

基于环境振动的大直径地铁盾构隧道振动源强研究

梁进学¹, 张良涛², 邬美权¹, 王振刚², 谢伟平³, 魏盼君³, 钟李凯³

(1. 武汉地铁运营有限公司, 武汉 430030; 2. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 武汉 430063;
3. 武汉理工大学土木工程与建筑学院, 武汉 430070)

摘要: 地铁大直径盾构隧道的质量大于普通盾构隧道, 其振源强度较小, 因此有望作为解决地铁环境振动问题的有效措施。然而, 大直径盾构隧道在现有地铁线路中应用较少, 缺乏振源实测数据, 并且其源强的分频特征以及影响因素尚不明确, 这使得采用这类隧道进行减振降噪设计时缺乏依据。实测同一地铁线路中大直径盾构隧道和普通盾构隧道的振动, 对比分析振动源强及频谱差异; 建立“隧道-土体”有限元模型, 使用实测数据进行验证, 并进一步分析地质条件与衬砌厚度对振动源强的影响。结果表明: 相同列车工况下, 大直径盾构隧道的源强低于普通盾构隧道 7 dB 以上, 可作为降低地铁环境振动影响的有效措施; 大直径盾构隧道振源在低频 1~125 Hz 的幅值小于普通盾构隧道, 但在 125 Hz 以上的高频振幅更大; 隧道周围土体越硬, 振动源强及卓越频率越大; 隧道衬砌厚度每增加 10 cm, 振动源强减小约 1.5 dB; 隧道直径每增加 1 m, 振动源强减小约 1.9 dB。研究结论可为地铁环境振动评价及减振降噪设计提供依据。

关键词: 地铁; 大直径盾构隧道; 环境振动评价; 振动源强; 减振降噪

中图分类号: U231

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2026)03-0126-08

Vibration Source Strength of Large-Diameter Metro Shield Tunnels Based on Environmental Vibration

LIANG Jinxue¹, ZHANG Liangtao², WU Meiquan¹, WANG Zhengang²,
XIE Weiping³, WEI Panjun³, ZHONG Likai³

(1. Wuhan Metro operation Co., Ltd., Wuhan 430030; 2. China Railway Siyuan Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Wuhan 430063; 3. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070)

Abstract: Large-diameter shield tunnels for metro systems exhibit greater mass compared to conventional shield tunnels, and their vibration source strength is generally considered lower. Consequently, they are regarded as a potentially effective measure for mitigating environmental vibration induced by metro operations. However, large-diameter shield tunnels have limited applications in existing metro lines, resulting in a lack of measured vibration source data. Moreover, their frequency-dependent source characteristics and influencing factors remain unclear, leaving vibration and noise reduction designs utilizing such tunnels inadequately supported. Field measurements were conducted on large-diameter and conventional shield tunnels along the same metro line to compare their vibration source strength and spectral characteristics. A “tunnel-soil” finite element model was established and validated using the measured data. Subsequently, the effects of geological conditions and lining thickness on

收稿日期: 2025-09-26 修回日期: 2025-12-16

第一作者: 梁进学, 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为城市轨道交通运维技术, liangjx@wuhanrt.com

通信作者: 谢伟平, 男, 博士, 研究方向为轨道交通系统环境振动、噪声评价与控制策略、结构计算理论与方法, wxie@sina.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(52278458)

引用格式: 梁进学, 张良涛, 邬美权, 等. 基于环境振动的大直径地铁盾构隧道振动源强研究[J]. 都市轨道交通, 2026, 39(3): 126-133.

Liang Jinxue, Zhang Liangtao, Wu Meiquan, et al. Vibration source strength of large-diameter metro shield tunnels based on environmental vibration[J]. Urban rapid rail transit, 2026, 39(3): 126-133.

the vibration source strength were investigated. The results indicate that, under identical train operating conditions, the source strength of large-diameter shield tunnels is at least 7 dB lower than that of conventional shield tunnels, confirming their efficacy in reducing metro-induced environmental vibration. The vibration source amplitude of large-diameter shield tunnels is lower than that of conventional shield tunnels within the low-frequency range (1–125 Hz) but higher at frequencies above 125 Hz. Stiffer surrounding soils lead to increased vibration source strength and predominant frequencies. Additionally, each 10 cm increase in tunnel lining thickness reduces vibration source strength by approximately 1.5 dB, and each 1 m increase in tunnel diameter reduces the vibration source strength by about 1.9 dB. These findings provide a theoretical basis for evaluating metro environmental vibrations and designing vibration and noise mitigation measures.

