

地铁车站深基坑支护结构安全性分析与优化研究

张金龙

中铁十二局集团有限公司 江苏 苏州 215000

【摘要】：随着城市化推进，地铁车站深基坑工程规模扩大，支护结构安全性关乎工程成败与城市安全。为应对地质复杂、周边环境敏感等挑战，从设计原则、结构设计、施工技术等方面剖析安全性影响因素。运用数值模拟、案例分析、技术创新等方法，提出方案创新优化、材料性能升级、工艺改进提升等策略。有效提升支护结构安全稳定性，降低工程风险，为地铁建设提供可靠技术支撑与实践指导。

【关键词】：地铁车站；深基坑支护；安全性分析；结构优化；变形控制

DOI:10.12417/2811-0536.25.11.075

引言

在新型城镇化与智慧交通发展浪潮下，地铁作为城市交通的核心载体，其深基坑工程建设面临地质条件复杂、周边环境敏感等多重挑战。支护结构安全与否直接关系到工程安全与城市公共安全，如何在绿色、智慧、安全发展理念指导下，实现深基坑支护结构的精准设计与优化，成为业界关注焦点。本文系统剖析地铁车站深基坑支护结构安全性影响因素，探索创新优化路径，为提升工程安全与城市建设质量提供新思路。

1 设计原则把控

1.1 科学合理准则

科学合理准则贯穿地铁车站深基坑支护结构设计全程，是保障安全性的核心前提。设计需以地质勘察数据为基石，精准分析地层岩性、地下水分布等特性，运用有限元分析、数值模拟等现代技术手段，建立符合实际工况的力学模型，确保支护结构受力计算准确。契合绿色发展理念，设计中应引入生态友好型支护技术，如采用可回收式支撑结构，减少资源浪费与环境破坏；同时严格遵循行业规范与标准，保证设计方案在技术层面的科学性与可行性，使支护结构既能抵御复杂地质应力，又能适应周边环境变化，为深基坑施工筑牢科学屏障。

1.2 安全经济权衡

安全经济权衡是地铁车站深基坑支护结构设计的重要考量，旨在实现安全性能与建设成本的最佳平衡。在保障安全方面，通过提高结构安全系数、设置多重监测预警系统，增强支护结构对突发荷载、地质突变的抵御能力；同时运用价值工程原理，对不同支护材料、结构形式进行成本效益分析，优选性价比高的方案。践行集约发展理念，在满足安全要求前提下，合理优化结构参数，减少不必要的材料消耗；推广模块

化、标准化设计，降低施工难度与成本^[1]。如采用装配式支护构件，既缩短工期，又减少现场施工损耗，在确保深基坑施工安全的同时，实现资源高效利用与成本有效控制。

1.3 施工便捷考量

施工便捷考量聚焦提升地铁车站深基坑支护结构施工效率与质量，保障工程顺利推进。设计阶段充分结合施工现场条件，简化复杂工艺，优先选择成熟、易操作的施工技术，如采用旋挖钻机成孔工艺替代传统冲击钻，减少施工干扰与时间成本。顺应智慧建造趋势，融入 BIM 技术进行施工模拟，提前预判施工难点与冲突点，优化施工顺序与资源配置。设计可拆卸、可重复利用的临时支撑体系，方便施工设备通行与后续拆除作业；合理规划施工场地布局，预留充足的材料堆放与设备操作空间，减少工序交叉干扰，提高施工流畅性，以高效便捷的施工设计，助力深基坑工程安全、快速建成。

2 结构设计剖析

2.1 方案选型分析

选型需综合考量地质条件、周边环境及施工要求，契合创新发展理念，引入新型支护技术。对于软土地层，可选用地下连续墙结合内支撑体系，其刚度大、止水效果好，能有效控制基坑变形；在环境敏感区域，采用桩锚支护结构，减少对周边建筑物和地下管线的影响。结合绿色发展理念，评估支护方案的可持续性，优先选择可回收、低能耗的支护材料与结构形式，如钢支撑替代传统混凝土支撑，降低资源消耗与碳排放。

