

DOI: 10.7672/sjgs2025070007

地铁隧道邻近区域振动预测数值计算方法研究*

闫建宁

(中铁十八局集团第三工程有限公司,河北 涿州 072750)

[摘要] 随着城市化进程的加速,地铁隧道建设越来越多位于已有建(构)筑物的邻近区域。地铁引起的振动,尤其是高频振动,可能对周围环境和敏感建筑物产生影响,因此,准确预测地铁引起的振动传播成为一个重要课题。提出了一种基于列车-轨道-隧道相互作用模型和地下波传播模型的振动传播预测方法。通过现场测量与数值计算验证,发现高频成分在地下逐渐衰减,而地面上 50Hz 附近的频率成分明显放大。基于此,提出的列车-轨道-隧道模型能够有效预测隧道内的振动时程加速度水平,而二维有限元分析方法可以精确预测地面和地下的振动衰减及加速度分布。研究结果为地铁振动控制提供了可靠的理论基础,并为相关噪声治理工作提供了有力支持,有助于减少地铁建设和运营对周围环境的影响。

[关键词] 地铁;隧道;振动;预测;有限元分析

[中图分类号] TU25

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)07-0007-05

Numerical Calculation Method for Predicting Vibration Propagation Invicinity of Subway Tunnel

YAN Jianning

(China Railway 18th Bureau Group Third Engineering Co., Ltd., Zhuozhou, Hebei 072750, China)

Abstract: With the acceleration of urbanization, subway tunnels are increasingly constructed in proximity to existing buildings or facilities. Subway-induced vibrations, especially high-frequency ones, can affect the surrounding environment and sensitive buildings, making the accurate prediction of vibration propagation a critical issue. This paper presents a vibration propagation prediction method based on a train-track-tunnel interaction model and a ground wave propagation model. Field measurements and numerical calculations validate the proposed method, revealing that high-frequency components attenuate underground, while frequencies near 50Hz are significantly amplified at the ground surface. The train-track-tunnel interaction model effectively predicts the time-history acceleration levels of vibrations within tunnels, while 2D finite element analysis accurately predicts vibration attenuation and acceleration distribution in both underground and surface areas. The findings provide a reliable theoretical basis for vibration control in subway construction and offer strong support for noise mitigation efforts, helping to reduce the impact of subway construction and operation on the surrounding environment.

Keywords: subways; tunnels; vibration; prediction; finite element analysis

0 引言

随着城市化进程的不断推进,尤其是在一些人口密集的大城市中,空间资源的利用变得愈发紧张,地铁隧道往往需要建设在已有建筑物或设施的邻近区域^[1]。与此同时,越来越多的新建设施对环

境噪声和振动的要求变得更加严格,尤其是对于办公楼、住宅以及医院等对噪声敏感的建筑,往往要求不受列车运营产生的振动和噪声影响^[2-4]。因此,准确预测列车引起的地面振动,特别是地面传播的噪声,已成为地铁建设中的一项重要课题。

目前,已有一些经验公式用于预测地面振动水平^[5-6],但这些公式主要针对低于 80Hz 的低频振动,无法有效预测超过 80Hz 的高频成分。此外,现有的公式大多忽略了振动加速度的频谱特性,如三

* 中铁十八局集团有限公司西安轨道交通 8 号线一期工程科研创新项目(C2022-049)

[作者简介] 闫建宁,工程师,E-mail: poisson0606@foxmail.com

[收稿日期] 2024-12-28

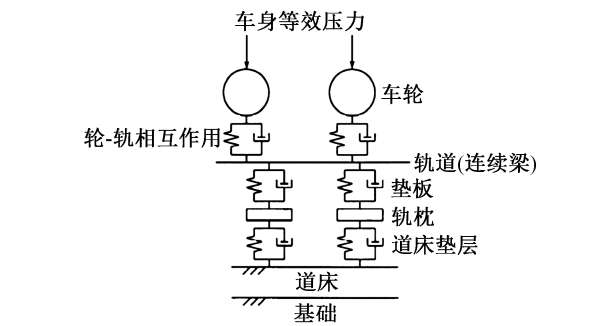


图3 列车-轨道-隧道相互作用模型

Fig. 3 Train-track-tunnel interaction modelling

表 1 列车和轨道的基本参数

Table 1 Basic properties of train and track		
部位	参数	数值
列车	车身荷载	36.75kN
	轮组质量	350kg
轮-轨互动	弹簧常数	2 000MN/m
	阻尼系数	1kN · s/m
轨道	弯曲刚度	4MN · m ²
	单位质量	50kg/m
轨道垫板	刚度系数	63.4MN/m
	阻尼系数	650kN · s/m
轨枕垫板	刚度系数	7.8MN/m
	阻尼系数	100kN · s/m
轨枕	弯曲刚度	1MN · m ²
	质量	102.5kg

