

# 地铁上盖物业场段库外线小半径曲线 轨道无缝化研究\*

胡志鹏 魏周春 谢 露 刘 杰

(陕西省铁道及地下交通工程重点实验室(中铁一院), 710043, 西安)

**摘 要** [目的]为减小上盖物业场段列车运行产生的振动和噪声对上盖建筑的影响,有必要研究地铁上盖物业场段库外线小半径曲线轨道无缝化设计方案。[方法]介绍了库外线无缝化的必要性;分析了库外线小半径曲线无缝线路的关键参数;基于无缝线路检算原理,对库外线半径为 150 m 的曲线段进行无缝线路检算及优化设计。[结果及结论]当库外线半径为 150 m 的曲线段每 km 铺设 1 667 根新Ⅲ型桥枕,且铺设可无缝化的 7 号弹性可弯尖轨道岔时,能够满足无缝线路铺设要求。库外线无缝线路优化设计方案为:库外线采用新Ⅲ型桥枕,线间距小于 5 m 的两线间采用道砟填平,曲线外侧道床肩宽加至 400 mm,设置砟肩堆高,道床边坡坡率为 1:1.75。所提优化方案能够增强无缝线路的稳定性和安全储备量。

**关键词** 地铁;无缝线路;上盖物业场段;库外小半径曲线  
**中图分类号** U213.9

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.05.020

## Research on Seamless Small-Radius Curved Track for Subway Upper Cover Property Depot External Lines

HU Zhipeng, WEI Zhouchun, XIE Lu, LIU Jie

(Shaanxi Key Laboratory of Railway and Underground Traffic Engineering(FSDI), 710043, Xi'an, China)

**Abstract** [Objective] To reduce vibration and noise impacts from depot train operation on the upper cover property, it is necessary to study the seamless design scheme for small-radius curved tracks on subway upper cover property depot external lines. [Method] The necessity of seamless design for depot external lines is introduced; the key parameters of small radius curved CWR(continuously welded rail) on depot external lines are analyzed. Based on CWR inspection verification principles, CWR inspection verification and optimization designs are conducted for external line curved section with a radius of 150 m. [Result & Conclusion] When 1 667 pieces of new type Ⅲ bridge sleepers per km are laid in the 150 m radius curved sec-

tion of depot external lines, and the No. 7 CWR elastic bendable rail turnout is also laid, CWR laying requirements could be met. The optimal CWR design scheme for depot external lines is: adopting new type Ⅲ bridge sleepers for depot external lines, filling the gap spacing less than 5m between two lines with ballast, widening shoulder width of the outer curve track bed to 400mm, setting elevated ballast shoulders, and setting ballast embankment slope ratio to 1:1.75. The proposed optimization scheme can enhance CWR stability and safety margin.

**Key words** subway; CWR; upper cover property depot; small radius curve outside the depot

随着地铁建设规模的不断扩大,场段上盖物业开发逐渐增多,盖下列车产生的振动可传递至上盖建筑物,影响上盖开发品质。因此,有必要研究减少列车运行过程中产生振动及噪声的方法,提升上盖物业开发品质。上盖物业场段库外线咽喉区的小半径曲线较多,最小曲线半径一般为 150 m,道岔、钢轨接头分布密集,库外线列车运行速度为 15~20 km/h,振动影响主要来源于道岔及有缝线路的轨缝冲击振动<sup>[1]</sup>,小半径曲线地段存在轮轨噪声和尖啸噪声,列车经过道岔的“有害空间”和钢轨接头时会产生撞击噪声<sup>[2]</sup>。根据文献[3]对场段库外线上盖物业的振动测试结果可知,其上盖振动超标量为 3~8 dB。对场段上盖物业开发的减振问题,需重点考虑咽喉区道岔和小半径曲线地段的冲击振动<sup>[4]</sup>,采取合理的减振措施,减少对上盖建筑环境的影响。

本文针对库外线小半径曲线钢轨接头对上盖物业开发的影响问题,可通过库外线的无缝线路设计彻底消除钢轨接头,并结合现场测试数据,优化库外线小半径曲线无缝线路设计方案。本文研究可为上盖物业场段库外线无缝线路设计提供参考。

