

新建公路桩板结构施工对邻近地铁隧道、高铁桥梁变形影响的模拟分析*

刘江涛¹ 龚铭杰¹ 元翔¹ 林子涵²

(1. 上海嘉定公路建设发展有限公司, 201899, 上海;

2. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 201804, 上海)

摘要 [目的] 道路桩板结构施工会对邻近地铁隧道、铁路结构产生较大影响, 在严格的规范要求和复杂的工程状况下, 需要保证既有地铁、铁路结构的安全。[方法] 基于新建百安公路工程, 利用数值模拟方法, 构建 Plaxis 3D 有限元计算模型, 模拟各施工工况, 分析桩板结构施工过程中对邻近的既有地铁、高铁的影响。[结果及结论] 研究结果表明: 在该公路工程钻孔灌注桩施工过程中易出现塌孔、土塞效应等不良情况, 将会对邻近地铁线路造成不利影响, 使地铁隧道位移及收敛变形超过控制值; 而施工过程对高铁桥梁影响较小, 变形在可控范围之内。为此, 需改进和优化公路的施工方

案, 如增加桩基础与地铁隧道的距离、增加部分桩长等, 并对优化设计方案进行了安全评估。然后再进行的数值模拟结果显示, 公路施工引起的地铁隧道位移和变形可以满足要求, 能保证地铁隧道的结构安全。

关键词 新建公路; 桩板结构施工; 地铁隧道; 高铁桥梁; 数值模拟; 影响分析

中图分类号 TU454

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.10.009

Influence Simulation Analysis of New Road Pile-plate Structure Construction on Deformation of Adjacent Metro Tunnels and High-speed Railway Bridges

LIU Jiangtao¹, GONG Mingjie¹, YUAN Xiang¹, LIN Zihan²

(1. Shanghai Jiading Highway Construction Development Co., Ltd., 201899, Shanghai, China; 2. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of Ministry of Education, Tongji University, 201804, Shanghai, China)

Abstract [Objective] The construction of road pile-plate structures can significantly impact adjacent metro tunnels and railway structures. Under stringent regulatory requirements and complex engineering conditions, it is essential to ensure the safety of existing metro and railway structures. [Method]

Based on the new Bai'an Highway project, numerical simulation methods are utilized to construct a Plaxis3D finite element calculation model. This model simulates various construction conditions to analyze the impact of pile-plate structure construction process on the adjacent existing metro and high-speed railway. [Result & Conclusion] The research results indicate that during the construction of bored cast-in-place piles in this road project, adverse conditions such as hole collapse and soil plug effect are likely to occur. These conditions can negatively impact adjacent metro lines, causing metro tunnel displacement and convergence deformation to exceed control values. In contrast, the construction process has less impact on high-speed railway bridges, with deformation remaining within controllable limits. Therefore, it is necessary to improve and optimize the road construction plan, such as increasing the distance between pile foundation and metro tunnels and extending the length of some piles. A safety assessment of the optimized design scheme is conducted, and subsequent numerical simulation results show that the metro tunnel displacement and deformation caused by road construction can meet the required standards, ensuring metro tunnel structural safety.

Key words new highway; pile-plate structure construction; metro tunnel; high-speed railway bridge; numerical simulation; influence analysis

随着我国城市化水平的逐步提高, 各种交通网络规模逐步扩大, 会不可避免地出现临近既有地铁和铁路的道路工程施工。道路的施工将对邻近的地铁和铁路造成影响, 有可能导致既有地铁和铁路结构发生较大的位移和变形, 出现安全隐患。地铁和铁路结构对变形要求的标准较为严苛, 为了地铁和铁路的运营安全, 必须要保证道路设计方案的合理性。

针对临近地铁和铁路的施工问题, 国内外学者

* 国家自然科学基金项目(51708424)

