

深基坑支护结构在复杂地质条件下的施工技术与变形控制研究

刘 辉

江西齐鼎工程监理有限公司 江西南昌 330000

摘 要: 随着城市建设的不断发展,深基坑工程在各类建筑项目中日益增多。在复杂地质条件下进行深基坑施工,支护结构的稳定性及变形控制是确保工程安全与质量的关键因素。本文聚焦于深基坑支护结构在复杂地质条件下的施工技术与变形控制展开研究。首先对复杂地质条件的特点及其对深基坑支护结构的影响进行了分析,接着详细探讨了适用于复杂地质的多种支护结构施工技术,包括土钉墙支护、桩锚支护、地下连续墙支护等,并阐述了各技术的施工要点与适用范围。同时,通过理论分析与实际案例相结合的方法,研究了深基坑支护结构变形的主要影响因素,如地质条件变化、施工工艺、地下水作用等。在此基础上,提出了一系列有效的变形控制措施,如优化支护结构设计、加强施工过程监测、合理安排施工顺序等。通过本文的研究,旨在为复杂地质条件下深基坑支护结构的施工提供科学的技术指导和变形控制策略,提高深基坑工程的安全性和可靠性。

关键词: 深基坑; 支护结构; 复杂地质条件; 施工技术; 变形控制

引言

城市化进程加速,城市高层、超高层建筑及地下工程增多,深基坑工程规模和数量大幅增加。我国地质条件复杂,深基坑施工常遇软土、砂土、岩石等复杂地质。复杂地质给深基坑支护结构设计与施工带来巨大挑战,其不仅要承受土体侧向压力,还要应对地质变化的不确定性影响,如土体不均匀沉降、地下水渗透等。若施工技术选择不当或变形控制措施不到位,会导致支护结构失稳等严重后果,影响工程并威胁周边环境与公共安全。目前,深基坑支护结构研究虽有成果,但复杂地质条件下的系统性研究仍不足。因此,深入研究复杂地质条件下深基坑支护结构的施工技术与变形控制意义重大,可为工程提供科学方案和控制措施,提高安全性与经济效益,推动技术发展。

一、复杂地质条件下深基坑支护结构的受力特性与变形机理

(一) 复杂地质条件的内涵与特征

复杂地质条件的内涵与特征是深基坑支护结构设计与施工分析的首要前提。其内涵指多种地质因素在特定空间域相互叠加、共同作用形成的地质环境,挑战工程稳定性。具体表现为:岩土体性质在垂直和水平方向的不均匀性;地下水条件复杂,包括高承压水、多层水位差异等;存在不良地质现象,威胁支护结构稳定和施工

安全。深入剖析其内涵与特征,可为工程勘察和地质模型建立提供靶向,助设计人员建立三维地质模型,为支护结构选型和受力分析提供可靠依据,规避设计失误。

(二) 深基坑支护结构的主要类型及其适用性

深基坑支护结构的主要类型及其适用性分析是基于地质条件的工程决策过程。当前主要支护结构类型有桩墙式支护、重力式支护、土钉墙与复合土钉墙、支撑锚杆体系等。每种类型原理、承载能力和变形控制机理不同,对地质条件适应性差异大。如地下连续墙适用于超深基坑,土钉墙适用于地质好、开挖浅的基坑。系统梳理各类支护结构特点和适用边界,可为科学选型提供决策框架,助工程师综合比选,保证工程安全、经济、合理^[1]。

(三) 复杂地质对支护结构受力特性的影响

复杂地质对支护结构受力特性的影响是本章核心问题。这种影响多层次、非线性,决定了支护结构内力分布的复杂和不确定。岩土体参数空间变异性使土压力分布畸变;地下水影响关键,渗流力改变土压力,高承压水有上浮力风险,不当降水会引发流砂;不良地质体产生集中荷载或应力集中区。深入研究其影响,可揭示传统设计方法局限,推动设计理念转变,建立精细化数值分析模型,准确模拟受力状态,优化结构设计,避免结构失效风险。

(四) 深基坑支护结构变形的主要机理与影响因素

深基坑支护结构变形的机理与影响因素分析是

评估基坑工程对周边环境影响、制定变形控制措施的依据。变形是土体与支护结构共同作用结果，核心机理是基坑开挖打破应力平衡，引发土体位移并传递给支护结构。支护结构自身刚度等决定其抗变形能力。影响因素包括地质条件、基坑开挖的时空效应、降水工程和基坑周边荷载。系统阐明机理和识别因素，可为监测方案设计提供指导，实现基坑工程安全状态的动态评估与预警，预防事故^[2]。

