

土岩复合地层地铁车站深基坑锚索预应力 损失规律及变形控制研究*

孙超¹ 辛庆飞¹ 孙志成² 吴宇飞² 周浩¹ 徐东明² 杨恩泽¹

(1. 中铁四局集团有限公司, 230023, 合肥; 2. 中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 100083, 北京)

摘要 [目的]为控制土岩复合地层地铁车站深基坑施工风险,应分析施工过程中的锚索受力与基坑变形特性,据此制定控制措施,并实施现场效果验证。[方法]以青岛地铁某在建车站深基坑为例,采用无损检测方法获取锚索预应力短期与长期演化规律;通过 FLAC3D 软件建立三维基坑-地层模型,分析锚索预应力损失工况下桩体位移与塑性区分布特征;基于桩体位移和钢支撑轴力数据对支护措施的合理性进行验证。[结果及结论]锚索一次张拉合格率达 75% 以上,5 d 后预应力降低值超过锁定值的 10%,短期预应力损失值较高。当锚索预应力损失发生后,基坑开挖结束的水平位移是其设计值的 2.5 倍,最大水平位移为 35.4 mm,与现场监测结果保持一致;在锚索低预应力条件下,基坑两侧塑性区分布广,面积大,易发生围岩变形。布置的钢支撑分担了主动土压力,改变了桩体的水平位移分布;布置的钢支撑发挥效用后,钢支撑轴力先上升,随后逐渐降低,最终趋于稳定。采用增设钢支撑的加强措施有效控制了围岩变形。

关键词 地铁;车站深基坑;土岩复合地层;锚索预应力损失;变形控制

中图分类号 TU753

DOI:10.16037/j.1007-869x.20230632

Prestress Loss Law of Anchor Cables and Deformation Control for Metro Station Deep Foundation Pit in Soil-rock Composite Strata

SUN Chao¹, XIN Qingfei¹, SUN Zhicheng², WU Yufei², ZHOU Hao¹, XU Dongming², YANG Enze¹

(1. China Railway Fourth Bureau Group Co., Ltd., 230023, Hefei, China; 2. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, 100083, Beijing, China)

Abstract [Objective] To control construction risks associated with deep metro station foundation pit in soil-rock composite strata, it is essential to analyze the stress characteristics of anchor cables and excavation-induced deformation during construction, formulate appropriate control measures according-

ly, and verify their effectiveness on-site. [Method] Taking the deep foundation pit project construction at a metro station in Qingdao as a case study, non-destructive testing methods are employed to obtain the short- and long-term evolution law of anchor cable prestress. A 3D foundation pit-stratum model is developed using FLAC3D software to analyze the displacement of the retaining piles and the distribution characteristics of plastic zones under prestress loss conditions. The rationality of the support measures is verified based on pile displacement and steel strut axle force. [Result & Conclusion] Non-destructive testing results show that over 75% of the anchor cables passed the initial tensioning acceptance criteria. However, within 5 days, the prestress loss exceeded 10% of the lock-in value, indicating a relatively high level of short-term prestress loss. After the occurrence of prestress loss, the final horizontal displacement of the excavation is 2.5 times of the design value, with a maximum displacement of 35.4 mm, consistent with field monitoring results. Under conditions of low anchor cable prestress, wide and extensive plastic zones developed on both sides of the foundation pit, increasing the likelihood of the surrounding rock deformation. The installed steel struts shared part of the active earth pressure and altered the horizontal displacement distribution of the retaining piles. Following their deployment, the steel strut axle force initially increased, then gradually decreased, and eventually stabilized. The reinforcement measures of adding steel struts effectively controlled the deformation of the surrounding rock.

Key words metro; station deep foundation pit; soil-rock composite strata; anchor cable prestress loss; deformation control

随着我国城市轨道交通建设的快速发展,基坑工程数量激增。由于基坑施工具有高风险特性^[1-3],坍塌等安全事故发生概率显著增加。为了保证基坑施工过程安全,以桩-撑-锚组合的支护体

* 国家自然科学基金项目(52074298)

