

基于传递函数标定法的异型盾构隧道地铁列车运行振动分析

张启乐¹ 董连东¹ 刘林芽² 拜立岗¹ 马广驰¹ 李 枫¹

(1. 中国电子系统工程第二建设有限公司, 214028, 无锡;

2. 华东交通大学铁路环境振动与噪声教育部工程研究中心, 330013, 南昌//第一作者, 工程师)

摘 要 基于某城市地铁的异型盾构隧道, 采用实际场地传递函数标定数值模型的方法, 对异型盾构隧道地铁振动问题进行了研究。研究表明: 异型盾构隧道埋深增加量与 Z 振级衰减量不是线性关系; 单从地铁环境振动控制角度而言, 存在 1 个最佳经济埋深, 本算例的最佳经济埋深为 15~20 m; 地铁列车运行引起的 80 Hz 以上频段的振动衰减非常快, 传至地面时振动峰值频率为 63 Hz; 若采用钢弹簧浮置板进行隔振, 隧道正上方地面位置 Z 计权总振级可以减小 14.6 dB。

关键词 地铁振动; 异形盾构隧道; 传递函数标定法

中图分类号 U451⁺3

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2021.12.028

Vibration Analysis of Metro Train Operating in Special Shape Shield Tunnel Based on Transfer Function Calibration Method

ZHANG Qile, DONG Liandong, LIU Linya, BAI Ligang, MA Guangchi, LI Feng

Abstract Based on the special shape shield tunnel of certain urban metro, the issue of metro vibration in special shape shield tunnel is studied, adopting the method of transfer function calibration numerical model on actual site. The results show that: the increased value of tunnel buried depth is not linear with the VLz attenuation. From the perspective of vibration control of metro environment, there is an optimal economic burial depth. The optimal economic burial depth of this study case is 15~20 m. Vibration caused by metro train operating with a frequency above 80 Hz attenuates very quickly, and when it propagates to the ground, the peak frequency is 63 Hz. If FST (floating slab track) is used for vibration isolation in track system, the VLz of ground surface right above the tunnel can be reduced by 14.6 dB.

Key words metro vibration; special shape shield tunnel; transfer function calibration method

First-author's address China Electronic System Engineer-

ing No. 2 Construction Co., Ltd., 214028, Wuxi, China

单圆盾构隧道断面较小, 对断面尺寸多变的区段适应能力差。最近兴起的异形盾构隧道结构断面形状较大, 可同时容纳上行和下行 2 条线路, 其在线路规划方面显得更为灵活。相关学者对异形盾构隧道的振动问题做了些探索性研究^[1-3]。

现阶段地铁振动预测研究多数是完全基于有限元法。该研究方法没有对模型进行校准, 故在预测过程中参数及模型假定等引入的误差不可预估。本文先现场测量振动传递函数, 然后对有限元模型进行标定, 并基于标定后模型对异形盾构施工隧道的列车运行振动进行分析, 以期对异形盾构施工隧道的结构设计提供数据积累和经验参考。

1 振动传递函数测试

由于本文研究的线路尚未正式运营, 所以选择施工车辆平板拖车作为测试目标。将隧道-土层耦合系统视为 1 个大的滤波系统, 对施工车辆运行时隧道-土层的振动传递函数进行实际测量, 并通过实测传递函数对有限元模型进行标定和校准。

现场测量的响应物理量为加速度, 采样频率为 1 024 Hz, 数据处理窗函数为汉宁窗。测量 10 次过车数据取平均值作为使用数据。施工车辆在钢架支撑临时轨道上的行驶速度约为 10 km/h。隧道壁测点及地面测点的振动时程和频谱如图 1 及图 2 所示。

由图 2 可见, 信号振动加速度的峰值较多, 类似于无序状态。经分析, 在实测时平板车运行的临时施工轨道上, 轨道接头比较多, 故冲击荷载较大较多, 导致振动加速度峰值较多。此外, 由于施工车辆行进速度较慢, 且施工车辆本身的减振系统较