\* 中铁第一勘察设计院集团有限公司科研开发项目(KY23-C004);中国铁建股份有限公司科技研究开发计划项目(2024-B14)

## 1 库外线无缝化必要性

目前,我国上盖物业场段库外线多采用减振垫道床,即在道床下铺设减振垫,减少振动向下部基础传递,减振垫道床的减振效果良好。但采用减振垫道床后,库外线钢轨接头处的振动仍存在,并未从源头上消除库外线的振动影响。库外线通过铺设无缝线路可消除大量钢轨接头影响,减小库外线的振动及噪声,提升场段上盖物业开发品质,减少养护维修工作量,降低运营成本。根据 HJ 453—2018《环境影响评价技术导则 城市轨道交通》中有缝与无缝线路的噪声修正值,无缝线路减振效果约为 3 dB。上盖物业场段轨道结构所处环境相对稳定,气候条件较好,且钢轨不受太阳照射,为钢轨的无缝化提供了有力条件。

GB 50157—2013《地铁设计规范》中规定,“地下线的直线和曲线半径不小于 300 m 的地段可铺设无缝线路,当曲线半径小于 300 m 时,应进行特殊设计并采取加强措施。”对于小半径曲线无缝线路而言,线路的稳定性最为关键,而影响线路稳定性的因素主要有道床阻力、锁定轨温、温度变化幅度及初始平顺性等<sup>[5]</sup>。目前,线路曲线半径  $R = 150$  m 地段的无缝线路设计无相关规范指导,也缺乏相关的研究成果。因此,有必要对库外线小半径地段铺设无缝线路的可行性进行研究。

## 2 库外线小半径曲线无缝线路

目前,上盖物业场段分为地面及地下两种类型,由于地面场段气温较高,轨温变化幅度大,对无缝线路具有不利影响<sup>[6]</sup>。我国南方地区低温约为 0℃,高温约为 40℃,轨温变化幅度较小,有利于铺设无缝线路。本文根据我国南方城市的气温条件,以南方某城市地面上盖物业场段为例,进行场段库外线小半径曲线无缝化研究。库外线铺设碎石道床,采用 50 kg/m 钢轨,强度等级为 U71Mn,铺设新 II 型轨枕,配套弹条 I 型扣件。当地历史最高气温为 39.2℃,最低气温为 1.5℃。

### 2.1 关键参数分析

场段库外线小半径地段无缝线路检算的主要参数有:钢轨轨温、钢轨支座刚度、道床参数、设计荷载、轨道横向水平力系数等。

#### 2.1.1 钢轨轨温

根据 TB 10015—2012《铁路无缝线路设计规

范》中的规定,最高轨温通常等于当地最高气温加 20℃,最低轨温等于当地最低气温。而对于盖板下不受太阳直射条件下的轨温取值,规范尚未有规定。由于场段上盖物业开发后,轨道结构所处环境相对稳定,受外部气候变化的影响较小,钢轨避免了太阳直射的情况,有利于无缝线路的铺设。针对上盖物业开发后钢轨与气温的关系,对地面上盖物业场段盖下轨温进行现场测试。不同时间下,地面上盖物业场段钢轨轨温测试结果如图 1 所示。由图 1 可知:盖下轨温最大值高于气温 7℃,为考虑一定的安全储备,最高轨温仍取当地最高气温加 10℃,最低轨温取最低气温。

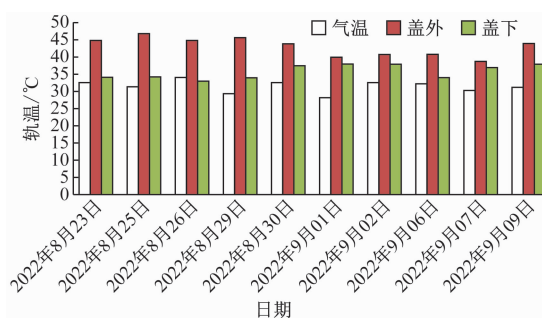


图1 不同时间下地面上盖物业场段钢轨轨温测试结果

Fig.1 Test results of rail temperature for upper cover property depot at different times

