

DOI: 10.7672/sgjs2025220006

# 地铁上盖开发建筑群振动特性及二次噪声 传播规律研究\*

王良山

(中铁二十局集团第六工程有限公司, 陕西 西安 710032)

[摘要] 以重庆某地铁上盖开发工程为背景,基于车辆-轨道耦合动力学理论,建立了地铁列车-轨道相互作用力学模型及包含隧道与土体的有限元模型。结合现场实测数据,分析了地铁运营引发 TOD 建筑群的振动特性(主频集中在 63Hz)及二次噪声传播规律。研究表明,租赁区因邻近线路,其振动水平超出国家标准限值。为此提出了减振降噪措施:将车辆段库内及咽喉区普通扣件替换为弹性扣件;在咽喉区上盖办公楼区设置弹簧隔振支座;在租赁住宅侧墙增设隔振垫。实施后各功能区振动及二次噪声指标均降至国家标准范围内。其中,最大 Z 振级衰减达 4~8.9dB(A),最大声压级衰减达 6.2~9.6dB(A),证明项目采取的减隔振措施对振动和结构二次噪声具有良好的控制效果。

[关键词] 地铁;TOD;振动;监测;二次噪声;减隔振

[中图分类号] TU445.4

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)22-0006-06

## Research on Vibration Characteristics and Secondary Noise Propagation Law of Buildings in Subway Overhead Development

WANG Liangshan

(The Sixth Engineering Co., Ltd. of China Railway 20th Bureau Group Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710032, China)

**Abstract:** Taking the development project over a subway line in Chongqing as the background, this study established a mechanical model of train-track interaction and a finite element model incorporating tunnels and soil based on the vehicle-track coupled dynamics theory. By combining field measurement data, the vibration characteristics (with a dominant frequency concentrated at 63Hz) and secondary noise propagation patterns in the TOD building cluster caused by subway operations were analyzed. The findings indicate that the vibration levels in the leasing area, due to its proximity to the tracks, exceeded national standard limits. To address this, vibration and noise reduction measures were proposed that replacing conventional fastenings with elastic fastenings in the depot and throat areas, installing spring vibration isolation bearings in the office building area above the throat section, and adding vibration isolation pads to the side walls of leased residential units. After implementation, the vibration and secondary noise indicators in all functional zones fell within the national standard range. The maximum Z-weighted vibration level attenuation reached 4~8.9dB(A), while the maximum sound pressure level attenuation achieved 6.2~9.6dB(A), demonstrating that the vibration and secondary noise mitigation measures adopted in the project effectively controlled both vibration and structural secondary noise.

**Keywords:** subways; transit-oriented development(TOD); vibration; monitoring; secondary noise; vibration reduction and isolation

### 0 引言

以公共交通为导向的开发模式(transit-oriented development, TOD)可使轨道交通车辆基地建设和相关土地资源得到优化配置,在 TOD 理念引导下,车辆段综合开发的商业配套通过与公共交通的深度

\* 陕西省重点研发计划(2024SF-YBXM-650)