做出大量的研究。文献[1-3]研究盾构隧道施工引起的周围土体位移场变化,并分析其对邻近构筑物的影响;文献[4-6]分析基坑施工对邻近线路结构变形的影响;文献[7-9]针对既有铁路线路周边桩板结构施工案例,研究其对铁路结构的扰动影响。目前,学者对临近铁路施工做出了大量的研究,但对桩板结构近距离施工还需要进一步探讨。而在地质条件较复杂地区,施工过程中会出现诸多不利条件,易引发安全事故,因此对变形控制的要求很高,对设计和施工提出了更高的要求。

本文以上海市新建百安公路为例,其下穿高速铁路并上跨上海轨道交通 11 号线,桩基与 11 号线隧道最小净距仅为 1.5 m,通过数值模拟进行研究,为未来类似工程的设计提供参考。

1 研究背景

新建百安公路下穿沪宁城际铁路、京沪高速铁路,上跨上海轨道交通 11 号线,平面位置关系如图 1 所示。

京沪高铁与沪宁城际铁路的线路平行,百安公路中心线与其夹角均为 70.82° 。由于空间限制等

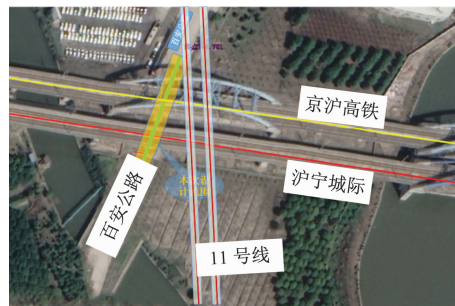
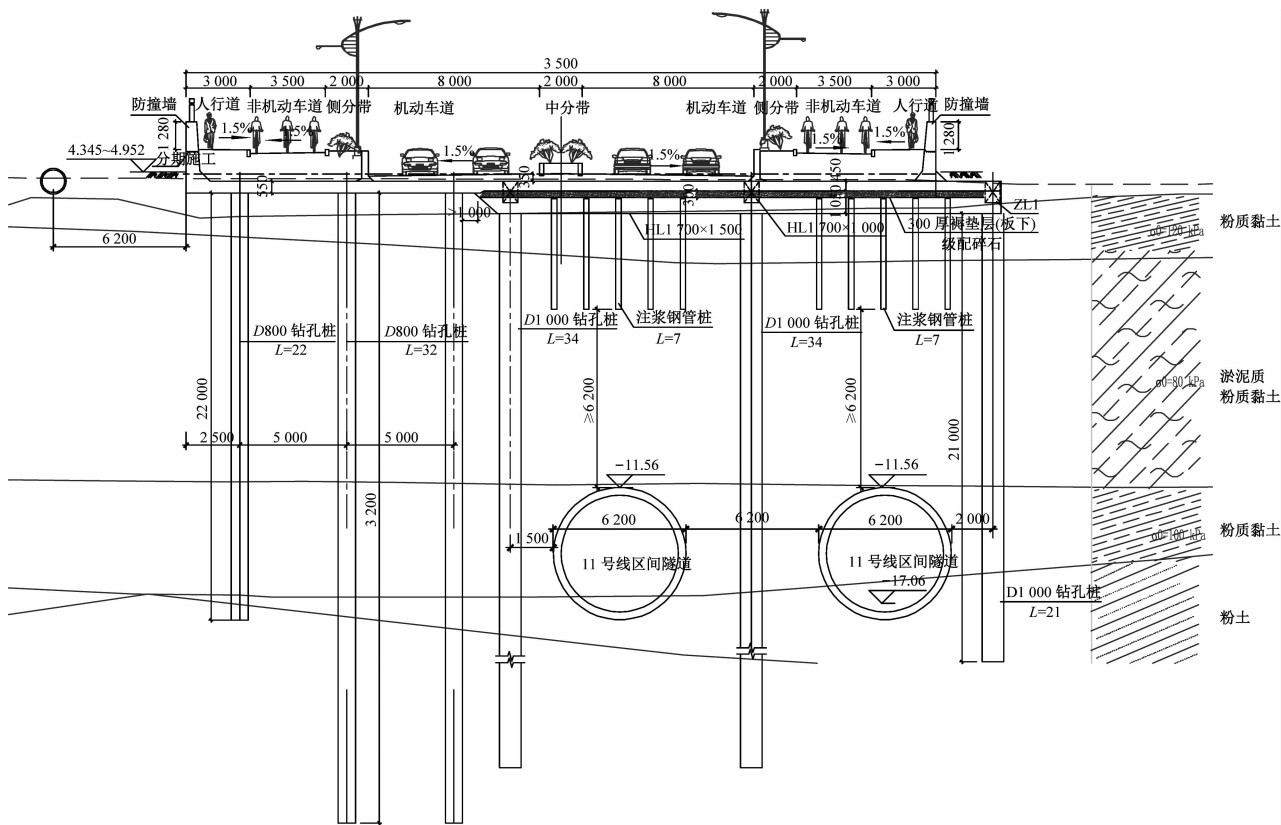


