

基于 Midas GTS 有限元软件的下穿既有 轨道交通结构安全保护研究^{*}

顾章川

(华设计集团股份有限公司, 210014, 南京)

摘要 [目的]随着城市轨道交通网络的迅速扩张,多线路交织穿越已成为城市建设的普遍现象,特别是新建隧道以矿山法施工方式下穿既有轨道交通结构的情况日益增多,故有必要对下穿既有轨道交通结构安全保护进行深入研究。[方法]以某市轨道交通8号线矿山法隧道下穿既有轨道交通3号线安全防护项目为依托,运用 Midas GTS 有限元软件,模拟了不同外部作业工况对上部已建轨道交通结构的影响。通过对各施工工序下既有轨道交通结构变形特征的详细分析,以及数值模拟结果与现场监测数据的对比分析,探讨了施工对既有结构的影响。[结果及结论]数值模拟结果显示:新建轨道交通8号线采用矿山法下穿隧道施工时,引起的既有轨道交通结构变形均在控制指标范围内。主体结构水平位移最大值为0.54 mm,竖向位移最大隆起量为1.92 mm。而现场实测数据显示,既有轨道交通主体结构的水平位移最大值为0.50 mm,竖向位移最大值为1.60 mm。这表明,在合理选取参数的前提下,数值模拟作为一种安全风险评估手段,其模拟结果与实测值较为吻合。此外,数值模拟还能准确预测结构受影响的最不利位置及程度,对现场施工及监测具有重要的指导作用。

关键词 隧道施工;下穿轨道;安全保护;变形监测

中图分类号 TP3;TV554+.4

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.03.034

Safety Protection of Under-passing Existing Rail Transit Structures Based on Midas GTS Finite Element Software

GU Zhangchuan

(China Design Group Co., Ltd., 210014, Nanjing, China)

Abstract [Objective] With the rapid expansion of urban rail transit networks, the intersection of multiple lines has become a common phenomenon in urban construction. In particular, the increasing cases of newly constructed tunnels using the mining method under-passing existing rail transit structures necessitate in-depth research on the safety protection of these structures. [Method] Based on the safety protection project of

a city's Rail Transit Line 8 mining method tunnel under-passing existing Rail Transit Line 3, Midas GTS finite element software is used to simulate the impact of different external working conditions on the upper part existing rail transit structure. Through a detailed analysis of the deformation characteristics of the existing rail transit structure under various construction procedures, as well as a comparative analysis of numerical simulation results and the on-site monitoring data, the construction impact on above-mentioned existing structures is explored. [Result & Conclusion] Numerical simulation results show that when the new Metro Line 8 using mining method for the under-passing tunnel construction, the deformations of the existing rail transit structure remain within the control indicators. The maximum horizontal displacement of the main structure is 0.54 mm, and the maximum upward deflection of vertical displacement is 1.92 mm. On-site measured data indicate that the maximum horizontal displacement of the existing rail transit main structure is 0.50 mm, and the maximum vertical displacement is 1.60 mm. This shows that under reasonable parameter selection, numerical simulation, as a safety risk assessment tool, provides simulation results in good agreement with actual measurements. Additionally, numerical simulation can accurately predict the most adversely affected positions and the extent of structural impact, providing significant guidance for on-site construction and monitoring.

Key words tunnel construction; under-passing track; safety protection; deformation monitoring

近年来,随着城市轨道交通网络的迅猛扩展,围绕其开展的外部建设项目数量显著上升,多线路间的交织与穿越现象愈发频繁,已成为城市建设中不可忽视的普遍现象。在新建隧道穿越既有轨道交通线路的过程中,如何确保既有隧道的运营安全,已成为亟待解决的核心挑战与关键问题。针对盾构下穿既有隧道的问题,国内外学者已通过经验

^{*} 华设计集团股份有限公司科研项目(KY2021026)

