combined vibration damping track [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019, 36(6): 38-44.(in Chinese)
- [7] 王一干, 刘鹏辉, 李腾, 等. 车辆段轨道减振措施对上盖建筑减振降噪效果试验研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(21): 284-291.
WANG Yigan, LIU Penghui, LI Teng, et al. Tests for effect of track vibration reduction measures in a depot on vibration and noise reduction of a superstructure [J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(21): 284-291.(in Chinese)
- [8] 金浩, 刘维宁. 枕下减振垫铺设方式对梯式轨道减振性能影响试验研究[J]. 土木工程学报, 2015, 48(2): 73-78.
JIN Hao, LIU Weining. Experimental study on vibration reduction characteristics of ladder track with different arrangement of sleeper pads[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(2): 73-78.(in Chinese)
- [9] 邓亚虹, 夏唐代, 陈敬虞. 车辆动荷载作用下隔振沟响应增强区数值分析[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(12): 2121-2127.
DENG Yahong, XIA Tangdai, CHEN Jingyu. Numerical analysis of response magnified area of vibration isolation trenches subjected to vehicle dynamic loads [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(12): 2121-2127.(in Chinese)
- [10] 叶茂, 曹保兴, 郑志华, 等. 列车动荷载下某古遗址隔振沟的减振效果研究[J]. 应用力学学报, 2015, 32(4): 682-688.
YE Mao, CAO Baoxing, ZHENG Zhihua, et al. Effect of vibration isolation trench on an ancient ruin subjected to train dynamic loads [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2015, 32(4): 682-688.(in Chinese)
- [11] 杨力, 石广田, 张小安, 等. 城市轨道交通槽形梁对桥上轨道结构声辐射的遮蔽效应研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(9): 2366-2374.
YANG Li, SHI Guangtian, ZHANG Xiaohan, et al. Shadowing effect of urban rail transit trough girders on sound radiation of track structure on bridge [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(9): 2366-2374.(in Chinese)
- [12] 刘晶磊, 张瑞恒, 赵晓玉, 等. 轨道交通典型隔振屏障隔振效果模型试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2019, 39(1): 231-241.
LIU Jinglei, ZHANG Ruiheng, ZHAO Xiaoyu, et al. The research on the model test on vibration isolation effect of typical vibration isolation bar in rail transit [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2019, 39(1): 231-241.(in Chinese)
- [13] 李大成. 城市地铁隧道内弹性长枕轨道动力学行为与减振效果研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
- [14] JIN H, TANG S, ZHAO C, et al. Study on vibration propagation characteristics caused by segments joints in shield tunnel [J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2023, 23(14): 2350156.
- [15] XU Z S, MA M, ZHOU Z K, et al. Prediction of metro train-induced tunnel vibrations using machine learning method [J]. Advances in Civil Engineering, 2022, 2022: 4031050.
- [16] 李明宇, 刘国彬, 胡蒙达, 等. 运营地铁盾构隧道结构振动响应实测分析[J]. 铁道学报, 2011, 33(6): 88-93.
LI Mingyu, LIU Guobin, HU Mengda, et al. Field measurement and analysis of structural vibration response in the metro shield tunnel [J]. Journal of the China Railway Society, 2011, 33(6): 88-93.(in Chinese)



第一作者简介:金浩,男,1986年9月生,博士、副研究员、博士生导师。主要研究方向为轨道交通结构长效服役。

E-mail: jinhao@seu.edu.cn