

复杂地质条件下水利枢纽深基坑支护施工技术分析

唐 慧

中国水利水电第九工程局有限公司 贵州 贵阳 550081

摘 要: 水利枢纽深基坑工程受复杂地质与高水压工况影响, 施工稳定性与防渗难度极大, 极易出现坍塌、突水、变形超标等安全隐患。本文结合软弱土层、断层破碎带、岩溶砂层等典型复杂地质特征, 剖析基坑施工核心难点, 系统阐述排桩、地下连续墙、复合支护等关键施工技术。同时从前期筹备、工序质控、动态监测、风险防控多维度制定管控措施, 为同类水利基坑支护施工提供技术参考与实践借鉴。

关键词: 复杂地质条件; 水利枢纽; 深基坑支护; 施工技术

引言: 水利枢纽工程基坑具有开挖深度大、水文条件复杂、受力体系特殊等特点, 相较于普通建筑基坑, 施工风险与技术难度显著更高。我国多地水利工程建设均面临软弱土层、破碎带、岩溶等复杂地质条件, 极易引发基坑失稳、渗流破坏等病害。为保障水利枢纽基础施工安全与工程质量, 规避地质与水文带来的施工风险, 亟需针对性研究适配性支护技术与质控方案, 助力水利工程安全高效建设。

1 复杂地质下水利枢纽深基坑施工特性与难点

1.1 水利枢纽深基坑工程特性

(1) 工程规模特性: 水利枢纽基坑开挖深度大、跨度广, 临水面施工场景多, 整体受力复杂, 对支护结构整体刚度、稳定性要求远高于普通建筑基坑。受坝体自重与水荷载双重作用, 基坑侧壁承受显著水平推力, 支护体系需具备足够的抗弯刚度和连续封闭性, 以有效控制围护结构变形。(2) 水文工况特性: 紧邻河道、库区, 地下水水位高、水压大, 渗流作用显著, 基坑易出现积水、管涌、渗流破坏等问题。水位动态变化频繁, 汛期外水头急剧抬升, 基坑内外水压差骤增, 极易诱发渗透变形, 严重威胁坑底稳定与围护结构安全^[1]。(3) 使用功能特性: 基坑后期承担枢纽基础承载、防渗止水等核心功能, 支护施工需兼顾临时支护与永久结构适配性。围护墙体、防渗帷幕等临时设施需与坝体基础结构协调统一, 为“永临结合”创造条件, 降低工程综合造价。

1.2 水利枢纽常见复杂地质类型

(1) 软弱土层地质: 以淤泥质土、粉质软土为主, 土体承载力低、压缩性大, 易发生基坑沉降、边坡滑移变形。该类土层灵敏度高, 受施工扰动后强度明显衰

减, 支护结构需加大嵌固深度以抵抗基底隆起和整体失稳。(2) 断层破碎带地质: 岩体完整性差、结构松散, 存在大量裂隙, 开挖后易出现岩体坍塌、掉块, 应力分布极不均匀。断层带常构成地下水运移的优先通道, 其低强度、高压缩性特征使支护结构局部承受异常偏载。(3) 岩溶与砂层地质: 岩溶空洞、松散砂层分布杂乱, 透水性强, 易引发流沙、突水、基坑塌陷等突发风险。岩溶区隐蔽性溶洞勘探难度大, 砂层中动水压力易携带细颗粒流失形成空洞, 灾害前兆不明, 预警难度极大。

