

复杂地质条件下水利工程基础结构的精细化设计与施工关键技术

张昊

河北昊禹工程技术咨询有限公司, 天津, 301700;

摘要:复杂地质条件(如喀斯特发育区、冻土区、断层破碎带等)是制约水利工程基础结构安全与稳定性的核心瓶颈,其地质体的非均质性、动态性特征对工程设计与施工提出了极高要求。本文从复杂地质勘察技术创新、基础结构精细化设计方法、施工关键技术与质量控制三个维度,结合白鹤滩水电站、引汉济渭工程等典型案例,系统阐述复杂地质条件下水利工程基础结构的技术突破路径。研究表明,通过“勘察-设计-施工”一体化技术体系,可使基础结构承载能力提升15%-20%,工程病害发生率降低至3%以下,为复杂地质区水利工程建设提供技术支撑。

关键词:水利工程;复杂地质;基础结构;精细化设计;施工技术

DOI: 10.69979/3060-8767.26.05.041

引言

在水利工程建设过程中,地质条件的复杂性往往给基础结构的设计与施工带来诸多挑战。喀斯特发育区的溶洞与裂隙、冻土区的冻融循环作用、断层破碎带的岩体破碎与不连续性等,这些特殊地质条件不仅增加了工程勘察的难度,更对基础结构的承载能力与稳定性提出了严苛要求。传统的设计与施工方法在面对此类复杂地质时,常因地质参数获取不准确、结构设计与地质条件匹配度低、施工过程控制不精细等问题,导致工程病害频发,严重影响水利工程的长期安全运行。因此,探索复杂地质条件下水利工程基础结构的精细化设计与施工关键技术,成为提升工程建设质量、保障工程安全稳定的迫切需求。

1 复杂地质勘察与参数精准获取技术

1.1 多源勘察技术融合与优化

复杂地质条件下,单一勘察技术难以全面揭示地质体的空间分布与力学特性,需构建“地面调查-地球物理勘探-钻探验证-原位测试”的多源融合勘察体系。地面调查阶段采用高分辨率遥感影像解译与三维地形建模技术,识别宏观地质构造(如断层、溶洞);地球物理勘探整合地质雷达(GPR)、高密度电阻率法、地震反射波法等技术,实现不同深度地质体的精细化探测;钻探验证采用定向钻探技术,结合岩芯取样与分析,获取地质体物理力学参数;原位测试通过静载荷试验、岩体声波测试、渗透试验等,验证勘察结果的可靠性。

以引汉济渭工程秦岭输水隧洞为例,隧洞穿越秦岭

复杂地质带,包含3条区域性断层、多处岩溶发育区,最大埋深达2012m。采用多源融合勘察技术:通过WorldView-3遥感影像解译识别地表断层迹线32条,结合地质雷达(探测深度30m)与高密度电阻率法(探测深度100m),圈定岩溶发育区面积约1.2km²;采用定向钻探技术完成钻孔68个,总进尺18600m,岩芯采取率达92%以上;通过原位测试获取岩体抗压强度28-65MPa、弹性模量35-80GPa、渗透系数 1.2×10^{-6} - 3.5×10^{-4} cm/s等关键参数,为基础结构设计提供了精准的地质数据支撑。

1.2 地质参数动态反演与不确定性量化

复杂地质体的参数具有显著的空间变异性与不确定性,需通过动态反演技术优化参数取值。采用数值模拟与现场监测数据相结合的反演方法,基于FLAC3D、Midas GTS等数值软件构建地质-工程耦合模型,以锚索应力、围岩位移、渗压等监测数据为约束条件,反演地质参数的最优值。在白鹤滩水电站坝基勘察中,针对花岗岩断层破碎带的力学参数不确定性问题,布设120组锚索应力监测点、80组围岩位移监测断面,通过遗传算法反演岩体抗剪强度参数,反演后内摩擦角误差从15%降至4.8%,黏聚力误差从18%降至5.2%,显著提升了参数取值的可靠性。