系已在我国多个城市的地铁车站基坑施工过程中进行了推广应用^[4-5]。文献[6]研究了土岩复合地层基坑开挖过程中的支护结构受力特性,在多道支撑的作用下,有效控制了地下连续墙的变形,桩体最大位移随施工的进行向基坑底部移动;文献[7]分析了桩-撑-锚组合支护形式的变形协调问题,认为增加锚杆的刚度和变形控制能力是解决桩-撑-锚支护体系变形协调的关键;文献[8]针对基坑卸荷开挖进行模拟研究,发现围护结构水平位移最大值为10.35 mm;文献[9]以青岛地区土岩组合地质条件为背景,通过Plaxis有限元软件模拟和现场监测相结合的方法,得到桩身水平位移随着钢支撑预应力的增大逐渐减小,锚索施加预应力能够有效减小桩身水平位移。

同时,面对桩-撑-锚组合支护下基坑变形的问题,诸多学者从支护体系、地质条件、施工因素等方面入手探寻围岩变形原因^[10-12]。

通过上述研究,得到了桩-撑-锚组合支护结构的受力和变形规律,并对基坑变形原因进行了分析。但就目前来看,解决基坑变形的问题仍未形成共识,难以提出针对性处理措施。因此,本文针对青岛地铁某在建车站基坑变形预警问题,发现预应力损失是导致基坑变形发展的主要原因;同时基于无损检测技术与锚索轴力演化数据,探究了预应力短期与长期损失的演化规律,通过数值模拟验证预应力损失后基坑的变形特征,提出增设钢支撑的变形控制措施。

1 工程背景

1.1 工程概况

以青岛地铁某在建车站为例,其基坑右侧为双向6车道与2条非机动车道,左侧为在建住宅区。车站长度为239.5 m,采用明挖法施工。基坑长度约为242.2 m,宽度为21.9~23.9 m,深度为21.1~25.6 m。

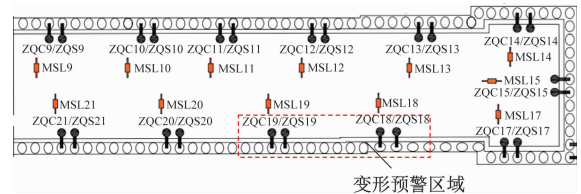
基坑范围内风化岩面较高,岩层强度低,由上至下分别为:素填土、粉质黏土、含黏性土砾砂、闪长岩强风化带、闪长岩中风化带、闪长岩微风化带,是典型的上软下硬土岩复合地层。

1.2 开挖支护方案

基坑由大里程向小里程方向依次开挖,采用两侧阶梯型分段分层、中部拉槽放坡式开挖。基坑支护形式为钻孔灌注桩+预应力锚索+钢支撑。

1.3 基坑变形预警

在基坑大里程方向施工YMG6锚索时,监测到18号桩和19号桩之间的基坑发生变形并触发预警。基坑变形预警区域及监测点布置如图1所示。



注:ZQC、ZQS分别为桩体竖直、水平位移测点;MSL为锚索测点;
↑为桩体位移;→为锚索轴力。

图1 基坑监测点布置

Fig.1 Foundation pit monitoring point layout

桩体位移监测点从地面至坑底,每隔0.5 m布置1组。图2为桩体水平位移变化曲线。图2中,ZQS18-10代表18号桩体距地面10 m处的测点。

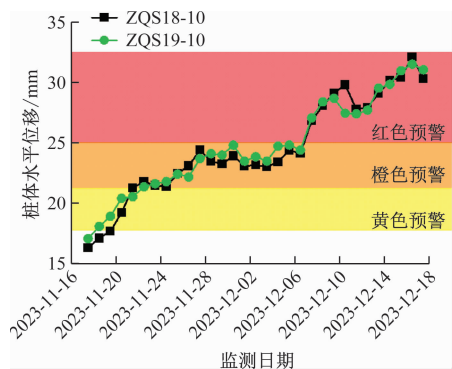


图2 桩体水平位移变化曲线

Fig.2 Horizontal displacement change curve of pile body

根据桩体水平位移与速率分别为25 mm与2 mm/d的双控指标,图2标记了黄色、橙色及红色三类预警范围。2023年11月21日,桩体水平位移与变形速率双控指标均达到黄色预警值,触发预警。监测单位在此区域内增加了测点并加强监测频率,以排除测量误差。在此后1周内,桩体水平位移仍持续增加,2023年11月28日,桩体水平位移达到控制值的97.6%,累计水平位移为-24.4 mm,触发了橙色预警。监测单位迅速对施工方案、开挖进度、支护参数、工艺方法等做出检查和完善,并组织相关技术人员探究发生预警原因。12月8日后,桩体水平位移急剧增加,变形速率达到2.7 mm/d,累计水平位移达到-27.1 mm,双控指标均超过控制值,引发红色报警。此时对该区域进行停工处理,寻求控制桩体水平变形的措施。