[作者简介] 王良山,工程师,E-mail: 524984790@qq.com

[收稿日期] 2025-05-10

捆绑,从早期的社区服务型商业逐步转变为与城市联动的多层级商业,车辆基地上盖开发项目近年来成为城市轨道交通开发的典型模式,该模式对促进区域协同发展具有重要意义<sup>[1-2]</sup>。但地铁修建和运营带来一系列问题,如列车运行过程中,车轮与钢轨相互作用产生的振动以振动波的形式向上部及周围建筑物传递,引发上部结构振动,诱发结构二次噪声,严重影响人们的正常生活和工作质量,更有甚者会威胁人们的身心健康<sup>[3-5]</sup>。已有学者对地铁引起的振动和二次噪声问题进行了研究。Melke 等<sup>[6]</sup>研究表明,地铁列车车轮、钢轨及轨道之间的不顺会增加运行时的振动强度。Costa 等<sup>[7]</sup>将车辆系统分块分析,并研究了各类接触关系对车轨相互作用的影响。Wettschureck<sup>[8]</sup>研究了振动幅度与轨道结构形式之间的关系,并提出对应减振措施。耿传智等<sup>[9]</sup>采用二维有限元方法预测了地下列车运行产生的地面振动,发现在距离隧道 50m 以上的轨道减振形式对地面振动影响不大。由广明等<sup>[10]</sup>采用了三维有限元方法来研究交叠车站和列车运行带来的振动影响。邓飞皇等<sup>[11]</sup>基于广州地铁某区间隧道列车运行情况,利用 FLAC3D 软件建立三维弹塑性动力模型并分析振动对地层和地表的振动响应。针对地铁引发的一系列问题,国内外学者从减振降噪的角度进行了相关研究。Yang 等<sup>[12]</sup>采用 2.5D 有限元法/无限单元法对沟渠、填充沟和波阻块的隔振有效性进行了比较分析。朱玉星<sup>[13]</sup>建立了土-隧道-隔振墙二维模型,分析得出隔振墙的深度以及空隙填充物对隔振效果的影响,并且发现隔振墙对低频激励的隔振效果比高频激励的要好。本文以重庆某地铁上盖开发工程为背景,基于车辆-轨道耦合动力学理论,建立地铁列车-轨道相互作用力学模型,确定列车激励荷载后,构建包含隧道、土体等结构在内的有限元模型,结合现场实测数据,研究地铁引发的 TOD 建筑群振动特性和二次噪声传播规律,提出了针对性的减隔振措施,并讨论了其对车致振动及二次噪声的控制效果。

## 1 工程概况

重庆市南岸区南坪组团地块 TOD 开发项目所处区域为重庆轨道环线四公里停车场地块。其中重庆市轨道交通环线是重庆市轨道交通网中的骨干线路和唯一的闭合状线路,该线全长 50.88km。四公里停车场负责重庆轨道环线运营、整备、检修、停放及维修、保养等工作,如图 1 所示。

为充分利用土地资源,四公里停车场拟进行上

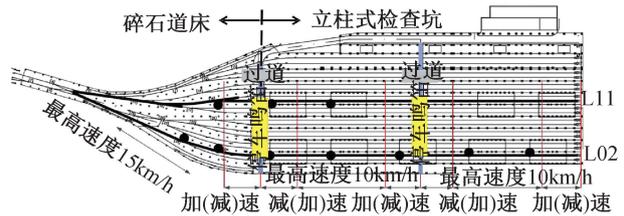


图 1 停车场平面

Fig. 1 Plane of parking lot

盖物业综合开发,即在停车场用地范围内,通过合理布局和采取专门的建设方案,使停车场在满足营运及车辆检修工艺需要的前提下,以地铁车辆段为基础,采用地铁停车场桩基进行平台上盖物业开发,开发项目总面积 16 139m<sup>2</sup>,主要包括高层住宅区、租赁区、办公区等,如图 2 所示。



图 2 设计效果

Fig. 2 Design effect

拟建四公里 TOD 项目位于南岸区核心位置,紧邻轨道 3 号线四公里站和公交四公里交通枢纽站。项目将以轨道交通站点为中心,主体修建于四公里停车场上方。四公里停车场场址东侧紧邻海峡路,西侧紧邻纵二路(城市次干道),南侧紧邻四公里换乘枢纽现有道路,周边地块均为和记黄埔地块。停车场接轨于环线罗家坝站。场址南北向长约 750m,东西向宽约 190m,如图 3 所示。



图 3 项目位置

Fig. 3 Project position

根据场地地质勘探结果,工程地段地层从上到下分别为素填土、强风化砂质泥岩、中风化砂质泥岩,各层地质参数如表 1 所示。

表1 地层物理力学性质

Table 1 Physical and mechanical properties of strata

深度/ m	土体	重度/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	弹性模 量/MPa	泊松 比
0~10	素填土	18.0	51	0.401
10~11.2	强风化砂质泥岩	24.6	1 036	0.315
12.2 以下	中风化砂质泥岩	25.6	1 750	0.240