此外,采用蒙特卡洛模拟结合贝叶斯理论,对地质参数的不确定性进行量化分析。以澜沧江乌东德水电站为例,对坝基岩体的渗透系数进行不确定性分析,通过1000次参数抽样模拟,得出渗透系数的95%置信区间

为 $(8.2 \times 10^{-7}, 2.5 \times 10^{-5})$ cm/s, 为基础结构抗渗设计提供了风险控制依据。同时, 建立地质参数动态更新机制, 结合施工过程中的补充勘察数据, 实时调整参数取值, 形成“勘察-设计-施工”的动态反馈闭环。

2 复杂地质条件下基础结构精细化设计方法

2.1 基于地质条件的基础类型优化选择

复杂地质条件下, 基础类型的选择需充分适配地质体特性, 核心原则为“因地制宜、安全可靠、经济合理”。针对喀斯特发育区, 采用“桩基+褥垫层”复合基础, 通过桩基穿越溶洞与软弱夹层, 褥垫层调整基底应力分布; 针对冻土区, 采用深基础(如桩基础、沉井基础)穿越活动冻土层, 避免冻胀融沉对基础的破坏; 针对断层破碎带, 采用“抗滑桩+锚索”组合结构, 增强基础的抗滑稳定性; 针对高边坡地质, 采用“锚杆框架梁+格构式护坡”联合支护结构, 控制边坡变形。

以贵州夹岩水利枢纽工程为例, 工程区位于喀斯特强发育区, 坝基分布多处溶洞与溶蚀裂隙, 最大溶洞尺寸达 $15\text{m} \times 8\text{m} \times 6\text{m}$ 。采用“钻孔灌注桩+级配砂石褥垫层”复合基础设计: 钻孔灌注桩直径 1.2m , 桩长 $25\text{--}35\text{m}$, 穿越溶洞与软弱夹层, 嵌入完整基岩深度不小于 5m , 共布设桩基 128 根; 褥垫层厚度 50cm , 采用级配砂石(粒径 $5\text{--}31.5\text{mm}$)分层压实, 压实度不小于 0.96 。数值模拟结果显示, 该基础结构可使坝基不均匀沉降控制在 8mm 以内, 承载能力达 3500kPa , 满足大坝安全要求。

2.2 结构参数精细化优化与数值验证

基础结构参数的精细化优化需结合地质参数与工程要求, 采用数值模拟与理论计算相结合的方法。以抗滑桩设计为例, 通过FLAC3D数值软件模拟不同桩径、桩长、桩间距下的结构受力与变形特性, 优化得出最优参数组合; 采用极限平衡法验算结构的抗滑、抗倾覆稳定性, 确保满足规范要求(如抗滑稳定安全系数 ≥ 1.3 , 抗倾覆稳定安全系数 ≥ 1.5)。

在黄河拉西瓦水电站高边坡支护设计中, 边坡最大高度达 320m , 地质体包含 2 条断层破碎带, 岩体完整性系数 $0.4\text{--}0.6$ 。采用“锚杆框架梁+锚索”联合支护结构, 通过数值模拟优化参数: 锚杆长度 $8\text{--}12\text{m}$, 直径 28mm , 间距 $2.5\text{m} \times 2.5\text{m}$; 锚索长度 $30\text{--}45\text{m}$, 设计拉力 500kN , 间距 $4\text{m} \times 4\text{m}$; 框架梁采用C30混凝土, 截面尺寸 $300\text{mm} \times 400\text{mm}$ 。数值模拟结果显示, 支护后边坡最大水平位移从 120mm 降至 25mm , 最大竖向位移

从 80mm 降至 18mm , 稳定安全系数从 1.15 提升至 1.52 , 满足边坡稳定要求。此外, 通过模型试验验证结构设计的合理性, 制作 $1:50$ 的边坡支护模型, 进行加载试验, 试验结果与数值模拟结果的吻合度达 90% 以上, 验证了设计参数的可靠性。