差,所以振动主频在 10 Hz 以下比较突出。

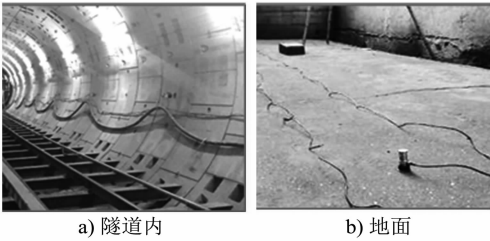


图 1 测试现场
Fig. 1 Vibration test site

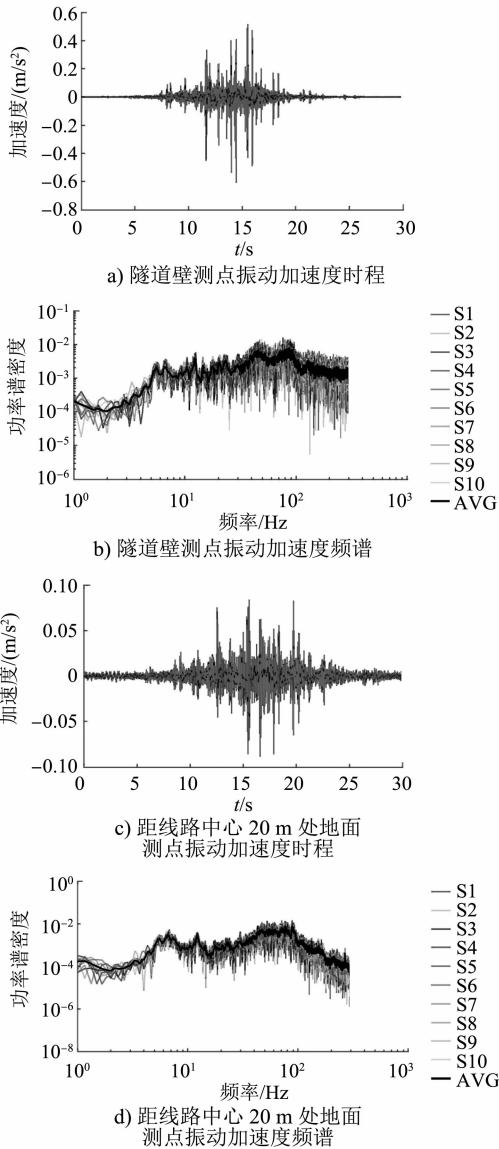


图 2 振动信号时程与频谱

Fig. 2 Vibration signal time history and spectrum

2 有限元模型计算

2.1 有限元模型及标定

根据地勘报告将土层等效为多个均质土层,其

动弹性模量及动泊松比等可根据土层的纵波和横波波速求得。划分网格时,靠近隧道的土体网格划得较密集,而远离隧道的土体网格划得较稀疏,以缩短计算时间,并保证计算精度的可靠性。模型边界设置黏弹性人工边界,合理设置振动波的通透性,尽可能考虑所有影响结果精度的因素。有限元模型见图 3。

