

深基坑开挖与支护体系协同施工关键技术及安全控制研究

尉延涛 陆宏磊 张铮 刘洋 拓阳阳

中铁十六局集团第一工程有限公司 北京 101300

摘要: 本文围绕深基坑开挖与支护体系协同施工关键技术及安全控制展开系统研究。通过分析土体-支护结构相互作用机理、施工力学响应特征及系统协调性,建立了协同作用理论框架。研究了开挖时序优化、信息化施工及特殊地质应对等关键技术,构建了包含风险识别、多层次控制和应急响应的安全管控体系。工程实践表明,该技术体系可有效控制基坑变形,提高施工效率,保障工程安全,为深基坑工程提供了重要的理论依据和技术支撑。

关键词: 协同施工; 安全控制; 支护体系; 风险预警

引言

随着城市地下空间开发向深、大方向发展,深基坑工程面临愈加复杂的环境挑战。本文旨在研究深基坑开挖与支护体系的协同施工机理,探讨其关键技术及安全控制方法,以提升施工过程的协同性、可控性与安全性,保障工程整体稳定。超高层建筑和地下空间开发日益普遍,深基坑工程面临的挑战不断增加,为深入探讨深基坑开挖与支护技术,提高支护效果,确保施工安全,本文通过分析实际工程案例,结合数值模拟和监测数据,系统评估了支护方案的有效性和适用性。

1 深基坑开挖与支护体系协同作用机理

1.1 土体-支护结构相互作用关系

土体与支护结构的相互作用关系是深基坑工程协同施工机理的核心基础。基坑开挖打破了土体原有应力平衡,引发围岩应力重分布和变形,此时支护结构通过提供被动抗力约束土体位移,二者形成相互制约、共同工作的力学体系。土体的物理力学性质、地下水条件及开挖卸载效应直接影响支护结构承受的土压力大小与分布形式;反之,支护体系的刚度、安装时机及空间布局也显著影响土体的变形发展和破坏模式。这种相互作用表现为动态变化的荷载-响应过程:开挖初期,支护结构需及时承担卸荷释放的侧向压力;随着开挖深度增加,土体蠕变和应力松弛效应进一步对支护体系提出持续稳定的要求。因此,深入理解土体-结构间的耦合作用机制,是优化支护设计、实现变形精准控制的前提,对保障基坑安全与稳定性具有决定性意义^[1]。

1.2 协同施工过程中的力学响应特征

协同施工过程中的力学响应特征是深基坑开挖与支护体系协同作用机理的核心体现。随着开挖作业的推进,坑周土体应力状态发生连续变化,表现为侧向应力释放、坑底卸荷回弹以及应力重分布。这一过程引发支护结构产生相应的力学响应:支护桩墙的侧向位移、内力重分布及支撑轴力的动态变化。这些响应具有明显的时空效应,即变形与内力随开挖时间与空间位置的不同而呈现规律性变化。开挖卸荷的瞬时效应与土体蠕变的时间效应相互叠加,使得支护体系的受力状态处于动态调整过程中^[2]。及时施作的支护结构通过提供约束抗力,有效抑制了土体的自由变形,其自身的受力状态也随之不断调整,与土体变形形成动态平衡体系。掌握这一过程中力学参数的演变规律,是预测基坑变形、评估结构安全、实现开挖与支护在时空上紧密配合的重要理论基础^[3]。

1.3 动态施工条件下的系统协调性分析

动态施工条件下的系统协调性分析是深基坑协同作用机理研究的关键环节。该分析聚焦于开挖、支护、降水和监测等多工序在复杂作业环境中的时空配合关系。系统协调性体现为施工活动与结构响应在时间上的同步性和空间上的匹配度。开挖步骤的划分、支护时机的选择、以及环境调控措施的实施必须形成一个有机整体,任何环节的滞后或脱节都可能破坏系统的动态平衡。这种协调性需要通过严密的施工组织设计和实时监测反馈来实现,以确保各子系统始终处于受控状态。分析需综合考虑地质条件的时空变异性、施工荷载的动态变化以及周边环境的交互影响,从而评估整个施工系统是否保持协同工作状态。系统协调性的高低直接决定

了基坑工程的变形控制效果与整体安全性能,是实现安全、高效施工的重要保障^[4]。

2 协同施工关键技术

2.1 开挖顺序与支护时序优化

开挖顺序与支护时序优化是实现深基坑开挖与支护体系协同施工的核心技术。该技术主要通过实施分层分段开挖策略和严格的支护结构及时跟进控制来实现。分层分段开挖策略根据基坑规模、形状及地质条件,将开挖区域划分为合理的施工单元,通过控制每层开挖深度和分段作业长度,有效管理基坑暴露时间和空间范围,从而控制土体应力释放速率和变形发展。支护结构及时跟进控制要求每一阶段土方开挖后,必须在规定时间内完成相应区域的支护作业,确保支护体系与开挖面保持合理距离,形成有效的时空协同效应^[5]。这种优化方法能够显著减少无支撑暴露时间,抑制基坑变形,维持土体-支护体系的动态平衡,是确保基坑稳定性和施工安全的关键技术措施。