2 现场监测数据分析

2.1 锚索短期预应力损失

现场调研过程中,对小里程方向正在张拉作业的前4排锚索 YMG1—YMG4 进行张拉锁定后的预应力进行检测。利用无损检测手段,实现锚索预应力的普测。无损检测技术是通过锚索锚固系统的横向振动频率与轴向荷载之间的对应关系计算锚索自由段轴向受力^[13]。

根据现场情况,从基坑顶部向下选取4排锚索(即 YMG1—YMG4),每排15根,依次对张拉锁定时与5 d后的锚索轴力进行检测,追踪预应力短期的演化过程,结果如图3和图4所示。

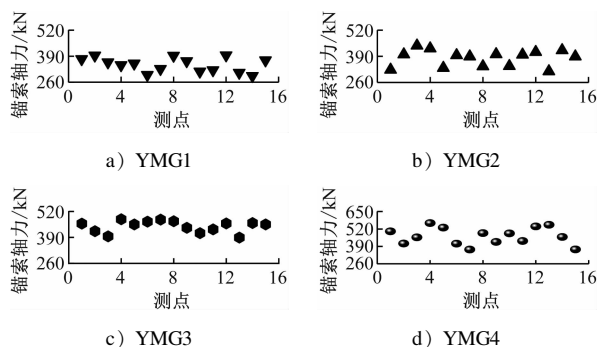


图3 张拉锁定时的锚索轴力

Fig. 3 Anchor cable axial force during tension locking

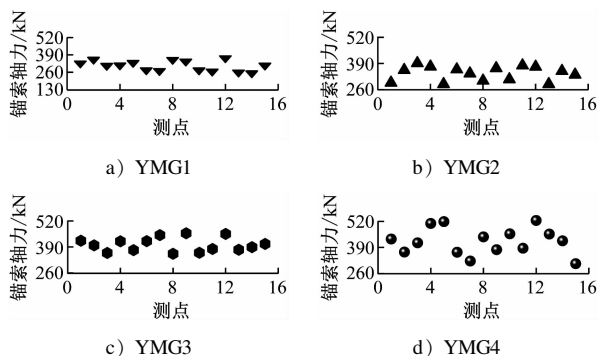


图4 锁定5 d后的锚索轴力

Fig. 4 Anchor cable axial force after locking for 5 days

检测结果表明:单根锚索1次张拉合格率可达到75%以上,其中 YMG4 锚索所持预应力离散程度最高;总体来看,4排锚索的预应力均值均满足设计值要求。但在锁定5 d后,锚索预应力显著降低, YMG1—YMG4 锚索预应力均值分别降低11.6%、10.7%、10.2%、11.9%,仅25%锚索满足设计值要求,最大损失值达到89 kN。因此,现场锚索预应力在短期内出现极大的预应力损失,导致支护体系作

用大幅降低。

在现场施工过程中,为克服张拉系统摩擦阻力造成的预应力损失,采用分级加载超张拉至设计值1.1倍的方式,以保证锚索预应力的合格率^[14-16]。张拉锁定值取得了一定效果,但在锁定后预应力出现短期降低的原因主要有以下两点:①现场钻孔、爆破等施工振动作用,打破了锚固体系平衡;②锚具、夹片受到钢绞线回缩的压力产生了压缩变形。

2.2 锚索长期预应力损失

根据施工监测情况,基坑变形区域内第1排锚索 YMG1 与第4排锚索 YMG4 存在锚索轴力监测点,分别为 MGL18-1 与 MGL18-4,其安装至预警时间的演化过程如图5所示。

