

上软下硬地层地铁车站深基坑支护结构设计研究

房国华¹, 刘浩然¹, 赵乙丁¹, 刘守花²

(1. 盐城工学院 土木工程学院, 江苏 盐城 224051; 2. 淮阴工学院 土木工程学院, 江苏 淮安 223001)

摘要: 由于城市化水平的日益提高, 高地下水位、上软下硬地层的基坑工程建设数量激增, 这对基坑工程的建设提出了更加严格的要求。文章依托青岛某地铁车站基坑工程, 针对高地下水位、上软下硬地层条件提出采用排桩+内支撑作为深基坑支护结构, 水泥土搅拌墙(TRD)作为止水帷幕的设计方案, 并基于数值分析方法, 对基坑自身安全性及其对周边环境的影响进行分析, 研究表明: 基坑的深层水平位移和周边土体竖向位移均小于预警值, 排桩内力内支撑轴力均小于设计标准值, 表明基坑自身安全性及对周边环境的影响均在安全范围内, 设计的支护方案及其参数合理可靠; 对比排桩、桩间土体和 TRD 墙深层水平位移发现, 桩间土体的水平位移最大, 后续施工中应重点关注桩间土体的稳定性。研究成果可为后续高地下水位、上软下硬地层条件基坑设计和施工提供借鉴。

关键词: 深基坑; 上软下硬地层; 水泥土搅拌墙; 数值分析

中图分类号: TU473.2

文献标志码: A

文章编号: 1673-8993(2025)10-0069-06

doi: 10.13402/j.gcejs.2025.10.127

Research of the design on the deep foundation pit support structure of metro station in soft upper-hard lower strata

FANG Guohua¹, LIU Haoran¹, ZHAO Yiding¹, LIU Shouhua²

(1. School of Civil Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224051, Jiangsu, China;

2. Faculty of Architecture and Civil Engineering, Huaiyin Institute of Technology, Huai'an 223001, Jiangsu, China)

Abstract: Due to the increasing urbanization level, high groundwater levels, and layered geology with soft top and hard bottom conditions in deep foundation engineering projects, there are more deep foundation engineering projects, which impose stricter requirements on the construction of deep foundations. Taking the deep foundation engineering of a certain metro station in Qingdao as a case study, this paper proposes the use of piles and internal bracing as the deep reinforcement structure for deep foundation engineering under high groundwater and soft upper-hard lower strata conditions, and the TRD walls as the drainage curtain. Based on numerical analysis methods, the overall safety of the foundation and its impact on the surrounding environment are analyzed. The results indicate that the deep horizontal displacement and vertical displacement of the soil around the foundation are both less than the warning value, and the internal forces and axial forces of the piles and internal bracing are within the design standard. This indicates that the overall safety of the foundation and its impact on the surrounding environment are within the safe range. The reasonable and reliable design of the reinforcement scheme and its parameters is verified by comparing the deep horizontal displacements of the piles, inter-soil layer, and TRD walls. It was found that the inter-soil layer had the largest horizontal displacement in the deep region, and attention should be paid to the stability of the inter-soil layer in subsequent construction. The research results can provide references for

收稿日期: 2025-04-14

基金项目: 江苏省自然科学基金资助项目(BK20220694); 江苏省研究生科研与实践创新计划(SJCX24_2161)

作者简介: 房国华(2000—), 男, 硕士研究生, 从事结构稳定性方面的研究。

通信作者: 赵乙丁(1989—), 男, 博士, 副教授, 从事地下结构精细化管养方面的研究。

subsequent deep foundation engineering design and construction under high groundwater conditions and layered geology with soft top and hard bottom layers.