二、复杂地质条件下深基坑支护结构的施工关键技术

（一）施工前准备与地质勘察强化技术

施工前准备与地质勘察强化技术是应对复杂地质的首道防线，可减少因地质信息不足致决策失误和施工风险。传统勘察在复杂区域难捕捉土层等细微变化，强化技术要求采用综合勘察手段，增加勘探点密度，辅以原位测试方法获取土体参数和地下水特征。同时建立三维地质信息模型，可视化勘察数据，揭示地质体分布和不良地质体位置。此外，施工前技术准备还包括编制专项方案、技术交底和对施工人员进行培训，确保了解风险与应对措施。

（二）支护结构选型与优化组合技术

支护结构选型与优化组合技术是决定基坑工程安全与经济的核心。复杂地质下单一支护难应对风险，该技术通过科学组合实现不同支护优势互补。设计人员基于强化的地质勘察数据，综合分析基坑周边环境、开挖深度等因素。如软土且邻近重要建筑采用“地下连续墙+内支撑”组合，上杂填土下岩层场地采用“排桩+预应力锚索”组合。优化组合关键在于考虑支护强度、稳定性及协同变形特性，确保满足周边环境要求。

（三）关键工序施工控制技术

关键工序的施工控制技术，是将设计方案转化为实体结构的具体执行过程，其价值在于通过精细化的过程管控，确保每一道工序的施工质量都达到设计要求，这是控制支护结构受力和变形的根本保障。以钻孔灌注桩施工为例，成孔质量控制是重中之重，在复杂地质中，必须严格控制钻孔的垂直度、孔径和孔深，防止因孔斜导致钢筋笼下放困难和桩体承载力下降；同时，要有效控制泥浆性能，防止孔壁坍塌和沉渣过厚。对于锚杆或土钉施工，注浆质量控制直接决定了其抗拔力，需控制注浆压力、浆液水灰比和注浆量，确保浆体能有效填充土体裂隙，形成可靠的锚固体。基坑开挖工序则具有显

著的时空效应，其控制技术强调“分层、分段、对称、平衡、限时”的原则，即严格按照设计要求的分层厚度和分段长度进行开挖，并做到对称开挖以避免基坑受力不均，每段开挖后必须及时架设支撑或浇筑垫层，最大限度减少无支护状态下的基坑暴露时间。对每一项关键工序制定详细的作业指导书和质量验收标准，并进行全过程旁站监督，是确保施工控制技术落地的有效手段^[3]。

（四）施工过程中的动态调整与信息化施工管理

施工过程中的动态调整与信息化施工管理，是应对复杂地质条件下不确定性的核心管理手段，其价值在于构建一个“监测-分析-预警-调整”的闭环反馈系统，实现施工过程的实时控制和风险预控。信息化施工管理平台是这一系统的核心，它集成了地质勘察数据、设计模型、施工计划以及各类监测传感器（如支护结构内力、深层土体位移、支撑轴力、地下水位等）的实时数据。通过对这些海量数据进行实时分析，可以判断支护结构的实际工作状态是否与设计预期相符。例如，当监测数据显示支护结构变形速率突然增大或支撑轴力接近报警值时，系统会自动发出预警。此时，动态调整机制启动，管理人员可以立即暂停相关区域的施工作业，结合现场实际情况和数据分析结果，采取应对措施，如增加临时支撑、调整开挖顺序、进行背后注浆加固等。

三、深基坑支护结构的变形控制策略与措施

（一）变形控制的原则与标准

变形控制的原则与标准，是整个控制体系的基石与准则，其价值在于为变形控制工作提供明确、量化的依据，确保控制的科学性与可操作性。控制原则强调预防为主、综合治理，要求在工程初期即对变形风险进行系统性评估，并将控制措施贯穿于设计与施工全过程。控制标准则具体体现在一系列量化指标上，如支护结构顶部水平位移的最大值、最大位移速率、邻近建筑物的不均匀沉降量、地下管线的沉降曲率等。这些标准的制定，并非随意设定，而是基于地质条件、基坑深度、周边环境敏感度以及支护结构类型等多种因素，通过理论计算、工程经验总结和规范要求综合确定的。其研究价值在于，为不同工程条件下的变形控制提供了基准，使得设计方案的选择、施工工艺的优化以及监测数据的判读都有了统一的标尺，是实现精细化管理和风险可控的前提^[4]。