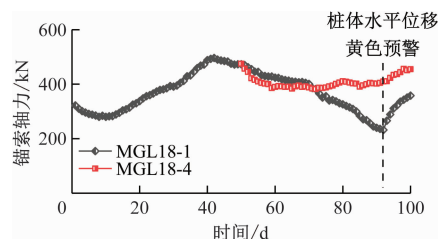


图5 锚索轴力监测曲线

Fig. 5 Anchor cable axial force monitoring curves

MGL18-1 锚索锚固在含黏性土砾砂岩层中,在安装锁定10 d内处于预应力损失的状态,轴力降低42 kN,短期预应力损失后锚索预应力普遍不足,支护效用大幅降低,锚索主动加固岩土体、抑制塑性区发展的效果难以满足,塑性区发展范围扩大引起围岩变形,此时锚索发挥被动支护效用,轴力呈现逐渐增加,锚索轴力在10~45 d内逐渐上升至496 kN。增大的锚索拉力使锚固体发生塑性变形,锚固状态改变;此后锚索预应力开始降低,至第92天时降低幅度达53.2%,锚索轴力仅为232 kN;当桩体水平位移出现黄色预警后,锚索轴力突增。而锚固于岩层中的 MGL18-4 锚索在安装前期同样出现预应力损失,3~10 d内预应力下降72 kN,此后预应力在一段时间内呈现波动趋势;由于锚固段所处地层不同增大的锚索拉力未使岩层发生位移,在预警发生前锚索轴力上升10 kN,当围岩发生变形预警后锚索轴力加速上升。

综上所述,锚固在含黏性土砾砂与中风化岩层中的锚索轴力类似于循环加卸载过程,其上升与下降波动程度同岩层性质和施工因素密切相关,这与文献[17-19]的研究规律相似。文献[20]表明,岩

土体在锚索拉力的作用下往往经历弹性变形、滑移变形、塑性变形、脱黏摩擦变形 4 个变形阶段,而岩土体的位移引起的塑性与脱黏摩擦变形,是产生长期预应力损失的重要原因。

3 基坑数值模拟分析

3.1 基坑-地层模型的建立

鉴于基坑土层条件对称,采用 1/2 对称模型进行简化计算,并重点针对变形区域开展模拟分析。为降低边界条件的影响,建立基坑-地层模型,其尺寸为 140 m×180 m×80 m(长度×宽度×高度),如图 6 所示。钢支撑采用 beam 单元模拟;钻孔灌注桩按照等刚度原则等效为围护墙,采用实体单元模拟;预应力锚索采用 cable 单元模拟。基坑支护体系模型如图 7 所示。考虑自重应力场与周边环境的影响,将 10 kPa 荷载模拟施加至基坑左侧地面住宅区,将 20 kPa 荷载模拟施加至基坑右侧车道。

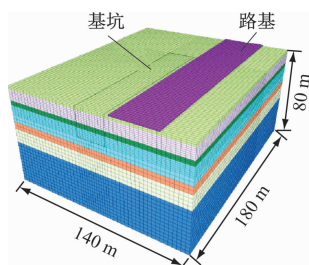


图 6 基坑-地层模型

Fig. 6 Foundation pit-stratum model

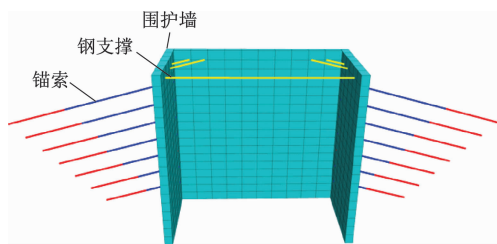


图 7 基坑支护体系模型

Fig. 7 Foundation pit supporting system model

3.2 模型参数的选取

基坑-地层模型中的岩土体均采用摩尔-库伦弹塑性模型,路基采用弹性模型。该模型中岩土的物理力学参数如表 1 所示。

围护桩和钢支撑采用线弹性模型。其中基坑围护桩结构等效为厚度 h (单位 m)的围护墙:

$$h = 0.838D^2 \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{t}{D}}} \quad (1)$$

表 1 岩土的物理力学参数

Tab. 1 Rock and soil physical and mechanical parameters

岩土名称	重度/ (kN/m ³)	弹性模 量/MPa	泊松比	内摩擦 角/(°)	黏聚力/ kPa	厚度/ m
素填土	17.5	8.5	0.40	11.3	6.0	3.0
粉质黏土	19.6	25.0	0.35	10.2	20.8	8.2
含黏性土砾砂	19.0	30.0	0.27	38.0	10.6	4.3
强风化闪长岩	22.0	350.0	0.25	40.0	250.0	12.4
中风化闪长岩	25.0	5 000.0	0.22	50.0	500.0	6.5
中风化花岗岩	25.0	5 000.0	0.22	55.0	600.0	10.8
微风化闪长岩	27.8	22 000.0	0.20	65.0	750.0	34.8
路基	26.0	35.0	0.25			1.0