公式、理论解析、数值模拟等手段进行了广泛研究^[1-5]。其中,文献[1-2]对传统随机介质理论进行了改进,构建了隧道下穿施工引起的既有隧道及地层变形预测模型。文献[3]则采用 Pasternak 双参数基础模型,将既有隧道简化为由剪切、拉伸和压缩弹簧连接的一系列短梁,为施工前评估对既有隧道的影响提供了便捷有效的工具。此外,文献[5-6]基于实际工程案例,深入分析了施工活动对既有轨道交通结构的影响,并提出了相应的变形控制措施。

本文聚焦于某市轨道交通 8 号线(以下简称“8 号线”)采用矿山法隧道施工穿越既有轨道交通 3 号线(以下简称“3 号线”)的安全防护问题。通过运用数值模拟技术和现场实地监测方法,本文系统探究了隧道下穿施工对既有轨道交通线路产生的变形影响。研究结果显示,施工活动对既有隧道的变形影响在可控范围内。同时,本文还提出了有效的变形控制措施,旨在为同类工程提供有价值的参考数据和经验借鉴,确保在类似复杂环境下的轨道交通施工安全、顺利进行。

1 工程概况及地质

1.1 工程概况

8 号线一期工程中的某一车站设计为站前折返站,为满足一期运营的停车需求,设置了本段暗挖区间。该区间采用矿山法进行施工,左、右线的长度均为 63.0 m,其工程平面位置具体如图 1 所示。在暗挖区间穿越车站的范围内,采用了直径为 89 mm、长度为 8 000 mm 的长管棚作为初期支护措施。对于车站底板以下的部分,则采用了直径为 32 mm 的钢花管对拱顶以上 1.5 m 范围内的围岩进行了注浆加固,并形成了止水帷幕。在标准段,循环进尺的长度被设定为 0.5 m。此外,该暗挖区间需要下穿 3 号线车站的主体结构,其中下穿段的初期支护拱顶与既有的 3 号线车站主体结构底板之间的最小净距离达到了 2.2 m,而与下翻底纵梁之间的最小净距离则为 0.982 m。暗挖区间的最大地面覆土厚度约为 19.99 m,且主要穿越的土层为中风化砂岩层。8 号线暗挖区间与 3 号线既有车站的剖面关系详见图 2。

1.2 地质条件

根据轨道交通 8 号线一期工程的岩土工程勘察报告,该地铁站地貌单元为一级阶地,场地地势平缓

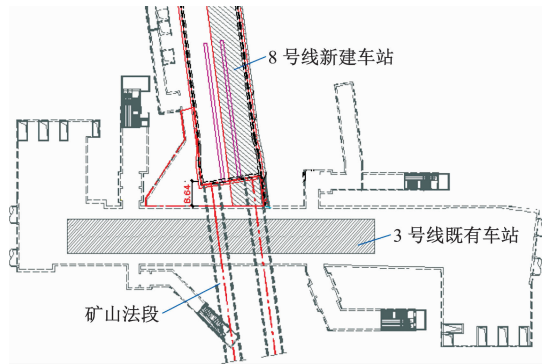
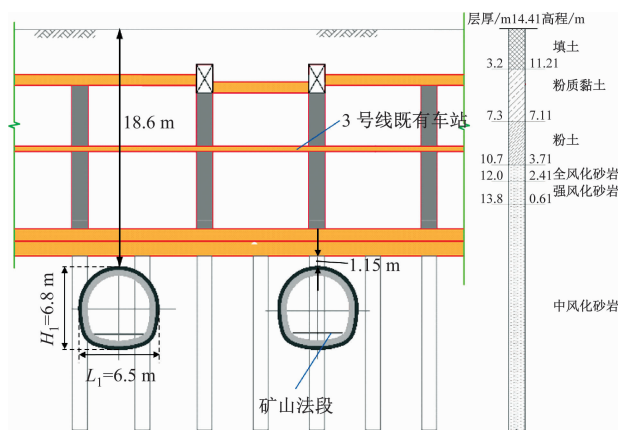


图 1 8 号线新建车站与 3 号线既有车站平面位置图
Fig. 1 Plan location diagram of Line 8 newly-built station and Line 3 existing station