图 1 新建百安公路与铁路、地铁位置关系示意图

Fig. 1 Relation diagram between new Bai'an Highway and railway, metro positions

因素,下穿拟采用桩板结构通过,桩为钢套管钻孔灌注桩。桩板结构板厚 0.55 m,桩径 0.8 m,共 7 排,中间 5 排桩长 32 m,两侧桩长 22 m。

此外,百安公路与上海轨道交通 11 号线相交,夹角为 23.55° ,区间地铁隧道埋深约 11.8 m,百安公路同样以桩板结构通过。由于地铁区间与道路交角较小,桩基布置受地铁隧道结构影响,在地铁区间影响范围桩基于地铁区间线路两侧布置,桩径为 1.0 m、板厚为 450 mm,因跨度较大布置纵横梁。公路与上海轨道交通 11 号线立面关系如图 2 所示。



注:除标高和桩长单位以 m 计外,其余尺寸以 mm 计;L 为桩长;D 表示桩径。

图 2 新建公路与上海轨道交通 11 号线立面关系图

Fig. 2 Elevation relationship diagram between new road and Shanghai Rail Transit Line 11

由于钻孔灌注桩距离既有结构较近,因此施工对地铁隧道、高铁桥梁的影响控制是本工程的重点与难点。

2 数值分析

2.1 有限元模型

为分析新建公路对临近铁路的影响,利用有限元软件 Plaxis 3D 进行建模并计算。根据施工影响范围,为避免边界效应,建立长 190 m、宽 210 m、高 115 m 的三维模型(如图 3 所示)。模型底部施加完全固定约束,两侧施加竖直滑动约束,表面为自由边界。将地基模型简化为成层均质地基,模型中土体采用小应变土体硬化本构模拟,地层参数见表 1。新建造的钻孔桩、桩板结构、道路结构层与既有高铁桥墩、承台等采用线弹性实体单元模拟,既有铁

