

深基坑支护技术在复杂地质条件下的选型与施工优化

王 玺

中核核电运行管理有限公司 浙江 嘉兴 314300

【摘要】：深基坑工程在城市建设中广泛应用，而复杂地质条件下的支护技术选型与施工方案直接影响工程安全与成本控制。本文分析不同地质环境中常见的深基坑支护方式，结合实际工程案例，探讨适用于各类复杂地质的支护技术选型策略，并从结构安全性、施工可行性与经济性角度提出相应的施工优化建议。研究结果可为类似条件下的基坑工程提供科学参考与实践指导。

【关键词】：深基坑支护；复杂地质；技术选型；施工优化；安全性

DOI:10.12417/2811-0528.26.12.009

引言

在城市化快速发展的背景下，地下空间开发需求日益增长，深基坑工程逐渐成为常态。复杂多变的地质条件为支护结构的设计与施工带来了显著挑战。如何在保证工程安全的前提下，科学合理选择支护形式，并进行高效施工，是当前岩土工程领域亟需解决的重要问题。本文旨在通过系统分析与工程实证，探索应对复杂地质环境的深基坑支护技术及其施工优化路径。

1 复杂地质条件下深基坑工程面临的主要挑战

深基坑工程在复杂地质条件下的实施常常伴随着诸多不可控因素，地质的不确定性使支护系统的设计与施工面临严峻挑战。软弱土层、富水地层、夹层交替或强风化岩层等复杂地质构造，会直接影响基坑稳定性与支护结构的受力状态。在软弱地基中，土体抗剪强度低，容易发生大变形甚至塌方；而在富水地层中，地下水的渗透压力对支护结构产生额外荷载，并可能引起基坑底部隆起、管涌等失稳现象。地层的不均匀性也常导致支护结构受力分布异常，进而引发局部应力集中、结构变形不均，可能出现裂缝、变形超限等问题，增加了设计的复杂度，也对施工过程中的技术控制和安全保障提出更高要求。

施工过程中，地质条件的复杂性还会影响基坑周边环境的稳定性。在城市密集区施工，毗邻建筑、地下管线和地铁结构的存在对基坑位移控制提出更高要求，而复杂地质更容易引发基坑变形超限问题。砂土夹粘土互层的地层中，支护结构位移与地表沉降呈现非线性发展，难以利用常规方法有效预测与控制。岩溶、断层等不良地质现象也会在基坑开挖过程中突出现，对施工计划和安全控制造成极大干扰，往往需要紧急设计调整，增加工程不确定性和成本压力。

从施工组织与技术实现角度看，复杂地质条件使支护技术的选型和施工工艺的配合变得更加困难。针对不同地质单元需要差异化的支护方案，如采用排桩结合喷锚、地连墙联合内支

撑或逆作法施工等多种混合支护体系。而各类支护方式对设备能力、施工精度、监测系统布设都有更高要求，稍有不慎便可能引发结构破坏或地基失稳。地质条件变化频繁区域的施工周期普遍延长，要求施工单位具备快速响应、动态调整方案与高效执行能力。在复杂地质条件下实施深基坑工程，是技术层面的挑战，更对项目全过程的管理能力提出了更高要求。

2 常见深基坑支护技术及其适应性分析

在深基坑工程中，支护技术的选择需要充分考虑地层结构、地下水状况及周边环境等多重因素，不同支护形式在适应性方面具有明显差异。常见的支护技术包括放坡支护、重力式挡墙、排桩支护、地下连续墙、复合土钉墙以及喷锚支护等。放坡支护适用于空间宽裕、地层稳定的区域，具有施工简便、造价低的优势，但在城市中心或紧邻建筑物时通常不适用。重力式挡墙依靠自重抵抗侧向土压力，适合浅基坑或稳定地层，但受限于结构厚度大、施工周期长，在复杂地质下难以灵活调整。相较之下，排桩支护和地连墙支护在复杂地质条件中表现出更强的适应性，尤其在软土、砂土或高水位地区具有良好的抗渗性与结构刚度。

排桩支护常用于中等深度基坑施工，可根据桩型和桩距灵活调整支护强度，并经过加设锚索或内支撑系统提高整体稳定性。钻孔灌注桩、SMW工法桩等变形控制能力强，适用于土体扰动敏感或要求控制沉降的区域。地下连续墙因其连续性和高抗弯刚度，在高水位、深层软土或流沙地层中具有显著优势，能够有效阻挡地下水渗透，减小坑外变形影响，对邻近建筑物保护效果较好。该工艺对施工设备、槽壁稳定性及泥浆性能控制要求极高，造价及施工周期也相对较高。喷锚支护系统适用于自稳性较好、基坑不太深的岩土环境，可灵活布置支护面并快速施工，但其抗渗性能有限，难以单独应对高水位或松散地层。