#### 2.1.2 钢轨支座刚度

结合 TB 10015—2012《铁路无缝线路设计规范》中相关规定,本文的 II 型轨枕钢轨支座刚度取为 30 kN/mm。

#### 2.1.3 道床参数

TB 10015—2012《铁路无缝线路设计规范》中规定:当新 II 型轨枕铺设标准为 1 840 根/km 时,每股轨道的道床纵向阻力为 9.66 kN/m、等效道床横向阻力为 8.9 kN/m;当新 II 型轨枕铺设标准为 1 760 根/km 时,每股轨道的道床纵向阻力为 8.80 kN/m、等效道床横向阻力为 8.5 kN/m。但规范中未对其他轨枕铺设标准的道床纵向、横向阻力进行规定,因此,不同轨枕铺设标准状态下的道床纵向、横向阻力需结合现场试验结果进行取值。

本文设置 3 种工况的轨枕铺设标准,即 1 667 根/km、1 600 根/km 和 1 440 根/km。每种工况测试 10 组数据,统计轨枕纵向、横向位移为 2 mm 时的道床纵向、横向阻力值。为了便于分析,取 10 组测试结果的平均值进行分析,道床阻力现场测试结果如表 1 所示。当新 II 型轨枕铺设标准为 1 440

根/km 时,道床纵向阻力取为每股轨道 5.36 kN/m、等效道床横向阻力取为 6.9 kN/m。

表 1 道床阻力现场测试结果

Tab. 1 On site test results of ballast resistance

工况编号	Ⅱ型轨枕铺设标准/ (根/km)	每股轨道纵向 阻力/(kN/m)	每股轨道横向 阻力/(kN/m)
工况 1	1 667	7.78	7.95
工况 2	1 660	7.13	7.64
工况 3	1 440	5.36	6.90

#### 2.1.4 设计荷载

地铁列车多采用 B 型车,轴重 $\leq 14$  t,固定轴距为 2.0~2.3 m。无缝线路检算时,以最不利工况进行检算,机车轴重取为 14 t,固定轴距取为 2.3 m,场段内列车运行速度取为 25 km/h。

#### 2.1.5 轨道横向水平力系数

TB 10015—2012《铁路无缝线路设计规范》中,对曲线半径小于 300 m 地段的横向力水平系数取值未进行规定,为进行小半径曲线地段无缝化设计,考虑一定的安全储备,曲线半径小于 300 m 地段的轨道横向水平力系数 $f$ 按 3.0 取值。

### 2.2 无缝线路检算

#### 2.2.1 稳定性检算

稳定性检算采用无缝线路稳定性计算公式,可以表示为:

$$[P] = P_w/K \quad (1)$$

式中:

$P_w$ ——钢轨温度压力;

$[P]$ ——钢轨允许温度压力;

$K$ ——安全系数,本文取为 1.3。

#### 2.2.2 钢轨强度检算

钢轨强度检算主要针对钢轨动弯应力 $\sigma_d$ 、钢轨基本温度应力 $\sigma_t$ 、钢轨制动附加应力 $\sigma_z$ 叠加进行强度检算分析,应满足以下要求:

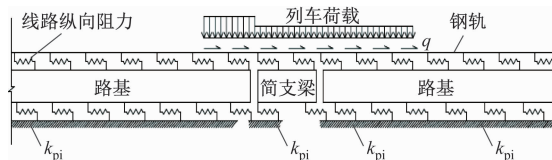
$$\sigma_d + \sigma_t + \sigma_z \leq [\sigma] \quad (2)$$

式中:

$[\sigma]$ ——允许应力,本文取为 351.5 MPa。

采用无缝线路通用计算程序 BCWR 分析列车

制动时的钢轨附加应力。模型中设置长为 1 m 的简支梁,简支梁两侧设置路基模型,钢轨制动附加力计算模型示意图如图 2 所示。路基地段钢轨制动力计算结果如图 3 所示。由图 3 可知:列车在路基段的最大钢轨制动力为 50.543 kN,即制动应力为 7.68 MPa。根据我国铁路建设经验,路基地段列车制动应力一般取为 10 MPa。从安全方面考虑,本次检算钢轨制动应力按 10 MPa 取值。



注: $k_{pi}$ 为下部基础支撑刚度; $q$ 为制动力。

图 2 钢轨制动附加力计算模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of calculation model for rail braking additional force