路桩基采用 Plaxis 3D 软件中的 embedded 桩单元模拟,既有 11 号线盾构隧道采用板单元模拟,结构参数见表 2。

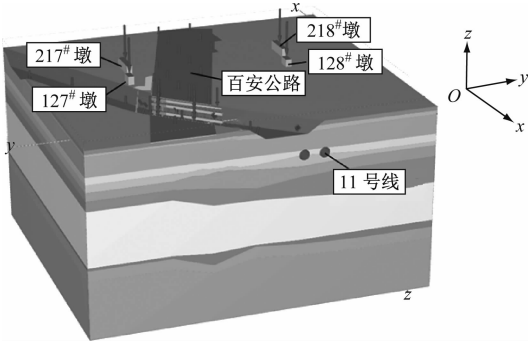


图 3 三有限元模型图

Fig. 3 Diagram of 3D finite element model

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

地层编号	岩土名称	岩土状态	各土层容许应力/kPa	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	压缩模量/MPa
(1) ₀	素填土	稍湿				
(2) ₁	粉质黏土	软塑	120	11.15	22.78	5.14
(2) ₃	粉土	中密、饱和	100	15.78	14.75	5.80
(3) ₁	淤泥质粉质黏土	流塑	80	8.35	13.74	3.82
(4) ₂	粉质黏土	硬塑	180	13.55	31.99	6.56
(4) ₃	粉土	中密、饱和	100	16.82	7.88	5.99
(4) ₄	淤泥质粉质黏土	流塑	80	7.61	13.12	3.62
(5) ₁	粉质黏土	软塑	100	10.12	14.44	4.59
(5) ₂	粉砂	中密、饱和	100	23.40	13.00	9.65
(8) ₁	粉质黏土	软塑	140	12.33	16.57	5.33
(8) ₂	粉质黏土	软塑	150	11.70	14.58	5.33
(9) ₁	粉砂夹粉土、粉质黏土	中密、饱和	150	15.63	13.83	8.45
(9) ₂	粉砂	密实、饱和	200			16.82

表 2 结构参数
Tab.2 Structure parameters

结构名称	重度/(kN/m ³)	弹性模量/GPa	泊松比
桩结构	7	32	0.2
混凝土	25	32	0.2

对施工过程进行模拟,根据具体情况划分了 7 个工况。

1) 工况 1: 桩板结构的桩基施工,模拟混凝土灌注成桩过程;

2) 工况 2: 桥梁盖梁施工及梁体架设,激活盖梁实体及顶部面荷载模拟梁体架设;

- 3) 工况 3: 桩板结构开挖;
- 4) 工况 4: 桩板结构浇筑;
- 5) 工况 5: 沪宁城际桥下管线开挖;
- 6) 工况 6: 沪宁城际桥下管线回填;
- 7) 工况 7: 新建道路铺装及通车运营。

2.2 计算结果及分析

2.2.1 公路施工过程对地铁及铁路的影响

通过分析新建公路施工过程中既有铁路结构的位移变化,评估该工程的影响。在 Plaxis 3D 软件中对新建百安公路施工过程进行模拟和计算。将 11 号线隧道因公路施工引起的累计位移和收敛变

形汇总,得图 4—图 5。高铁桥墩最大累计位移如表 3。

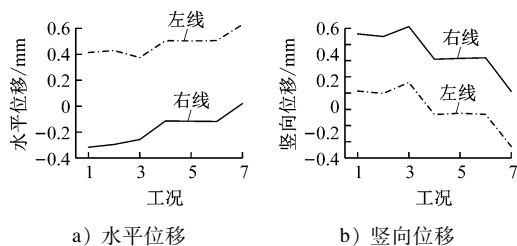


图 4 地铁隧道累计位移图

Fig. 4 Accumulated displacement diagram of metro tunnels

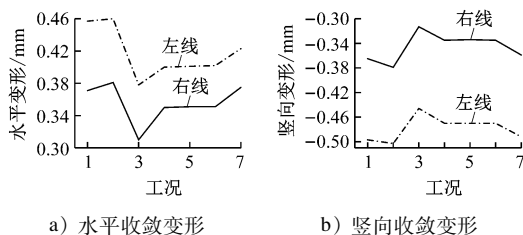


图 5 地铁隧道累计收敛变形图

Fig. 5 Accumulated convergence deformation diagram of metro tunnels

表 3 高铁桥墩最大累计位移

Tab. 3 Maximum cumulative displacement of high-speed railway bridge piers

线名	墩号	横桥向位移/ mm	顺桥向位移/ mm	竖向位移/ mm
京沪高铁	217 [#]	0.067	0.632	-0.485
	218 [#]	-0.056	-0.137	-0.123
沪宁城际	127 [#]	0.051	0.598	-0.420
	128 [#]	-0.043	-0.118	-0.094