Key words: deep foundation; soft upper- hard lower strata; TRD walls; numerical analysis

基坑工程作为现代城市地下空间开发的核心环节,其设计与施工技术直接影响工程安全、环境协调性和经济性。随着城市化进程加速,深大基坑工程逐渐向复杂地质条件、高环境敏感性区域拓展,对支护结构设计、变形控制及监测技术提出更高要求^[1-2]。

基坑工程具有显著的临时性、时空效应和环境敏感性特征。其临时性体现在支护体系服役周期短,需在有限时间内完成结构效能最大化,时空效应表现为土体应力路径随开挖步序动态变化,导致支护结构内力重分布^[3-4]。环境敏感性则要求工程实施过程中需严格控制地层扰动,防止邻近建筑沉降、管线破裂等次生灾害。研究表明,基坑变形 40% 以上由时空效应引发,需通过分区分段开挖、动态调整支护参数实现控制。现代基坑支护体系呈现多元化发展,排桩加内支撑、TRD 工法墙、复合土钉墙等技术已形成成熟应用体系^[5-8]。排桩结构通过桩间土拱效应分担荷载,配合预应力内支撑可有效抑制侧向位移。排桩加内支撑支护结构在基坑工程中的应用已经得到了广泛的研究。现有的研究表明,排桩加内支撑支护结构在复杂地质条件下具有良好的力学性能和变形控制能力,能够有效保证基坑施工的安全性和经济性^[9]。TRD 等厚度水泥土搅拌墙技术突破传统支护界限,形成兼具挡土与止水功能的连续墙体,在上海软土地区应用中墙体抗渗系数达 10^{-7} cm/s 量级。数值模拟技术的进步使得支护参数优化更为精准,三维有限元模型可再现开挖过程中土-结构相互作用机理^[10],为多支撑体系协同工作分析提供工具支撑。

本文以青岛某地铁车站深基坑工程为依托,提出采用排桩+内支撑作为深基坑支护结构,配合水泥土搅拌墙(TRD)作为止水帷幕,并基于有限差分软件 FLAC3D 建立基坑三维数值分析模型,详细分析基坑施工后基坑支护结构力学响应及其对周边环境的影响,以期可为实际工程的后续安全施工提供借鉴。

1 工程概况

依托地铁车站位于两城市主干道交叉口,周边临近居民小区及在建商业综合体,基坑两侧为交通疏导道路。由于位处市区繁华地段,施工组织不便,临近市政管线错综复杂,且来往车流量大,都给该工程基坑建设带来相应的挑战。考虑到周边复杂环境及地质条件,该工程施工安全等级为一级。该工程所处地貌为冲洪积平原地貌,场区地势平坦,地层结构自地表向下依次发育杂填土层、粉质黏土层、粗砾砂层、黏性土层、含碎石粗砾砂层以及强风化-中等风化-微风化安山岩层,整体呈现青岛地区典型的软土覆盖硬质基岩地层特征。根据地质勘察数据,场区地下水类型主要为第四纪孔隙潜水和基岩裂隙承压水,勘察期间稳定地下水位为 2.0 m,地下水位较高。基坑标准段宽度为 19.9 m,基坑深度为 17.5 m,主体结构基坑保护等级为一级,变形控制等级为一级。

在高含水率软弱地基区域开展地下工程时,基坑施工作业常处于富水地层环境。开挖活动引发的渗流场动态变化会显著加剧砂层液化、渗透破坏等工程地质灾害风险,直接危及坑体围护结构稳定性。为保证高水位软弱土层基坑的稳定性,地下水控制一般采用止水帷幕+基坑降水相结合的方法,围护结构较多采用地下连续墙或灌注桩+止水帷幕。

围护结构若采用地下连续墙,虽其变形控制强,但由于地下连续墙水下浇筑、槽段之间存在接缝的施工工艺特点,地连墙墙身以及接缝位置存在防水的薄弱环节,易产生基坑坑壁渗漏水现象,且地下连续墙的造价较高。围护结构若采用灌注桩,需在外侧设置止水帷幕,目前水泥搅拌桩和高压旋喷桩常作为基坑止水帷幕,然而由于受设备和施工过程人为的影响,桩间结合不好,易开叉漏水,且深度只能达到 25.0 m 左右,且施工速度也较慢,难以满足工程需要。近年来,从