2.2 设计流程梳理

设计流程始于详细的地质勘察与环境调查，获取准确的地层参数、地下水情况及周边建筑物信息，为后续设计提供数据支撑。随后，基于勘察结果进行结构初步设计，运用结构力学、土力学等理论，确定支

护结构形式、尺寸及支撑体系布置。借助有限元软件对初步设计方案进行数值模拟分析,模拟基坑开挖与支护过程中的应力、变形情况,检验方案的合理性与安全性^[2]。依据模拟结果优化设计参数,必要时进行多轮迭代调整。设计过程中严格遵循相关规范标准,开展专家论证与技术评审,确保设计方案满足安全性要求。

2.3 案例参数解析

以某地下二层地铁车站为例,基坑开挖深度18米,场地地层主要为粉质黏土与粉砂层,地下水位较高。支护结构采用钻孔灌注桩+止水帷幕的围护形式,灌注桩桩径1000mm,间距1.2m,嵌固深度5m,止水帷幕采用三轴搅拌桩,有效阻断地下水渗漏。基坑设置三道内支撑,第一道为混凝土支撑,截面尺寸800mm×800mm,水平间距9m;第二、三道为钢支撑,钢管直径800mm,壁厚16mm,水平间距3m。通过对该案例支护结构的受力分析与变形监测数据研究,验证设计参数的合理性。分析显示,在基坑开挖过程中,灌注桩最大水平位移控制在35mm以内,满足规范要求;支撑轴力分布均匀,未出现应力集中现象。案例参数解析为同类工程提供参考,有助于优化设计参数,提升深基坑支护结构的安全性与可靠性。

3 施工技术探究

3.1 挡土墙施工法

施工时,严格遵循精准放线原则,采用超平放线工艺确定墙体轴线与标高,结合立皮数杆技术控制砌体灰缝厚度与垂直度,确保墙体结构尺寸精准。材料选用契合绿色发展理念,优先采用节能型砖材与低水泥用量的混合砂浆,在满足强度要求的同时降低能耗与碳排放。施工过程中,运用模块化施工理念,将挡土墙划分为标准施工单元,通过预制构件现场装配,减少湿作业与现场材料损耗,提升施工效率。针对复杂地质条件,采用复合式挡土墙结构增强支护效果,在软土地层区域,将重力式挡土墙与深层搅拌桩相结合,利用搅拌桩加固地基,提高挡土墙抗倾覆与抗滑移能力;在地下水丰富地段,设置排水孔与反滤层,配合止水帷幕阻断渗水路径,防止水土流失引发墙体失稳。同时,引入智能监测技术,在墙体关键部位埋设应力传感器与位移监测点,实时采集数据并反馈至施工管理平台,动态调整施工参数,确保挡土墙施工全程安全可控,为深基坑构筑稳固防线。

3.2 灌注桩施工术

施工前,依据地质勘察报告精准选择钻孔设备,

针对不同地层特性制定专项施工方案。在砂卵石地层采用旋挖钻机配合全护筒跟进工艺,防止塌孔;在软土地层使用回旋钻机结合优质泥浆护壁,维持孔壁稳定。施工过程中融入绿色施工理念,搭建泥浆循环处理系统,通过沉淀、过滤与离心分离技术,实现泥浆再生利用,减少废弃物排放,降低对周边环境的污染。钢筋笼制作采用标准化、工厂化生产模式,运用数控弯曲机与滚焊机精准加工钢筋构件,通过套筒冷挤压连接技术确保接头强度与可靠性^[3]。混凝土浇筑环节,采用水下导管法灌注,严格控制导管理深在2-6米范围内,确保混凝土连续浇筑与密实度。引入BIM技术进行施工模拟,优化钻孔顺序与设备调度,避免相邻桩孔施工相互干扰。施工全程利用物联网技术,对钻孔深度、泥浆指标、混凝土灌注量等关键参数进行实时监测与智能预警,一旦出现异常立即启动应急预案,保障灌注桩施工质量与安全,为深基坑支护提供可靠支撑。