注: L_1 为隧洞跨度; H_1 为隧洞高度。

图 2 8 号线暗挖区间与 3 号线既有车站剖面关系图
Fig. 2 Sectional relation diagram between Line 8 underground-excavated interval and Line 3 existing station

开阔,自然坡度约 $3^\circ \sim 5^\circ$,标高在 23 ~ 27 m 之间。现场岩土分层自上而下依次为填土、粉质黏土、粉土、粉砂、风化砂岩,各岩土层物理力学参数如表 1 所示。

2 安全评估分析

2.1 基于 MIDAS/GTS 有限元软件的三维数值模型

为了模拟矿山法隧道下穿既有轨道交通结构在施工各工况下的受力与变形特性,采用有限元软件 MIDAS/GTS 构建了相应的数值模型。为确保模拟计算的准确性并排除边界效应的影响,遵循圣维南原理,模型在纵向和横向上的尺寸均设定为基坑开挖深度的 2 至 3 倍。在计算过程中,边界条件设定如下: x 轴方向施加 x 向约束, y 轴方向施加 y 向约束,模型底部施加竖向约束,而上表面则设定为自由面。所构建的三维有限元数值模型如图 3 所示。

表 1 土层物理力学参数
Tab.1 Physical and mechanical parameters of soil layers

土层编号	土层名称	重度 $\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	固结快剪		基床系数/(MPa/m)		渗透系数 $K/(\text{m}/\text{d})$	地基承载力 F_{ak}/kPa
			黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\phi/(\text{°})$	水平 K_{h}	垂直 K_{v}		
(0)	人工填土	18.0	10.0	12.0	10	8	0.100~5.000	
(1)1	粉质黏土	19.7	30.0	13.0	20	25	0.024	120
(1)2-1	粉土	20.1	16.7	23.3	25	25	0.500	130
(7)1	全风化泥质砂岩	20.0	30.0	16.1	39	43	0.500~1.000	250
(7)2	强风化泥质砂岩	23.4	100.0	25.0	200	200	0.500	400
(7)3	中风化泥质砂岩	25.7	300.0	31.0	250	300	0.050	800

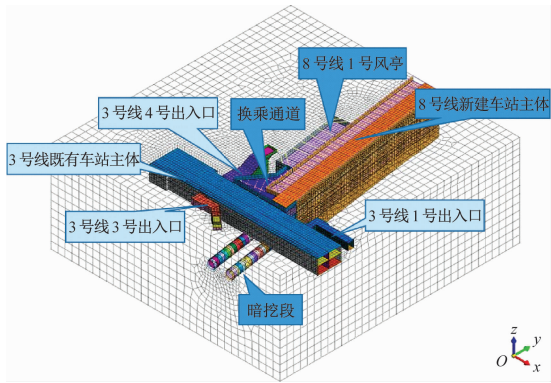


图 3 三维有限元数值模型
Fig.3 Three-dimensional finite element numerical model

依据项目相关资料,采用不同类型的单元来模拟项目场地内的土体和支护结构,并为它们分配相应的材料参数。具体而言,场地内的土体采用3D实体单元进行模拟,车站的结构墙、板以及围护结构等则采用2D板单元,而车站的结构梁、支撑以及冠梁等则使用梁单元进行模拟。对于矿山法施工的模拟,初期支护和临时仰拱等结构采用2D板单元,二次衬砌则采用3D实体单元。

为确保模拟计算的可行性,对有限元模型做出以下假设:

- 1) 岩土体的构造应力被忽略,仅考虑自重应力作为初始地应力;
- 2) 结构周围的土体被视为连续、均质且各向同性的弹塑性体,采用硬化模型进行计算;
- 3) 鉴于矿山法施工属于临时性工程,且施工周期较短,因此在模拟计算中未考虑土体的长期行为影响,如固结和蠕变等因素。

2.2 计算工况

根据施工工序,矿山法暗埋段的施工在8号线新建车站之后进行。通过上下台阶法来模拟隧道的整个施工过程,其中上台阶的高度为3.4 m,进深

为5.0 m,下台阶的高度同样为3.0 m。在此过程中,选取了左右线开挖至1/4处、开挖至1/2处以及开挖完成这六个关键工况进行研究。

根据矿山法的施工顺序,本项目的数值模拟施工工况可以总结为以下7个关键工况:工况一(盾构井破洞)、工况二(左线开挖1/4)、工况三(左线开挖1/2)、工况四(左线开挖完成)、工况五(右线开挖1/4)、工况六(右线开挖1/2)以及工况七(右线开挖完成)。