注:位移以图 3 的坐标方向为正,反之为负。

根据规范^[10]和工程文件,约定地铁隧道位移量和径向收敛量控制值为 2 mm,此外隧道位移变化的正负值参考图 3 中的坐标系,且隧道收敛变形以收敛为负,反之为正。由模拟结果可知,新建百安公路施工及运营过程引起 11 号线累计最大位移为 -1.528 mm,小于隧道位移的 2 mm 限制值;引起地铁累计最大收敛变形为 -0.503 mm,小于收敛变形的 2 mm 限制值。这说明在理想情况下,施工及运营引起的隧道收敛变形能满足要求。约定铁路桥梁桥墩位移限值为 1.5 mm。将京沪高铁、沪宁城际桥墩因公路施工引起的阶段位移累加,模拟结果显示,公路施工及运营过程引起京沪高铁桥墩墩顶累计最大位移为 0.632 mm,引起沪宁城际铁路桥墩

墩顶最大位移为 0.598 mm,皆能满足累计位移限值 1.5 mm 的要求。

2.2.2 公路施工中钻孔桩孔壁坍塌对地铁隧道的影响

在软弱土层中,塌孔问题是一般钻孔灌注桩施工过程中经常出现的问题,会导致地铁隧道发生较大位移与变形,将严重影响隧道的结构安全及隧道内行车安全性。因此,需要研究塌孔缩径现象对既有地铁隧道的影响。在有限元模型中,创建邻近地铁的公路桩基竖向范围内的淤泥、粉土、粉砂地层的桩身侧面收缩,进行塌孔缩径模拟。塌孔缩径现象发生时的隧道位移和收敛变形模拟结果如表 4 所示。

表 4 塌孔缩径现象发生时的隧道位移模拟结果

Tab. 4 Tunnel displacement simulation results in case of hole collapse and diameter reduction

线别	水平向位移/ mm	竖向位移/ mm	水平收敛 变形/mm	竖向收敛 变形/mm
右线	4.950	-7.063	5.264	-5.705
左线	6.969	-8.973	5.409	-5.877

由模拟计算结果可知,在钻孔灌注桩施工过程中塌孔缩径现象发生时,地铁隧道最大位移为 -8.973 mm,最大收敛变形为 -5.877 mm,已超过 2 mm 的限值,将给地铁的安全运营造成严重影响。因此,需针对钻孔桩施工过程采取套筒保护措施,以防止发生塌孔事故。

2.2.3 土塞效应对地铁隧道的影响

在钢套筒开口桩压入土体的过程中,桩内空腔将形成一定高度的土柱,土柱的自重和侧摩阻力形成向下的总阻力,该阻力对桩端土进入空腔形成了不同程度的阻塞,称之为土塞效应。土塞效应的发生会对邻近的隧道结构产生较大影响。在有限元模型的基础上,对土体进行膨胀设置,进行土塞效应的模拟,以分析土塞效应对邻近地铁隧道的变形影响规律。土塞效应发生时的隧道位移和收敛变形计算结果如表 5 所示。

由计算结果可知,土塞效应对地铁隧道产生了显著影响。11 号线地铁隧道最大位移为 -11.118 mm,超过了 2 mm 的隧道位移限值;11 号线地铁隧道最大收敛变形为 4.712 mm,也超过了 2 mm 的隧道收敛变形限值。尽管施加了套筒保护,可以有效规避塌孔带来的地层扰动,但倘若长套管下压过程

表 5 土塞效应现象发生时的隧道位移及收敛变形

Tab. 5 Tunnel displacement and convergence deformation in case of soil blockage effect occurrence

线别	水平位移/ mm	竖向位移/ mm	水平收敛 变形/mm	竖向收敛 变形/mm
右线	-4.001	-8.506	3.572	-3.046
左线	3.895	-11.118	4.712	-3.750

