

深埋地下水电站洞室群施工稳定性分析

李彦涛

中国水利水电第三工程局有限公司 陕西 西安 725029

摘要: 深埋地下水电站洞室群面临高地应力与复杂地质挑战, 施工期间围岩变形与失稳风险显著, 对施工安全、结构质量及长期运行稳定性构成威胁。本文以苏洼龙水电站引水隧洞为例, 深入探讨高地应力、地质缺陷对围岩稳定性的影响, 总结开挖支护、混凝土衬砌及施工监测等关键环节的稳定性控制技术。提出围岩分级管理、动态施工调整及温控防裂等优化策略。研究表明, 精细化开挖、及时支护与实时监测相结合, 能有效控制围岩变形, 避免失稳, 为同类工程提供理论与实践指导。

关键词: 深埋地下水电站; 洞室群; 施工稳定性

引言: 随着我国水电开发向西部深山峡谷延伸, 深埋地下水电站成为关键建设形式。洞室群作为核心结构, 具有埋深大、断面宽、洞室密集交叉及施工工序复杂等特性。其地质环境恶劣, 普遍遭遇高地应力、岩体破碎及地下水丰富等问题, 导致施工期间围岩易发生塑性变形、片帮、冒顶甚至整体失稳, 不仅影响工期, 还可能引发安全事故, 损害结构耐久性。当前, 深埋洞室施工稳定性控制成为地下水工程的核心难题, 尤其针对密集洞室群协同施工及多工序交叉扰动下的稳定性分析尚存不足。本文依托实际工程, 系统分析施工稳定性影响因素, 构建全流程管控体系, 以解决围岩失稳问题, 确保工程顺利实施。

1 工程概况与地质条件分析

本文研究依托金沙江上游苏洼龙水电站引水发电系统洞室群工程, 该工程属于典型深埋地下水电站工程, 引水系统布置于左岸山体内部, 为一管一机供水模式, 共设4条平行引水隧洞, 隧洞间距31m, 1号至4号隧洞轴线长度分别为536.09m、579.82m、623.56m及667.28m, 洞室埋深普遍超过200m, 属于典型深埋地下洞室群。隧洞主要由进水口、上平段、斜井段、下平段、渐变渐缩段等组成, 上平段、斜井段、下平段均采用圆形断面, 钢筋混凝土衬砌段洞径12.0m, 衬砌厚度0.8m, 压力钢管段洞径10.0m, 整体洞室断面尺寸大, 且弯段、渐变段数量多, 共计8个渐变渐缩段、16个弯段, 洞室交叉与结构变截面部位施工难度极大。

工程区域地质条件复杂, 洞室穿越岩体以变质岩为主, 局部存在岩体破碎带、节理裂隙密集区, 围岩级别以III、IV级为主, 部分不良地质段为V级围岩, 岩体完整性较差, 自稳能力弱。同时, 洞室埋深大导致地应力水平较高, 属于高地应力施工环境, 加之洞内存在一定渗水

量, 进一步弱化岩体力学性能, 加剧围岩失稳风险。洞室群施工涉及开挖、支护、钢筋绑扎、混凝土衬砌、灌浆等多道工序, 上下平段、斜井段同步施工, 交叉作业频繁, 施工扰动对围岩稳定性的叠加影响显著, 对施工过程中的稳定性控制提出了极高要求^[1]。工程地处青藏高原东部, 属典型高海拔地区, 平均海拔超过2500m, 具有高寒、干热河谷气候特征。区内冬季漫长寒冷, 极端最低气温可达-11.7℃, 昼夜温差大, 多年平均日温差超过15℃。这种气候条件对混凝土施工的温控防裂提出了更高要求。

2 深埋地下水电站洞室群施工失稳机理与影响因素

2.1 围岩失稳核心机理

深埋地下洞室群围岩失稳本质是岩体原始应力平衡被施工扰动打破, 围岩应力重新分布超出岩体自身承载极限, 进而产生变形、破坏直至失稳的过程。洞室开挖前, 岩体处于原始地应力平衡状态, 开挖卸荷后, 洞周岩体应力快速释放, 形成应力集中区, 尤其是洞室拐角、交叉部位、变截面部位, 应力集中系数远超常规平直段。高地应力环境下, 脆性岩体易发生岩爆, 破碎岩体则会产生塑性流变变形, 若未及时采取支护措施, 围岩变形会持续发展, 裂隙不断扩展贯通, 最终导致围岩坍塌、失稳。同时, 洞室群多洞室并行、交叉布置, 相邻洞室开挖会产生应力叠加效应, 形成相互扰动, 加剧围岩应力失衡状态。地下水的渗透作用会软化岩体, 降低岩体抗剪强度和粘聚力, 形成渗透压力, 进一步推动围岩裂隙扩展, 形成“应力释放-岩体软化-变形加剧-失稳破坏”的恶性循环。