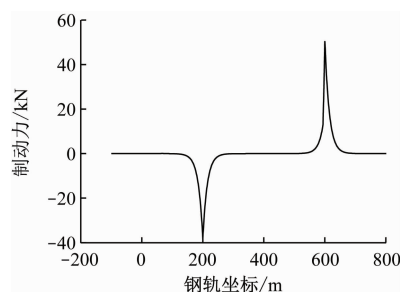


图 3 路基地段钢轨制动力计算结果

Fig. 3 Calculation results of rail braking force in subgrade sections

#### 2.2.3 不同参数取值下无缝线路检算

##### 2.2.3.1 铺设标准为 1 440 根/km 的Ⅱ型轨枕

上盖物业场段库外线轨枕铺设标准一般为 1 440 根/km,不同曲线半径下的无缝线路参数计算结果如表 2 所示。由表 2 可知:对于库外线曲线半径为 150 m 的小半径地段,当设计锁定轨温为 44℃ 时,方可满足无缝线路铺设要求。由于锁定轨温过高,现场难以实施,需进一步调整锁定轨温、轨枕铺设间距和轨枕类型等不同计算参数,结合不同因素确定最佳的铺设标准。

表 2 不同曲线半径下的无缝线路参数计算结果

Tab. 2 Calculation results of CWR parameters under different curve radii

曲线半径/ m	钢轨底部动弯 应力/MPa	钢轨制动 应力/MPa	允许温度 压力/kN	线路稳定性 允许温升/℃	强度条件下 允许温降/℃	断缝条件下 允许温降/℃	锁定轨温/ ℃	钢轨最大 温升/℃	钢轨最大 温降/℃
100	179.69	10	429.17	13.2	67.1	50.1	39~49	10.2	47.5
150	172.71	10	584.22	17.9	69.9	50.1	39~49	10.2	47.5



### 2.2.3.2 不同轨道铺设标准

分别研究库外线铺设不同轨枕类型及铺配置下的无缝线路检算结果。具体工况参数如表3所示,不同铺设标准下的无缝线路参数计算结果如表4所示。

由表4可知:小半径曲线段钢轨强度检算的裕量较大,主要受控于无缝线路的稳定性;在锁定轨温为30~40℃条件下,工况6的钢轨允许温升裕量仅为3.8℃,虽可满足无缝线路铺设要求,但无缝线路稳定性的裕量较小;在锁定轨温为27~33℃条件下,工况7的钢轨允许温升为29.5℃,而其钢轨最

大温升为22.2℃。相较于工况6,工况7不仅节约了建设投资成本,还提高了无缝线路稳定性的安全储备量。

表3 具体工况参数

Tab.3 Detailed parameters for specific working conditions

工况编号	曲线半径/m	轨枕类型	轨枕铺设标准/(根/km)
工况4	150	Ⅱ型	1 667
工况5	150	Ⅱ型	1 760
工况6	150	Ⅱ型	1 840
工况7	150	Ⅲa型	1 667

表4 不同铺设标准下的无缝线路参数计算结果

Tab.4 Calculation results of CWR parameters under different laying standards

工况编号	钢轨底部动弯应力/MPa	钢轨制动应力/MPa	允许温度压力/kN	线路稳定性允许温升/℃	强度条件下允许温降/℃	断缝条件下允许温降/℃	锁定轨温/℃	钢轨最大温升/℃	钢轨最大温降/℃
工况4	164.16	10	678.75	20.8	71.6	60.9	30~40	19.2	38.5
工况5	162.57	10	716.62	22.0	72.2	64.2	30~40	19.2	38.5
工况6	161.26	10	749.47	23.0	72.7	67.2	30~40	19.2	38.5
工况7	161.38	10	961.24	29.5	72.7	83.8	27~33	22.2	31.5

### 2.2.3.3 盖下与盖外无缝线路对比

场地上盖物业开发后,钢轨避免了阳光照射,其轨温相对较低。在曲线半径为150 m的小半径地段,盖下和盖外无缝线路钢轨最大温升与轨枕铺设标准间的关系曲线,如图4所示。由图4可知:无上盖物业开发的钢轨最大温升均超出了稳定性允许温升,不满足无缝线路铺设要求;盖下无缝线路的钢轨温升均满足无缝线路铺设要求。

