

复杂地质条件下水利工程施工技术与质量管控研究

赵子俊¹ 吴娟² 单雅婷²

1 徐州市正源水利建筑工程检测有限公司

2 徐州鼎源水务工程有限公司

DOI:10.32629/btr.v8i12.5140

[摘要] 本文将根据实际工程中普遍出现的复杂地质类型,系统梳理四类典型复杂地质场景对应的施工技术,明确各技术的工艺要点与参数控制标准,同时从前期地质复核、过程工序管控、动态监测反馈三个维度,构建全流程闭环质量管控路径。

[关键词] 复杂地质; 水利工程; 施工技术; 质量管控

中图分类号: TV51 文献标识码: A

Research on Construction Technology and Quality Control of Water Conservancy Projects under Complex Geological Conditions

Zijun Zhao¹ Juan Wu² Yating Shan²

1 Xuzhou Zhengyuan Water Conservancy Construction Engineering Testing Co., Ltd.

2 Xuzhou Dingyuan Water Engineering Co., Ltd.

[Abstract] Based on the complex geological conditions commonly encountered in actual engineering projects, this paper systematically reviews the construction technologies applicable to four typical complex geological scenarios and clarifies the key technical procedures and parameter control standards for each technology. Meanwhile, a whole-process closed-loop quality control approach is established from three dimensions: preliminary geological verification, process and procedure control, and dynamic monitoring and feedback.

[Key words] complex geological conditions; water conservancy projects; construction technology; quality control

引言

水利工程建设周期长、涉及范围广,多建于河谷、峡谷地带。施工过程中常面临岩溶发育、软弱围岩、高陡破碎边坡、深厚覆盖层等复杂地质条件^[1]。地质缺陷易引发工程渗漏、围岩坍塌、边坡失稳、地基沉降超标等问题,直接影响工程结构安全与长期运行寿命。要求施工时合理选用适配的施工技术,配套建立全流程质量管控体系,才能降低水利工程建设对当地地质不利影响,保障工程建设成效。

1 复杂地质条件下水利工程施工技术

1.1 岩溶地质区防渗施工技术

岩溶地质的典型特征为岩体内部存在溶洞、溶蚀裂隙、溶槽等构造,岩体完整性差、透水性强,水利工程坝基、库区及隧洞穿越该类地层时,极易出现集中渗漏、突水涌泥等问题。针对岩溶地质的防渗处理,需根据岩溶发育规模、充填状态及透水性分级处置。帷幕灌浆是岩溶区防渗的主流技术,通过在岩体中钻孔并注入浆液,填充溶蚀裂隙与小型溶洞,形成连续的防渗帷幕。施工通常采用单排或双排孔布置,孔距控制在2.0~3.0m,

排距1.5~2.0m,钻孔垂直度偏差不大于1%,确保帷幕搭接连续。灌浆材料以普通硅酸盐水泥浆为主,水灰比按2:1、1:1、0.8:1、0.5:1四个等级动态调整,初始采用稀浆灌注,随吸浆量变化逐级加浓;对于漏浆严重、裂隙发育的区段,掺加水玻璃配置双液浆,缩短浆液凝结时间,避免浆液无限扩散。灌浆施工采用自上而下分段灌浆法,单段长度5~6m,灌浆压力随深度递增,浅部风化岩层压力控制在0.3~0.5MPa,深部完整岩层可提升至0.8~1.2MPa;灌浆结束标准为设计压力下注入率小于0.4L/min且持续30min以上。施工中若出现串浆、冒浆现象,可采用封堵冒浆点、间歇灌浆的方式处置。灌浆完成后布设检查孔开展压水试验,检查孔数量不少于总灌浆孔的10%,岩体透水率需满足设计防渗要求。针对体积较大的独立溶洞按规模分级处理:高度小于1m的溶洞直接通过灌浆充填胶结;高度1~5m的溶洞先投入碎石、砂石充填,再灌注水泥浆将充填物胶结为整体;高度大于5m的大型溶洞,先清理内部松软充填物,再浇筑混凝土封堵形成塞体,确保溶洞区域的结构强度与防渗性能^[2]。