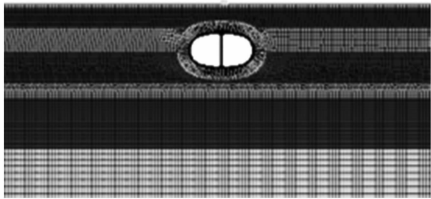


图 3 有限元模型
Fig. 3 Finite element model

在隧道壁分别施加简谐荷载和测试得到的加速度时程荷载,计算两种荷载下距地面 30 m 处的隧道壁测点振动加速度频响函数,并与实测频响函数对比如图 4 所示。

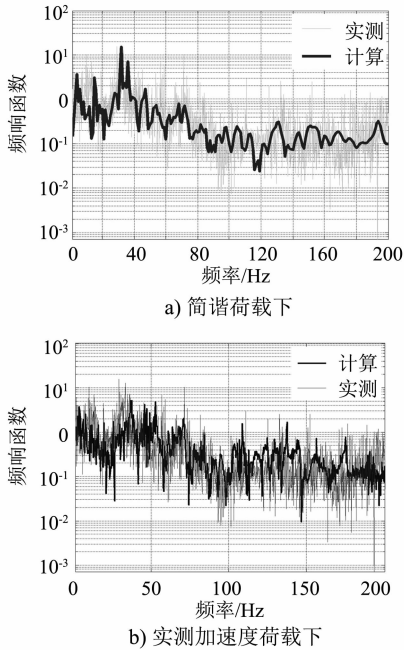


图 4 实测频响函数与计算频响函数对比

Fig. 4 Comparison between measured and calculated vibration response function

由计算结果可以看出,测试频响函数和计算频响函数在各个频段均具有较好的吻合和对应,说明模型基于的假定和参数基本没有改变振动能量在各个频段的构成占比,故可以认为所采用的有限元数值模型可靠。

2.2 轮轨荷载求解^[4-5]

2.2.1 实测钢轨加速度的数定求解

地铁列车的轮轨振动具有随机特性,经小波分解和重构后的钢轨加速度时程可认为是一个具有零均值的各态历经的平稳高斯过程,因此可将钢轨振动加速度波形分解为一系列不同频率的谐波。

$$x(t) = \sum_{n=0}^{\infty} [A_n \cos(n\omega t) + B_n \sin(n\omega t)] \quad (1)$$

其中,

$$A_n = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \cos(n\omega t) dt \quad (n = 0, 1, 2, \dots, N-1) \quad (2)$$

$$B_n = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \sin(n\omega t) dt \quad (n = 0, 1, 2, \dots, N-1) \quad (3)$$

式中:

t ——记录时间;

$x(t)$ ——根据傅里叶级数重构的加速度时程;

T ——记录时长;

N ——加速度波长离散点数量;

n ——在 $0 \sim N-1$ 中取值;

ω ——基频, $\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{N} \Delta t$, 其中 Δt 为采样

间隔;

A_n, B_n ——傅里叶变换后的谐波幅值。

对钢轨竖向振动加速度波形进行离散采样,即将加速度波形离散成点后,有:

$$x(t) = \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} [A_n \cos(n\omega t) + B_n \sin(\omega t)] \quad (4)$$

由式(1)~(4),通过数学编程软件可得数定后的加速度时程。

2.2.2 基于简化列车模型的振动荷载求解

在进行地铁列车的环境振动影响分析时,主要考虑列车竖向振动,故可将列车简化为一系二系弹簧质量系统模型组合(见图 5),并设这个组合是沿

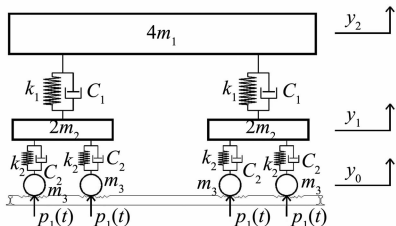


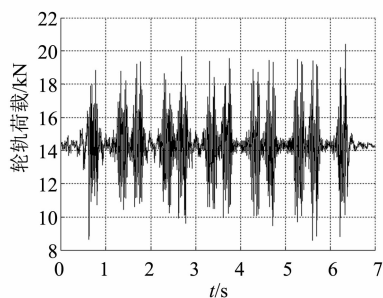
图 5 地铁列车计算模型

Fig. 5 Metro train calculation model

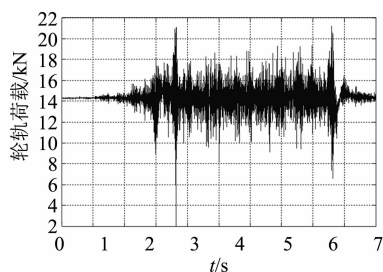
隧道纵向均匀分布的。图 5 中, m_1 、 m_2 分别为车体 1/4 质量及转向架 1/2 质量, k_1 、 c_1 分别为构架的刚度与阻尼, k_2 、 c_2 分别为轮对的弹簧与阻尼, $P(t)$ 为轮轨之间作用力, y_0 、 y_1 、 y_2 为竖向参考坐标系。