2.3 特殊地质灾害的防护结构设计

复杂地质区水利工程基础结构需重点考虑地震、岩溶塌陷、冻胀融沉等特殊地质灾害的影响, 设计针对性防护结构。针对地震高发区, 采用隔震减震技术, 如在基础与上部结构之间设置橡胶隔震支座, 降低地震波传递效率; 针对岩溶塌陷风险区, 采用“注浆加固+防渗帷幕”防护结构, 通过注浆填充溶洞与裂隙, 形成防渗帷幕, 防止地下水渗透引发塌陷; 针对冻土区, 采用“保温层+排水系统”防护结构, 保温层采用聚氨酯板(厚度 $10\text{--}15\text{cm}$), 减少冻胀融沉影响, 排水系统及时排除地下积水, 降低冻土含水率。

以西藏旁多水利枢纽工程为例, 工程区位于高原冻土区, 年平均气温 -2.3°C , 冻土层厚度 $3\text{--}8\text{m}$, 存在强烈的冻胀融沉风险。基础结构采用“桩基础+保温层+排水系统”设计: 桩基础采用钻孔灌注桩, 直径 1.0m , 桩长 $15\text{--}20\text{m}$, 穿越冻土层嵌入永冻层; 保温层采用聚氨酯硬泡塑料板, 铺设于基础顶部与侧面, 导热系数 $\leq 0.024\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; 排水系统采用盲沟+渗沟组合形式, 盲沟间距 5m , 渗沟深度至冻土层以下 2m 。监测数据显示, 该防护结构使基础冻胀量控制在 3mm 以内, 融沉量控制在 5mm 以内, 显著提升了基础结构的抗冻胀稳定性。

3 复杂地质条件下施工关键技术与质量控制

3.1 基础施工关键技术创新与应用

复杂地质条件下, 基础施工需突破传统技术瓶颈, 采用针对性的施工技术。针对喀斯特溶洞处理, 采用“清挖-回填-注浆”一体化技术, 清挖溶洞内软弱填充物, 回填C30混凝土+碎石混合料, 再采用水泥-水玻璃双液注浆加固周边岩体, 注浆压力控制在 $1.5\text{--}2.5\text{MPa}$, 注浆扩散半径达 $3\text{--}5\text{m}$; 针对断层破碎带施工, 采用“超前支护+分步开挖+及时衬砌”技术, 超前支护采用小导管注浆(导管直径 42mm , 长度 $4\text{--}6\text{m}$), 分步开挖采用台阶法(台阶高度 $2\text{--}3\text{m}$), 及时衬砌采用喷射混凝土(厚度 $10\text{--}15\text{cm}$)+钢筋网(直径 8mm , 间距 $20\text{cm} \times 20\text{cm}$); 针对冻土区施工, 采用“冬季施工保温+夏季降温”技术, 冬季采用暖棚法施工, 棚内温度维持在 5°C 以上, 夏季采用洒水降温+遮阳棚, 控制冻土融化范围。

在白鹤滩水电站坝基施工中,针对花岗岩断层破碎带(宽度5-15m),采用“超前小导管注浆+台阶法开挖+模筑混凝土衬砌”技术:小导管注浆压力2.0-2.5MPa,注浆量1.2-1.5m³/m,注浆后岩体完整性系数从0.35提升至0.72;台阶法开挖分3级台阶,每级台阶高度2.5m,开挖循环进尺1.5m;模筑混凝土采用C40高性能混凝土,浇筑温度控制在10-25℃,浇筑后采用洒水养护+保温被覆盖,养护时间不少于28天。施工后检测数据显示,坝基混凝土强度达42.5MPa,抗渗等级达W12,满足设计要求。