3.3 变形控制要点

控制要点贯穿施工全过程,从设计阶段的参数优化到施工过程的动态调控,形成系统性管控体系。设计阶段,运用有限元分析软件模拟基坑开挖与支护过程,精准预测土体变形趋势,合理确定支护结构刚度与支撑间距,预留变形补偿量。施工过程中,采用信息化施工技术,构建多层次监测网络,对基坑围护结构水平位移、支撑轴力、周边地表沉降等关键指标进行高频次监测。基坑开挖阶段,遵循“分层、分段、对称、限时”原则,严格控制每层开挖深度与暴露时间,及时架设支撑并施加预应力,抑制土体变形发展。在降水施工中,采用按需降水技术,通过水位自动控制系统实时调节抽水量,避免因过度降水引发周边地面沉降。引入智能注浆加固技术,对变形超限区域进行精准注浆,填充土体空隙、提高土体强度,实现变形的快速有效控制。

4 安全影响因素

4.1 地质环境影响

复杂的地层条件直接改变土体力学特性,如软土地层高压缩性与低抗剪强度,易导致基坑侧壁失稳与基底隆起;砂卵石地层渗透性强,易引发流砂、管涌等灾害。地下水的动态变化同样关键,地下水位骤升会增大水压力,削弱支护结构承载能力;水位下降则可能造成周边土体固结沉降。践行绿色发展理念,采用地质雷达、声波探测等无损检测技术,精准勘察地层分布与地下水走向,构建三维地质模型。针对特殊

地质条件，创新应用复合地基处理技术，如高压旋喷桩与注浆加固相结合，改善土体力学性能；采用智能降水系统，实时监测水位变化，按需降水，减少对周边环境的影响。通过地质环境的精细化分析与适应性设计，降低地质风险，提升支护结构安全性。

4.2 周边建筑制约

地铁车站深基坑施工常处于城市建筑密集区，周边建筑对支护结构安全构成直接制约。建筑物基础类型、埋深与荷载分布，会改变基坑周边土体应力场，导致支护结构受力不均；老旧建筑对变形敏感，基坑开挖引起的土体位移可能引发建筑倾斜、墙体开裂^[4]。地下管线与设施纵横交错，施工扰动易造成管线破损，危及城市生命线安全。遵循安全发展理念，运用 BIM 技术建立基坑-周边建筑协同模型，模拟施工全过程对周边建筑的影响，量化沉降、位移等指标。采用隔离桩、地基加固等保护措施，降低施工影响；对关键建筑实施实时自动化监测，结合人工智能算法预测变形趋势，提前预警并动态调整施工方案。

4.3 施工技术挑战

传统施工工艺在复杂工况下存在局限性，如钻孔灌注桩施工中易出现塌孔、缩径等质量缺陷；内支撑体系安装精度不足，会导致应力传递不均，降低支护效果，施工过程中的交叉作业、工序衔接不畅，易引发安全隐患。贯彻创新发展理念，推广智能化施工技术，如采用智能成孔设备自动控制钻孔垂直度与深度，通过物联网技术实时监测混凝土灌注质量；应用装配式内支撑体系，实现快速安装与精准预应力施加。引入数字孪生技术，构建施工过程虚拟仿真系统，优化施工流程，减少工序冲突。通过技术创新与精细化管理，突破施工技术瓶颈，保障深基坑支护结构安全可靠。

5 结构优化策略

5.1 方案创新优化

基于地质条件、周边环境及施工需求，突破传统设计思路，引入新型支护方案。针对复杂地质区域，采用桩-撑-锚复合支护体系，结合桩体的承载能力、支撑的刚性约束与锚杆的主动加固特性，形成多道防线协同受力机制，有效控制基坑变形。运用数字化技术，通过有限元模拟与参数化设计，对不同方案进行比选与优化，实现支护结构的轻量化与高效化。同时，践行可持续发展理念，设计可回收、可重复利用的装配式支护结构，减少资源浪费，降低工程全生命周期成本，为深基坑支护提供安全、环保的创新解决方案。