表 2 轨枕、混凝土基础和地面属性

Table 2 Properties of track bed, concrete base and ground				
部位	密度/ (kg · m ⁻³)	纵波速度/ (m · s ⁻¹)	横波速度/ (m · s ⁻¹)	剪切模量/ (MN · m ⁻²)
轨枕	1 667	465.0	248.6	103.0
混凝土基础	2 300	4 768	2 920	19 610
地面	1 420	928	270	22

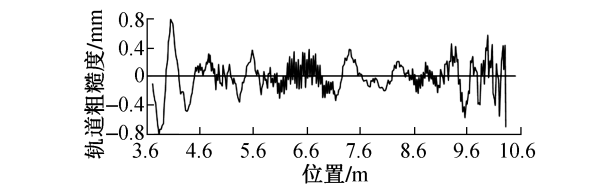


图 4 轨道粗糙度

Fig. 4 Rail roughness

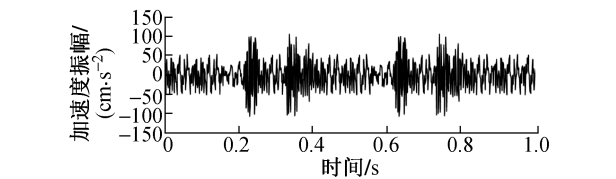


图 5 轨道附近产生的振幅

Fig. 5 Amplitude of generated vibration

将计算得到的振动加速度水平与现场测量结

果进行了比较,如图 6 所示。可以观察到,计算得到的频谱大致与现场测量结果一致。

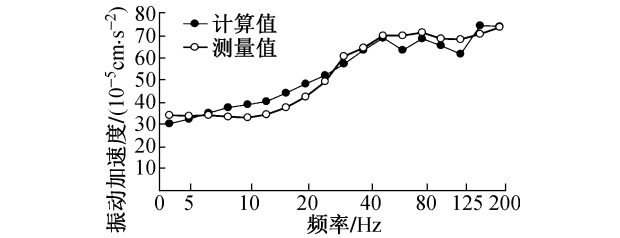


图 6 计算和测量的振动加速度对比

Fig. 6 Comparison of calculated and measured vibration acceleration

3 振动传播数值计算

通过二维有限元分析方法研究振动的传播,在与现场测量相同的条件下进行计算。有限元分析网格如图 7 所示,其中包括 3 864 个单元和 11 906 个节点。单元在垂直方向上的长度大多为 0.6m,相邻两个节点的间距大约为 0.3m。为了防止振动在边界处发生反射,分析区域的外围设置了统一的黏性边界条件。本次计算中应用了 Rayleigh 阻尼,具体公式如下:

$$C = \alpha M + \beta K \tag{1}$$

式中: C 是阻尼矩阵; M 是质量矩阵; K 是刚度矩阵; α 和 β 是常数,取值如表 3 所示。

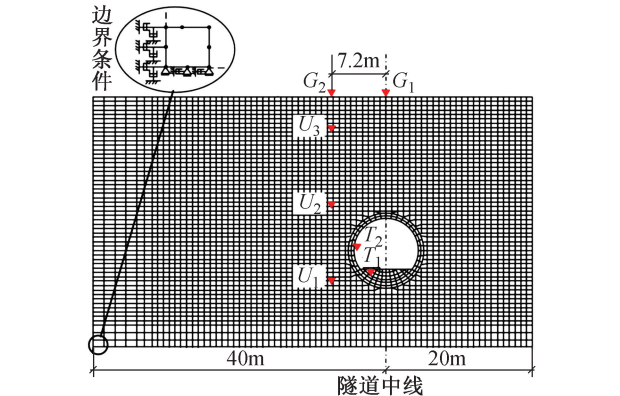


图 7 二维有限元分析计算模型

Fig. 7 Calculation model of 2D-FE analysis

表 3 常量取值

Table 3 Constants α and β		
位置	α	β
地面	6.221	6.303×10^{-5}
隧道	0.377	1.582×10^{-6}

地面弹性模量是根据通过 P-S 电测剖面 (P-S logging) 获得的剪切波速计算得出,而隧道弹性模量的计算则假设其剪切波速为 1 000m/s。地面中的常数和阻尼系数范围设定为 2%~5%,该范围适用