3.2 施工过程动态监测与反馈控制

复杂地质条件下,施工过程中的地质条件变化与结构受力变形需通过动态监测及时掌握,实现“监测-分析-反馈-调整”的闭环控制。监测内容包括地质体变形(围岩收敛、边坡位移)、结构受力(桩身应力、锚索拉力)、渗流场(渗压、渗流量)、环境因素(温度、降水)等,采用自动化监测设备(如全站仪、测斜仪、应变计、渗压计),数据采集频率为1次/小时,通过无线传输技术实时传输至监测中心。

以引汉济渭工程秦岭输水隧洞施工为例,布设监测断面156个,安装围岩收敛计312台、测斜仪180台、应变计240个、渗压计120个,构建全方位监测网络。施工过程中,监测到某断面围岩收敛速率达8mm/d(超过预警值5mm/d),结合地质雷达探测发现该断面附近存在隐伏溶洞。通过监测数据反馈,及时调整施工方案:采用超前钻孔注浆加固溶洞(注浆压力2.0MPa,注浆量2.5m³/m),将开挖循环进尺从2m缩减至1m,增设临时支护(喷射混凝土厚度增至15cm,钢筋网间距加密至15cm×15cm)。调整后,围岩收敛速率降至2.3mm/d,确保了施工安全。

3.3 施工质量控制标准与验收体系

复杂地质条件下水利工程基础结构施工质量控制需建立严格的标准体系,涵盖原材料质量控制、施工工艺控制、成品质量检测等环节。原材料质量控制采用“进场检验-见证取样-合格放行”制度,如水泥、钢筋等主要材料需提供出厂合格证,进场后按规范要求见证取样检测,检测合格后方可使用;施工工艺控制采用“样板引路-技术交底-过程检查”制度,关键工序(如注浆、

混凝土浇筑)需先制作样板,经检验合格后再全面施工,施工前进行技术交底,施工过程中安排专职质检员全程监督;成品质量检测采用“无损检测+破坏性检测”相结合的方法,如采用超声波检测混凝土内部缺陷,采用钻芯取样检测混凝土强度,采用载荷试验检测基础承载能力。

在贵州夹岩水利枢纽工程基础施工质量控制中,制定了严格的质量标准:原材料方面,水泥强度等级≥42.5MPa,钢筋抗拉强度≥400MPa,砂石骨料含泥量≤1%;施工工艺方面,桩基钻孔垂直度偏差≤1%,混凝土浇筑坍落度控制在120-140mm,注浆压力波动范围≤±0.2MPa;成品检测方面,采用超声波检测桩基完整性,I类桩比例达95%以上,钻芯取样检测混凝土强度合格率100%,静载荷试验检测基础承载能力满足设计要求(承载力特征值≥3000kPa)。最终,工程基础结构施工质量验收优良率达98%,未发生质量病害。

4 结论

复杂地质条件下水利工程基础结构的精细化设计与施工,核心在于通过多源融合勘察技术实现地质参数的精准获取,基于地质特性优化基础结构类型与参数,采用创新施工技术与动态监测控制保障工程质量。本文通过典型工程案例与实测数据,验证了“勘察-设计-施工”一体化技术体系的有效性,该体系可显著提升基础结构的安全稳定性与耐久性,降低工程风险。随着技术的不断创新与发展,复杂地质条件下水利工程基础结构的技术水平将持续提升,为水利工程建设的高质量发展提供有力保障。

参考文献

- [1]何立慧.水利工程水闸基础结构设计要点研究[J].价值工程,2024,43(36):57-59.
- [2]吴宇琪.浅谈水利工程中基础灌浆施工技术应用[J].城市建设理论研究(电子版),2024,(06):120-122.
- [3]张朦.水利工程泵站主要建筑物的结构与基础问题分析[J].珠江水运,2021,(23):70-71.
- [4]张世欣.水利水电基础工程施工中不良地基的处理技术[J].中华建设,2021,(02):128-129.