式中:

D ——桩体直径,单位 m;

t ——桩间距,单位 m。

根据支护设计方案,将直径 1.0 m、桩间距 1.5 m 的围护桩等效成厚度为 0.62 m 的围护墙。

根据工程实际,钢支撑重度为 78.5 kN/m³,泊松比为 0.28,弹性模量为 200 GPa,外径为 609 mm,壁厚为 16 mm,预加力为 600 kN。锚索预应力分别按照其设计值和损失后的轴力进行模拟。对于预应力损失后的锚索轴力,在充分考虑锚索预应力的短期与长期损失前提下,求取现场数据中每排锚索长期演化过程中最小值的均值,将此预应力作为此排锚索所持载荷,通过汇总现场锚索轴力计监测数据,得到 YMG1—YMG7 锚索轴力依次为 215 kN、227 kN、245 kN、361 kN、369 kN、383 kN 和 295 kN。

3.3 计算结果分析

3.3.1 桩体水平位移

图 8 为基坑开挖结束,变形预警区域 18 号桩和 19 号桩之间的基坑水平位移云图。由图 8 可知:锚索预应力损失会导致其对围岩的约束作用降低;距离地面与临空面越近,桩体的位移越大,最大水平位移为 35.4 mm,是理想设计值的 2.5 倍。在现场实测中,施工至第 5 排锚索 YMG5 时,桩体最大水平位移为 32.2 mm,与模拟结果接近,验证了锚索预应力损失是造成基坑变形预警的主要原因。

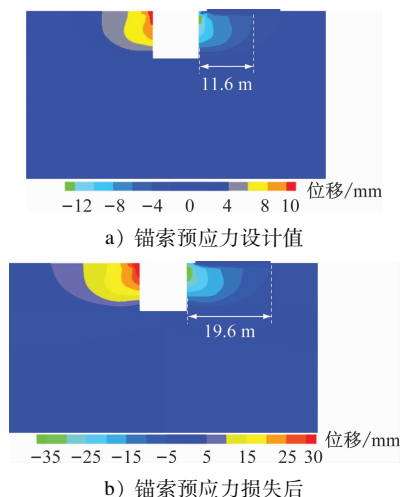


图8 基坑水平位移云图

Fig. 8 Nephogram of foundation pit horizontal displacement

图8 a)中:基坑两侧桩体水平位移近似呈对称分布;地面一侧的影响范围为11.6 m,其中桩体水平位移 >10 mm的区域集中在前3排桩体处;受偏压影响,右侧桩体水平位移 >10 mm的影响范围为3.3 m,大于左侧2.3 m的集中范围。当锚索预应力损失后,桩体水平位移显著增加,对地面的影响范围增加至19.6 m,前3排桩体水平位移均在30 mm以上;且在偏压影响下,右侧桩体的水平位移大于左侧。

3.3.2 围岩塑性区分布

锚索预应力损失下基坑两侧塑性区最大深度为6 m,集中在前3排锚索支护区域。此区域内锚索预应力长期损失较高,控制围岩的变形能力较差,基坑塑性区面积为 213 m^2 。而在锚索预应力设计值下基坑两侧塑性区分布范围降低,塑性区面积为 106 m^2 ,较锚索预应力损失后减小幅度达到50%。

4 变形控制方法及效果

4.1 变形控制方法

经过多次专家论证,在原设计基础上采取加强措施,在变形区域增设两排直径800 mm钢支撑,分别位于第2排与第3排锚索之间,以及第4排与第5排锚索之间。钢支撑预加轴力设计值为400 kN。

4.2 变形控制效果

图9为在围岩变形位置增加两道钢支撑后桩体水平位移随基坑开挖深度变化曲线。由图9可见:在开挖深度1~12 m范围内,桩体在钢支撑作用下水平位移减小,减小的最大水平位移为7.2 mm。