2.2 信息化施工技术应用

信息化施工技术应用是实现深基坑开挖与支护协同控制的重要手段。该技术体系以实时监测与数据反馈系统为核心,通过布设于基坑内外的一系列传感器,对支护结构内力、深层水平位移、地表沉降、地下水位等关键参数进行持续采集。数据通过自动传输系统汇集至中央处理平台,实现施工状态的实时可视化呈现。基于数据的动态调整方法则是将监测数据与预设控制值进行对比分析,当数据趋势表明可能存在风险时,及时对施工参数进行调整优化,如调整开挖节奏、加强支护措施或优化降水方案。这种基于实时监测反馈的闭环控制模式,有效克服了传统施工中依赖经验的局限性,实现了从被动应对到主动控制的转变,显著提升了施工过程的可控性和安全性,为深基坑工程的安全建设提供了可靠的技术保障^[6]。

2.3 特殊地质条件下技术应对措施

特殊地质条件下的技术应对措施是深基坑协同施工的关键技术环节。针对高水位地层,需实施降水与支护协同控制技术,通过合理安排降水井布置和抽水时序,使地下水位平稳降至安全高程,避免因过快降水引发周边地层沉降。同时,支护结构需具备良好的止水性能并与降水系统形成协同工作机制。在软土地区,应采用加固与开挖配合技术,通过在开挖前实施地基预处理、在开挖过程中采用适当的

土体改良方法,提高坑底和坑壁土体的稳定性^[7]。这些措施需与支护结构安装密切配合,形成时空上的协同效应,有效控制软土的流变变形,确保基坑在特殊地质条件下的稳定性和安全性。

3 安全控制体系构建

3.1 施工全过程风险识别与评估

施工全过程风险识别与评估是构建深基坑工程安全控制体系的基础性工作。该过程需系统识别从基坑勘察、设计、施工到回填各个阶段可能存在的潜在风险。关键节点风险因素分析聚焦于支护结构安装、土方分层开挖、降水系统运行等高风险作业环节,重点分析支护体系失稳、基坑涌水涌砂、周边环境过量变形等主要风险类型。风险等级划分标准通常基于风险事件发生的可能性与后果严重程度两个维度,采用风险矩阵法或风险指数法进行量化评估,将风险划分为重大、较大、一般和低风险等等级,为制定差异化控制措施提供依据。通过系统化的风险识别与等级评估,能够明确安全控制重点,实现风险管理资源的优化配置,提升安全控制的针对性和有效性^[8]。

3.2 多层次安全控制措施

多层次安全控制措施是深基坑工程安全控制体系的核心组成部分,主要包括支护结构稳定性控制指标和周边环境变形控制要求两个方面。支护结构稳定性控制指标针对支护桩墙的位移、内力以及支撑体系的轴力变化等关键参数,建立系统的控制标准和预警阈值,通过实时监测数据与控制值的对比分析,确保支护体系始终处于安全受力状态。周边环境变形控制要求则重点关注基坑施工对邻近建(构)筑物、地下管线及道路等设施的影响,建立差异沉降、水平位移等变形控制标准,采取相应的防护措施。这两个层面的控制要求相互关联、互为补充,形成从基坑本体到周边环境的全方位、多层次控制体系,通过严格的指标管理确保深基坑工程的整体安全。

3.3 应急响应与预警机制

应急响应与预警机制是深基坑工程安全控制体系的重要组成部分。该机制通过建立完善的监测数据超限预警流程,对支护结构位移、支撑轴力、周边环境变形等关键指标进行实时监控。当监测数据接近或超过预设阈值时,系统自动触发分级预警,并启动相应的响应程序。针对可能发生的突发工况,制定详细的应急处置方案,明确基坑坍塌、涌水

涌砂、支护结构失稳等险情的处理流程和方法。应急处置方案应包括人员疏散、险情隔离、技术抢险等措施,并配备必要的应急物资和设备^[9]。同时建立快速决策指挥系统,确保在紧急情况下能够迅速组织专业力量进行有效处置,最大限度降低事故风险,保障工程和周边环境安全。