2.2 施工稳定性关键影响因素

一是地质因素, 围岩级别、岩体完整性、地应力大小、地下水发育程度是决定围岩初始稳定性的核心, V级

围岩、高地应力、富水地段是失稳高风险区域；二是开挖施工因素，开挖方式、开挖进尺、爆破参数直接影响围岩扰动程度，爆破振动过大会破坏岩体原有结构，扩大围岩松动圈范围，大断面一次性开挖易导致应力集中过快释放；三是支护因素，支护时机滞后、支护结构强度不足、支护搭接不密实，无法及时约束围岩初始变形，导致变形持续发展；四是结构施工因素，洞室群交叉段、渐变段衬砌施工不规范，混凝土浇筑质量差、养护不到位出现裂缝，会削弱结构整体承载能力；五是施工监测因素，监测点位布设不全、监测频率不足、数据反馈不及时，无法提前预判围岩变形趋势，错失稳定性调控最佳时机^[2]。

3 深埋地下水电站洞室群施工稳定性控制技术体系

3.1 精细化开挖与围岩预保护技术

针对深埋洞室群高地应力、岩体破碎的特点，采用“弱扰动、短进尺、多循环”的精细化开挖原则，根据围岩级别差异化选择开挖方式。对于Ⅲ级及以上完整围岩，采用光面爆破或预裂爆破技术，严格控制爆破参数，减小爆破振动对围岩的扰动，降低围岩松动圈厚度；对于Ⅳ、Ⅴ级破碎围岩及高地应力段，放弃常规爆破开挖，采用机械掘进配合人工修整的方式，避免爆破振动诱发围岩坍塌，开挖进尺严格控制在1.0-1.5m，每循环开挖后立即进行临时支护，杜绝围岩长时间暴露。洞室交叉段、渐变渐缩段等特殊部位，采用分层分段开挖法，先开挖导洞超前探明地质条件，再逐步扩挖成型，避免大断面一次性开挖导致应力集中。同时，对不良地质段提前采取超前支护措施，布设超前锚杆、超前小导管，必要时进行超前注浆加固，封堵地下水并固结破碎岩体，提升围岩初始自稳能力，从源头降低开挖过程中的失稳风险。

3.2 闭环式支护与结构协同承载技术

构建“临时支护+永久支护”的闭环式支护体系，实现对围岩变形的全程约束。开挖后立即喷射混凝土封闭围岩表面，防止岩体风化、剥落，随即架设钢拱架、布设锚杆与钢筋网，形成初期支护体系，初期支护紧跟开挖工作面，滞后距离不超过2m，确保及时约束围岩初始变形。根据围岩级别调整支护参数，Ⅴ级围岩加密锚杆间距、加厚喷射混凝土厚度、增设钢支撑，提升初期支护承载力。永久支护以钢筋混凝土衬砌为主，结合洞室结构特点选用适配施工设备，上下平段采用针梁式全液压钢模台车施工，实现衬砌混凝土一次性浇筑成型，保证衬砌结构整体性；斜井段采用针梁内爬式自升滑模，适配斜井特殊结构，确保衬砌与围岩紧密贴合。衬砌施工前清理基面，保证围岩与衬砌之间无空隙，形成“围岩-

初期支护-二次衬砌”协同承载体系，共同抵抗地应力与外部荷载，提升洞室群整体稳定性。

3.3 混凝土施工温控与防裂维稳技术

深埋洞室群混凝土衬砌结构厚度大，尤其是大体积混凝土部位，水化热温升与内外温差易导致混凝土开裂，破坏结构完整性，进而影响围岩稳定性，因此温控防裂是稳定性控制的重要环节。混凝土浇筑阶段，优先选择日间气温平稳时段施工，避开洞内温度波动剧烈时段，钢模板外侧加装保温层，浇筑前预热模板，消除冷模效应，分层浇筑厚度控制在30cm以内，严控上下层浇筑间隔时间，避免形成冷缝。养护阶段采用多层覆盖保温保湿方案，底层铺设塑料薄膜锁水，上层覆盖保温被、岩棉被，边角部位强化保温，严控养护时长与降温速率，冬季施工搭设暖棚加热养护，保证棚内正温环境，防止混凝土受冻开裂^[3]。拆模依据同条件养护试块强度确定，强度达标后及时二次覆盖养护，避免衬砌结构出现温度裂缝与收缩裂缝，保障衬砌结构完整，维持协同承载体系稳定。针对藏区高寒、温差大的特点，混凝土施工需采取更为严格的温控措施。冬季施工期间，洞外气温常低于-5℃，混凝土运输过程中需对罐车罐体加装保温被，确保入模温度不低于5℃。浇筑后立即采用“塑料薄膜+双层保温被”覆盖养护，边角部位增设电热毯辅助加热，养护期间控制降温速率不大于5℃/h，防止混凝土受冻开裂。昼夜温差大时段，加强夜间巡查，确保保温措施落实到位。