5.2 材料性能升级

材料性能升级是增强地铁车站深基坑支护结构安全性的关键路径。顺应建筑材料高性能化发展趋势，选用高强度、耐久性好的新型材料。采用超高强钢材制作内支撑构件，在减小构件截面尺寸的同时提升承载能力，降低钢材用量与施工难度；应用自愈合混凝土浇筑围护桩，利用其内部预埋的微生物胶囊或矿物外加剂，实现裂缝自主修复，延长结构使用寿命^[5]。结合绿色发展理念，推广再生骨料混凝土与工业废渣基胶凝材料，在满足力学性能要求的前提下，减少天然资源消耗与碳排放。通过材料性能的优化升级，提高支护结构的抗变形、抗腐蚀能力，增强其在复杂环境下的安全稳定性。如图 1 所示：

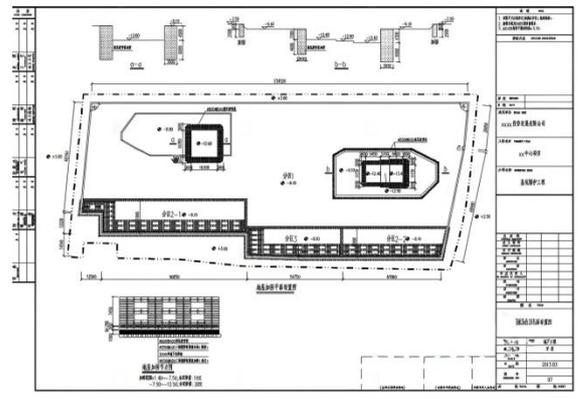


图 1 深基坑支护关联地基加固工艺示意图

5.3 工艺改进提升

摒弃传统粗放式施工模式，引入智能建造技术。采用自动化成桩设备，通过传感器与控制系统精准调节钻孔深度、垂直度及泥浆参数，避免塌孔、缩径等质量问题；运用预应力智能张拉设备，实现内支撑预应力的精确施加与实时监测，确保支撑体系受力均匀。借助 BIM 5D 技术，将施工进度、成本、质量与安全集成于同一平台，优化工序衔接，减少交叉作业干扰。通过工艺的数字化、智能化改进，提升施工质量与效率，降低人为操作误差，为深基坑支护结构的安全施工提供技术保障。如图 2 所示：

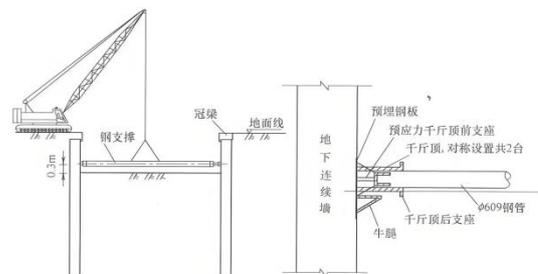


图 2 深基坑钢支撑安装及预应力施加工艺示意图

6 结语

地铁站深基坑支护结构安全性对工程建设与城市安全意义重大,通过创新支护方案,构建复合受力体系并结合数字化设计,提升结构适应性;升级材料

性能,应用新型材料实现绿色低碳与耐久目标;改进施工工艺,借助智能建造技术保障施工精准高效。多维度优化策略有效增强支护结构安全稳定性,为地铁深基坑工程建设提供可靠技术路径与实践支撑。

参考文献:

- [1] 张松,姜文盛,刘海飞,等.郑州某地铁站明挖深基坑支护结构稳定性分析[J].山西建筑,2023,49(15):78-82.
- [2] 徐辉杰.某地铁站深基坑支护结构变形与优化研究[D].中国地质大学(北京),2023.
- [3] 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(01):60-64.
- [4] 刘文霞.地铁站深基坑支护结构设计及变形研究[J].建筑技术开发,2022,49(24):180-183.
- [5] 张昌雷.地下连续墙在景云路地铁站深基坑支护结构施工中的应用[J].工程技术研究,2022,7(04):73-74+77.