## 2 建筑物振动特性及二次噪声特性分析

### 2.1 建立模型

采用 Midas 有限元软件建立土体-轨道-建筑耦合系统模型,模型按照 1:1 比例建立停车场结构层、上盖建筑模型及轨道,从而模拟列车以不同速度驶过不同区域建筑的振动响应。

地层按地质勘探情况分为 3 层,地层参数按表 1 取值。列车根据实际行驶情况,咽喉区运行速度为 15km/h,库内区 6 节 As 型车运行速度为 5km/h。列车建模参数为车体质量 41 610kg,构架质量 4 280kg,轮对质量 1 860kg,车辆长 22.8m,车辆定距 15.7m,转向架轴距 2.5m,车轮滚动圆半径 0.42m。轨道为普通道床轨道,钢轨弹性模量  $2.06 \times 10^{11} \text{N/m}^2$ ,截面惯量  $3.22 \times 10^{-5} \text{m}^4$ ,钢管单位长度质量 60.64kg/m,扣件间距 0.6m,轨下胶垫刚度  $4 \times 10^7 \text{N/m}$ ,胶垫阻尼  $3 \times 10^4 \text{N/m}$ 。为更有效地激励土体振动,轨道随机不平顺采用美国 5 级轨道谱与 Sato 短波不平顺的叠加形式<sup>[14]</sup>。

为了消除边界反射波的影响,在已建立的模型边界沿法向衍生 1 层相同类型的单元,以此模拟模型以外的半无限空间土体。模型共包含  $6.125 \times 10^6$  个单元及  $6.234 \times 10^6$  个结点,如图 4 所示。

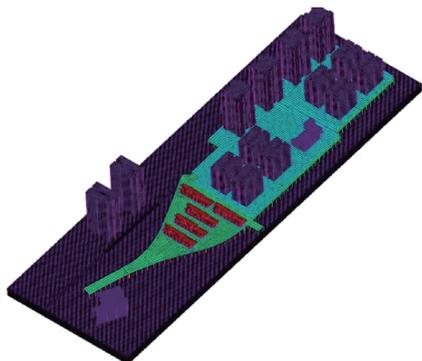


图4 数值模型

Fig. 4 Numerical model

### 2.2 基于实测数据的模型验证

为保证模拟结果的可靠性,项目在该停车场运行情况下进行了振动实测,并将相应测点的测试结果与模拟结果对比,分析模型计算结果的可靠性。测试期间,列车以约 12km/h 的速度驶过咽喉区,约

5km/h 的速度开行入库。根据现场建筑物分布和场地分区情况(见图 5,6),共布设 9 个监测断面,1~6 号监测断面对称布置在 B 区,7~9 号断面布置在 C 区。其中,地下层布点位于桩基处和道床外,地面测点布置在桩基对应处或两桩基的薄弱位置处。

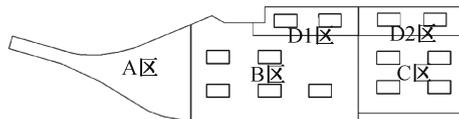


图5 场地分区

Fig. 5 Field partition

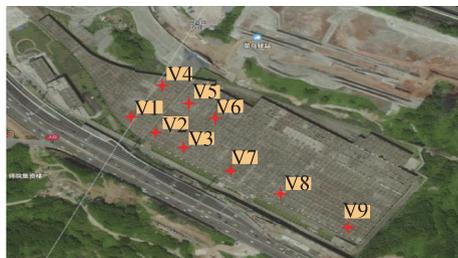


图6 测点布置

Fig. 6 Measuring points arrangement

按照 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》的振动加速度计算公式,将测试所得的加速度转换为 Z 计权振动加速度级(简称最大 Z 振级)。各点实测值与模拟值的对比如表 2 所示。