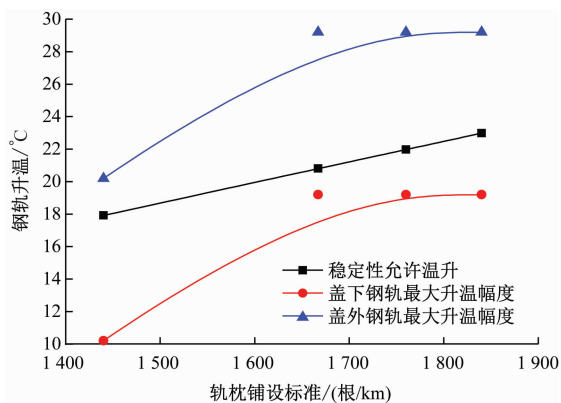


图4 盖下和盖外无缝线路钢轨最大温升与轨枕铺设标准间的关系曲线

Fig.4 Relationship curves between CWR maximum temperature rise under/outside the cover and sleeper laying standards

## 3 库外线无缝线路方案设计

基于前文分析可知,对于钢轨轨温温差较小的城市,上盖物业场段库外线轨道铺设标准为1 667根/km的Ⅲa型轨枕具备无缝线路铺设条件。结合理论计算,为确保库外线无缝线路的稳定性和可实施性,对库外线轨道结构进行优化设计。

1) 轨枕设计。根据无缝线路检算结果,当铺设1 667根/km的Ⅲa型轨枕时,钢轨允许温升裕量为7.3℃。新Ⅲ型桥枕与Ⅲa型轨枕具有相同的轨枕长度及钉孔距,其轨枕横断面面积更大,横向阻力较Ⅲa型轨枕增大了10%。为进一步增加无缝线路的稳定性,增大安全储备量,可采用横向阻力更大的新Ⅲ型桥枕。

2) 道床优化设计。既有普通有缝线路的库外线道床肩宽为200 mm,未设置砟肩堆高,道床边坡坡率为1:1.5。为进一步增强库外线小半径曲线地段道床的横向稳定性,在既有道床的基础上,优化设计一种线间距小于5 m、两线间采用道砟填平的无缝化道床,其曲线外侧道床肩宽增大至400 mm,并设置150 mm砟肩堆高,道床边坡坡率优化为1:1.75。普通道床和优化无缝化道床设计示意图如图5所示。

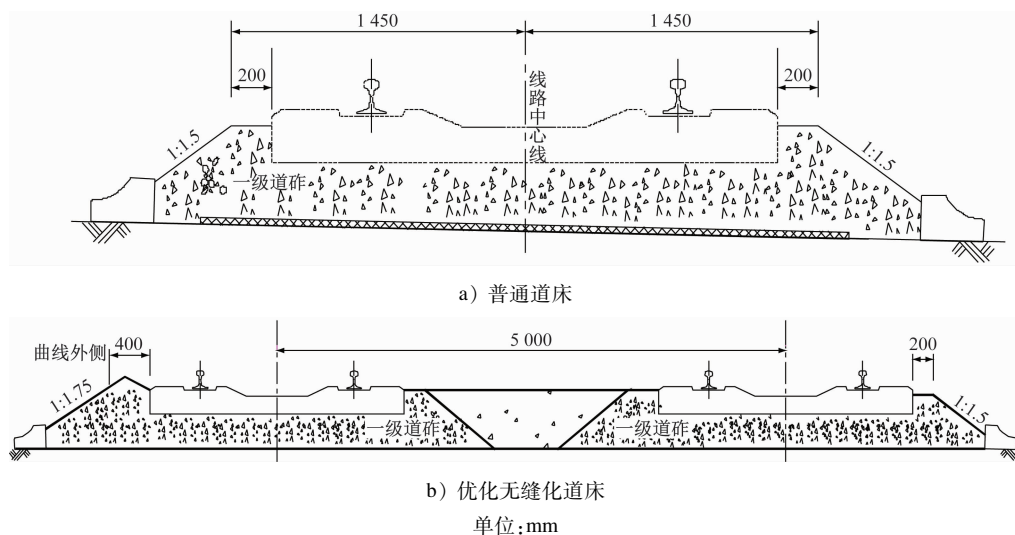


图5 普通道床和优化无缝化道床设计示意图

Fig.5 Design schematic diagram of ordinary track bed and optimized seamless track bed