Keywords: metro; large-diameter shield tunnel; environmental vibration assessment; vibration source strength; vibration and noise mitigation

大直径盾构隧道在国内现有地铁线路中应用较少, 主要分布在华东、华南经济发达省区和长江、钱塘江、黄河等水系发育地区, 多用于跨江跨河区段。相较于直径约 6 m 的普通盾构隧道, 大直径盾构隧道的直径通常大于 10 m, 隧道截面构造也有明显差异, 这导致其动力特性和振源特性有所不同。由于其质量大于普通盾构隧道, 因此通常认为其整体振源强度较小, 这使其有望作为解决地铁环境振动问题的有效措施。然而, 大直径盾构隧道目前缺乏振源实测数据, 振源的分频特征以及周围地质条件对振源的影响尚不明确, 采用这类隧道形式进行减振降噪设计时缺乏依据。

对于地铁隧道的振源特性和影响因素, 目前已有大量的研究。何卫等^[1]通过对某地铁区间隧道进行试车试验, 分析列车运行速度对荷载特性的影响, 结果表明车速与隧道壁振动源强呈正相关。杨忠平等^[2]通过现场实测分析不同地质条件下的地铁隧道源强, 结果表明冲积、冲洪积平原区冲积地层的地铁振动源强比黄土塬区风积地层小; 黄浩等^[3]通过数值模拟, 分析 4 种不同地质条件下振动源强与地面振动响应, 结果表明坚硬土地质的振动源强比软土地质大; 余梦雯等^[4]实测地铁列车通过时地面振动响应, 结果表明地面测点分频最大振级对应的 1/3 倍频程中心频率在 63~100 Hz, 而隧道结构对振动响应有很大影响; 王晓慧^[5]通过数值模拟, 分析土体模型的尺寸和列车速度等因素对地面点振动响应的影响, 结果表明土体模型深度及宽度的变化对列车引起地面振动点响应有一定影响, 地面测点的竖向振动加速度峰值随着车速的增大呈现近似线性的增长趋势; YAN 等^[6]通过数值模拟, 研究不同速度下及不同衬砌厚度下地铁振动源强特性, 结果表明车速越高、衬砌厚度越小, 振动源强越大。刘文武等^[7]实测某地铁车辆段的车致振动信号和速度信号, 结果表明车速与道床、隧道壁的振动加速度级呈现较强的线性正相关, 车速每提高 10 km/h, 振

动分别增加约 1.7、2.6 dB。

以上研究均是针对普通盾构隧道, 而特殊断面隧道的断面形式与普通盾构隧道存在差异, 从而导致隧道结构的动力特性不同, 地铁振动源强的特性也发生变化。陈扬勋等^[8]通过数值模拟, 研究大直径盾构隧道在不同地层时所受列车荷载的动力响应规律, 结果表明隧道周围土体刚度越大, 其振动源强越小。张凌等^[9]对比分析 3 种隧道断面和不同曲线半径隧道型式的地铁振动源强特性, 结果表明不同隧道断面型式振动源强由大到小排序为圆形隧道、矩形隧道和马蹄形隧道; 张啟乐等^[10]对比类矩形隧道和圆形隧道的振动特性, 结果表明类矩形盾构隧道的振动小于圆形盾构隧道, 振动由圆形盾构隧道向地面传递的衰减更快; 杨文波等^[11-12]分析表明圆形断面隧道结构的动力响应小于马蹄形断面隧道结构, 平均差值约 3.8 dB。目前研究尚未涉及地铁大直径盾构隧道的振动特性测试和分析。通常认为, 大直径盾构隧道的质量比普通盾构隧道更大, 因此整体上振源强度更小。但目前大直径盾构隧道的源强减小量、分频振动传播规律以及地质条件对其振动特性的影响有待进一步研究。

本文对大直径盾构隧道振源特性进行研究。通过对同一地铁线路上的大直径盾构隧道和普通盾构隧道进行对比测试, 基于实测数据分析大直径盾构隧道的振动特性, 分析其与普通盾构隧道的振动源强差异; 进一步建立“隧道-土体”有限元模型, 使用实测数据验证模型准确性, 分析地质条件与衬砌厚度对振动源强的影响。