表2 实测值与模拟值对比

Table 2 Comparison of measured and simulated values

测点	峰值加速度/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )		最大 Z 振级/dB(A)	
	实测值	模拟值	实测值	模拟值
V1	0.037	0.041	68.8	70.2
V2	0.029	0.032	63.3	63.6
V3	0.026	0.029	63.1	65.3
V4	0.052	0.052	67.8	69.5
V5	0.048	0.049	60.0	62.4
V6	0.042	0.044	58.6	60.7
V7	0.024	0.026	60.7	61.9
V8	0.024	0.027	60.7	62.3
V9	0.022	0.023	59.1	61.1

由表 2 可知,模拟结果与实测结果加速度幅值相近,且变化趋势一致,数值结果差异较小,验证了模型的准确性和可靠性。

### 2.3 建筑群不同功能区振动特性分析

工程开发用地建筑及其周围已有建筑群按照区域功能划分为住宅区、白地区(即可扩展使用区域)、租赁住房区和办公楼区,其中住宅区包括待建的高层建筑 1~13 号楼,白地区包括已有建筑 14,15

号楼,租赁住房区包括已有建筑 16 号楼,办公区包括已有建筑 17 号楼,各功能区域及楼栋平面位置如图 7 所示。

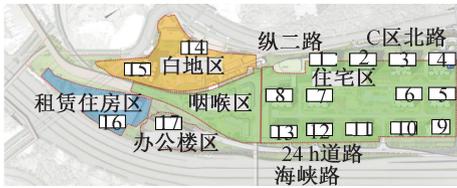


图 7 功能区分

Fig. 7 Functional area division

根据 GB 10070—1988《城市区域环境振动标准》和《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》中对住宅楼、商业楼及地下室的分频振级限值和最大 Z 振级标准的规定,结合现场情况对建筑群不同功能区域进行振动特性分析,如图 8 所示。振动监测点为住宅区 1~13 号楼的 1,5,13 层楼板中心位置;白地区 14,15 号楼的 1,6,11,16,21 层楼板中心位置;租赁住房区 16 号楼 1,4,7 层楼板中心位置;办公区 17 号楼 1,4,7 层楼板中心位置。

为了更直观地查看各频带内楼层的振动,对振动时域结果进行 1/3 倍频分析,分频振级和最大 Z 振级汇总如表 3 所示。由表 3 可知,对于车辆段上盖住宅区建筑群,地铁引发的楼板振动主频集中在 63Hz 附近,且随楼层由低到高振动逐渐衰减,但其最大振级和分频振级均未超出规范限值。5~8 号楼的最大振动加速度和最大 Z 振级相对其两侧建筑物较大,这是由于 5~8 号楼位于轨道上方,距离振源位置近,故其振动响应明显。沿地铁行进方向,各建筑物的最大振动加速度和最大 Z 振级越来越小,分析原因为地铁开行速度较咽喉部逐渐减小,其尾端建筑群相对于前方建筑振动较小。

类比住宅区建筑振动特性分析方法,对办公区建筑、白地区建筑和租赁区建筑的振动时域结果及其振级汇总如表 4 所示。地铁引发的办公区、白地区和租赁区建筑的楼板振动主频均集中在 63Hz 附近,其振动特性变化规律与住宅区建筑相同,但由于白地区、办公区和租赁区建筑距车辆段咽喉部较近,且地铁入库时速度较快,因此办公区、白地区和租赁区相较于住宅区振动响应更大,尤其是租赁区 16 号楼 1 层,其分频振级为 69.3dB(A),超出规范要求的 70/67dB(A),其他位置的分频振级虽未超标,但余量较小。