2.3 矿山法施工对3号线主体结构位移影响分析

MIDAS/GTS的施工阶段分析功能采用累加模型,并累加各施工阶段的分析结果。鉴于暗挖区间施工对既有隧道变形的影响主要体现在竖直方向上,因此提取了各工况下3号线车站主体结构的z向位移变化云图,如图4所示。同时,各工况施工对车站结构位移的具体影响见表2。

根据图4所示结果,矿山法施工段对车站主体结构产生了垂直于施工方向的竖向位移影响。随着开挖进尺的加深,竖向位移的最大隆沉变形量逐渐趋向于开挖面。具体而言,在左线暗挖法隧道掘进至1/2位置时,既有3号线车站底板的最大隆起量达到了1.92 mm。根据施工方案分析,这种上抬现象可能由长管棚及围岩注浆加固引起,但整体变形量保持在较小范围内,符合规范中的变形要求。

由表2提供的数据可知,在暗埋段开挖过程中,既有3号线车站结构局部出现了水平位移变化。其中,与隧道长轴方向(x向)的变形量相对较小,最大值仅为0.13 mm,出现在左线掘进至1/4时;而与隧道长轴平面垂直的方向(y向)的最大水平位移变形量为0.54 mm,同样发生在左线掘进至1/4时,且后续y向水平位移变化较为稳定,波动较小。综上所述,车站主体结构在水平和竖向的位移均低于控制