于频率从 10~250Hz 的情况,如图 8 所示。在计算中,将图 5 中 1s 内的时程加速度幅值输入到与轨道位置相对应的节点。

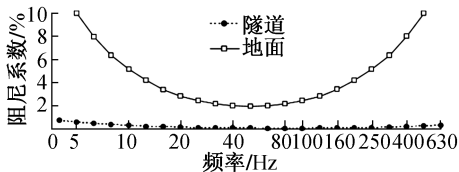


图 8 频率和阻尼系数之间的关系

Fig. 8 Relationship between frequency and damping factor

通过快速傅里叶变换,分析代表性测点的时程加速度幅值。振动加速度水平计算值和实测值如图 9 所示。计算结果与实测结果相比,地表处的振动加速度水平差异在 0.7~3.6dB,而在地下测点 U_2 处,计算值比实测值低 6.3dB。图 9 显示,计算的振动谱与实际测量数据大致吻合,既适用于隧道,也适用于地下和地表。

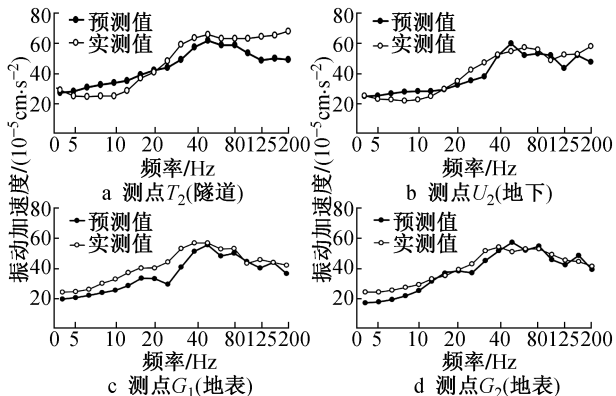


图 9 振动加速度水平计算值和实测值对比

Fig. 9 Comparison between calculated and measured vibration acceleration level

图 10 展示了垂直地面方向上振动加速度云图。从中可以看出,振动主要从隧道底部辐射出去。在 4m 深度以下,振动逐渐衰减,而接近地面表面时,振动出现了放大效应。地表处最大振动加速度并不位于隧道中心正上方,而是在距离隧道中心线 10~20m 的位置。这种振动放大的现象可能是由于地表附近的软土层以及自由表面效应所导致的。

4 施工优化分析

根据上述研究结果,影响地铁隧道结构振动产生与传播的因素复杂多样,涵盖了结构形式、材料属性、位置关系等多种因素。从施工的角度出发,采取合适的技术措施和管理策略,能够在一定程度上有效减小振动的产生和传播,降低对地铁隧道结构安全性和周边环境的潜在危害。结合前述研究成果,从多个维度展开对地铁隧道施工优化的分

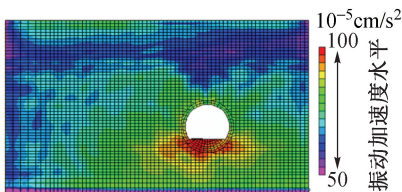


图 10 振动加速度云图

Fig. 10 Contour of overall values of vibration acceleration level

析,以期有效减弱潜在振动危害提供理论依据和实践指导。

4.1 施工振动控制措施

在地铁隧道施工过程中,振动控制是确保周围建筑物和设施安全的关键。根据研究结果显示,振动传播的主要频率集中在 50Hz 附近,且高频成分在地下逐渐衰减。因此,施工过程中可以采取以下措施来控制振动。

1) 工艺选择:采用低振动施工工艺,如盾构法施工,盾构推进速度与注浆压力应控制在合理范围内,以确保地层稳定,减少振动传播。

2) 振动隔离措施:在隧道与邻近建筑物之间设置振动隔离屏障,如隔振沟或隔振墙,以减少振动传播,隔振沟深度应至少为隧道埋深的 1.5 倍,隔振墙的厚度应根据振动频率和地层条件设计,采用混凝土或钢筋混凝土材料。

4.2 施工监测与反馈

施工过程中应进行实时监测,确保振动水平在允许范围内。其中测点的布置应考虑在隧道内、地面及邻近建筑物内等振动敏感位置。监测频率应根据施工进度和振动水平动态调整,确保实时掌握振动情况。选择振动加速度作为检测指标,当振动加速度超过阈值时,应立即降低盾构推进速度并增加注浆压力,以减少振动传播。