#### 2.4 建筑群不同功能区二次噪声特性分析

根据《城市轨道交通引起建筑物振动与二次辐

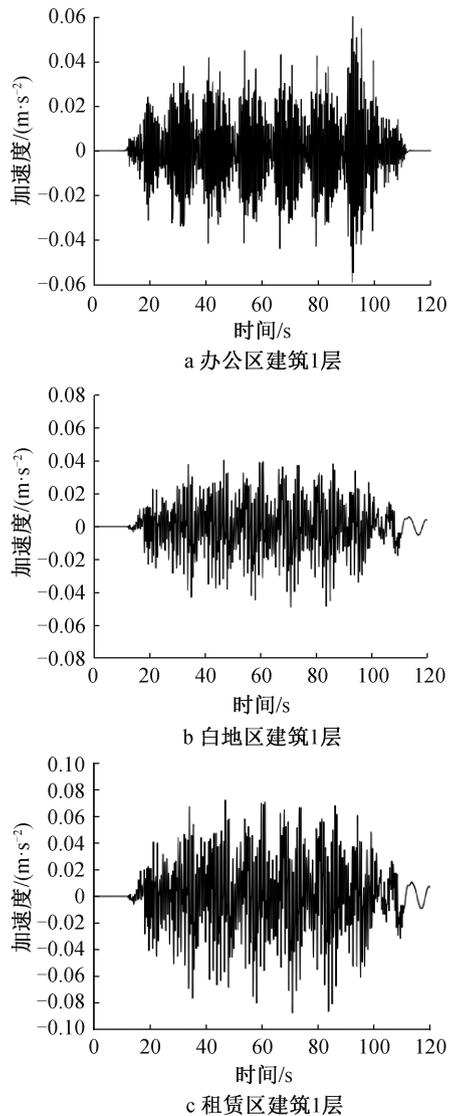


图 8 各功能区建筑楼层振动

Fig. 8 Building floor vibration in each functional area

射噪声限值及其测量方法标准》,城市轨道交通沿线建筑物室内二次辐射振动噪声限值,住宅楼按照居民、文教区进行分类,取声压级容许值为 38/35dB(A)(昼/夜);商业和地下室按居住、商业混合区、商业中心区进行分类,取声压级容许值为 41/38dB(A)(昼/夜)。

将各功能区二次结构噪声最大声压值汇总如表 5 所示。由于在评价列车引起的环境影响时,二次噪声所用规范的要求比振动评价所用规范要求更加严格,大部分测点位置均出现了二次噪声超标的情况,租赁区 1,4 层超标,尤其是办公区,1~3 层均超标,最大超标值达到了 8.7dB(A),只有白地区建筑和住宅区未超标,但其余量较小。综合振动特性分析和二次噪声特性分析结果,应采取相应的减振降噪措施,从而满足相应的规范要求。

表3 住宅区分频振级及最大Z振级

Table 3 Frequency division vibration level and maximum Z vibration level in residential area dB(A)

	位置	分频振级	最大Z振级
1号楼	1层	45.2	47.5
	5层	38.2	40.4
	9层	35.5	37.2
	13层	28.9	31.1
2号楼	1层	44.2	46.3
	5层	37.3	39.5
	9层	36.2	38.2
	13层	29.5	32.5
3号楼	1层	45.3	47.6
	5层	37.9	40.8
	9层	35.3	37.6
	13层	29.8	32.0
4号楼	1层	41.4	43.7
	5层	36.2	38.3
	9层	30.8	33.5
	13层	26.7	29.3
5号楼	1层	55.5	47.4
	5层	40.9	43.2
	9层	37.8	39.3
	13层	30.9	33.2
6号楼	1层	48.3	50.6
	5层	44.2	46.8
	9层	39.6	41.9
	13层	35.4	37.1
7号楼	1层	49.3	51.1
	5层	43.7	45.6
	9层	38.5	40.8
	13层	33.3	35.9
8号楼	1层	49.3	51.6
	5层	44.1	46.3
	9层	36.6	38.8
	13层	32.1	34.2
9号楼	1层	40.1	42.7
	5层	35.2	37.6
	9层	31.3	33.6
	13层	26.2	28.8
10号楼	1层	45.2	47.4
	5层	39.7	41.3
	9层	34.6	36.6
	13层	28.4	30.4
11号楼	1层	45.1	48.7
	5层	37.2	38.6
	9层	33.1	36.1
	13层	27.3	29.8
12号楼	1层	45.2	47.7
	5层	36.3	37.9
	9层	32.1	34.1
	13层	27.9	29.1
13号楼	1层	44.5	46.9
	5层	36.8	38.1
	9层	32.4	34.5
	13层	27.3	29.3

表4 不同功能区分频振级及最大Z振级

Table 4 Frequency division vibration level and maximum Z vibration level in different function areas dB(A)