钢支撑的支撑作用,使桩体由悬臂梁的受力模式转变为类连续梁,改变了桩体的水平位移分布,提升了围护体系刚度,最终降低了桩体的水平位移。围岩变形区域桩体水平位移随时间变化曲线如图10所示。由图10可见:在增设钢支撑后,桩体水平位移得到有效控制,其水平位移累计值在经过短暂的增加后开始降低,最终趋于稳定;其中ZQS18-3测点的水平位移累计值稳定后为25.9 mm,减小幅度为34%;增加的两道钢支撑有效分担了主动土压力,对桩体水平位移起到约束作用。

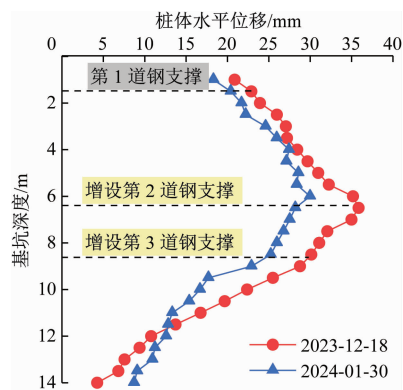


图9 桩体水平位移随基坑深度变化曲线

Fig. 9 Curves of pile body horizontal displacement changing with foundation pit depth

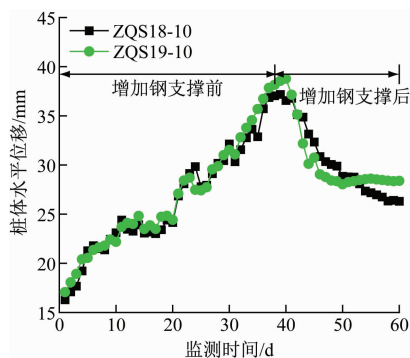


图10 桩体水平位移随时间变化曲线

Fig. 10 Curves of pile body displacement changing over time

图11为围岩变形区域第1道和增设的第2道钢支撑轴力监测结果。由图11可见:随着围岩变形,主动土压力增大,第1道钢支撑ZL1-18上的轴力逐渐增大,在基坑桩体水平位移上升发生红色预警的过程中,钢支撑轴力迅速增加,最高速率达到 51 kN/d 。当第2道钢支撑ZCL2-18布置完成,其轴力逐渐上升,在承担部分主动土压力后,ZL1-18轴力在一段时间内呈现降低趋势,并逐渐稳定。在增设的钢支撑发挥效用后,1个月内钢支撑轴力趋

于稳定,最大值为 1 330 kN,远低于 JGJ 120—2012《建筑基坑支护技术规程》规定的轴力控制值 2 300 kN,证明增加两道钢支撑可以提高支护结构的安全储备。

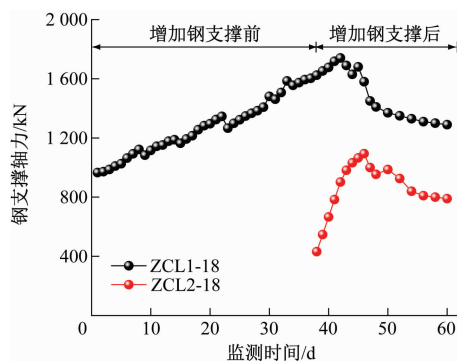


图 11 钢支撑轴力随时间变化曲线

Fig. 11 Curves of steel support axial force changing over time

5 结论

1) 在土岩复合地层中,锚索预应力损失主要分为短期损失与长期损失。无损检测结果表明,锚索一次张拉合格率达 75% 以上,5 d 后预应力降低量超过锁定值的 10%,短期预应力损失值较高。

2) 当锚索预应力损失发生后,基坑开挖结束的水平位移是其设计值的 2.5 倍,最大水平位移为 35.4 mm,与现场监测结果保持一致;在锚索低预应力条件下,基坑两侧塑性区发展难以控制,塑性区分布广、面积大,易发生围岩变形问题。

3) 采用增设钢支撑的加强措施有效控制了围岩变形。布设的钢支撑分担了主动土压力,改变了桩体的水平位移分布;增设的钢支撑发挥效用后,钢支撑轴力先上升,随后逐渐降低,最终趋于稳定。

参考文献

- [1] 金平,王涛,蔡海兵,等. L 形地铁换乘车站超深基坑支护结构设计优化分析[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(1): 60.
JIN Ping, WANG Tao, CAI Haibing, et al. Design optimization analysis of ultra-deep foundation pit supporting structure for L-shaped metro interchange station[J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(1): 60.
- [2] 徐健,周子涵,王林枫,等. 软土地区邻近既有建筑半盖挖深基坑变形特征[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(1): 71.
XU Jian, ZHOU Zihan, WANG Linfeng, et al. Deformation characteristics of semi-covered deep foundation pit adjacent to existing buildings in soft soil area[J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(1): 71.
- [3] 谭鑫,金永乐,黄明华,等. 桩锚支护基坑对邻近建筑影响实测及三维数值分析[J]. 土木工程学报, 2023, 56

(7): 126.