日本引进一种新型 TRD(等厚度水泥土搅拌墙)工法作为止水帷幕,其施工速度快,成墙深度可达 60.0 m,垂直度偏差不大于 1/250,墙体均质性好、隔水性能可靠,并在已青岛、上海、南昌、天津、淮安、杭州、苏州、武汉等地的 10 余个基坑工程中成功应用。

因此,综合考虑基坑地层条件、地下水位、周边环境以及基坑尺寸等因素,为保证基坑施工中自身安全以及周边建构筑物的正常使用,根据《建筑基坑支护技术规程》(JGJ 120—2012),该基坑采用排桩与内支撑相结合的支护结构型式,配合水泥土搅拌墙 TRD 作为止水帷幕。其中,排桩选用直径为 1.0 m 的钻孔灌注桩,桩中心间距为 1.4 m,嵌固深度为 9 m。为保证桩间土体的稳定性,桩间土体挂网并喷射混凝土。该工程采用分层支护体系,自地表向下依次布设 3 道水平支护结构:首层支护选用现浇混凝土梁,其横断面规格为 800 mm×800 mm,沿基坑周向每隔 8 m 布设一道;第二、三层支护体系采用大直径钢套管支护,管体规格为 $\varnothing 609$ mm×16 mm,相邻支护单元中心距与首层保持一致。基坑第一道混凝土冠梁截面尺寸为 1 000 mm×1 000 mm,第二、三道腰梁采用双拼 56 a 工字型钢。基坑竖向支撑体系采用 $\varnothing 609$ ×16 mm 规格钢立柱,各管段通过法兰盘螺栓接合,纵向布设间距 9 m。该立柱系统上部与现浇混凝土支撑梁刚性锚固,中部与钢结构支撑通过双肢工字钢组合节点连接,基座段以 4 m 嵌固深度插入直径 1.2 m 的钻孔灌注桩承台内。基坑采用坑内降水,降水到坑底下 1.0 m,排桩外侧采用 TRD 墙止水措施,水泥土搅拌墙按 850.0 mm 设计。

2 基坑受力特性分析模型构建

基坑采用排桩+内支撑的支护结构,排桩外侧采用水泥土搅拌墙(TRD)作为止水帷幕,本研究应用有限差分软件 FLAC^{3D}建立该车站基坑开挖支护三维数值分析模型,分析车站基坑支护结构和止水帷幕的形变规律和受力特征。为使计算结果不受边界条件限制,开挖区域外边界至数值解析模型边界大于 3 倍开挖深度,图 1 为数值模型网格划分具体示意图,其中模型尺寸为 150.0 m×24.0 m×80.0 m。

边界条件分别为两侧水平固定,底部为三个方向固定,上边面为自由边界,人为增大土体与结构接触位置网格密度,以提高计算的精度。

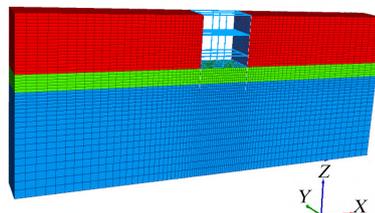


图 1 计算基坑三维模型

土体、TRD 墙、排桩均采用实体单元(Zone)模拟,基坑内侧网喷混凝土层则通过衬砌(Shell)单元来模拟,冠梁、腰梁和内支撑采用梁单元(Beam)模拟,采用桩单元(Pile 单元)模拟中立柱和立柱桩。模型中排桩和土体、排桩和 TRD 墙、TRD 墙和土体、网喷混凝土和土体之间的相互作用均采用接触面(Interface)来实现,内支撑和冠梁(腰梁)、中立柱和腰梁、冠梁(腰梁)和排桩间的相互作用则通过连接(Link)来实现,具体如图 2 所示。