	位置	分频振级	最大Z振级
办公区(17号)	1层	65.4	67.8
	2层	63.6	66.2
	3层	62.7	65.4
白地区(14号)	1层	64.4	48.6
	6层	60.2	40.2
	11层	54.3	36.5
	16层	44.6	27.9
白地区(15号)	21层	32.8	25.7
	1层	63.6	46.7
	6层	56.8	39.3
	11层	53.3	35.8
租赁区(16号)	16层	46.1	27.6
	21层	33.3	25.4
	1层	69.3	70.8
	4层	64.8	67.4
	7层	59.6	61.3

表5 各功能区二次结构噪声最大声压级

Table 5 Maximum sound pressure level of secondary structure noise in each functional area dB(A)

	位置	最大声压级
住宅区	1层	37.1
	5层	36.8
	9层	30.0
	13层	24.1
办公区	1层	43.7
	2层	41.5
	3层	38.3
白地区	1层	37.5
	6层	31.3
	11层	26.6
	16层	21.2
租赁区	21层	19.1
	1层	46.7
	4层	41.3
	7层	36.5

### 3 振动控制

#### 3.1 控制方法

按照减振工程的原则,一般从振源、传递路径和受振体方面选择和布置减振措施。考虑项目特点,振源处即停车场各股道可考虑采用减振扣件、钢轨无缝化、道岔减振器、浮置板道床等,传递路径可考虑挖隔振沟或隔振墙,受振体即建筑物处采用减振垫、隔振支座。

项目结合各减隔振措施的特性,综合考虑各功能区超标情况,本项目在住宅区范围内采用减振扣件措施;办公区则选择在建筑底部加减振支座措施;在租赁房靠近咽喉区侧选用隔振垫及高等级减振扣件,布置范围如图9所示。

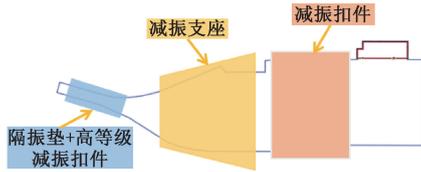


图9 各功能区减隔振措施布置

Fig. 9 Arrangement of vibration isolation and reduction measures in each functional area

弹簧隔振支座参数为外径×内径×厚度×高度=500mm×253mm×27mm×38mm,弹性模量为206GPa,泊松比为0.3,弹簧刚度为95 822N/mm,设置4个弹簧片。减振扣件刚度为15kN/mm,为双层非线性减振扣件。隔振垫等效刚度为0.01N/mm<sup>3</sup>,深度为5m。

### 3.2 减振措施效果分析

根据上节所述减振措施及参数进行有限元模拟计算,并提取减振后超标建筑振动及二次辐射噪声如表6,7所示。

表6 办公区、租赁区振级分析

Table 6 Vibration level analysis of office area and rental area

		dB(A)	
位置	分频振级	最大Z振级	
办公区	1层	56.2	58.9
	2层	55.3	57.5
	3层	33.7	55.6
租赁区	1层	64.8	65.3
	4层	58.9	59.6
	7层	53.5	54.7

表7 办公区、租赁区声压级分析

Table 7 Vibration level analysis of office area and rental area

		dB(A)	
位置	总声压级		
办公区	1层	34.1	
	2层	32.3	
	3层	30.1	
租赁区	1层	37.5	
	4层	35.3	
	7层	32.4	

各功能区增加相应的减隔振措施后,观测位置的振动和二次噪声均有明显下降,各项指标均降低至标准范围内,其中最大Z振级衰减量为4~8.9dB(A),最大声压级衰减量为6.2~9.6dB(A),说明本项目采取的减隔振措施对振动和结构二次噪声具有良好的控制效果。