在地质条件复杂、地层变化频繁的工程中，常需采用复合支护系统来应对不同层位的差异化支护需求。在上部为填土和

淤泥层、下部为卵石层的区域,可能采用地下连续墙与内支撑结合的方式,兼顾止水、稳定与变形控制。在岩溶发育地带,设置桩端扩底、地基注浆或帷幕灌浆等手段提高支护结构的稳定性与适应性。选型过程中还需结合数值模拟、原位测试与现场监测数据,对不同技术组合的变形控制效果与经济指标进行综合评估,从而实现技术可行性与经济合理性的统一。复杂地质条件下的支护技术选择不再是单一标准可套用的模板,而是必须根据具体工程特点进行系统分析与多方案比选,才能确保基坑施工的安全、高效与可控。

3 复杂地质环境中的支护技术选型策略

复杂地质环境下,支护技术的选型需要基于对地质构成、地下水特征以及周边环境影响因素的系统认知与工程经验的深度融合。不同于一般土层结构,复杂地质常涉及软弱夹层、岩溶发育、强风化带、断层构造及高水位等不良地质条件,各类因素耦合作用对支护系统的结构强度与施工适应性提出更高要求。选型过程中应充分依托地质勘察数据,通过地质剖面分析明确各层分布、物理力学性质与水文特征,并建立相应的风险评价体系。当孔隙比大于0.9、天然含水率高于40%的淤泥质土层广泛分布时,需优先考虑抗变形能力强、止水性能好的支护形式,如地下连续墙结合内支撑体系,以应对侧向土压力与渗流破坏风险。

选型策略应以工程安全性为核心,结合施工可行性与经济性进行多方案比选。在软弱地层且存在大量地下水的条件下,采用SMW工法桩结合预应力锚索可有效增强结构稳定性,并具备较强的抗渗性能。实际工程表明,当采用800mm厚的地下连续墙支护系统时,在30m深的基坑中水平位移控制在15mm以内,远低于行业标准规定的30mm限值,显示出极佳的变形控制能力。而在存在强风化岩层或不均匀沉积的复合地基中,则推荐采用钻孔灌注桩联合土钉墙的复合支护体系,多点支护与加固增强基坑边坡稳定。选型过程中,应充分运用数值模拟手段,建立有限元模型进行力学响应预测,并与原位测试数据相结合,修正设计参数,确保技术方案的科学性与可行性。

在满足结构安全的前提下,施工组织与经济成本也是选型策略中的关键考量因素。复杂地质区域往往施工难度大、周期长,选型需兼顾工艺复杂度与设备匹配能力。在城区高密度建筑区域,基坑深度超过25m的工程中采用逆作法配合地连墙支护,可有效减少地面施工扰动并提升施工效率。而在地层结构变化频繁的区域,分段施工与分区选型可实现对不同地质单元的精细化支护匹配,从而降低材料浪费与技术风险。大量工程实践表明,综合采用组合支护与动态调整设计策略,在不良地质条件下可节约支护成本10%~15%,大幅提升工程质量与

进度控制能力。在复杂地质环境中,支护技术选型应统筹地质适应性、安全、效率与经济性,形成以数据驱动、动态优化为核心的科学决策路径。



4 支护施工过程中的关键控制要点与优化路径

支护施工过程在复杂地质条件下具有高度的不确定性与技术敏感性,因此全过程的关键控制尤为重要。在基坑开挖前,需根据详尽的地质勘察资料制定科学合理的施工组织方案,明确各支护工序的技术要求与时间节点。场地平整与围护结构施工期间,控制支护桩或地下连续墙的垂直度、深度和接缝严密性是保证结构整体稳定的首要条件。在连续墙施工中若接缝处理不当,将直接影响其止水与抗弯性能,可能引发渗漏或墙体结构失效。此阶段还需加强泥浆比重、粘度及沉渣控制,确保槽壁稳定,避免塌孔事故。在复杂地层中应预设应急加固方案,如遇到突发孤石、溶洞或断层结构时,立即采用高压旋喷、灌浆帷幕等手段处理,以保障支护体系的完整性和连续性。

基坑开挖过程中,土方开挖与支护结构同步施工是控制变形和防止失稳的关键策略。在多层支撑体系中,每一层支撑的安装位置与预加力大小对结构受力平衡起着决定性作用,施工单位需严格按设计顺序施工,并实时监测支护结构内力与周边位移数据。当监测数据显示支护桩水平位移超过警戒值(如25mm),应立即暂停开挖,调整支撑体系或加设临时支撑以分担荷载。地下水位控制同样至关重要,设置明排水或井点降水系统维持基坑底部干燥,避免因基底隆起或渗透破坏引发坑底破坏。对于高水位或承压水层区域,降水应分级缓降并结合坑外截水措施,确保基坑安全开挖。施工阶段还应采用BIM协同管理与三维地质模型技术,实时动态调整施工流程,在保障施工精度的同时,提升管理效率与响应速度。