1 现场测试概况

1.1 测试对象

本研究为实测大直径盾构隧道的振源特性, 选择武汉地铁某大直径盾构隧道作为测试对象, 同时测试同一线路上的普通盾构隧道作为对比。图 1 为两种隧

道类型的剖面对比。大直径盾构隧道直径为 12 m，可供上行和下行列车对向行驶；普通隧道的直径为 6.2 m，仅供列车单向行驶。

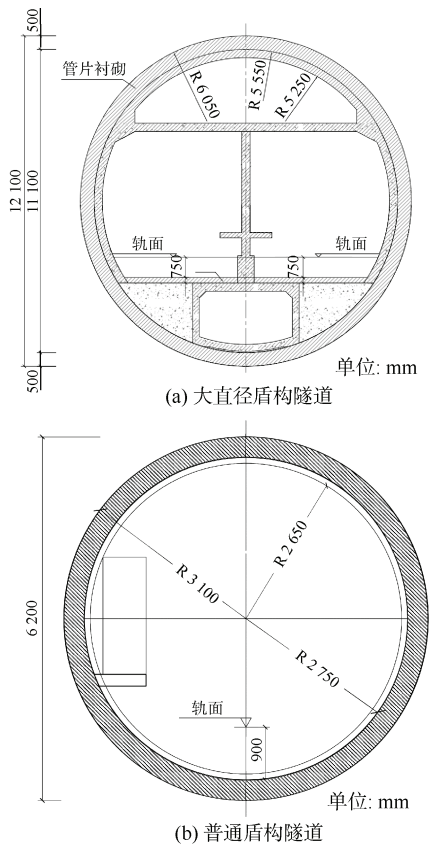


图 1 两种隧道类型剖面

Figure 1 Cross-sectional views of two types of tunnels

实测两个断面的轨道均未安装减振措施，采用板式轨道及普通扣件。两者地质条件存在差异，大直径盾构隧道断面所在土体类别为中硬土，隧道埋深为 28.4 m；而普通盾构隧道所在的土体类别为中软土，隧道埋深为 20.15 m，地质分层及参数如表 1 所示。测试地铁线路的车辆类型为 B 型车，6 节编组，总长约 120 m。列车经过两个断面实际车速略有差异，经测量，大直径盾构隧道断面平均车速为 61.48 km/h；普通盾构隧道断面平均车速为 54.20 km/h。因此，认为所选的普通盾构隧道断面可作为对比，分析大直径盾构隧道的振动特性差异。车速及地质条件的差异将通过修正以及进一步数值模拟的方法进行考虑。

1.2 测点布置

本次测试目的是为分析不同隧道类型中，车致振动沿钢轨-轨道板-隧道壁的传播衰减规律。因此，分别在钢轨、轨道板、隧道壁上布置加速度传感器，测量

表 1 测试隧道断面的地质条件

Table 1 Geological conditions of the test tunnel cross-section

断面	土层	厚度/ m	弹性模 量/MPa	泊松 比	剪切 波速/ (m/s)	压缩 波速/ (m/s)	平均剪 切波速/ (m/s)
大直径 盾构 隧道 (中硬土)	细砂	7.3	442.9	0.28	230	428.0	290.8
	粉细砂	15	677.2	0.25	283	508.0	
	圆砾土	1	1 355.3	0.22	387	715.0	
	砾岩	6.85	1 962.6	0.2	419	892.0	
普通 盾构 隧道 (中软土)	杂填土	3	139.8	0.35	126	264.0	195.4
	淤泥质 粉质黏土	3	139.6	0.32	132	290.0	
	粉质黏土	14	575.0	0.25	259	508.0	
	粉质黏土 夹粉土	2	216.6	0.22	167	411.0	

列车行驶经过导致的竖向加速度。布置测点时保证大盾构隧道和普通盾构隧道的测点位置一致。其中，钢轨测点位于钢轨的轨腰处；轨道板测点位于轨道板上距离钢轨 1 m 处；隧道壁测点位于轨道侧壁距离轨顶面 1.25 m 处。隧道壁测点位置即为《环境影响评价技术导则 城市轨道交通》(HJ 453—2018)^[13]规定的标准振源位置。测点具体位置示意如图 2 所示。图 3 为大直径盾构断面的测试现场实景。

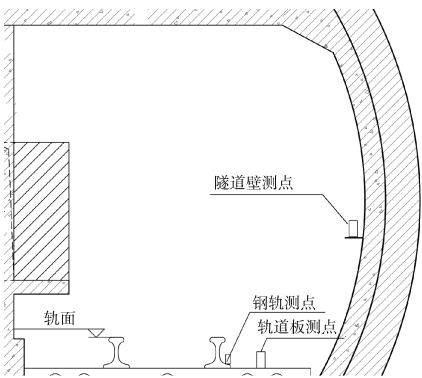


图 2 测点布置

Figure 2 Layout of measurement points



图 3 现场测试场景

Figure 3 Field test scene setup

测试采用丹麦 B&K 土木工程振动与噪声测试系统。根据《城市轨道交通引起建筑物振动与二次辐射噪声限

值及其测量方法标准》(JGJ/T 170—2009)^[14], 振动分析频率为 1~200 Hz, 因此测试采样频率设为 400 Hz。每种隧道类型记录地铁正常运营时 3 h 的振动数据, 并根据数据波形完整、无明显畸变、信噪比高、无工频干扰或工频干扰不严重的原则, 剔除异常数据, 共获得 30 组有效数据。下面针对筛选后的数据进行振动分析。

2 测试结果分析

基于测试数据分别对比大直径盾构隧道和普通盾构隧道的频谱特征、Z 振级以及各测点处的 1/3 倍频程加速度级。

2.1 频谱特征对比

对比大直径盾构隧道和普通盾构隧道的振源频谱。图 4 为某车次列车经过两种不同断面导致的隧道壁处测点振动傅里叶谱对比。

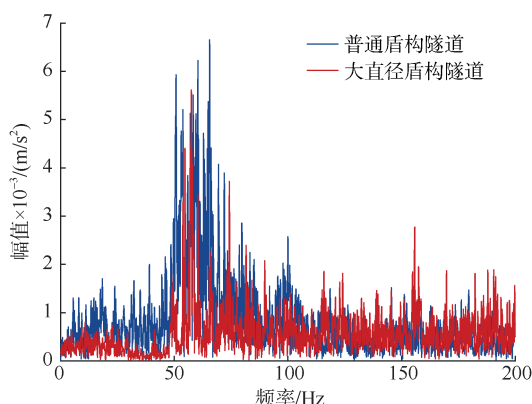


图 4 隧道壁铅垂向测点傅里叶谱对比

Figure 4 Comparison of Fourier spectra at vertical measurement points on the tunnel walls of the two types of tunnels