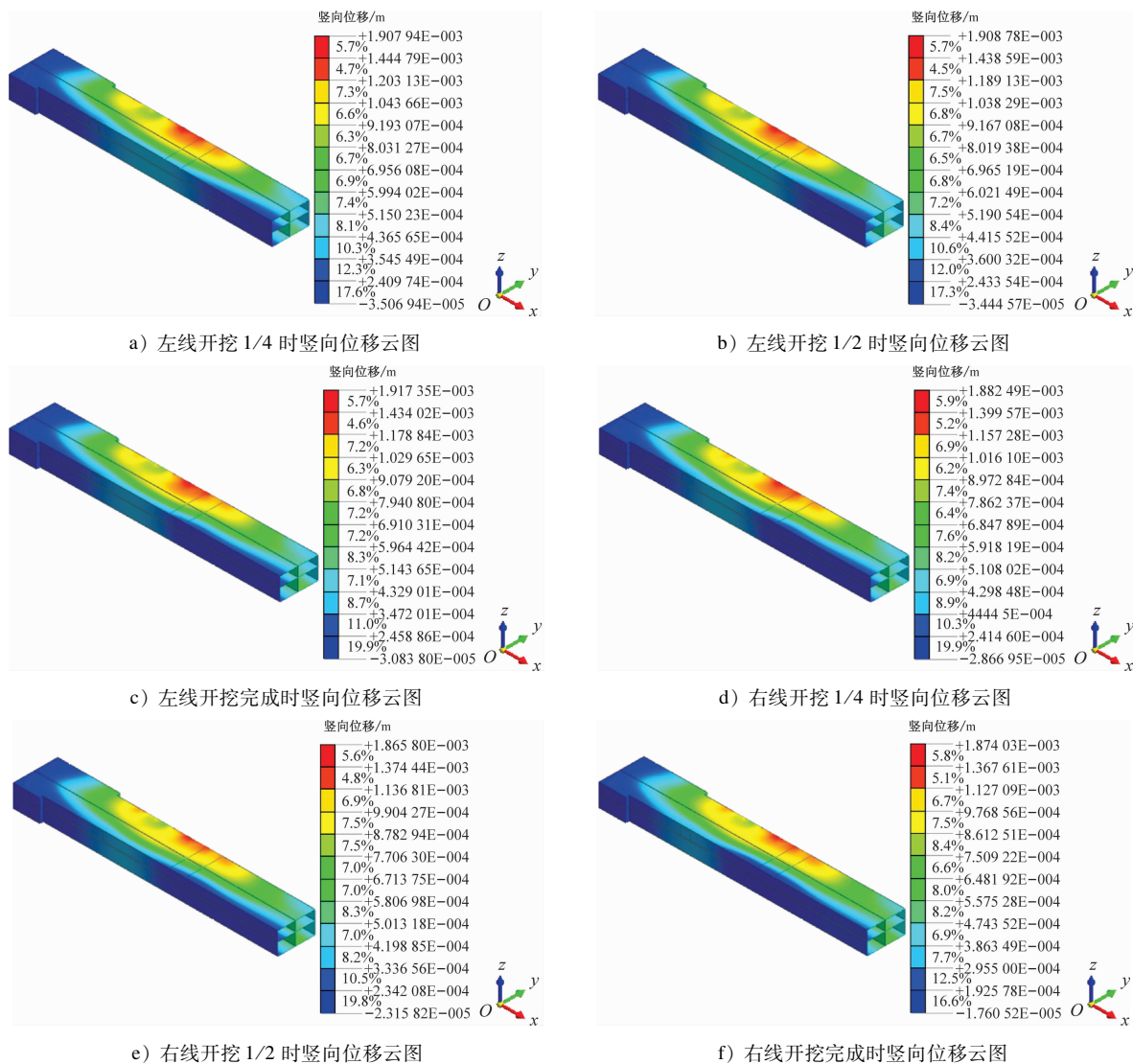


图4 各工况下3号线车站主体结构位移云图(z向)

Fig. 4 Displacement nephogram of Line 3 station main structure under each working condition (z direction)

表2 各工况施工对既有车站结构的位移影响

Tab.2 Displacement impact of various construction conditions on existing station structure

工况	主体结构位移/mm		
	水平位移		竖向位移
	x 向	y 向	
工况二:左线开挖 1/4	0.13	0.54	1.91
工况三:左线开挖 1/2	0.12	0.53	1.92
工况四:左线开挖完成	0.11	0.53	1.92
工况五:右线开挖 1/4	0.11	0.53	1.89
工况六:右线开挖 1/2	0.10	0.54	1.87
工况七:右线开挖完成	0.10	0.54	1.87

值 5 mm,符合规范要求。因此,可以判断本项目施工对邻近 3 号线车站主体结构的位移影响处于可控

状态。

3 涉轨保护区监测

3.1 监测项目及方法

为确保该工程及其周围环境在施工期间的安全稳定,综合矿山法施工对 3 号线主体结构影响的安全评估分析,在暗埋段隧道施工过程中,需要对既有车站主体结构进行监测,在施工主要影响区需要对监测断面进行加密,并采用适当的方案进行监测。监测项目及监测方法见表 3,监测点布设断面图如图 5 所示。

3.2 监测频率

该监测项目采用自动化监测和人工复核监测,各监测项目的监测频率如表 4 所示。

表 3 既有车站监测项目及方法
Tab.3 Existing station monitoring projects and methods

监测对象	监测项目	测点布设	监测方法
3 号线 既有车站	车站竖向位移	主要影响区 3 m 1 个断面;次要影响区 10 m 1 个断面	自动化监测(及人工复测)
	车站水平位移	主要影响区 3 m 1 个断面;次要影响区 10 m 1 个断面	自动化监测(及人工复测)
	道床竖向位移	主要影响区 3 m 1 个断面;次要影响区 10 m 1 个断面	自动化监测(及人工复测)
	道床水平位移	主要影响区 3 m 1 个断面;次要影响区 10 m 1 个断面	自动化监测(及人工复测)
	道床与轨道变位	主要影响区 3 m 1 个断面;次要影响区 10 m 1 个断面	人工监测
	裂缝、变形缝张开量	依据现场调查情况确定	人工监测