由于列车车体重心在纵向与横向通常都是对称的,故分析单侧钢轨上的列车荷载时,可以只分析 1 个转向架的 1 侧情况。

根据图 5 的坐标系,利用直接平衡法建立车体的竖向运动方程。在列车正常运行过程中,若忽略轮轨之间的弹跳作用(非脱轨情况),可以认为车轮的竖向振动加速度与实测的钢轨加速度相等。根据 D'Alembert 原理,仿真计算可得普通整体道床和钢弹簧浮置板道床两种情况下沿纵向均匀分布的列车线荷载,如图 6 所示。



a) 普通整体道床列车振动荷载



b) 钢弹簧浮置板道床列车振动荷载

图 6 列车振动荷载

Fig. 6 Train vibration load

由图 6 可知:普通整体道床刚度大,整体性强,其在列车经过时的轮轨作用清晰可见;而钢弹簧浮置板道床因其依靠减小轨道系统刚度来减小振动,削弱了隧道基础与道床之间的耦合,故其振动荷载的变化无法清晰体现列车经过时的轮轨作用。

2.3 不同隧道埋深时的振动分析

在隧道埋深不同时,振动传递特性及钢弹簧浮置板道床减振效果也有差异。

2.3.1 埋深与水平距离的影响

本文基于既有土层不同埋深条件下,研究地面振动沿垂直线路方向的衰减关系。

在有限元模型中,以隧道正上方地面为坐标原点,于 5 m、10 m、15 m 及 20 m 埋深处,每间隔 5 m 取 1 个计算点。不同埋深下,地面振动与水平距离 x 的衰减关系如图 7 所示。

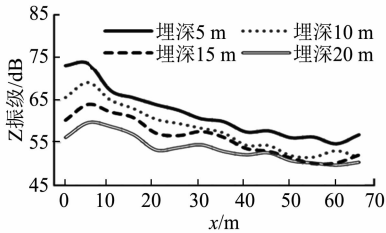


图 7 Z 振级沿地面衰减
Fig. 7 VLz attenuation on the ground

当隧道埋深不同时,地铁运行引起的地面振动大致呈现出埋深越深、振动越小,埋深越浅、振动越大的规律。但这一规律并非绝对适用。不同埋深的隧道对应的地面振动放大区出现的位置不同,埋深越深,隧道地面振动放大区的 x 就会越大。

由图 7 可见,埋深增加量与 Z 振级衰减量不是线性关系。单就地铁环境振动控制而言,存在一个最佳经济埋深,其与地质参数、线路条件等有关。根据 GB 10070—1988《城市区域环境振动标准》^[6],特殊住宅区昼间和夜间 Z 振级限值为 65 dB。由此可知,本计算测点的最佳经济埋深为 15~20 m。

2.3.2 地铁振动的传递特性

计算不同埋深时隧道壁到地面 $x=0$ 、 $x=20$ m 及 $x=40$ m 处测点的振动传递损失,如图 8 所示。

由图 8 可知:30 Hz 以下的低频振动衰减很慢,80 Hz 以上频段的振动衰减非常快;频率越高衰减越大;在 100 Hz 以上有大于 50 dB 的振动加速度级衰减量;地铁振动是宽频振动,在各个频段均有能量分布,地铁振动传至地面时振动频率主要集中在 63~80 Hz,与其他城市地铁振动测试结果结论相一致^[7-8]。