3.4 全程实时监测与动态调控技术

建立洞室群施工全过程实时监测体系，布设全方位监测点位，涵盖围岩表面变形、深部位移、支护结构应力、混凝土温度、洞内渗水量等核心指标，采用自动化监测设备，实现24小时不间断监测，实时传输监测数据。重点监测洞室交叉段、渐变段、破碎围岩段等风险部位，加密监测点位与监测频率，一旦监测数据超出预警阈值，立即启动应急预案。结合监测数据动态调整施工方案，若围岩变形速率过快，立即停止开挖，加强支护强度，增设预应力锚杆或锚索约束变形；若混凝土内外温差过大，及时调整保温措施，延缓散热速度；若地下水渗流量增大，及时进行注浆封堵。通过“监测-分析-调控”闭环管理，实现施工稳定性的动态预判与精准管控，将围岩变形控制在允许范围内，杜绝失稳事故发生。

4 工程实例应用效果分析

4.1 现场施工管控与差异化技术实施

苏洼龙水电站引水隧洞洞室群施工全程紧扣前文稳定性控制技术体系，结合现场地质条件、洞室结构特点，落实分层分区、差异化施工管控，针对性化解各类稳定

性风险。针对4条平行引水隧洞并行开挖、交叉作业扰动叠加的核心问题,优化施工时序排布,采用“错峰开挖、间隔衬砌”模式,相邻隧洞开挖工作面错开不小于50m,避免同步施工引发围岩应力叠加失衡;对洞室群交叉段、渐变渐缩段、弯段等特殊结构部位,提前编制专项施工方案,采用钢木组合定型模板拼装施工,严控结构尺寸偏差与衬砌密实度,同时加密初期支护布设间距,额外增设预应力锚杆,强化薄弱部位围岩约束。针对不同级别围岩实施精准管控,Ⅲ级围岩采用光面爆破+常规支护,Ⅳ、Ⅴ级破碎围岩及高地应力岩爆段,全面改用机械掘进+超前注浆加固,杜绝爆破扰动,每循环开挖后立即完成初支封闭,全程严控围岩暴露时间,从施工环节筑牢稳定性防线。

4.2 监测数据结果与围岩变形规律分析

施工期间构建全方位自动化监测网络,围绕围岩变形、支护应力、混凝土温控三大核心维度,累计布置围岩表面位移监测点、深部位移监测点、支护钢拱架应力监测点、衬砌混凝土测温点共计126处,实行24小时不间断监测,定期采集分析数据,总结围岩变形与结构受力规律。监测数据显示,全洞室群围岩表面累计变形量均控制在32-48mm范围内,远低于规范允许的80mm阈值,变形速率前期稳定在0.8-1.2mm/d,施工后期逐步降至0.1mm/d以下,围岩变形快速趋于收敛,无异常突变、加速变形等失稳前兆;支护结构应力值始终处于设计允许承载力范围内,未出现应力超标、杆件变形破损情况;大体积衬砌混凝土内外温差稳定在18-23℃,降温速率控制在3-5℃/d,完全符合温控防裂标准。整体监测数据表明,围岩应力重分布过程平稳,未出现应力集中超限现象,协同支护体系发挥有效约束作用,洞室群整体稳定性处于可控状态^[4]。

4.3 技术应用成效与工程实践价值

本次稳定性控制技术体系在苏洼龙水电站的落地应用,取得了显著的施工成效与工程价值。从施工安全层面,项目全程未发生围岩片帮、冒顶、坍塌等安全事故,未出

现衬砌混凝土开裂、渗漏水等质量问题,洞室结构成型质量优良,顺利通过各阶段验收;从施工效率层面,精细化开挖与闭环支护联动,减少了围岩返工处理工序,相比传统施工工艺缩短工期约15%,有效规避了因失稳隐患导致的工期延误;从技术效益层面,精细化开挖将围岩松动圈厚度减小32%左右,大幅降低了支护耗材用量,超前支护与温控防裂技术结合,延长了洞室结构使用寿命,减少后期运维成本。该技术体系成功适配深埋、高地应力、复杂地质下洞室群施工场景,破解了多洞室并行扰动、破碎围岩自稳差、大体积混凝土温控难等核心难题,形成可复制、可推广的施工经验,为金沙江流域及西部山区同类深埋地下水电站洞室群施工,提供了直接的实践参考与技术支撑。

结束语

深埋地下水电站洞室群施工稳定性控制是一项系统性工程,需结合地质条件、工程结构、施工工序开展精细化管理。随着水电工程向超深埋、超大断面方向发展,洞室群施工稳定性将面临更多新挑战,需进一步结合数值模拟、智能化监测技术,优化施工工艺与管控模式,提升稳定性控制的智能化、精准化水平。本次研究成果可为行业内类似工程提供参考,助力我国深埋地下水工程技术的持续提升,推动水电开发事业高质量发展。

参考文献

- [1]李惠敏.某水电站复杂地下厂房洞室群渗流量计算与分析研究[J].水上安全,2025(20):142-144.
- [2]杨宗立,丁鹏,安瑞楠,等.乌东德水电站地下洞室群创新施工方法与技术[J].地下空间与工程学报,2024,26(6):2045-2053,2082.
- [3]田江伟.忠玉水电站地下洞室群开挖对围岩稳定性影响及支护研究[J].水利水电快报,2025,46(8):55-60.
- [4]方丹,韩钢,鄢江平,等.卡拉水电站地下洞室群稳定性分析及洞室间距优化研究[J].长江科学院院报,2023,40(11):93-101,110.