3) 道岔设计。库外线小半径地段满足铺设无缝线路要求后,需进一步消除道岔接头,道岔均设置在直线段,无稳定性因素的影响。采用可无缝化的7号道岔,其尖轨跟端可与区间钢轨冻结,实现道岔无缝化。考虑到部分场段已按有缝线路设计,为保证库外线无缝化不影响场段土建工程,采用与既有7号有缝道岔前长、后长一致的可无缝化道岔,确保道岔接口无变化,保证库外线无缝化的顺利实施。

4) 钢轨接头连接型式。库外线采用25 m定尺长的标准50 kg/m钢轨,钢轨结构数量较多。为确保接头连接质量,提升库外线列车运行平稳性,建议除道岔内部采用冻结接头外,其余库外线均采用焊接接头。

#### 4 结语

1) 通过无缝线路检算,在库外线曲线半径为150 m的小半径曲线段,当铺设1 667根/km的Ⅲa型轨枕时,在锁定轨温为27~33℃条件下,可满足无缝线路铺设要求。为进一步增大无缝线路稳定性的安全储备量,可采用新Ⅲ型桥枕代替Ⅲa型轨枕。

2) 在道岔及库外线均铺设无缝线路时,采用可无缝化的7号弹性可弯尖轨道岔。道岔内采用冻结接头,其余钢轨采用焊接接头结构。

3) 为优化库外线小半径曲线地段道床,在既有道床基础上,设计一种线间距小于5 m、两线间采用道砟填平的优化无缝化道床,曲线外侧道床肩宽增大至400 mm,并设置150 mm的砟肩堆高,道床边

坡坡率优化为1:1.75。

通过采取上述一系列优化措施,对于南方低温较高的城市,由于场段盖下温差较小,可实现库外线无缝线路的铺设,消除道岔区及小半径曲线段钢轨接头问题,减少列车运行产生的振动及噪声,提升上盖物业开发品质。

#### 参考文献

- [1] 马晓华,曲村,郑瑞武. 车辆段上盖开发轨道振动噪声控制技术[J]. 现代交通技术, 2021, 18(2): 83.  
MA Xiaohua, QU Cun, ZHENG Ruiwu. Research on technologies of track vibration and noise control for the development of subway depot superstructure [J]. Modern Transportation Technology, 2021, 18(2): 83.
- [2] 陈建党,吴佩,林博文. 地铁车辆段上盖物业开发的减振降噪技术研究[J]. 智能城市, 2021, 7(13): 5.  
CHEN Jiandang, WU Pei, LIN Bowen. Research on vibration isolation and noise reduction technology for the upper cover of metro depot[J]. Intelligent City, 2021, 7(13): 5.
- [3] 邹超. 地铁车辆段及上盖建筑物振动传播规律及减振技术研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2017: 28.  
ZOU Chao. Train-induced vibration transmission and mitigation in metro depot and over-track buildings. [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017: 28.
- [4] 董光辉. 带有上盖物业的地铁车辆基地试车线不同轨道结构对邻近建筑物振动影响分析[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(10): 67.  
DONG Guanghui. Vibration influence of different track structures on adjacent buildings for the test line of metro vehicle base with cover property[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(10): 67.

(下转第134页)