优化路径的核心在于将技术手段与管理措施有机结合,实现全过程可控、动态调整与高效运行。复杂地质条件下的支护施工应推进信息化施工平台建设,整合监测、预警、施工进度与资源调度数据,实现智能化预控。传感网络实时采集支护结构应力、地表沉降与地下水位数据,与设计模型联动比对,实现早期预警机制。一项基于大数据分析的工程研究显示,在实

施自动化监测与智能分析系统后, 基坑事故风险率降低了23%, 施工周期平均缩短10%以上。在优化工艺方面, 应推广装配式支撑、钢支撑循环利用与高性能混凝土等新型材料和工法, 减少施工时间和资源消耗。建立标准化施工流程与分阶段验收制度, 提升工程质量控制水平, 从源头上减少设计与施工偏差带来的安全隐患。复杂地质条件下支护施工的关键在于系统性的控制管理与技术路径的持续优化, 唯有实现技术与管理的双重闭环, 方能保障深基坑工程在高风险环境中的安全高效完成。

5 基于工程案例的选型与施工优化综合分析

在某沿江地铁车站基坑工程中, 场地地质条件复杂, 上部为松散填土及淤泥质粘土层, 下部为强风化泥岩, 地下水丰富且水压较高。基坑开挖深度达26.5米, 邻近既有地铁结构与高层建筑, 对支护结构稳定性与变形控制要求极高。项目团队基于地勘资料及变形控制目标, 经多轮比选后确定采用800mm厚地下连续墙结合三道钢筋混凝土内支撑系统作为支护方案。该方案在止水性能、整体刚度与抗侧向稳定性方面表现优越, 有效应对软弱土层的沉降问题与高水位渗透影响, 支护体系在实际施工中控制了墙体最大水平位移在18.3mm以内, 优于设计警戒值25mm。

在施工优化方面, 为克服地层差异带来的应力集中问题, 项目在连续墙施工中引入了分区槽段工艺, 并调配不同泥浆性能控制槽壁稳定。在软土段设置了高压旋喷桩止水帷幕, 形成多重止水系统, 从而减少施工降水对周边地层扰动。内支撑施工阶段, 预应力张拉与智能张拉系统相结合, 确保各支撑层受力均衡、变形可控。施工单位引入BIM+GIS技术平台建立数

字化模型, 对支护结构与地下管线关系进行可视化模拟, 避免了支撑布置对地下设施的不利影响。在支护体系运行期间, 安装了自动化监测系统对沉降、水平位移与支撑轴力的连续跟踪, 系统每日数据反馈指导施工调整, 实现了支护全过程的实时优化控制。

工程完工后的监测数据显示, 基坑沉降最大值为9.6mm, 远低于20mm的预警标准, 邻近建筑未出现结构性影响, 基坑支护系统安全稳定, 施工周期较原计划缩短12%。该案例充分验证了在复杂地质条件下, 科学的支护结构选型与施工阶段的全过程动态优化, 能够实现深基坑工程的安全、高效与经济目标。尤其是在信息化与智能化技术的协同作用下, 选型与施工过程不再依赖单一经验判断, 而是建立在多源数据驱动与工程模型推演基础之上, 为类似工程提供了可复制的系统化支护技术路径。这一综合分析思路也体现出当前深基坑工程管理正逐步向精细化、智能化和标准化发展, 具有重要的工程应用推广价值。

6 结语

本文围绕复杂地质条件下深基坑支护技术的选型与施工优化展开系统研究, 结合工程实际, 分析了不同支护技术在复杂地层中的适应性及其应用策略。剖析施工过程中的关键控制要点, 并辅以典型工程案例的综合分析, 提出了具有实践指导意义的优化路径。研究表明, 科学的选型决策、动态的施工控制与信息化管理手段的融合, 是提升复杂地质条件下深基坑支护工程安全性与经济性的关键方向, 为今后同类工程提供了有益参考。

参考文献:

- [1] 李建勋,周炯.深基坑支护结构设计与施工技术[J].岩土工程技术,2018,36(2):112-116.
- [2] 黄志远,杨志宏.地铁基坑支护技术研究及优化分析[J].建筑技术开发,2020,47(3):83-87.
- [3] 王绍平,郭文凯.不良地质条件下基坑支护技术的适用性研究[J].中国建筑学报,2019,45(5):56-60.
- [4] 陈国栋,曾祥龙.复杂地质环境中地下连续墙施工技术探讨[J].工程设计与设计,2021,27(4):101-104.
- [5] 赵春生,孙海明.基于BIM技术的深基坑工程信息化管理研究[J].土木工程与管理学报,2022,39(1):72-76.