## 4 结语

1)结合1/3倍频与最大Z振级计算结果,各功能区建筑振动主频集中在63Hz;租赁区由于距离线路最近,其振级超出标准要求,其他功能区均在国

家标准范围之内;办公区和租赁区观测点位置均出现了二次噪声超标的情况,最大超标值为8.7dB(A),白地区建筑和住宅区虽未超出标准,但余量较小。

2)针对多栋建筑均出现振动或二次噪声超标的情况,采用减振措施如下:将车辆段库内及咽喉区普通扣件替换为弹性扣件,降低办公区、白地区、住宅区和租赁区振动;咽喉区上盖办公楼区设置弹簧隔振支座,可缓冲冲击、衰减振动等,对振动较大区域有明显改善作用;租赁住宅侧墙增设隔振垫,进一步改善租赁住宅低层二次噪声超标情况。

3)增加相应的减隔振措施后,各功能区相应项指标均降低至标准范围内,说明本项目采取的减隔振措施对振动和结构二次噪声具有良好的控制效果。

### 参考文献:

- [1] 翁明友,段佐刚,李金宴. 公轨融合背景下公交场站TOD规划选址适应性及设计优化研究[J]. 城市建筑空间, 2023, 30(10): 98-101.  
WENG M Y, DUAN Z G, LI J Y. Adaptability and design optimization of TOD planning site selection for public transport terminals under background of public rail integration[J]. Urban architecture space, 2023, 30(10): 98-101.
- [2] 彭益伦. TOD模式下轨道交通站点地区土地利用现状评价研究——以杭州上城区为例[J]. 城市建筑空间, 2023, 30(3): 82-83.  
PENG Y L. Evaluation of land use status in rail transit station area under TOD mode: taking Shangcheng district, Hangzhou as an example[J]. Urban architecture space, 2023, 30(3): 82-83.
- [3] 马龙祥,刘维宁,刘卫丰,等. 地铁列车振动环境影响预测的薄片有限元-无限元耦合模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(10): 2131-2141.  
MA L X, LIU W N, LIU W F, et al. Sliced finite element-infinite element coupling model for predicting environmental vibration induced by metro train[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2016, 35(10): 2131-2141.
- [4] 邹超,汪益敏,汪朝晖,等. 地铁车辆段咽喉区地面振动传播规律实测与分析[J]. 振动与冲击, 2015, 34(16): 200-206.  
ZOU C, WANG Y M, WANG Z H, et al. Field measurement and analysis of ground vibration in the throat area of metro depot[J]. Journal of vibration and shock, 2015, 34(16): 200-206.
- [5] 余志杭. 地铁振动实测及结构与桩土响应规律研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2015.  
YU Z H. Study on measured vibration of subway and response characteristics of structures, piles, and soil[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2015.
- [6] MELKE J, KRAMER S. Diagnostic methods in the control of railway noise and vibration[J]. Journal of sound and vibration, 1983, 87(2): 377-386.