1.2 软弱围岩隧洞施工技术

水利输水隧洞常穿越泥岩、破碎带、强风化岩体等软弱围岩地层,对应围岩等级多为IV、V级,该类围岩自稳能力差,开挖后易出现拱顶坍塌、边墙收敛变形、拱脚下沉等问题,施工风险高。针对软弱围岩隧洞,施工应围绕“超前加固、短进尺、弱爆破、强支护、快封闭、勤量测”展开。超前小导管预支护是当前最常用的超前加固手段,通常采用 $\phi 42\text{mm}$ 无缝钢管,单根长度 $3.5\sim 4.5\text{m}$,环向间距 $30\sim 40\text{cm}$,外插角控制在 $10^\circ\sim 15^\circ$ 。导管前端加工为圆锥状,管壁布设溢浆孔,通过注入水泥浆或水泥砂浆,将掌子面前方 $3\sim 5\text{m}$ 范围内的围岩胶结加固,形成环状支护壳体,为后续开挖提供安全屏障。开挖采用上下台阶留核心土法,上台阶高度为隧洞断面的 $1/2$ 左右,台阶长度控制在 $3\sim 5\text{m}$,每循环开挖进尺 $0.5\sim 1.0\text{m}$,严禁超挖。开挖采用光面爆破或机械开挖工艺,严格控制爆破装药量,减少对周边围岩的扰动,局部超挖区域采用同等级喷射混凝土回填密实。开挖完成后第一时间喷射混凝土封闭掌子面,随后施作锚喷网联合初期支护,锚杆长度 $2.5\sim 3.0\text{m}$,间距 $1.0\text{m}\times 1.0\text{m}$,采用全长粘结型砂浆锚杆,钢筋网采用 $\phi 6\text{mm}$ 钢筋,网格尺寸 $20\text{cm}\times 20\text{cm}$,搭接长度不小于一个网格,喷射混凝土采用湿喷工艺,强度等级为C25,厚度 $10\sim 15\text{cm}$,添加速凝剂保证初凝时间不大于 5min 。对于围岩破碎严重的V级区段,增设钢拱架强化支护,钢拱架间距 $0.5\sim 0.8\text{m}$,拱架间采用纵向钢筋焊接连接,拱脚处设置2根锁脚锚杆,长度 $3.0\sim 3.5\text{m}$,向下倾斜 $20^\circ\sim 30^\circ$,注浆饱满,防止拱架下沉侵限。施工中严格控制仰拱施作时机,初期支护仰拱与掌子面距离不超过 30m ,尽快形成封闭受力环。二次衬砌待围岩变形速率连续7天小于 $0.2\text{mm}/\text{d}$ 后方可施作,保证结构长期受力稳定。

1.3 高陡边坡加固施工技术

水利工程溢洪道、坝肩及渠道沿线常存在高陡边坡,若边坡岩体风化破碎、存在顺层软弱夹层,施工及运行过程中易发生滑坡、崩塌等地质灾害。高陡边坡加固以提升边坡抗滑稳定性、阻断水蚀影响为目标,应遵循“分层开挖、分层支护、自上而下、严禁掏底”的施工原则^[3]。预应力锚索抗滑桩适用于推力较大的深层滑坡治理,抗滑桩多为矩形截面,常规尺寸 $2.0\text{m}\times 3.0\text{m}$,桩间距 $5\sim 6\text{m}$,桩端嵌入稳定岩层不少于 3m 。施工可采用人工挖孔或机械成孔工艺,挖孔过程分段施作混凝土护壁,每段高度不超过 1m ,防止孔壁坍塌。锚索设置于桩顶或桩身中上部,单桩配置 $2\sim 3$ 束锚索,锚索采用高强度低松弛钢绞线,锚索拉力依据滑坡推力设计,张拉锁定应力控制在设计值的 $1.05\sim 1.1$ 倍,钻孔完成后彻底清孔,采用水泥砂浆压力注浆,保证注浆饱满度不低于 90% ,张拉完成后及时封锚防腐,外露钢绞线切割后采用混凝土封闭,避免水环境下锈蚀失效。通过锚索拉力抵消部分滑坡推力,可大幅提升桩体抗滑效能。针对浅层破碎岩体边坡,采用锚杆框架梁防护方案,锚杆长度 $4\sim 6\text{m}$,间距 $2.0\text{m}\times 2.0\text{m}$,框架梁采用现浇C25混凝土,坡面挂设钢筋网后喷射 $10\sim 15\text{cm}$ 厚混凝土封闭,防止岩体进一步风化剥落。边坡开挖严格控制分层高度,每层开挖高度 $2\sim 3\text{m}$,开挖完成后72小时内完成对应坡面支护,避免坡面长期裸露。靠近坡面处采用光面爆破,最大限度保留边坡