发生了土塞效应,仍会引起地铁隧道发生过大位移,严重影响地铁的安全运营。

3 优化设计方案安全评估

由前文可知,塌孔、土塞效应的发生会对地铁隧道产生安全隐患。为减少公路施工对邻近地铁的影响,针对原设计方案进行优化,并进行安全评估。在原设计方案的基础上,进行了部分修正。优化方案将隧道两侧公路桩基的桩径,由 1 000 mm 缩小至 800 mm,且两隧道外侧桩基与隧道的净距由 1.5 m 增加至 3.0 m。此外,还增长了桩体长度,隧道左线外侧桩基桩长由 34 m 增至 42 m,隧道右线外侧桩基桩长由 21 m 增至 28 m。同时,明确采用全回转钻机加全长钢护筒进行钻孔灌注桩施工,以降低潜在的塌孔风险,减少土层扰动。修正后的设计方案在结构上更加合理,可降低施工过程中邻近隧道的变形和应力,有利于维护地铁隧道的结构安全。根据有限元计算分析,优化方案下土塞现象对邻近地铁隧道和铁路桥梁的影响如图 6、图 7 及表 6 所示。

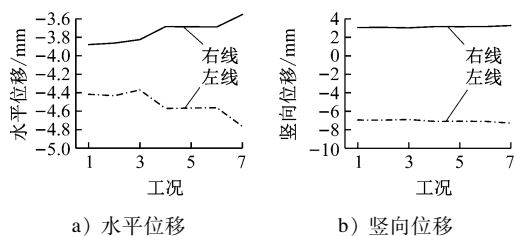
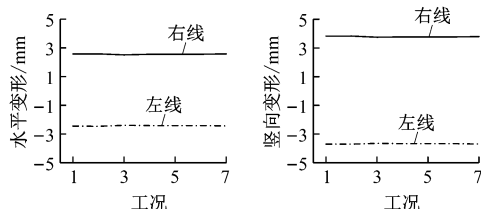


图 6 优化方案的地铁隧道累计位移图

Fig. 6 Accumulated displacement diagram of metro tunnels in optimized scheme

由模拟计算可知,当套管钻孔灌注桩施工过程中产生土塞效应时,施工及运营过程引起地铁隧道的累计最大位移为 -7.288 mm,累计最大收敛变形为 -3.701 mm,均小于原方案中的相关数据。计算结果表明,倘若套管旋压过程中发生了土塞效应,引起地铁隧道位移和收敛变形超过控制值,依然会影



a) 水平收敛变形 b) 竖向收敛变形

图 7 优化方案的地铁隧道累计收敛变形图

Fig. 7 Accumulated convergence deformation diagram of metro tunnels in optimized scheme

表 6 优化方案的铁路桥墩最大累计位移

Tab. 6 Maximum cumulative displacement of railway bridge piers in the optimized scheme

线名	墩号	横桥向位移/ mm	顺桥向位移/ mm	竖向位移/ mm
京沪高铁	217 [#]	0.056	0.557	-0.600
	218 [#]	0.051	-0.101	-0.157
沪宁城际	127 [#]	-0.092	0.544	-0.507
	128 [#]	0.049	-0.088	-0.119

响地铁的安全运营。对于铁路结构,优化方案中相关数据变化不大,可满足 1.5 mm 控制值要求。

若在施工过程中及时取土,并采取有效的施工工艺优化措施,如改进钢套管壁厚等参数以降低土塞效应的强度后,模拟分析对地铁隧道、铁路桥墩的影响,得出的计算结果显示,11 号线隧道累计最大位移为 -0.974 mm,累计最大收敛变形为 -0.315 mm,均满足 2 mm 控制值的要求;铁路结构相关数据也有所降低,满足要求。所以,当施工工艺控制良好时,土塞效应得到有效减弱,公路施工及运营过程对地铁隧道、铁路桥梁的影响显著减小,位移和变形值均在控制范围内,既有地铁和铁路的结构安全可得到有效保障。

4 结语

1) 在理想情况下,当钻孔灌注桩施工期间不发生塌孔时,原设计方案(无钢套管)的施工及运营引起的地铁隧道的位移和收敛变形、铁路桥墩的位移均符合控制要求。

2) 塌孔缩径现象对既有地铁隧道有着显著影响,使地铁隧道的位移和收敛变形超过了限值,会给安全运营带来隐患。因此,建议针对钻孔成桩施工过程中采取套筒保护措施。而当套管旋压过程中发生土塞效应时,会引起地铁隧道发生过大位移,