2.3.3 钢弹簧浮置板减振分析

在类矩形盾构隧道模型中建立特殊减振轨道结构-钢弹簧浮置板道床。假定埋深为 17.8 m,分析采用钢弹簧浮置板隔振措施时 Z 振级沿地面的衰减情况,如图 9 所示。

由图 9 可知,采用钢弹簧浮置板道床减振系统后,地面各位置的 Z 振级有显著的减小,其中在线路正上方地面位置的 Z 振级减振量为 14.6 dB, $x=5$ m 位置的 Z 振级减振量为 13.5 dB。

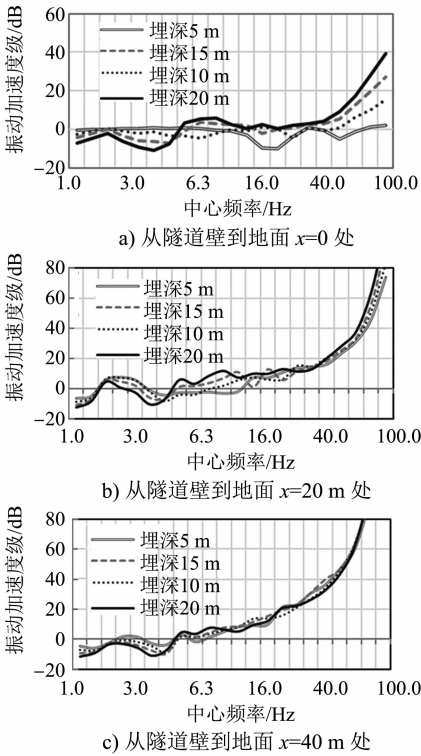


图 8 振动传递损失
Fig. 8 Vibration transmission loss

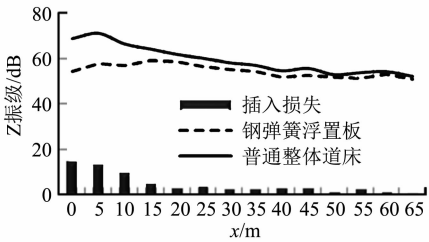


图 9 地面 Z 振级衰减对比
Fig. 9 Comparison of VLz attenuation on the ground

2 种轨道结构从隧道壁到地面的振动传递损失如图 10 所示。

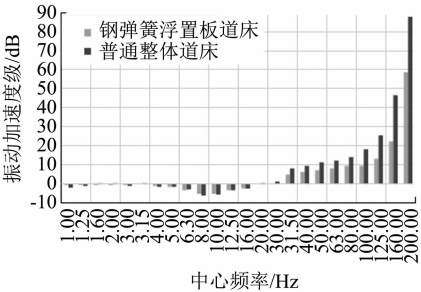


图 10 不同轨道结构的振动传递损失对比
Fig. 10 Comparison of vibration transmission loss of different track structures

振动由隧道壁传递至地面线路正上方的途径中:20 Hz 以下低频振动的衰减不是很明显;在 30~100 Hz 的中间频段(相对于本频段的中间部分),每个中心频率处整体道床和钢弹簧浮置板传递损失差值基本恒定,差别不大;在大于 100 Hz 的频段,普通整体道床的传递损失更大。究其原因,采用普通整体道床时,隧道壁处会产生大量高频振动,而且高频振动比低频振动衰减快。

3 结论

1) 埋深增加量与 Z 振级衰减量不是线性关系。单就地铁环境振动控制而言,存在 1 个最佳经济埋深。本算例的最佳经济埋深在 15~20 m 之间。

2) 地铁引起的 80 Hz 以上频段的振动衰减非常快,传至地面时峰值频段主要集中在 63~80 Hz,80 Hz 以上高频振动能量占比不大。

3) 距离线路中心线越近,采用钢弹簧浮置板后的振动插入损失越大,减振效果越好。采用钢弹簧浮置板措施后,在隧道正上方地面处的 Z 振级可以减小 14.6 dB。

参考文献

- [1] 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(3):41.
ZHANG Qile, 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(3):41.
- [2] 刘爱德,张斌,许永富. 地铁出入段线类矩形盾构隧道振动传递特性测试分析[J]. 城市轨道交通研究,2019(3):111.