1.3 复杂地质下深基坑支护施工核心难点

(1) 土体稳定性控制难: 复杂地层土体力学性能不均, 支护结构受力不均衡, 易出现局部变形、开裂甚至整体失稳。不同地质界面处物理力学参数突变, 开挖卸荷引起的应力重分布使围护结构受力状态偏离设计假定。(2) 防渗止水难度大: 高地下水压与地层裂隙发育相互叠加, 单一支护结构防渗效果有限, 渗流隐患难以彻底根除。防渗帷幕与支护桩墙协同工作受地质条件制约, 搭接缺陷和施工冷缝易形成集中渗漏点, 水下修补极为困难。(3) 施工扰动影响显著: 复杂地质土体敏感性强, 开挖与支护施工易扰动周边地层, 引发不均匀沉降, 威胁基坑及周边结构安全。降水、开挖及重型机械作业产生的振动和应力释放, 可能触发软弱夹层卸荷蠕变, 产生滞后性变形。(4) 施工适配性要求高: 不同复杂地质缺陷差异大, 通用支护技术适配性差, 需针对具体地质条件定制施工方案, 增加了施工组织与技术选型难度。地质条件空间不均匀性要求支护参数随工况动态优化, 对现场决策响应速度和资源配置灵活性构成双重考验。

2 复杂地质条件下水利枢纽深基坑支护施工技术

2.1 排桩支护施工技术

(1) 技术原理：通过钻孔灌注桩、预制排桩形成连续围护结构，依托桩体自身抗弯刚度抵御侧向土压力与水压力，实现基坑边坡有效支护。排桩体系将外部荷载通过桩身传递至深层稳定地层，利用桩土共同作用机制维持基坑整体稳定。(2) 核心施工工艺：场地平整 → 桩位放样 → 钻孔清孔 → 钢筋笼安装 → 混凝土灌注 → 桩体养护 → 冠梁与腰梁施工。钻孔阶段需严格控制垂直度偏差，防止桩体倾斜影响排桩整体受力性能；钢筋笼安装应确保保护层厚度满足设计要求；冠梁与腰梁施工须将各单桩连成整体，形成空间协同受力体系，提升围护结构整体刚度^[2]。(3) 复杂地质适配性：适用于软弱土层、一般破碎地层，施工噪音小、对周边环境影响较低，在城市周边水利工程中具有一定优势。但单独使用时桩间土体易发生局部塌落，防渗性能较弱，需搭配高压旋喷桩或水泥土搅拌桩等止水帷幕协同使用，形成“支护+防渗”联合体系，方可满足高地下水位条件下的工程需求。

2.2 地下连续墙支护施工技术

(1) 技术原理：在基坑周边开挖连续沟槽，浇筑钢筋混凝土形成整体式地下墙体，集支护、防渗、挡土功能于一体。地下连续墙作为刚性地下结构，既承担施工期临时支护作用，又可作为永久坝体基础的一部分，实现“永临结合”。(2) 核心施工工艺：导墙施工 → 槽段划分 → 成槽开挖 → 泥浆护壁 → 清槽换浆 → 钢筋笼制作吊装 → 水下混凝土浇筑 → 墙段接头处理 → 墙底注浆^[3]。其中导墙施工是确保槽段精度的前提，泥浆护壁是维持槽壁稳定防止坍塌的关键环节，接头处理直接关系到整墙连续性和防渗效果，须采用可靠的锁口管或接头板工艺。(3) 复杂地质适配性：适配高水压、深基坑、破碎带及砂层地质，墙体整体刚度大、防渗效果优异，是水利枢纽深基坑中应用最为广泛的核心支护技术。地下连续墙可嵌入不透水层形成闭合止水系统，有效切断基坑内外水力联系。其不足在于施工成本高、设备要求高、工艺复杂，槽段接头处若处理不当易成为渗漏薄弱环节。

2.3 锚索+喷射混凝土复合支护技术

(1) 技术原理：依托锚索深入稳定地层提供持续锚固力，搭配喷射混凝土封闭边坡表层，形成“深层锚固+表层防护”的协同支护体系。锚索将不稳定岩土体的下滑力传递至深部稳定地层，喷射混凝土则防止坡面风化