TAN Xin, JIN Yongle, HUANG Minghua, et al. Numerical analysis and filed monitoring on deformation characteristics of deep excavation adjacent to building with shallow foundation[J]. China Civil Engineering Journal, 2023, 56(7): 126.

- [4] 赵秀绍,王际凯,侯世磊,等. 明挖地铁隧道基坑围护桩优化方案分析[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(5): 42.
ZHAO Xiushao, WANG Jikai, HOU Shilei, et al. Analysis of retaining pile optimization scheme for open excavation metro tunnel foundation pit[J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(5): 42.
- [5] 臧延伟. 软土层厚度和基坑宽度对地铁车站基坑变形的影响[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(9): 105.
ZANG Yanwei. Influence of soft soil layer thickness and foundation pit width on metro station foundation pit deformation[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(9): 105.
- [6] 李克先,雷刚,李健,等. 土岩组合地层深基坑桩撑体系变形及受力分析[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(1): 310.
LI Kexian, LEI Gang, LI Jian, et al. Deformation and force analysis of pile foundation system of deep foundation pit in combination of soil and rock[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(1): 310.
- [7] 冯申铨,姜晓光,杨志银,等. “桩(墙)-撑-锚”联合支护技术的工程应用与变形协调探讨[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(增刊1): 456.
FENG Shenduo, JIANG Xiaoguang, YANG Zhiyin, et al. Discussion on the engineering application and deformation coordination of ‘pile (wall)-brace-anchor’ joint support technology [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(S1): 456.
- [8] 王立新,施王帅胤,徐硕硕,等. 邻近基坑卸荷情况下地铁隧道变形规律及加固措施[J]. 铁道建筑, 2021, 61(8): 68.
WANG Lixin, SHI Wangshuaiyin, XU Shuoshuo, et al. Deformation laws and reinforcement measures of subway tunnel under unloading of neighbor foundation pit [J]. Railway Engineering, 2021, 61(8): 68.
- [9] 白晓宇,张明义,闫楠,等. 土岩深基坑桩-撑-锚组合支护体系变形特性[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(2): 454.
BAI Xiaoyu, ZHANG Mingyi, YAN Nan, et al. Deformation properties of combined support system of pile-steel support-anchor cable for deep foundation pit in rock-soil combination[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2018, 49(2): 454.
- [10] 唐传政,唐冬云,李宇红. 武汉轨道交通 6 号线某主体车站基坑工程变形问题分析[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(增刊1): 198.
TANG Chuazheng, TANG Dongyun, LI Yuhong. Analysis of the deformation problem of foundation pit engineering of a main station of Wuhan Rail Transit Line 6 [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(S1): 198.
- [11] 郑刚,雷亚伟,程雪松,等. 局部锚杆失效对桩锚基坑支护体系的影响及其机理研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(3): 421.