（二）设计阶段的变形控制策略

设计阶段的变形控制策略，是从源头上控制变形的关键环节，其价值在于通过优化设计方案，从根本上降

低支护结构发生过大变形的可能性,为后续施工阶段的变形控制奠定坚实基础。该阶段的核心策略包括:首先,基于详尽的地质勘察资料,采用更为精确的计算模型,如考虑土体与支护结构共同作用的有限元法,对支护结构的内力和变形进行精细化预测与分析。其次,在方案比选中,优先选用刚度大、变形控制性能好的支护结构形式,如地下连续墙或组合式支护体系。同时,通过设置多道支撑或预应力锚杆,主动分担土压力,限制支护结构的位移发展。此外,合理的降水设计也是控制变形的重要一环,通过有效降低坑内地下水位,可以显著减小水头差对支护结构产生的附加荷载。设计阶段策略的价值,体现在将变形控制的关口前移,通过科学的分析与优化,将潜在的变形风险在图纸阶段予以消解或大幅削弱。

(三) 施工阶段的主动与被动变形控制措施

施工阶段的变形控制,是将设计意图转化为现实的关键过程,其价值在于通过精细化的现场管理与技术手段,将设计方案中的变形控制措施落到实处,并根据实际情况进行动态调整。主动控制措施是指在变形发生前或发生初期即采取的干预手段,例如,严格按照设计要求的分层、分段、对称、平衡的原则进行土方开挖,避免坑边超载,控制开挖暴露时间;在支撑或锚杆施工中,确保预应力施加的精度和时效性,使其能够立即发挥约束作用。被动控制措施则是指在变形发生或达到预警值后,为遏制变形加剧而采取的补救措施,例如,在基坑变形速率超标时,及时增设临时钢支撑、对坑底进行地基加固(如注浆)、或对支护结构背后土体进行回填等。施工阶段措施的价值在于其极强的针对性和可操作性,它直接作用于工程实体,是控制变形最直接、最有效的环节,其成功实施直接决定了基坑工程的最终安全状态。

(四) 施工监测与预警机制

施工监测与预警机制,是连接设计与施工的“神经网络”,是变形控制体系中的“眼睛”和“耳朵”,其价值在于实现对变形状态的实时感知、动态评估和风险预警,为决策提供及时、可靠的数据支持。该机制首先要求建立一个科学合理的监测方案,明确监测点的布设位置、监测频率、监测精度以及各项控制阈值。监测内容应涵盖支护结构本身(如位移、沉降、内力、支撑轴

力)和周边环境(如邻近建筑物沉降与倾斜、地下管线变形、地表沉降)。预警机制则根据监测数据与预设标准的对比关系,设立多级预警等级,如黄色预警、橙色预警和红色预警。当监测数据接近或达到某一预警阈值时,系统自动发出警报,提示管理人员启动相应的响应预案,如加密监测频率、分析原因、采取加固措施等。其核心价值在于实现了从“事后处理”到“事前预防”和“事中控制”的管理模式转变,通过持续、动态的数据反馈,使得变形控制不再是盲目的经验判断,而是基于数据驱动的科学决策,从而最大限度地避免了重大安全事故的发生,保障了工程的顺利进行^[5]。

结语

复杂地质条件下深基坑支护结构研究与实践涵盖理论分析到施工管理多关键环节。剖析支护结构变形机理与因素,运用先进施工技术,实施变形控制策略,各环节紧密相连。未来基坑工程中,城市建设发展使地质条件更复杂,基坑深度和规模增加。因此需深化研究,一方面完善变形控制理论方法,提高预测精度,为工程提供可靠依据;另一方面加强施工技术创新应用,引入智能自动化设备和管理系统,提高效率质量、降低风险。同时注重多学科交叉融合解决新问题,加强工程经验总结交流,建立案例数据库供参考。总之,该研究实践是持续发展过程,应不断探索创新,确保基坑工程安全、可靠、经济,为城市建设可持续发展做贡献。

参考文献

- [1] 周杰.复杂条件下某地下工程深基坑支护结构设计及施工关键技术研究[D].扬州大学,2021.
- [2] 周予启,刘卫未,薛刚,等.复杂条件下超深基坑变形控制关键技术研究与应用[J].建设科技,2022(007):000.DOI:10.16116/j.cnki.jskj.2022.07.020.
- [3] 锦锋巨.大型深基坑施工技术及应用[J].工程技术与管,2020.DOI:10.26549/gcjsygl.v4i13.5890.
- [4] 滕祖星.复杂地质条件下深基坑支护技术[J].2021.DOI:10.3969/j.issn.1672-4011.2021.04.034.
- [5] 焦兵,王加彬,周益军,等.复杂地质深埋承台深基坑支护结构设计及施工技术研究[J].建筑机械(上半月),2021,000(005):30-33.