注:现场巡视监测方法为外部作业情况、车站主体结构、监测设施。

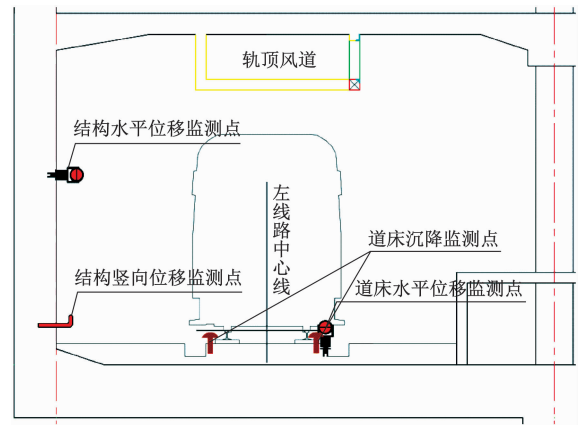


图 5 监测点布设断面图

Fig. 5 Profile diagram of monitoring point layout

表 4 各施工阶段监测频率
Tab.4 Monitoring frequency at each construction stage

监测方法	监测对象	监测项目	监测频率		
			洞门破除	暗挖	暗挖完成
自动化 监测	3 号线 既有车站	车站及 道床沉降	1 d/次	3 次/d	1 d/次
	3 号线 既有车站	车站及 道床水平	1 d/次	3 次/d	1 d/次
人工校核			7 d/次	3 d/次	15 d/次
现场巡视			1 d/次,人工监测时巡视		

3.3 安全评估与现场实测数据对比

表 5 为现场监测过程中轨道交通结构各变形量的最大值统计数据表。根据现场实测数据分析,8 号线新建车站项目在施工期间引发的轨道交通结构各项变形指标均处于控制值范围内,且未触发任何监测预警情形。车站结构的竖向位移实测趋势与安全评估中的沉降趋势相吻合,其实测最大值为 1.60 mm,低于安全评估所设定的最大值 1.92 mm;同样地,车站结构的水平位移实测趋势也与安全评估的沉降趋势一致,其实测最大值为 0.50 mm,小于

安全评估的最大允许值 0.54 mm,两者之间的差异较小。

表 5 现场实测轨道交通结构各变形量最大值统计数据表
Tab.5 Statistics of field-measured maximum deformation of each rail transit structure

监测项目	测点编号	变形量/mm	
		实测最大值	报警值
车站结构沉降	JGX-C9	1.6	± 3
道床结构沉降	DBX-C7	1.4	± 3
车站结构水平	JGX-S8	0.5	± 3
道床结构水平	DBX-S7	0.3	± 3

4 结语

本文以新建轨道站点影响已有轨道交通结构案例为背景,采用 Midas GTS 模拟研究了地铁站点施工对于轨道交通结构的影响,介绍了轨道交通结构安全保护监测方案,并对比了数值模拟与现场实测数据的差异,为其他类似工程提供参考。研究工作得到了以下结论:

1) 轨道交通 8 号线新建站施工引起邻近 3 号线轨道交通结构发生不同程度的变形,但均在控制指标范围内,轨道交通结构安全可控。

2) 采用 Midas GTS 的三维数值模拟可考虑各种工况下外部作业对轨道交通结构的影响,并计算出对结构的最不利影响程度及位置。数值模拟结果作为一种评估手段,在各参数合理选取的前提下,其计算结果可为其他工程提供参考。

参考文献

[1] 徐强,朱永全,雷升祥,等. 隧道下穿施工引起既有隧道及地层变形预测的改进随机介质理论模型[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(2): 301.