岩体完整性。同时配套建设截排水系统,边坡顶部设置浆砌石截水沟拦截地表径流,沟底纵坡不小于 0.3% 。坡面按 $2\sim 3\text{m}$ 间距布设仰斜式泄水孔,孔内安装透水管,进口设置土工布反滤层,防止坡内细颗粒流失,降低坡体地下水位,减少地下水对软弱夹层的软化作用。

1.4 深厚覆盖层地基处理技术

河床段水利工程常面临深厚砂卵石、淤泥质土等覆盖层地基,该类地基承载力低、压缩性大,且易发生渗流破坏,无法直接作为坝基、闸基持力层。振冲碎石桩复合地基技术用于提升地基承载力,适用于砂性土、粉土及松软填土覆盖层。常规桩径 $800\sim 1000\text{mm}$,桩距 $1.5\sim 2.5\text{m}$,呈等边三角形布置,桩长穿透软弱土层进入相对硬层不少于 1m ;施工前需开展工艺试验,确定成桩电流、填料量、振密时间等关键参数,正式施工严格按试验参数执行。施工采用振冲器成孔,分层填入碎石并逐段振密,桩体密实度以振冲器工作电流控制,达到设计电流值且稳定 $5\sim 10\text{s}$ 后方可提升振冲器;桩顶设置 $30\sim 50\text{cm}$ 厚的级配碎石褥垫层,协调桩体与桩间土的变形差异,保证复合地基均匀受力。通过桩体与桩间土共同作用,可有效提高地基承载力、减小工后沉降,施工完成后通过载荷试验、标准贯入试验验证加固效果。混凝土防渗墙是深厚覆盖层垂直防渗的核心技术,采用冲击钻成槽工艺,单槽段长度 $6\sim 8\text{m}$,墙厚 $0.6\sim 0.8\text{m}$,墙体嵌入基岩 $0.5\sim 1.0\text{m}$;成槽过程采用膨润土泥浆护壁,泥浆比重控制在 $1.1\sim 1.2\text{g}/\text{cm}^3$,维持槽壁稳定避免塌槽。槽段间采用接头管法连接,接头处反复刷洗至露出新鲜混凝土面,杜绝夹泥缺陷;墙体采用导管法水下混凝土浇筑,保证墙体搭接紧密,形成连续的防渗屏障,阻断覆盖层渗流通道。对于局部软弱夹层或防渗要求较低的区段,可采用高压旋喷桩替代,通过高压喷射水泥浆切割土体,形成桩柱式防渗体,桩间搭接不小于 15cm ,在保证防渗效果的同时降低施工成本。

2 复杂地质条件下水利工程施工质量管控

2.1 施工前期地质复核与技术交底管控

复杂地质条件下,前期勘察成果存在一定离散性,地质边界与岩体参数难以完全精准反映,施工前的精细化地质复核是质量管控的首要环节。针对隧洞工程,在洞口段、物探异常段补充施工勘察,采用地质雷达、浅层地震法探明围岩破碎带、溶洞的具体位置与规模;针对坝基与边坡工程,加密勘探点间距,复核软弱夹层产状、覆盖层厚度及岩体风化程度,修正设计参数^[4]。