由图 4 可知, 大直径盾构隧道的振源与普通盾构隧道的主频分布相近, 但主频处能量更集中, 且略小于普通盾构隧道; 普通盾构隧道在低频段的振动幅值显著大于大直径盾构隧道, 但是在 150 Hz 后的高频部分, 大直径盾构隧道的振源强度大于普通盾构隧道。

2.2 最大 Z 振级对比

计算并对比两个断面不同位置处的最大 Z 振级差别。由于实测两个断面的地铁列车车速略有不同, 大直径盾构隧道断面的平均车速高于普通盾构隧道断面约 7.28 km/h。为此, 根据《环境影响评价技术导则 城市轨道交通》(HJ453—2018)^[13]中列车速度对振动源强的修正公式, 将这两种类型隧道的隧道壁测点的最大 Z 振级进行速度修正, 均修正为 60 km/h 车速下的最大 Z 振级。修正前后两种类型隧道振源的平均最大 Z 振级如表 2 所示。

表 2 两种隧道类型隧道壁测点的最大 Z 振级

Table 2 Maximum Z-axis vibration levels at measurement points on the tunnel walls of the two types of tunnels

修正前后	大直径盾构隧道/dB	普通盾构隧道/dB
修正前	77.13	83.72
修正后	76.93	84.52

由表 2 可知, 修正后普通盾构隧道的振动源强比大直径盾构隧道的振动源强高出 7.59 dB。图 5 进一步给出速度修正后两种隧道钢轨、轨道板和隧道壁测点平均最大 Z 振级。由图 5 可知, 大直径盾构隧道隧道壁处的最大 Z 振级相比钢轨处减小了 46.8 dB, 相比轨道板处减小了 5.6 dB; 大直径盾构隧道由钢轨到隧道壁的衰减量更多, 高于普通盾构隧道衰减量 31.7 dB; 由于大直径盾构隧道的质量更大, 大直径盾构隧道钢轨处最大 Z 振级比普通盾构隧道大, 但是后者在轨道板和隧道壁处的振动强度比前者大。

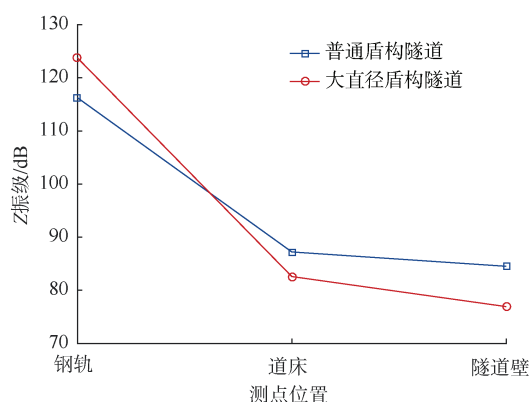


图 5 不同隧道类型下各测点的平均最大 Z 振级

Figure 5 Average maximum Z-axis vibration levels of each measurement point for different types of tunnels

2.3 1/3 倍频程振动加速度级对比

图 6 给出两种隧道类型对应的钢轨、轨道板和隧道壁测点的振动加速度分频振级平均值。

由图 6(a)可知, 钢轨的振动能量主要集中在 50~80 Hz 频段; 在整个频段内大直径盾构隧道的振动加速度级均大于普通盾构隧道。由图 6(b)可知, 大直径盾构隧道在 100 Hz 以下的振动衰减迅速, 在轨道板测点处, 只有 1~6.3 Hz 和 125 Hz 以上的频段, 大直径盾构隧道的振动加速度级大于普通盾构隧道。由图 6(c)可知, 在隧道壁处仅有 125 Hz 以上的频段, 大直径盾构隧道的振级大于普通盾构隧道, 表明 125 Hz 以上的振动频率是大直径盾构隧道安全性分析及减振降噪关注的重点。