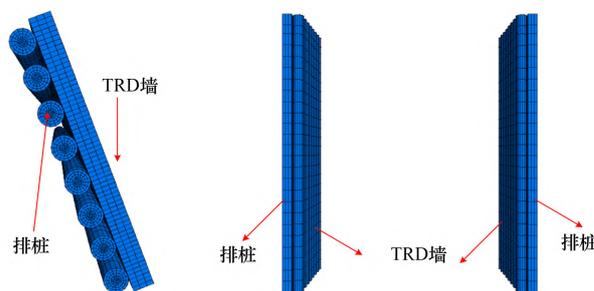


图 2 TRD 墙与排桩位置关系

基于土方开挖卸荷效应的数值模拟研究显示,摩尔-库伦(Mohr-Coulomb)本构模型在参数经济性与工程适用性方面具有显著优势。本研究计算模型中,岩土体本构关系设定为摩尔-库伦准则,支护体系(含排桩、内支撑、TRD 墙腰梁)采用线弹性本构模型进行数值表征,具体材料参数如表 1 所示。

根据实际施工过程,基坑开挖仿真分析共分为 9 个具体施工步:1) 位移清零平衡初始地应力场;2) 施作地下连续墙和冠梁;3) 土体开挖至地下 -1.8 m;4) 布设第一道支护结构;5) 土体开挖至地下 -8.2 m;6) 布设第二道支护结构并施加预应力;7) 土体开挖至地下 -13.2 m;8) 布

表 1 计算模型参数

材料	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	体积模 量/kPa	剪切模 量/kPa	泊松比	黏聚力/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$)	内摩擦 角/ $(^\circ)$	渗透系 数/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	孔隙率
杂填土	1 800	20.0	6.7	0.35	20.0	15	35.00	0.540
粉质黏土	1 960	27.8	9.3	0.35	54.0	19	0.02	0.420
粗砾砂	2 000	83.0	38.5	0.30	—	35	22.00	0.410
粗砂	2 100	104.2	48.1	0.30	—	35	30.00	0.400
强风化安山岩	2 300	720.0	245.0	0.30	2 000.0	42	0.02	0.001
中风化安山岩	2 600	833.3	384.6	0.30	3 600.0	45	0.01	0.001

设第三道支护结构；9) 土体开挖至地下 -17.5 m 。

3 数值仿真结果分析

3.1 基坑结构位移结果分析

图 3 为基于三维有限元数值模拟获得的基坑开挖完成后土体位移分布特征，其中左图为水平位移云图，右图为竖向位移云图。通过高精度网格单元划分和摩尔-库伦本构模型进行数值计算，数值结果云图清晰揭示了位移场的空间分布规律，水平位移最大值呈现沿基坑纵向轴线对称的椭圆形分布特征，竖向沉降则展现出由开挖面向外辐射衰减的抛物线型分布模式。

数值解析结果表明，在严格按设计分步开挖完成后，基坑邻近区域土体水平位移呈现典型的三段式分布特征。其中最大水平位移量为 4.84 mm ，出现位置与经典土压力理论预测相符，且位于基坑侧壁中部位，此处对应主动土压力区与静止土压力区的过渡带。该位移值较规定的 III 级预警值具有 45.2% 的安全余量，验证了支护体系的可靠性。围护结构后方土体竖向位移分析显示，最大沉降点位于距离坑壁后 7.5 m 处，沉降量值 3.46 mm 符合深基坑 Peck 公式预测范围的 $2.8\sim 4.1\text{ mm}$ 区

间。沉降槽宽度系数 $\eta = 0.28$ ，表明 TRD 止水帷幕有效抑制了地下水渗流导致的固结沉降。沉降云图显示出明显的“凹槽效应”，距坑壁 $0\sim 5\text{ m}$ 区域因支护结构约束仅产生 $0.8\sim 1.2\text{ mm}$ 微量沉降， $5\sim 10\text{ m}$ 区间则形成主要沉降带，这与土层动孔压消散的空间非均匀性密切相关。