基于地质复核结果编制专项施工方案,明确各工序的工艺参数、质量标准与验收要求,方案需经行业专家论证通过后方可实施。落实分级技术交底制度,项目部向施工工区交底整体质量目标、关键工艺控制要点与风险防控要求;工区向作业班组交底具体操作流程、参数控制范围与自检标准,所有交底留存书面记录并由参与人员签字确认,确保一线作业人员准确掌握技术要求,避免因操作不规范引发质量缺陷。

2.2 施工过程工序质量精细化管理

原材料质量是工程质量的基础,需建立严格的进场检验制度。水泥、钢材、外加剂等主材进场必须附带完整的质量证明文件,按批次抽样送检,检测指标不合格的材料严禁进场并及时清退;砂石骨料、碎石桩填料等地方材料,定期检测级配、含泥量与强度指标,杜绝不合格材料流入施工现场。

针对核心施工工序实行全过程旁站管控,安排专职质量人员全程监督关键工序作业。灌浆施工中重点核查浆液配比、灌浆压力、单段注入量与结束标准,严禁随意调整参数、缩短灌浆时间;隧洞支护施工中核查锚杆长度、注浆饱满度、钢拱架间距与连接质量,确保支护参数与设计一致;边坡锚索施工中管控锚索钻孔角度、深度与张拉应力,保证锚固效能。严格执行“三检制”质量验收流程,每道工序完成后由班组自检、工区复检、项目部质量部门终检,检验合格并报监理单位签认后,方可进入下一道工序;对不合格工序制定专项整改方案,明确整改措施与复查标准,整改完成后重新组织验收,杜绝质量隐患累积。

2.3 施工期动态监测与反馈管控

复杂地质条件下施工具有较强的不确定性,仅靠工序验收无法全面管控质量风险,需构建覆盖全施工周期的动态监测体系,以监测数据指导施工调整。针对不同工程对象设置差异化监测项目与频率:高边坡工程布设表面位移监测点、深部位移测斜孔与地下水位渗压计,常规监测频率为每天1次,雨季及边坡开挖期间加密至每天2次;隧洞工程布设拱顶沉降测点、周边收敛测点,开挖初期每天监测1次,围岩变形稳定后逐步延长至3~7天1次。

明确各监测项目的预警阈值与处置流程,当监测数据达到预警值时,立即暂停对应区域施工,组织技术人员结合地质条件分析数据异常原因,针对性调整施工参数或支护方案;待监测数据恢复稳定并经复核确认后,方可恢复施工。建立“监测-分析-

调整-验证”的闭环管控机制,定期汇总分析监测数据,总结地质变形规律,动态优化后续施工方案,避免盲目施工引发质量事故^[5]。

3 结语

地质环境的复杂性与不确定性,对水利工程施工技术提出更高要求。本文中所述帷幕灌浆与防渗墙、隧洞超前预加固、锚索体系及特殊土改良等技术,已在国内数十年水利建设中验证了可靠性和经济性。通过构建覆盖前期地质复核、过程工序管控、动态监测反馈的全链条质量管控体系,将质量管控贯穿施工全流程,通过精细化、闭环化管控抵消地质条件带来的不利影响。在实际工程中,需结合具体地质条件与工程特点,灵活适配施工技术与管理措施,持续优化管控流程,才能切实保障水利工程建设质量与长期运行安全。

[参考文献]

- [1]张金兰.大型水利工程中复杂地质条件下的施工技术挑战与解决方案[J].散装水泥,2025(1):112-114.
- [2]郑文金,冯超,王守凡.复杂地质条件下钻孔灌注桩质量控制关键技术研究[J].建筑安全,2025,40(2):10-13.
- [3]刘松良.复杂地质条件下水利工程施工地基处理灌浆技术研究[J].工程技术研究,2024,9(22):85-87.
- [4]王东东,廖鱼.复杂地质条件下高回填旋挖桩施工关键技术及质量控制手段[J].建筑机械,2024(8):82-86.
- [5]曹建林.复杂地质条件下桥梁岩土工程地质勘察技术研究[J].现代工程科技,2024,3(15):9-12.

作者简介:

赵子俊(1996—),男,汉族,江苏人,本科,工程师,研究方向:水利工程建设施工管理。