- trol of ancient buildings[J]. China Civil Engineering Journal, 2023, 56(1): 1.
- [2] 杨娜, 李天昊, 刘威, 等. 中国古建筑木结构健康监测 Benchmark 平台[J]. 土木工程学报, 2022, 55(6): 1.  
YANG Na, LI Tianhao, LIU Wei, et al. Health monitoring Benchmark platform of Chinese ancient wooden structure[J]. China Civil Engineering Journal, 2022, 55(6): 1.
- [3] DAI L, YANG N, ZHANG L, et al. Monitoring crowd load effect on typical ancient Tibetan building[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2016, 23(7): 998.
- [4] 吴贤国, 杨赛, 田金科, 等. 盾构近接施工对既有隧道影响参数分析及近接度分区研究[J]. 土木工程与管理学报, 2021, 38(4): 96.  
WU Xianguo, YANG Sai, TIAN Jinke, et al. Analysis on the influence of shield tunneling construction on the proximity of existing tunnels and research on proximity zoning[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2021, 38(4): 96.
- [5] 骆瑞萍, 陈保国, 闫腾飞, 等. 淤泥地层中盾构上穿近接地铁线施工稳定性研究[J]. 铁道标准设计, 2020, 64(10): 88.  
LUO Ruiping, CHEN Baoguo, YAN Tengfei, et al. Construction stability of shielded tunnel overcrossing an adjacent metro tunnel in silt stratum[J]. Railway Standard Design, 2020, 64(10): 88.
- [6] 陈卓, 孔超. 地铁车站隧道群近接既有桥梁结构施工的安全影响分析[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(增刊2): 1235.
- CHEN Zhuo, KONG Chao. Study on the influence of the construction of metro station tunnel group on the adjacent existing bridge structure [J]. Modern Tunnelling Technology, 2018, 55(S2): 1235.
- [7] 李恒一, 王志杰, 何晟亚, 等. 地铁基坑下穿铁路桥的桥墩保护设计方案合理性研究[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(7): 180.  
LI Hengyi, WANG Zhijie, HE Shengya, et al. Rationality study on pier protection and design scheme of metro foundation pit under crossing railway bridge [J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(7): 180.
- [8] 胡建林, 孙利成, 崔宏环, 等. 基于修正摩尔库伦模型的深基坑变形数值分析[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(18): 7717.  
HU Jianlin, SUN Licheng, CUI Honghuan, et al. Numerical analysis of deep foundation pit deformation based on modified Mohr-coulomb model[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(18): 7717.
- 收稿日期:2023-03-13 修回日期:2023-04-13 出版日期:2025-05-10  
Received:2023-03-13 Revised:2023-04-13 Published:2025-05-10  
• 通信作者:何晟亚,工程师,410160733@qq.com  
• ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

#### (上接第 120 页)

- [5] 魏贤奎, 王平, 庞玲, 等. 一种小半径曲线桥上无缝线路稳定性加强方案研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2012, 9(4): 14.  
WEI Xiankui, WANG Ping, PANG Ling, et al. One strengthening scheme of stability of small radius curve continuous welded rail on bridge[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2012, 9(4): 14.
- [6] 张大超. 半径 250 m 曲线无缝线路稳定性分析及加强措施[J]. 高速铁路技术, 2021, 12(1): 54.  
ZHANG Dachao. Analysis and reinforcement measures for stability of CWR with a radius of 250 m[J]. High Speed Railway Technology, 2021, 12(1): 54.
- 收稿日期:2023-03-08 修回日期:2023-09-19 出版日期:2025-05-10  
Received:2023-03-08 Revised:2023-09-19 Published:2025-05-10  
• 通信作者:胡志鹏,高级工程师,779355629@qq.com  
• ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

#### (上接第 127 页)

- [6] 余俊, 翁贤杰, 樊文胜, 等. 松散地层隧道进洞段管棚注浆加固效应分析[J]. 山东大学学报(工学版), 2020, 50(6): 92.  
YU Jun, WENG Xianjie, FAN Wensheng, et al. Analysis of pipe roof grouting reinforcement effect at tunnel entrance in loose stratum[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2020, 50(6): 92.
- [7] 王海洋. 浅埋暗挖黄土隧道下穿铁路道岔区技术研究[J]. 铁道工程学报, 2016, 33(8): 85.  
WANG Haixiang. Research on the technology for shallow mining tunnel in loess area crossing railway turnout zone[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2016, 33(8): 85.
- [8] 戴志仁, 任建, 李小强, 等. 富水砂卵石地层盾构隧道穿越铁路咽喉区道岔群技术研究[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(6): 1005.  
DAI Zhiren, REN Jian, LI Xiaoqiang, et al. Technologies for shield tunnel crossing underneath turnout groups of railway turnout area in water-rich sandy cobble stratum[J]. Tunnel Construction, 2019, 39(6): 1005.
- 收稿日期:2023-08-09 修回日期:2023-09-12 出版日期:2025-05-10  
Received:2023-08-09 Revised:2023-09-12 Published:2025-05-10  
• 通信作者:姜键骏,副教授,jiangjianjun@zime.edu.cn  
• ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license