图 4(a)~(c) 分别为不同施工步下桩间土体、TRD 墙和排桩的深层水平位移图，图 4(d) 为基坑开挖完成后排桩、TRD 墙和桩间土体深层水平位移的对比图。由图 4(a)~(c) 看出，随着坑内土体的开挖桩间土体、TRD 墙体和排桩的深层水平位移不断增大，至基坑开挖完成后深层水平位移达到最大值。同时，桩间土体、TRD 墙体和排桩的顶部和底部的深层水平位移较小，中间位置水平位移最大，整体沿竖向呈“鼓肚型”变形模式。由图 4(d) 得出，基坑开挖完成后，排桩的深层水平位移最小，其次为 TRD 墙深层水平位移，桩间土体的深层水平位移最大，最大值仅为 4.51 mm ，均位于地表以下 9.2 m 位置，虽远小于 $0.15H$ (H 为基坑开挖深度)，且小于 30.0 mm 要求，但桩间土体水平位移最大，施工过程中应重点关注桩间土体的稳定性。

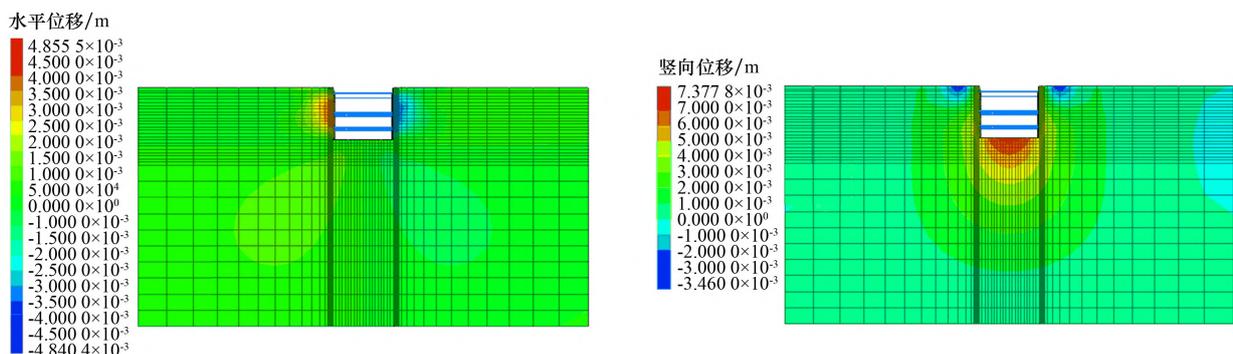
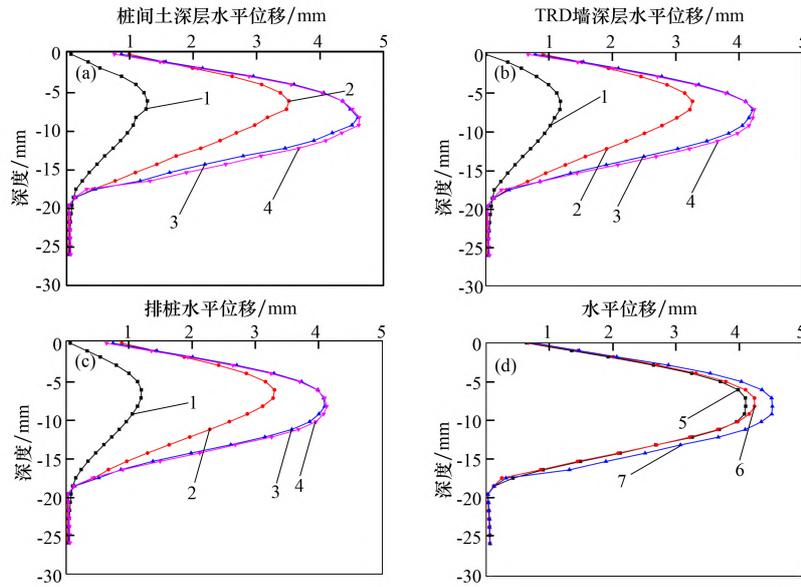