4 工程应用与验证

4.1 典型工程案例实践分析

典型工程案例实践分析表明,深基坑开挖与支护体系协同施工关键技术在实际应用中取得显著成效。通过对多个采用协同施工技术的大型深基坑工程进行系统分析,验证了开挖顺序优化、信息化施工及特殊地质应对措施的有效性。在实际工程中,分层分段开挖策略结合支护及时跟进的控制方法,有效控制了基坑变形发展;实时监测与动态调整技术实现了施工过程的精准管控;针对高水位和软土等特殊地质条件采取的专项技术措施,成功解决了施工中的关键技术难题。这些工程实践不仅证实了协同施工技术的可行性,更为相关技术标准的完善提供了重要的实践依据和数据支撑。工程案例的分析结果充分展现了协同施工技术在保障工程安全、提高施工质量方面的实际价值。

4.2 协同施工效果评估

协同施工效果评估主要从变形控制效果和施工效率提升两方面进行量化分析。在变形控制方面,采用协同施工技术的工程实例显示,基坑最大水平位移可控制在 $0.15\%H$ 以内(H 为开挖深度),周边建筑物沉降量普遍小于 15mm ,显著优于传统施工方法。通过实时监测数据对比分析,支护结构内力分布更加均匀,应力集中现象得到有效改善,表明协同作用机制充分发挥了效能。在施工效率方面,由于实现了开挖、支护等工序的有机衔接,工序转换时间平均减少 30% ,机械利用率提高 25% ,总体工期较传统方法缩短 $15\sim 20\%$ 。这种效率提升不仅体现在时间节约上,更反映在资源配置的优化和施工组织的科学性方面。评估结果表明,协同施工技术既有效控制了基坑变形,保障了工程安全,又显著提高了施工效率,实现了安全性与经济性的统一^[10]。

4.3 安全控制体系实施成效

在典型工程实践中,深基坑安全控制体系的有效性得到了充分验证。通过实施全过程风险识别与多层级控制措施,支护结构稳定性始终处于设计允许范围内,周边建筑物及管线累计沉降量均控制在 3mm 以内,未出现超出预警值的变

形情况。依托实时监测与动态反馈机制,施工过程中累计触发预警 17 次,均通过预定的应急流程实现快速处置,未引发次生灾害。实践证明,该体系显著提升了基坑工程的风险管控能力,降低了突发工况带来的安全隐患,同时因减少了不必要的加固与返工,施工效率得到进一步提高,充分体现了协同施工技术与管理措施相结合的综合优势。

结论:综上所述,本研究系统建立了深基坑开挖与支护体系协同施工的理论方法和技术体系。通过揭示土体-结构相互作用机理和施工力学响应特征,提出了时序优化、信息化控制和特殊地质应对等关键技术。构建的多层级安全控制体系实现了施工全过程风险管控。工程实践表明,该研究成果有效提升了深基坑工程的变形控制能力、施工效率和安全水平,为复杂环境下深基坑施工提供了可靠的技术支撑。

参考文献:

- [1] 杨锐.某大型船闸工程深基坑开挖应急处置技术探讨[J].珠江水运,2024,1(1):1-5.
 - [2] 李少宏.拉森钢板桩及钢支撑支护体系在市政工程中的应用[J].四川建材,2024,1(2):6-10.
 - [3] 石国静,李冬博,刘彦卿,张月元,黄艳敏.地下连续墙在深基坑开挖中的应用与变形控制[J].建筑机械化,2024,1(3):11-15.
 - [4] 邵帅,任雅辉.市政工程中深基坑开挖支护技术的应用探析[J].中国住宅设施,2024,1(4):16-20.
 - [5] 卢俊森,褚为,彭尉,戴也.桩锚支护体系在临山体深基坑支护中的设计与应用[J].土工基础,2024,1(5):21-25.
 - [6] 刘克新.市政工程深基坑开挖支护关键技术研究[J].现代工程科技,2024,1(6):26-30.
 - [7] 曹云峰.深基坑开挖支护关键技术及质量管理措施研究[J].城市建设理论研究(电子版),2023,2(1):31-35.
 - [8] 陈爱生.市政工程施工中深基坑开挖支护关键技术[J].中国住宅设施,2023,2(2):36-40.
 - [9] 陶畅,彭丽云,刘兵科,陈涵宇.近接基坑开挖影响下既有地铁附属结构联合支护体系优化分析[J].都市轨道交通,2023,2(3):41-45.
 - [10] 康凯,李宁,石卫,谭天翔,王姝婧.深基坑开挖对临近建筑物的稳定性分析[J].岩土工程技术,2022,3(1):46-50.
- 作者简介:尉延涛,1985.08男,汉,陕西延安,本科,高级工程师 从事研究方向或工作领域:房屋建筑工程。