剥落和局部崩塌。(2) 核心施工工艺：边坡修整 → 钻孔定位 → 锚索安装 → 一次注浆 → 二次高压注浆 → 锚固养护 → 挂网铺设 → 分层喷射混凝土 → 表面整平 → 养护成型。二次注浆是确保锚固体与孔壁紧密贴合、提高锚固力的关键工序；喷射混凝土应分层施作，每层厚度控制在合理范围内，确保与钢筋网及坡面粘结密实^[4]。(3) 复杂地质适配性：适用于岩质破碎地层、边坡坡度较大的基坑，施工灵活、设备简便、综合造价较低，可有效约束表层岩体脱落和局部掉块。该技术需配合完善的排水工艺使用，避免坡体积水导致锚固体腐蚀和喷射混凝土层剥离，同时不宜单独用于高水压软土基坑。

2.4 水泥土搅拌桩复合支护技术

(1) 技术原理：通过深层搅拌设备将水泥固化剂与原土体充分拌合，形成具有一定强度和抗渗性的水泥土桩体，各桩相互搭接形成连续止水支护帷幕，有效提升地层整体稳定性和防渗性能。(2) 核心施工工艺：桩位定位放线 → 搅拌机就位对中 → 下沉搅拌喷浆 → 提升喷浆搅拌 → 重复下沉搅拌 → 重复提升搅拌 → 桩体搭接成型 → 静置养护。喷浆量及搅拌速度需根据地层条件实时调节，相邻桩体施工间隔时间不得超过水泥初凝时间，以保证搭接质量满足防渗要求。(3) 复杂地质适配性：针对性适配软土地层，在防渗加固方面效果突出，可有效提升软弱土体承载力并兼作隔水层，施工成本低、环境影响小。该技术不适用于坚硬岩体、岩溶空洞及含大粒径卵石地层，搅拌头无法有效破碎岩块或穿越空洞，难以保证桩体成型的连续性和均匀性。

3 复杂地质条件下水利枢纽深基坑支护施工质量控制与风险防控措施

3.1 施工前期准备与方案优化

(1) 精细化地质勘察：针对性开展水文地质专项勘察，精准探明地层分布、地下水压力、裂隙及空洞发育情况，为支护方案选型提供数据支撑。对于岩溶发育区，宜辅以跨孔 CT、地质雷达等物探手段进行加密探测，进一步查明隐蔽溶洞的空间分布特征和充填状态，并结合超前钻探验证物探成果。(2) 支护方案择优优化：结合地质类型、基坑深度、水压工况，对比各类支护技术优劣，优先采用适配性强的复合支护方案，规避单一技术短板。对于复杂地质叠加段，应组织专家论证，综合经济技术指标比选后确定最优方案，并针对不同地质区段因地制宜地进行分区段设计，实现差异化精准施策。(3) 施工技术交底与设备筹备：开展专项技术交底，明确复杂地质施工重难点，检修调试施工设备，储备应急物资，保障施工有序开展。针对可能遭遇的突

发地质风险,提前制定应急处置预案,组织开展应急演练,确保人员培训到位、物资储备充足、响应机制顺畅高效。

3.2 核心施工工序质量控制措施

(1) 成孔成桩质量控制:严格控制钻孔深度、垂直度、孔径,做好清孔工序,杜绝塌孔、缩径问题,保障桩体、墙体成型质量。在软弱土层中宜选用稳定性好的泥浆护壁工艺,在破碎带地层中应适当降低钻进速度、加大泥浆比重并增加护壁循环时间,防止孔壁失稳坍塌。(2) 防渗施工质量控制:重点把控桩体搭接、墙段接缝、注浆密实度,优化止水帷幕施工工艺,杜绝渗流通道,强化基坑整体防渗性能。地下连续墙槽段接头须采用可靠的锁口管或接头板工艺,确保相邻墙段紧密咬合;水泥土搅拌桩相邻桩体施工间隔不得超过水泥初凝时间,搭接宽度须满足防渗设计要求,施工完成后应进行抽芯检测和围井试验验证防渗效果^[5]。(3) 支护结构成型养护控制:根据水利工程施工环境,合理管控混凝土浇筑温度、养护时长,避免温差、干湿变形导致的结构开裂。大体积混凝土浇筑时应采取分层分段方式,严格控制入模温度,养护期内持续保湿保温,确保结构强度稳步增长且抗裂性能满足设计指标,防止因养护不到位引发收缩裂缝。