图 7 为大直径盾构隧道各测点 1/3 倍频程对比。由图

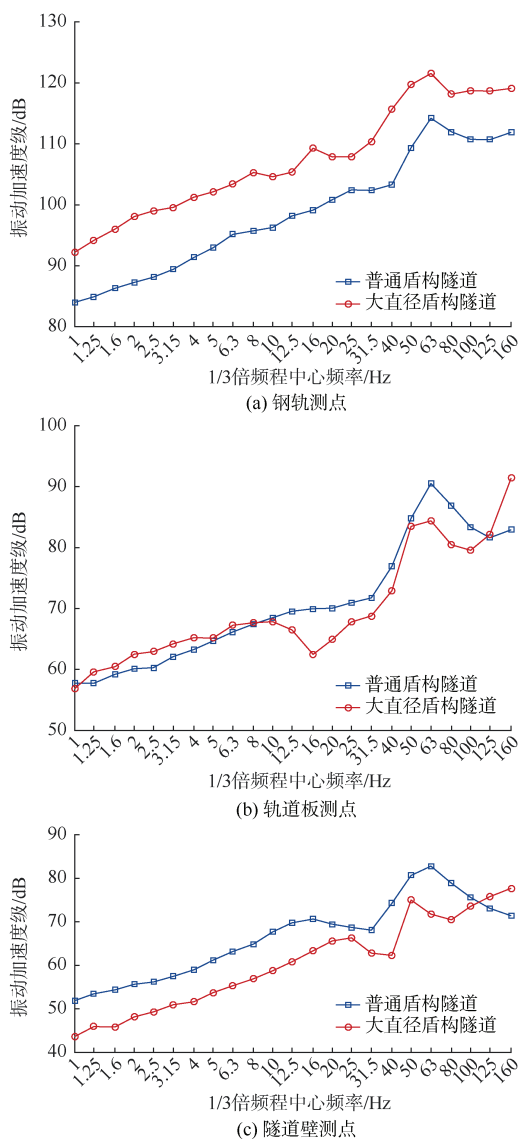


图6 两种隧道类型各测点的1/3倍频程

Figure 6 One-third octave spectra at each measurement point for the two types of tunnels

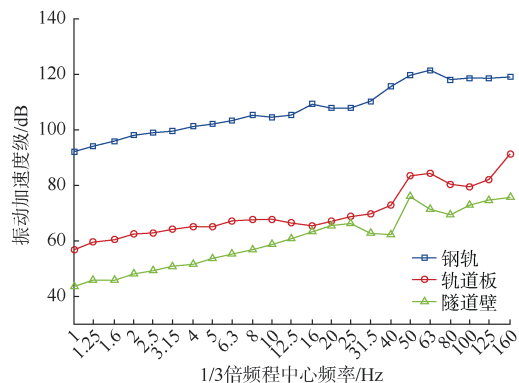


图7 大直径盾构隧道各测点1/3倍频程对比

Figure 7 Comparison of one-third octave spectra at each measurement point for the large-diameter shield tunnel

可知,从钢轨到轨道板,全频段的振动衰减显著;从轨道板到隧道壁振动衰减量减小,仅12.5 Hz以下和50 Hz以上的频段,振动衰减显著。

3 振源特性影响规律模拟分析

上文通过现场实测分析大直径盾构隧道和普通盾构隧道的振动特性差异,但由于现场实测的局限性,两个隧道类型所处的地质条件并不一样。已有研究表明^[2, 15],地质条件以及衬砌壁厚对地铁振动源强的影响不可忽视。因此,本章建立“隧道-土体”有限元模型,进一步分析地质条件与衬砌厚度对振动源强的影响。

3.1 “隧道-土体”有限元模型

采用有限元软件 ANSYS 建立“隧道-土体”三维整体有限元模型,如图8所示。其中,土体模型尺寸为120 m×100 m×45 m^[16],土体、衬砌以及轨道板采用 Solid45 实体单元模拟,钢轨采用 Beam188 单元模拟,扣件采用 Combine14 单元模拟。对于三维土体模型,通过在模型边界设置三维黏弹性人工边界单元的方式进行约束。土体单元尺寸为1 m,在进行动力计算时采用 Rayleigh 阻尼,土体阻尼比取3%。

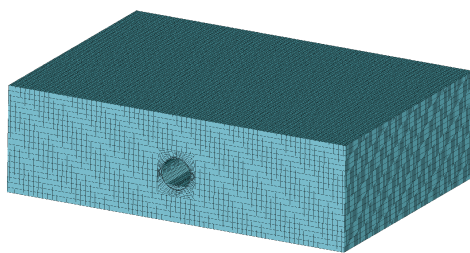


图8 “隧道-土体”有限元模型

Figure 8 “Tunnel-soil” finite element model

3.2 列车荷载

基于钢轨加速度实测数据求解竖向列车荷载是一种较为常用的计算方法^[17]。首先将列车简化为包含质量、阻尼和刚度参数的二系弹簧质量系统模型,建立其车体竖向运动平衡方程;然后基于轮轨持续接触的假设,引入实测钢轨加速度数据,并结合达朗贝尔原理与车辆参数,最终推导出轮轨力的数学表达式。根据大直径盾构隧道钢轨处实测加速度数据求解得到的列车荷载时程曲线,如图9所示。

3.3 准确性验证

为了验证本文建立的“隧道-土体”有限元模型准确性,将上述轮轨力荷载加载至有限元模型上,加载位置为隧道内钢轨处,提取隧道壁测点处的竖向加速度响应。将模拟计算得到的响应与现场实测结果进行对