(上接第 140 页)

- [4] 陈永刚,戴乾军,李俊武. 基于 SA-CPSO 优化 HSMM 的转辙机故障预测模型研究[J]. 铁道科学与工程学报,2019(4):1050.
CHEN Yonggang, DAI Qianjun, LI Junwu. Research on the fault prognostics model of the switch machine based on HSMM optimized by SA-CPSO[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019(4):1050.
- [5] 张煜东,吴乐南,王水花. 专家系统发展综述[J]. 计算机工程与应用,2010(19):43.
ZHANG Yudong, WU Lenan, WANG Shuihua. Survey on development of expert system[J]. Computer Engineering and Applications, 2010(19):43.
- [6] 徐计,王国胤,于洪. 基于粒计算的大数据处理[J]. 计算机学报,2015(8):1497.

LIU Aide, ZHANG Bin, XU Yongfu. Test analysis of quasi-rectangular shield tunnel vibration transmission characteristics on metro access lines[J]. Urban Mass Transit, 2019(3):111.

- [3] 马险峰,张宝民,方旭,等. 类矩形隧道地铁振动在软土地层中传播衰减数值模拟研究[J]. 路基工程,2018(5):133.
MA Xianfeng, ZHANG Baomin, FANG Xu, et al. Numerical simulation study on propagation attenuation of quasi-rectangular tunnel metro vibration in soft ground[J]. Subgrade Engineering, 2018(5):133.
- [4] 李德武. 列车振动荷载的数定分析[J]. 甘肃科学学报,1998(2):25.
LI Dewu. A deterministic analysis of dynamic train loading[J]. Journal of Gansu Sciences, 1998(2):25.
- [5] 孙晓静. 地铁列车振动对环境影响的预测研究及减振措施分析[D]. 北京:北京交通大学,2008.
SUN Xiaojing. Prediction of environment vibrations induced by metro trains and mitigation measures analysis[D]. Beijing:Beijing Jiaotong University, 2018.
- [6] 国家环境保护局. 城市区域环境振动标准:GB 10070—88[S]. 北京:中国标准出版社,1988.
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Standard of environmental vibration in urban area:GB 10070—88[S]. Beijing:Standards Press of China, 1988.
- [7] 黄俊飞,秦佳良. 地铁隧道内钢弹簧浮置板轨道的减振效果实测分析[J]. 城市轨道交通研究,2020(1):83.
HUANG Junfei, QIN Jialiang. On-site measurement and analysis of vibration reduction effect of steel spring floating slab track in metro tunnel[J]. Urban Mass Transit, 2020(1):83.
- [8] 张斌,王建立,王建,等. 地铁列车激励下岩石场地振动传递特性测试分析[J]. 都市快轨交通,2018(3):40.
ZHANG Bin, WANG Jianli, WANG Jian, et al. Test analysis of Qingdao rock site vibration transmission characteristics under metro train excitations[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2018(3):40.

(收稿日期:2020-03-31)

- XU Ji, WANG Guoyin, YU Hong. Review of big data processing based on granular computing[J]. Chinese Journal of Computers, 2015(8):1497.
- [7] 刘盾,李天瑞,苗夺谦,等. 三支决策与粒计算[M]. 北京:科学出版社,2013:3.
- LIU Dun, LI Tianrui, MIAO Duoqian, et al. Three-way decision making and granular computing[M]. Beijing: China Science Publishing & Media Ltd., 2013:3.
- [8] 朱建军. 层次分析法的若干问题研究及应用[D]. 沈阳:东北大学,2005.
ZHU Jianjun. Research on some problems of the analytic hierarchy process and its application[D]. Shenyang: Northeastern University, 2005.

(收稿日期:2019-11-26)