严重影响地铁的安全运营,因此需要采取有效措施控制隧道的位移和变形。

3) 为减少安全隐患,采用优化方案,对桩径、桩基与隧道的净距等进行修改,根据数值模拟分析结果,发生土塞效应时优化方案的地铁隧道位移值、收敛变形值都有所降低。若施工时及时取土并优化施工工艺以降低土塞效应的强度,则更能降低既有地铁隧道位移及变形值,并增加铁路结构的安全性。

参考文献

- [1] 黄龙,周顺华,宫全美. 软土地区盾构隧道下穿新建铁路的地基处理方案研究[J]. 城市轨道交通研究, 2013, 16(2): 56.
HUANG Long, ZHOU Shunhua, GONG Quanmei. Analysis on foundation treatment in soft soil crossed underground by shield tunneling[J]. Urban Mass Transit, 2013, 16(2): 56.
- [2] 李旭升,吴奇峰,刘彬斌. 城市立体公路隧道施工过程对既有地铁线路影响研究[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(增刊1): 986.
LI Xusheng, WU Qifeng, LIU Binbin. Study on the influence of urban three-dimensional highway tunnel construction process on existing subway lines[J]. Modern Tunnelling Technology, 2022, 59(S1): 986.
- [3] 曹洋,林育睿,张二望,等. 地铁盾构施工对上跨桩板结构的扰动机制研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2021, 49(7): 24.
CAO Yang, LIN Yurui, ZHANG Erwang, et al. Study on disturbance mechanism of metro shield construction on upper pile-plank structure[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2021, 49(7): 24.
- [4] CHEN R, MENG F, LI Z, et al. Investigation of response of metro tunnels due to adjacent large excavation and protective measures in soft soils[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 58: 224.
- [5] 徐中华,宗露丹,沈健,等. 邻近地铁隧道的软土深基坑变形实测分析[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(增刊1): 41.
XU Zhonghua, ZONG Ludan, SHEN Jian, et al. Deformation measurement and analysis of deep foundation pit in soft soil adjacent to subway tunnel[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(S1): 41.
- [6] 何忠明,王盘盘,王利军,等. 深基坑施工对临近地铁隧道变形影响及参数敏感性分析[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2022, 42(4): 63.
HE Zhongming, WANG Panpan, WANG Lijun, et al. Influence of deep foundation pit construction on adjacent subway tunnel deformation and parameter sensitivity analysis[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2022, 42(4): 63.
- [7] 黄大维,周顺华,刘重庆,等. 护壁套管钻孔灌注桩微扰动施工分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(4): 1103.
HUANG Dawei, ZHOU Shunhua, LIU Chongqing, et al. Analysis of small disturbing construction of protective jacket tube for cast-in-situ bored pile[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(4): 1103.
- [8] 张学钢,张丹锋,刘可,等. 隧道临近既有铁路桥桩基施工扰动影响的数值分析研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2015, 47(2): 217.
ZHANG Xuegang, ZHANG Danfeng, LIU Ke, et al. Influence of the metro undercut excavation tunnel construction on existing railway bridge pile foundation[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2015, 47(2): 217.
- [9] 王海峰. 轨道交通桩板结构施工对临近既有线影响的数值模拟[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(3): 36.
WANG Haifeng. Numerical study on the influence of rail transit pile slab structure construction on adjacent existing lines[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(3): 36.
- [10] 国家铁路局. 公路与市政工程中穿高速铁路技术规程: TB 10182—2017[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017.
National Railway Administration. Technical specification for highway and municipal engineering under crossing high speed railway: TB 10182—2017 [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2017.

· 收稿日期:2022-07-13 修回日期:2022-08-26 出版日期:2024-10-10
Received:2022-07-13 Revised:2022-08-26 Published:2024-10-10
· 第一作者:刘江涛,高级工程师,andy_liujt@163.com
通信作者:龚铭杰,副主任,183878020@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

欢迎投稿《城市轨道交通研究》

投稿网址:tougao. umt1998. com