比。图 10 为加速度时程对比, 图 11 为 1/3 倍频程对比。

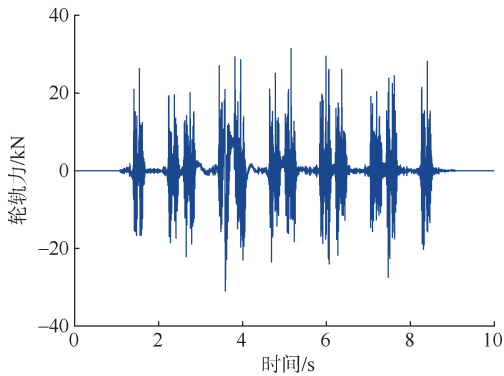


图 9 列车荷载时程曲线
Figure 9 Train load time-history curve

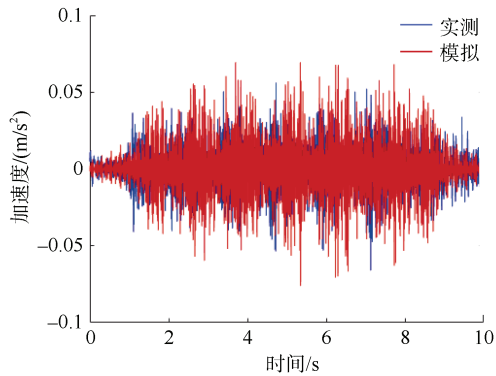


图 10 隧道壁测点模拟与实测的加速度时程对比
Figure 10 Comparison of simulated and measured acceleration time histories at measurement points on the tunnel walls

由图 10 可以看出, 在隧道壁测点处, 模拟和实测的振动加速度波形一致, 加速度峰值大小相差 10% 以内。图 11 表明, 隧道壁处振动的 1/3 倍频程分频振级分布一致, 主频均在 50 Hz, 各频段最大误差在 5 dB 以内。

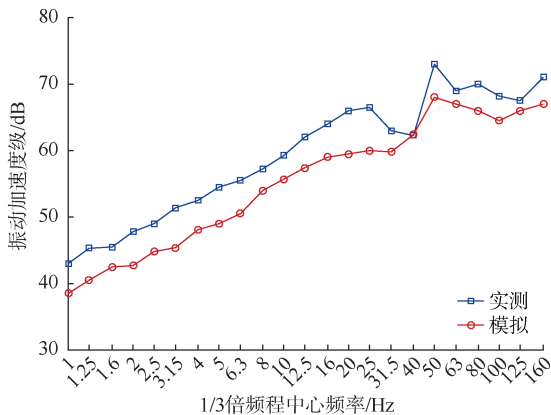


图 11 隧道壁测点模拟与实测的 1/3 倍频程对比
Figure 11 Comparison of simulated and measured one-third octave spectra at measurement points on the tunnel walls

3.4 影响因素分析

3.4.1 地质条件的影响

现场实测两种隧道类型所处的地质条件并不相同, 因此使用“隧道-土体”有限元模型分析在同一地质条件(中软土与中硬土)下大盾构隧道和普通盾构隧道振动特性。图 12 为两种地质条件下大直径盾构隧道与普通盾构隧道的隧道壁 1/3 倍频程。

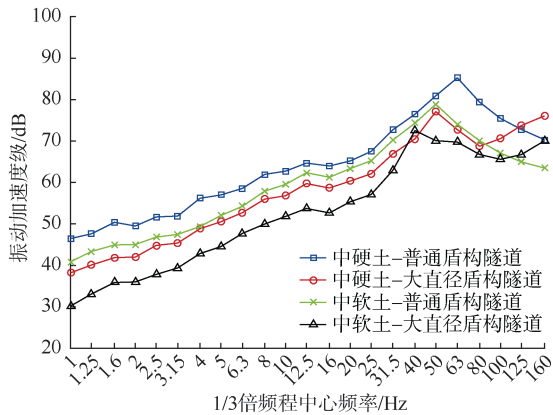


图 12 不同地质条件下隧道的 1/3 倍频程对比
Figure 12 Comparison of one-third octave spectra for tunnels under different geological conditions

从图 12 中可知, 大直径盾构隧道在 1~125 Hz 频段的振动加速度级小于普通盾构隧道, 但在 125 Hz 以上频段, 大直径盾构隧道的振动加速度级更大, 这与实测的结果一致; 中硬土下的隧道源强比中软土下的隧道源强大 4 dB 左右, 地质条件为中硬土下的卓越频率比中软土大。

3.4.2 衬砌厚度的影响

衬砌厚度是影响振动源强的关键因素。衬砌越厚, 隧道结构质量越大, 地铁运行引起的整体振动幅值越小。为研究衬砌厚度对大直径盾构隧道振动源强的影响, 分析厚度为 0.35~0.90 m 的大直径盾构隧道的振动源强。表 3 为隧道壁处的最大 Z 振级对比。图 13 为不同衬砌厚度下大直径盾构隧道的 1/3 倍频程。

表 3 不同衬砌壁厚下大直径盾构隧道振动源强
Table 3 Vibration source strength of large-diameter shield tunnels under different lining wall thicknesses

隧道类型	衬砌壁厚/m	振动源强/dB
普通盾构隧道	0.35	84.38
大直径盾构隧道	0.35	78.88
	0.50	75.77
	0.70	73.76
	0.90	70.42