图 3 基坑开挖完成后位移云图



(a) 桩间土深层水平位移; (b) TRD 墙深层水平位移
(c) 排桩深层水平位移; (d) 基坑开挖完成后水平位移对比

1—开挖至 -1.8 m; 2—开挖至 -8.2 m; 3—开挖至 -13.2 m; 4—开挖至 -17.5 m; 5—排桩; 6—TRD 墙; 7—桩间土。

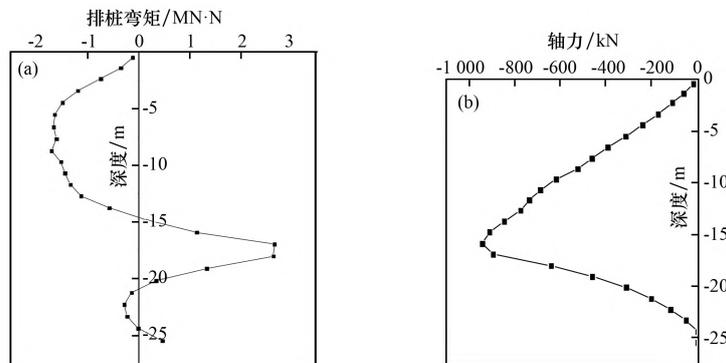
图 4 位移计算结果

3.2 基坑结构内力结果分析

图 5(a)、(b) 分别为排桩的弯矩和轴力图, 其中弯矩以排桩内侧受拉为负, 轴力以排桩受压为负。排桩弯矩分布呈现典型的三次多项式曲线特征, 最大负弯矩为 $1.7 \times 10^3 \text{ N}\cdot\text{m}$ 出现在地下 8.7 m 处, 此处对应主动土压力向静止土压力转变的临界区域。值得注意的是, 该深度与青岛地区特有的上软下硬地层分界面吻合, 揭示了地层刚度突变对结构内力的显著影响。最大正弯矩为 $2.6 \times 10^3 \text{ N}\cdot\text{m}$ 出现在桩顶下 3.2 m 处, 其量值仅为极限抗弯承载力的 67.7%。轴力分析显示, 排桩整体处于受压状态, 最大轴力值 -943.0 kN, 出现在

桩体中部, 该位置与 TRD 止水帷幕搭接区重合。值得注意的是, 轴力分布曲线在 -6 ~ -12 m 区间呈现“马鞍形”特征, 其峰值较常规悬臂桩结构降低约 40%, 归因于内支撑体系的有效应力重分布作用。与规定的极限抗压承载力设计值 $2.3 \times 10^4 \text{ kN}$ 相比, 实际轴力仅占 4.0%, 安全储备达 25 倍, 充分验证了结构体系的可靠性。

图 6 通过三维有限元数值模拟展示了基坑开挖完成后内支撑系统的轴力分布特征, 其中云图采用 HSL 色谱系表示轴力大小(蓝色表示低应力区, 红色表示高应力区)。结果显示: 第一道混凝土内支撑最大轴力为 -806.0 kN, 较规定的设计