4.3 施工对邻近建筑物的影响评估

在地铁隧道施工前后,应对邻近建筑物进行详细的结构评估和健康监测,主要考虑建筑物基础的振动加速度和位移变化,根据监测结果预测施工振动对建筑物的影响。

根据有限元分析结果,振动传播路径主要从隧道结构向地层辐射且逐渐衰减。振动在地层中的衰减系数为 0.2dB/m。因此,建筑物距离隧道中心线 20m 时,振动衰减约为 4dB,可以有效减少振动对建筑物的影响。

4.4 施工振动预测与优化

利用上述提出的列车-轨道-隧道相互作用模型和地下波传播研究,可以在施工前进行振动预测,

优化施工方案,具体步骤如下。

1)施工前振动预测:根据隧道设计参数和施工工艺,预测施工过程中隧道结构、地表及邻近建筑的振动加速度水平,评估对周围环境的影响。

2)施工方案优化:根据预测结果,优化施工方案,如调整隧道埋深至 20m,以减少振动对地面建筑物的影响;优先施工距离建筑物较远的隧道段,减少振动对建筑物的累积影响等,以减少振动对周围环境的影响。

4.5 施工后的振动控制

施工完成后,仍需对隧道运营期间的振动进行控制,确保长期运营不对周围环境产生不利影响,具体措施如下。

1)结构维护:根据轨道粗糙度数据研究发现,轨道不平整度应控制在 1mm/m 以内,以减少列车运行时的振动,且每 3 个月进行一次轨道维护,确保轨道平整度符合要求。

2)振动监测与预警:在隧道运营期间,持续进行振动监测,建立预警机制,及时发现和处理振动超标情况。

5 结语

本文提出了一种基于列车-轨道-隧道相互作用模型和地下波传播模型的地铁引起振动传播预测方法,并通过实测数据和数值计算验证了该方法的有效性。研究表明,高频成分在地下逐渐衰减,地面上出现 50Hz 的峰值;列车-轨道-隧道模型能够有效预测隧道中振动的时程加速度水平;通过二维有限元分析能准确预测地下和地面上的振动衰减和加速度分布。本研究提出的地铁振动传播预测方法,为高精度评估地铁施工和运营对周围环境的影响提供了可靠的理论基础和技术支持。其研究成果可为城市轨道交通规划和建筑物振动控制提供科学依据,有助于降低振动对周边结构和居

民的负面影响。

参考文献:

[1] 曾钦娥,何蕾,鄢玉斌,等. 地铁邻近高层住宅建筑振动分布规律及影响因素研究[J]. 噪声与振动控制, 2024, 44(6): 242-248.

ZENG Q E, HE L, WU Y B, et al. Distribution law and influencing factors of vibrations inside high-rise residential buildings adjacent to subway[J]. Noise and vibration control, 2024, 44(6): 242-248.

[2] 李伟科,林治平,黄俊光,等. 地铁邻近超高层建筑振动响应及减振降噪研究[J]. 建筑结构, 2024, 54(5): 58-63.

LI W K, LIN Z P, HUANG J G, et al. Research on vibration reaction and noise reduction for a super high-rise building near subway[J]. Building structure, 2024, 54(5): 58-63.

[3] 种记鑫,徐前卫,贺翔,等. 盾构近接桥梁及多层建筑施工扰动响应及其控制研究[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(12): 146-152, 158.

ZHONG J X, XU Q W, HE X, et al. Disturbance response and control of shield construction adjacent to bridge and high-rise buildings [J]. Urban mass transit, 2024, 27 (12): 146-152, 158.

[4] 龚叶锋. 地铁运行引起的小半径曲线隧道周边地表动力响应分析[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53 (11): 84-93.

GONG Y F. Analysis of ground vibrations induced by metro vehicles in small radius curved sections [J]. Construction technology, 2024, 53 (11): 84-93.

[5] 刘少鹏. 沉管隧道 BIM-ANSYS 模型快速生成转换研究与应用[J]. 隧道建设(中英文), 2023, 43(S2): 467-476.

LIU S P. Research and application of fast generation and transformation of BIM-ANSYS model in immersed tunnel [J]. Tunnel construction, 2023, 43 (S2): 467-476.

[6] 郭逸凡,郑俊杰,刘辉. 基于改进三阶段法的隧道下穿建筑风险评估[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2024, 46(4): 91-99.

GUO Y F, ZHENG J J, LIU H. Risk assessment of tunnel undercrossing building based on improved three-stage method [J]. Journal of civil and environmental engineering, 2024, 46 (4): 91-99.