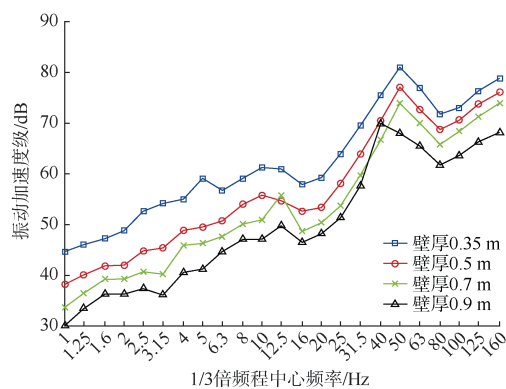


图 13 不同衬砌壁厚大直径盾构隧道 1/3 倍频程
Figure 13 One-third-octave spectra of large-diameter shield tunnels under different lining wall thicknesses

由表 4 可知,衬砌厚度对地铁振动源强影响较大,随着衬砌厚度的增加,大直径盾构隧道的振动源强逐渐减小,厚度每增加 10 cm,源强减小约 1.5 dB。由图 13 可知,当衬砌厚度为 0.35~0.70 m,对于低频振动减振效果显著;但当衬砌厚度为 0.90 m 时,振动主频减小为 40 Hz,且 40 Hz 处的振级反而大于衬砌厚度为 0.70 m 的振级。

3.4.3 隧道直径的影响

为研究隧道直径对大直径盾构隧道振动源强的影响,分析直径为 11~15 m 的大直径盾构隧道振动源强。表 4 为隧道壁处的最大 Z 振级对比。图 14 为不同直径下的大直径盾构隧道的 1/3 倍频程。

表 4 不同直径下大直径盾构隧道振动源强

Table 4 Vibration source strength of large-diameter shield tunnels with different diameters

隧道类型	隧道直径/m	振动源强/dB
大直径盾构隧道	11	75.77
	12	73.62
	13	71.08
	14	69.25
	15	68.14

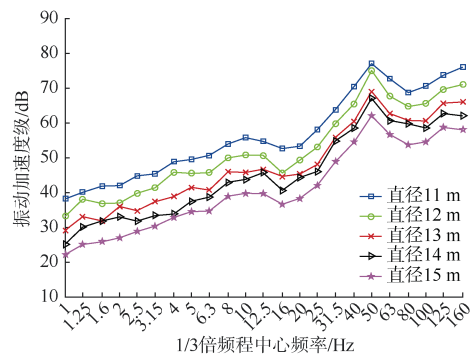


图 14 不同直径下大直径盾构隧道 1/3 倍频程
Figure 14 One-third-octave spectra of large-diameter shield tunnels with different diameters

由表 5 可知,隧道直径对地铁振动源强影响较大,随着隧道直径的增加,大直径盾构隧道的振动源强逐渐减小,直径每增加 1 m,源强减小约 1.9 dB,可能是因为直径越大,隧道的振动参与质量越大,且振动传播距离越远,引起的隧道壁振动越小;不同直径隧道的振动主频均集中在 50 Hz。

4 结论

本文采用现场实测和数值模拟的方法,分析大直径盾构隧道振动特性,得到以下结论。

1) 相同列车工况下,大直径盾构隧道的振动源强低于普通盾构隧道 7 dB 以上,可作为降低地铁环境振动影响的有效措施。在 1~125 Hz 频段,普通盾构隧道的隧道壁测点振动加速度级大于大直径盾构隧道,但是后者 125 Hz 以上的振动加速度级大于前者。

2) 中硬土中大直径盾构隧道源强比中软土中隧道源强大 4 dB 左右,其卓越频率也比中软土大。

3) 衬砌厚度对于地铁振动源强影响较大,随着衬砌厚度的增加,大直径盾构隧道的振动源强逐渐减小。厚度每增加 10 cm,源强减小约 1.5 dB。尤其对于低频段的振动减振效果显著,但大直径盾构隧道衬砌厚度不宜超过 0.70 m。

4) 隧道直径对于大直径隧道振动源强影响显著,随着直径的增加,隧道源强逐渐减小。直径每增大 1 m,源强减小约 1.9 dB,不同直径隧道的振动主频均集中在 50 Hz。

文中提出大直径盾构隧道的振源特性、分频衰减规律及影响因素,证实对环境振动敏感区间大直径盾构隧道是一种可行的减振措施。

参考文献

[1] 何卫, 谢伟平, 刘立胜. 地铁隧道列车振动特性试验研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2016, 44(4): 85-89.
He Wei, Xie Weiping, Liu Lisheng. Experimental investigation of vibrations induced by subway train loading in tunnel[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2016, 44(4): 85-89.

[2] 杨忠平, 蒋忙舟, 张瑞浩, 等. 不同地质条件下地铁振动源强及影响实测与分析[J]. 铁道标准设计, 2023, 67(9): 190-194.
Yang Zhongping, Jiang Mangzhou, Zhang Ruihao, et al. Measurement and analysis of vibration source strength and influence of the subway under different geological conditions[J]. Railway standard design, 2023, 67(9): 190-194.