- [J]. 人民长江,2018,49(21):77-83.
- QU Y, HU X M, ZHAO Y S, et al. Introduction of obstacle treatment technology in pipe jacking[J]. Yangtze river,2018,49(21):77-83.
- [7] 舒钢强. 矩形顶管机施工中遇到的障碍及清障技术[J]. 中国市政工程,2010(4):66-68,85.
- SHU G Q. On the obstacle and obstacle clearing technique during the operation of rectangular pipe-jacking machine [J]. China municipal engineering,2010(4):66-68,85.
- [8] 美国轻. 矩形顶管近距离下穿给水管线变形控制技术[J]. 施工技术(中英文),2024,53(12):71-75.
- GUAN G Q. Deformation control technology of rectangular pipe jacking through water supply pipeline at close distance [J]. Construction technology,2024,53(12):71-75.
- [9] 李江. 软土地区钢顶管施工引起的地表变形规律[J]. 西安科技大学学报,2023,43(6):1149-1157.
- LI J. Ground deformation law of steel pipe jacking construction in soft soils [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology,2023,43(6):1149-1157.
- [10] 李东风,杜一飞,马苗苗. 大断面顶管引起浅覆地表变形的有限元分析[J]. 北京测绘,2023,37(7):949-953.
- LI D F, DU Y F, MA M M. Finite element analysis of shallow stratum surface deformation caused by large section pipe jacking [J]. Beijing surveying and mapping,2023,37(7):949-953.
- [11] 胡政,张杰. 顶管穿越既有变形敏感建筑物的影响分析[J]. 江苏建筑,2023(3):73-76,122.
- HU Z, ZHANG J. Influence analysis of pipe jacking crossing existing deformed sensitive structures [J]. Jiangsu construction,2023(3):73-76,122.
- [12] 段超杰,蒋晓天,于飞. 顶管下穿城市道路地表沉降规律分析[J]. 工程勘察,2023,51(5):35-39.
- DUAN C J,JIANG X T,YU F. Analysis of surface settlement law of pipe jacking under urban road [J]. Geotechnical investigation & surveying,2023,51(5):35-39.
- [13] 陈月香,方欣欣,徐芊,等. 矩形顶管施工参数对地表沉降影响分析及控制[J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版),2023,39(5):576-582.
- CHEN Y X,FANG X X,XU Q, et al. Analysis and control of influence of rectangular pipe jacking construction parameters on surface settlement [J]. Journal of Harbin University of Commerce (natural sciences edition),2023,39(5):576-582.
- [14] 李荣伟,潘兴军. 砂土地基顶管稳定性分析及施工技术[J]. 三峡大学学报(自然科学版),2019,41(S1):29-32.
- LI R W,PAN X J. Stability analysis and construction technology of pipe jacking in sandy soil foundation [J]. Journal of China Three Gorges University (natural sciences),2019,41(S1):29-32.
- [15] 刘钧,张剑锋,龚湘源,等. 基于不同注浆效果的环境变形影响三维数值分析[J]. 工程技术研究,2024,9(9):37-39.
- LIU J,ZHANG J F,GONG X Y, et al. Three-dimensional numerical analysis of environmental deformation effect considering different grouting effects [J]. Engineering and technological research,2024,9(9):37-39.

## (上接第11页)

- [7] COSTA P A, CALÇADA R, CARDOSO A S. Influence of train dynamic modelling strategy on the prediction of track-ground vibrations induced by railway traffic [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of rail and rapid transit,2012,226(4):434-450.
- [8] WETTSCHURECK R G. Measures to reduce structure-borne noise emissions induced by above-ground, open railway lines [J]. 1997.
- [9] 耿传智,廖志军. 地铁振动衰减特性研究[J]. 同济大学学报(自然科学版),2009,37(3):344-348,368.
- GENG C Z,LIAO Z J. Research on attenuation characteristics of subway vibration [J]. Journal of Tongji University (natural science),2009,37(3):344-348,368.
- [10] 由广明,刘维宁. 交叠车站与区间隧道列车振动对环境的影响[J]. 北京交通大学学报,2005,29(4):40-44.
- YOU G M, LIU W N. Environmental vibrations induced by trains' passages through overlapping station and tunnels [J]. Journal of Beijing Jiaotong University,2005,29(4):40-44.
- [11] 邓飞皇,莫海鸿,曾庆军. 地铁运行振动诱发地层和地表动力响应分析[J]. 科学技术与工程,2007,7(3):348-351.
- DENG F H,MO H H,ZENG Q J. Analysis of dynamic response of stratum and ground induced by metro operating [J]. Science technology and engineering,2007,7(3):348-351.
- [12] YANG Y B,HUNG H H. A parametric study of wave barriers for reduction of train-induced vibrations[J]. International journal for numerical methods in engineering,1997,40(20):3729-3747.
- [13] 朱玉星. 地铁运行激励下土层振动的有限元分析与隔振研究[D]. 上海:同济大学,2007.
- ZHU Y X. Finite element analysis and isolation study of soil vibration under subway operation excitation [D]. Shanghai:Tongji University,2007.
- [14] 陈兆玮,徐鸿,尹镗,等. 地铁诱发 TOD 建筑群振动及二次噪声控制[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2023,51(7):63-68.
- CHEN Z W, XU H, YIN Q, et al. Control of metro-induced vibration and secondary noise of TOD building group [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (natural science edition),2023,51(7):63-68.