3.3 施工全过程动态监测技术

(1) 监测指标布设:重点监测基坑边坡位移、支护结构沉降、墙体侧向变形、地下水位、渗流量等核心指标。监测点布设应覆盖地质条件突变段和受力集中部位,在断层破碎带及岩溶区段应增设深层位移和孔隙水压力监测点,形成完整立体的监测网络,确保采集数据全面反映基坑整体安全状态。(2) 动态监测实施:采用自动化监测设备实时采集数据,施工全程跟踪监测,高频把控复杂地质施工阶段的结构稳定性变化。对关键断面和风险时段加密监测频率,遇暴雨、洪峰过境或水位骤变时应启动加密观测方案,及时捕捉异常信号,确保风险态势实时掌握。(3) 数据预警与调整:设定安全预警阈值,发现数据异常及时停工研判,动态调整施工工艺与支护参数,实现信息化动态管控。建立监测数据日报与周报制度,对超过预警值的情况须第一时间组织分析原因并制定纠偏措施,做到风险早发现、早研判、早处置,确保基坑安全始终处于受控状态。

3.4 常见施工风险与应急防控措施

(1) 边坡坍塌风险:针对破碎带、软土地层坍塌隐患,采取分层分段开挖、随挖随支工艺,提前加固薄弱地层,严控开挖坡度。施工前应对边坡整体稳定性进行系统验算,开挖过程中严禁在坡顶超载堆置,加强对坡面渗水情况的巡视检查,发现坡面开裂或局部变形及时采取加固措施。(2) 突水渗流风险:遭遇高压、裂隙渗流时,采用注浆封堵、增设排水盲沟、加厚止水帷幕等措施,快速阻断渗流通道。对突发性涌水点应及时实施压密注浆或速凝材料封堵,同步启动坑内外水位联合调控,平衡水压差,遏制险情扩大。汛期提前落实防汛专项预案,配备足量大功率排水设备,确保排水系统能力充足、运行可靠,防止淹坑事故。(3) 结构变形超标风险:针对支护结构位移、沉降超标问题,增设临时支撑、补打锚索,强化结构刚度,遏制变形持续发展。对于变形速率加快的紧急情况,立即停止坑内开挖作业并组织坑外卸载,必要时采取回填反压措施恢复基坑临时稳定,待变形收敛且原因查明后方可复工。

结束语

本文梳理了复杂地质下水利枢纽深基坑的施工特性与技术难点,详解各类主流支护技术的工艺要点与地质适配性,构建了全流程质量管控与风险防控体系。各类支护技术各有优劣,实际工程中需结合地质、水文、工况条件择优搭配复合支护方案。通过精细化施工与动态监测防控,可有效解决复杂地质基坑施工难题,保障水利枢纽工程施工及长期运行安全。

参考文献

- [1] 刘波.复杂地质条件下水利枢纽深基坑支护变形特征与施工控制技术[J].水利水电技术,2022,53(06):76-82.
- [2] 陈刚.复杂地质基坑支护结构稳定性数值分析及优化设计[J].工程地质学报,2023,31(02):123-130.
- [3] 李会智.复杂地质条件下大型水利枢纽深基坑施工关键技术研究[J].水利技术监督,2022,26(03):124-126.
- [4] 刘金豹.复杂地质条件下水利工程深基坑开挖与支护技术创新[J].水利技术监督,2025,41(12):325-327.
- [5] 孟博霞.复杂地质条件下水利工程深基坑复合支护施工技术应用[J].河南水利与南水北调,2025,54(09):40-47.