- [3] 黄浩, 陈启阳, 孔凡兵, 等. 土体性质对地铁振动传播与衰减的影响[J]. 噪声与振动控制, 2024, 44(5): 210-217.
Huang Hao, Chen Qiyang, Kong Fanbing, et al. Influence of soil properties on subway vibration propagation and attenuation[J]. Noise and vibration control, 2024, 44(5): 210-217.
- [4] 余梦雯, 刘向明, 张远荣. 地铁列车引起的地面振动响应测试分析[J]. 铁道建筑, 2023, 63(3): 123-127.
Yu Mengwen, Liu Xiangming, Zhang Yuanrong. Test and analysis of ground vibration response caused by subway train[J]. Railway engineering, 2023, 63(3): 123-127.
- [5] 王晓慧. 地铁引发隧土振动传播规律及其参数影响的数值分析[D]. 西安: 长安大学, 2020.
Wang Xiaohui. Numerical analysis on the propagation of subway-induced tunnel and soil vibration and its model parameter effects[D]. Xi'an: Changan University, 2020.
- [6] Yan Qixiang, Li Bin, Geng Ping, et al. Dynamic response of a double-lined shield tunnel to train impact loads[J]. Tunneling and underground space technology, 2016, 53: 33-45.
- [7] 刘文武, 冯青松, 罗信伟, 等. 地铁隧道振动源强受车辆状态影响因素实测分析[J]. 都市快轨交通, 2024, 37(4): 24-31.
Liu Wenwu, Feng Qingsong, Luo Xinwei, et al. Measured analysis of vibration source strength in metro tunnels influenced by vehicle condition factors[J]. Urban rapid rail transit, 2024, 37(4): 24-31.
- [8] 陈扬勋, 付钊, 刘学增, 等. 不同地层下大直径盾构隧道列车振动响应研究[J]. 地下空间与工程学报, 2023, 19(增刊 1): 458-464.
Chen Yangxun, Fu Zhao, Liu Xuezeng, et al. Study on train vibration response of large diameter shield tunnel under different ground conditions[J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2023, 19(S1): 458-464.
- [9] 张凌, 万宇婷, 成功, 等. 不同隧道型式的地铁振动源强实测影响研究[J]. 噪声与振动控制, 2025, 45(4): 231-236.
Zhang Ling, Wan Yuting, Cheng Gong, et al. Influence of different tunnel types on the vibration source of subways by field measurement[J]. Noise and vibration control, 2025, 45(4): 231-236.
- [10] 张啟乐, 冯立力, 王建立, 等. 类矩形盾构隧道与圆形盾构隧道振动特性对比分析[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(3): 41-45.
Zhang Q (L/Y), Feng Lili, Wang Jianli, et al. Comparative analysis of the vibration characteristics for quasi-rectangular shield tunnel and circular shield tunnel[J]. Urban mass transit, 2019, 22(3): 41-45.
- [11] 杨文波, 邹涛, 涂玖林, 等. 高速列车振动荷载作用下马蹄形断面隧道动力响应特性分析[J]. 岩土力学, 2019, 40(9): 3635-3644.
Yang Wenbo, Zou Tao, Tu Jiulin, et al. Analysis of dynamic response of horseshoe cross-section tunnel under vibrating load induced by high-speed train[J]. Rock and soil mechanics, 2019, 40(9): 3635-3644.
- [12] 杨文波, 陈子全, 徐朝阳, 等. 盾构隧道与周围土体在列车振动荷载作用下的动力响应特性[J]. 岩土力学, 2018, 39(2): 537-545.
Yang Wenbo, Chen Ziquan, Xu Zhaoyang, et al. Dynamic response of shield tunnels and surrounding soil induced by train vibration[J]. Rock and soil mechanics, 2018, 39(2): 537-545.
- [13] 环境保护部, 环境影响评价技术导则 城市轨道交通, HJ 453—2018[S]. 北京: 环境保护部, 2018.
Ministry of Environmental Protection, Technical guidelines for environmental impact assessment—urban rail transit: HJ 453—2018[S]. Beijing: Ministry of Environmental Protection, 2018.
- [14] JGJ/T 170—2009 城市轨道交通引起建筑物振动与二次辐射噪声限值及其测量方法标准[S].
JGJ/T 170—2009 Standard for limit and measuring method of building vibration and secondary noise caused by urban rail transit[S].
- [15] 刘继红, 衣忠强, 田龙岗, 等. 列车振动荷载下盾构隧道结构动态响应研究[J]. 地下空间与工程学报, 2023, 19(S2): 901-907.
Liu Jihong, Yi Zhongqiang, Tian Longgang, et al. Study on the dynamic responses of shield tunnel structure under train vibration load[J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2023, 19(S2): 901-907.
- [16] 王政印. 多孔隧道下穿建筑物车致振动分析及减振研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2017.
Wang Zhengyin. Train-induced vibration analysis and reduction study of multi-tunnel undercrossing buildings[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2017.
- [17] 郭玉斌, 宋瑞祥, 江楠, 等. 地铁列车进出站振源特征测试及数值模拟分析[J]. 振动 测试与诊断, 2023, 43(2): 282-289.
Wu Yubin, Song Ruixiang, Jiang Nan, et al. In-situ test and numerical simulation of characteristics of vibration source of metro trains arriving at or leaving station[J]. Journal of vibration, measurement & diagnosis, 2023, 43(2): 282-289.

(编辑: 傅依萱)