(a) 排桩弯矩; (b) 排桩轴力

图 5 排桩计算结果

标准值低 14.8%；第二道钢支撑轴力为 -550.0 kN，仅为标准值的 49.6%；第三道钢支撑轴力为 -218.8 kN，达到标准值的 19.7%。轴力分布呈现显著的空间差异性，第一道支撑在基坑长边中部出现局部应力集中，这与该区域地下连续墙接缝位置的刚度突变密切相关；第二道支撑轴力沿纵向呈马鞍形分布，两端比中部高 22.3%，反映了三维空间效应对支撑受力的影响；第三道支撑轴力分布则相对均匀，表明深部土体自稳性较好。本工程支撑轴力利用率益于 TRD 止水帷幕有效控制了地下水位波动引起的附加应力。机理分析表明，支撑轴力随深度递减的规律符合 Terzaghi 土压力重分布理论，深层土体拱效应使荷载传递路径发生改变。建议施工期间对第一道支撑实施轴力补偿，并加强长边中部的应变监测。监测数据表明，支撑轴力时程曲线在降水工况下波动幅度 $\leq 8\%$ ，验证了支护体系的稳定性。

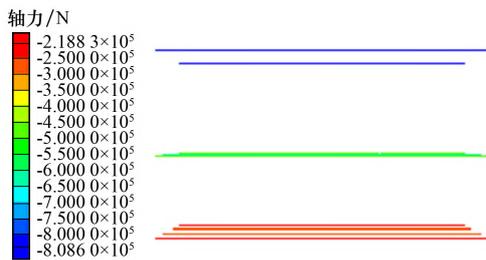


图 6 内支撑轴力云图

4 结 论

(1) 基坑开挖完成后，排桩的最大水平位移为 4.84 mm，最大沉降为 3.46 mm，均远小于设计允许值，表明支护结构具有良好的变形控制能力，满足工程要求。

(2) 排桩的最大负弯矩为 $1.7 \times 10^3 \text{ N}\cdot\text{m}$ ，最大正弯矩为 $2.6 \times 10^3 \text{ N}\cdot\text{m}$ ，最大轴力为 943.0 kN，均未超过其极限承载力，说明排桩在基坑开挖过程中表现出良好的力学性能，能够有效承担外部荷载。

(3) 第一、二、三道内支撑的轴力分别为 806.0、550.0、218.8 kN，均小于设计轴力标准值，表明内支撑系统能够有效分担基坑开挖过程中的土压力，确保基坑稳定。

(4) TRD 墙在基坑开挖过程中表现出良好的止水效果，深层水平位移较小，进一步验证了其作为止水帷幕的有效性。

参考文献：

- [1] 曹程明,时轶磊,龙照,等. 偏压条件下排桩加内支撑支护深基坑受力与变形分析[J]. 科学技术与工程, 2023,23(7):2952-2959.
- [2] 李鹏飞,朱良武,张明聚,等. 基坑工程排桩内支撑围护结构局部破坏安全风险评价方法研究[J]. 铁道勘察,2022,48(1):1-7.
- [3] 刘昭,屈静,袁维娜,等. 建筑工程施工中深基坑施工技术及安全风险评估[J]. 中国建筑金属结构,2025,24(6):97-99.
- [4] 刁国君,何昕. 地铁明挖车站下穿越既有建筑物的局部暗挖施工关键技术[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2025,55(2):536-549.
- [5] 桂大壮,张庆松,刘人太,等. TRD 工法在砂层中的关键工艺参数优化研究与应用[J]. 施工技术,2018,47(23):84-89.
- [6] 张伟寒. 复合土钉墙支护结构中土钉与预应力锚杆作用分析[D]. 西安:长安大学,2024.
- [7] 张军舰,李英杰,谭升,等. 倾斜止水帷幕复合土钉墙支护结构受力变形特点分析[J]. 科技通报,2023,39(12):55-61.
- [8] 王文涛,何泽川,黄正伟,等. 排桩内支撑基坑支护优化方案设计研究[J]. 建筑技术,2024,55(3):270-273.
- [9] 王松,张阳阳. 深基坑单排桩加内支撑支护结构有限元分析[J]. 黑龙江工业学院学报(综合版),2023,23(11):133-139.
- [10] 刘守花,王兆亮,阳军生,等. 广州软土地区狭长型深基坑变形性状及影响因素分析[J]. 建筑科学,2025,41(3):140-148.