- ZHENG Gang, LEI Yawei, CHENG Xuesong, et al. Influences and mechanisms of anchor failure on anchored pile retaining system of deep excavations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(3): 421.
- [12] 朱湘旭,徐昭辰,章定文,等. 硬质地层中偏压基坑支护结构受力特性研究[J]. 岩土工程学报,2021,43(增刊2):166.
- ZHU Xiangxu, XU Zhaochen, ZHANG Dingwen, et al. Behaviors of supporting structures of asymmetrically loaded deep excavation in hard soil layer[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43 (S2): 166.
- [13] 张后全, 吴宇, 陈彦龙, 等. 煤矿锚杆安装质量无损检测方法与应用[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(2): 283.
- ZHANG Houquan, WU Yu, CHEN Yanlong, et al. Non-destructive testing method and its application on bolt installation quality in coal mine[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2018, 35(2): 283.
- [14] 刘学,郭廷科,沈龙,等. 土岩复合地层不同锚固长度预应力锚索锚固机制及现场测试[J]. 隧道建设(中英文),2023,43(增刊1):154.
- LIU Xue, GUO Tingke, SHEN Long, et al. Anchorage mechanism and field test of prestressed anchor cables with different anchorage lengths in soil-rock composite strata [J]. Tunnel Construction, 2023, 43 (S1): 154.
- [15] 余瑜,刘新荣,刘永权. 基坑锚索预应力损失规律现场试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(5): 1932.
- YU Yu, LIU Xinrong, LIU Yongquan. Field experimental investigation on prestress loss law of anchor cable in foundation pits [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(5): 1932.
- [16] 刘永权,刘新荣,谢应坤,等. 基坑预应力锚索初始张拉锁定值取值规律探讨[J]. 岩土力学, 2018, 39(6): 2164.
- LIU Yongquan, LIU Xinrong, XIE Yingkun, et al. Discussion on selection law of initial stretch locking value of prestressed anchor cables in foundation pits[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(6): 2164.
- [17] 罗贤民,黄勇,陆剑明,等. 明挖异形基坑下穿高架桥及近接航站楼施工的影响与控制[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(5): 113.
- LUO Xianmin, HUANG Yong, LU Jianming, et al. Construction impact and control of open-excavation irregular shape foundation pit under-passing viaduct bridge and adjoining terminal building [J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(5): 113.
- [18] 白学平. 河湖相沉积软土地层地铁车站深基坑施工位移分析[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(6): 62.
- BAI Xueping. Analysis of metro station deep foundation pit construction displacement in fluvial and lake sedimentary soft soil stratum[J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(6): 62.
- [19] 刘季富. 富水砂卵石地层大型地铁车站基坑变形与支护结构受力分析[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(6): 43.
- LIU Jifu. Foundation pit deformation and supporting structure stress analysis of large metro station in water-rich sandy cobble stratum[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(6): 43.
- [20] 王渭明,曹正龙,王刚刚,等. 厚冲积层锚索预应力损失研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(9): 1607.
- WANG Weiming, CAO Zhenglong, WANG Ganggang, et al. Prestress loss of anchor cables in thick alluvial clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(9): 1607.
- 收稿日期:2023-06-05 修回日期:2023-09-01 出版日期:2025-06-10
Received:2023-06-05 Revised:2023-09-01 Published:2025-06-10
• 第一作者:孙超,高级工程师,lwtg_201@126.com
通信作者:徐东明,硕士研究生,wangkexuehblg@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86页)

- [16] 张研,梁卓悦,廖逸夫. 基于相关向量机的富水砂层渣土改良试验效果预测[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(17): 7293.
- ZHANG Yan, LIANG Zhuoyue, LIAO Yifu. Prediction of slag improvement in water-rich sand layer based on relevance vector machine[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(17): 7293.
- [17] 齐跃军. 泡沫和膨润土泥浆对改良砂土渗透性的研究[J]. 城市轨道交通研究, 2022,25(3): 26.
- QI Yuejun. Influence of foam and bentonite slurry on conditioning sand soil permeability [J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(3): 26.
- [18] 张润来,宫全美,周顺华,等. 砂卵石地层土压平衡盾构施工渣土改良试验[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019,47(5): 673.
- ZHANG Runlai, GONG Quanmei, ZHOU Shunhua, et al. Soil conditioning tests for earth pressure balance shield applications in sandy cobble strata [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2019,47(5): 673.
- [19] 陈中天. 基于渗透性试验的土压平衡盾构泡沫渣土改良研究[D]. 成都:西南交通大学, 2019.
- CHEN Zhongtian. Study on soil conditioning for EPB shields by permeability tests[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.
- [20] 李文辉. 土压平衡盾构中改良剂对砂土渗透性影响研究[D]. 北京:中国地质大学, 2020.
- LI Wenhui. Study on the effect of improvers on the permeabilityof sandy soil in soil pressure balance shield[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2020.
- 收稿日期:2023-05-18 修回日期:2023-05-31 出版日期:2025-06-10
Received:2023-05-18 Revised:2023-05-31 Published:2025-06-10
• 通信作者:郭世情,高级工程师,gsq-73@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