(下转第 191 页)

问题。采用改进后的 YOLOV3 算法在大图中精确定位测温贴片并进行裁剪;随后对裁剪后的图像进行语义分割,区分测温贴片的正常与变色部分;最后根据分割结果计算变色部分占整个测温贴片的比例,判定是否超温。试验验证显示,所提算法准确率高达 99.46%,满足列车巡检需求。

参考文献

- [1] 马茜. 基于图像识别技术的轨道交通缺陷检测研究[J]. 计算技术与自动化, 2022, 41(1): 117.
MA Qian. Research on rail transit defect detection based on image recognition technology[J]. Computing Technology and Automation, 2022, 41(1): 117.
- [2] 许贵阳, 李金洋, 白堂博, 等. 基于改进 Mask R-CNN 的轨道扣件状态检测方法[J]. 中国铁道科学, 2022, 43(1): 44.
XU Guiyang, LI Jinyang, BAI Tangbo, et al. Detection method of track fastener state based on improved mask R-CNN[J]. China Railway Science, 2022, 43(1): 44.
- [3] REDMON J, FARHADI A. YOLOv3: an incremental improvement [EB/OL]. [2022-08-10]. <https://arxiv.org/abs/1804.02767v1>.

- [4] ZHOU Z, RAHMAN SIDDIQUEE M M, TAJBAKHS N, et al. UNet++: a nested U-Net architecture for medical image segmentation[C]//Deep Learning in Medical Image Analysis and Multimodal Learning for Clinical Decision Support. Cham: Springer International Publishing, 2018: 3.
- [5] LI X, LI X, ZHANG L, et al. Improving semantic segmentation via decoupled body and edge supervision[C]//Computer Vision-ECCV 2020. Cham: Springer International Publishing, 2020: 435.
- [6] WOO S, PARK J, LEE J Y, et al. CBAM: convolutional block attention module [C]//Computer Vision-ECCV 2018. Cham: Springer International Publishing, 2018: 3.

· 收稿日期:2022-12-16 修回日期:2023-05-04 出版日期:2025-03-10
Received:2022-12-16 Revised:2023-05-04 Published:2025-03-10
· 通信作者:舒冬,高级工程师,sd8572663@163.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 185 页)

- XU Qiang, ZHU Yongquan, LEI Shengxiang, et al. Improved stochastic medium theoretical model for predicting deformation of existing tunnels and strata caused by excavation of new undercrossing tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(2): 301.
- [2] 金大龙. 盾构隧道群下穿既有地铁运营隧道变形机理及控制研究[D]. 北京:北京交通大学, 2018.
JIN Dalong. Study on deformation mechanism and control of shield tunnels under existing subway operation tunnels [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.
- [3] LIU B, YU Z, ZHANG R, et al. Effects of undercrossing tunneling on existing shield tunnels[J]. International Journal of Geomechanics, 2021, 21(8): 1.
- [4] 李伟平, 张君臣, 文冲, 等. 盾构下穿施工对高速铁路无砟轨道变形影响的解析算法及验证[J]. 铁道标准设计, 2023, 67(5): 94.
LI Weiping, ZHANG Junchen, WEN Chong, et al. Analytical algorithm and verification of shield tunneling influence on ballastless track deformation of high speed railway[J]. Railway Standard Design, 2023, 67(5): 94.
- [5] 张文正. 盾构下穿北京地铁 13 号线望京西站站房基础变形及

数值分析[J]. 隧道建设, 2014, 34(3): 226.

- ZHANG Wenzheng. Deformation of and numerical analysis on foundation of Wangjingxi Station on Line 13 of Beijing Metro caused by shield tunneling below[J]. Tunnel Construction, 2014, 34(3): 226.
- [6] 杜苗鸿, 梁玉雄, 张锋. 地下通道与下穿轨道交通共建案例分析[J]. 城市道桥与防洪, 2022(10): 179.
DU Miaohong, LIANG Yuxiong, ZHANG Feng. Analysis of co-construction of underpass and under-crossing rail transit[J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2022(10): 179.
- [7] 谭忠宏. 昆明轨道交通 4 号线下穿对既有 2 号线的影响及变形控制技术研究[D]. 成都:西南交通大学, 2021.
TAN Zhonghong. Influence of Kunming Rail Transit Line 4 undercrossing on existing Line 2 and research on deformation control technology[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021.

· 收稿日期:2024-08-10 修回日期:2024-09-02 出版日期:2025-03-10
Received:2024-08-10 Revised:2024-09-02 Published:2025-03-10
· 通信作者:顾章川,高级工程师,16764022@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

欢迎订阅《城市轨道交通研究》

服务热线 021—56830728 转 821