

水利水电围堰、基坑施工安全风险研究

罗 勇 董 娜

中国水利水电建设工程咨询西北有限公司 陕西 西安 710000

摘 要:围堰与基坑在水利水电施工中互为依托,安全风险高度关联。围堰溃决、基坑坍塌等事故频发,根源在于风险辨识不全面、施工管控不规范、动态监测不到位。本文在系统分析两类施工工艺特点及主要风险类型基础上,从渗漏管涌、失稳漫顶、坍塌涌水等维度开展风险识别,剖析前期方案针对性不足、汛期动态管控缺失、监测预警不完善等问题,从风险预控、防渗加固、支护排水精细管控及全过程动态监测四方面提出管控对策。构建围堰—基坑系统安全风险协同防控体系,实现从被动应对向主动预控转变,是提升施工安全水平的关键路径。

关键词:水利水电工程;围堰施工;基坑施工;安全风险;风险管理

引言:水利水电工程施工中,围堰承担挡水导流任务,基坑为主体结构施工提供作业空间,二者互为依托、相互制约,构成一个紧密关联的风险系统。围堰一旦失事,洪水直接灌入基坑,造成人员伤亡和设备损毁;基坑边坡失稳或涌水事故,同样可能导致围堰基础掏空、结构破坏。基于围堰—基坑系统风险关联视角,系统识别两类施工的主要风险因素,剖析管理薄弱环节,提出针对性的风险管控对策,以期为水利水电工程施工安全风险提供管理参考。

1 水利水电围堰与基坑施工特点及风险理论基础

1.1 围堰工程施工工艺与作业特点

围堰是水利水电施工期间挡水导流的临时水工建筑物,按材料分为土石围堰、混凝土围堰和钢板桩围堰。土石围堰适用于水深较小、流速较低的河床;混凝土围堰结构整体性好、抗冲能力强,适用于高水头大流速条件;钢板桩围堰施工速度快、可重复利用,适用于覆盖层较厚河床。围堰施工具有鲜明的季节性——必须在枯水期或汛前达到设计挡水高程,工期紧迫。围堰与水流直接对抗,受水位涨落、流速变化、漂浮物冲击等影响显著,风险随水情动态变化。围堰填筑体为松散堆积物,其稳定性取决于材料级配、压实密度和防渗体系完整性,任何环节缺陷都可能导致渗漏、滑坡甚至溃决,对施工组织和管理水平要求极高。

1.2 深基坑工程施工工艺

水利水电基坑通常位于围堰保护之下,开挖深度大、边坡高陡。基坑开挖采用分层分段方式,自上而下逐级推进,每级开挖后及时跟进支护。支护形式根据地质条件确定:岩质边坡以锚喷支护为主,辅以预应力

锚索加固;土质边坡或松散覆盖层采用桩锚支护、地下连续墙或土钉墙。基坑施工须同步建立降排水系统,包括管井降水、明沟排水和坑底集水抽排,确保作业面干燥。底部混凝土浇筑前须完成垫层封闭和防渗处理。基坑施工面临的最大挑战在于开挖卸荷引起的围岩应力重分布和地下水渗透压力的双重作用,边坡稳定性随开挖进程动态变化,呈现显著时空效应,要求支护紧跟开挖面,严禁大面积长时间暴露^[1]。

1.3 围堰、基坑施工主要风险类型

围堰与基坑施工涉及的风险类型多样,涵盖水力、结构、地质、施工与管理等多个维度。围堰方面,高水头作用下的渗透变形、超标洪水引发的漫顶溃决、高速水流对坡脚及合龙口的冲刷破坏是三大核心风险,三者相互关联——渗漏可弱化堰体结构,结构失稳又加剧渗漏风险,最终在极端水情下触发漫顶溃决。基坑方面,开挖卸荷导致的边坡失稳、地下水处理不当引发的涌水流砂、支护结构变形超限或锚固力不足是主要风险形态,同样存在链式传导特征——排水失效导致水位上升,软化边坡岩体,进而加剧支护结构受力,形成连锁破坏。此外,施工方案缺陷、操作不规范等人为因素,以及责任不清、应急不足等管理因素,与工程本体风险相互叠加放大。各类风险的耦合效应使围堰—基坑系统整体风险水平呈非线性增长,必须在识别与管控中予以系统考量。

2 水利水电围堰及基坑施工安全风险识别与分析

2.1 围堰施工风险识别

围堰施工核心风险集中于渗漏管涌、冲刷破坏、结构失稳和漫顶溃决四类。渗漏管涌最为常见——防渗墙

或帷幕灌浆存在缺陷时,高水头驱动下渗流路径贯通,细颗粒被带走形成管涌通道,如不及时处置将迅速恶化导致溃堰。冲刷破坏集中于坡脚、导流出口及合龙口,高速水流淘刷基础可引发坡面坍塌或整体滑动。结构失稳源于填筑质量缺陷——碾压不密实、速率过快、级配不良均可导致强度不足,在水压力和渗透压力联合作用下发生滑坡。漫顶风险直接威胁围堰生存——超标洪水或水位预报误差使洪水位超过堰顶,漫顶水流迅速扩大溃口。漂浮物撞击、冰凌堵塞等次生风险同样不容忽视。

2.2 基坑施工风险识别

基坑施工风险主要表现为边坡坍塌、涌水突涌、积水浸泡和支护失效。边坡坍塌最为典型——开挖卸荷打破应力平衡,若坡率过陡、未及时支护或遭遇降雨入渗,抗剪强度降低易发生掉块或滑坡。涌水突涌最具破坏性——基坑底部或侧壁揭露承压含水层时,高水头压力下发生突发性涌水,短时间即可淹没基坑;管涌和流砂表现为持续性细颗粒流失,逐渐掏空地基。积水浸泡源于排水能力不足或设备故障,长时间浸泡软化边坡岩土体、降低承载力^[2]。支护失效表现为锚杆抗拔力不足、喷射混凝土开裂脱落、钢支撑变形过大,一旦失效边坡将大面积失稳。

2.3 人为风险、环境风险与管理风险分析

除工程本体风险外,人为、环境和管理因素构成第二层次风险。人为风险表现为:施工方案编制粗糙,未针对实际地质设计合理坡比和支护参数;违规操作如超挖、支护滞后;监测数据造假或误判错过预警时机。环境风险包括极端降雨致基坑积水、边坡饱和失稳;上游突发洪峰或调度失误引发超标洪水;地震、滑坡等次生灾害冲击。管理风险体现为:安全责任体系不健全,总包与分包职责模糊;安全投入不足,监测设备、排水设施、应急物资配置不到位;防汛值班形同虚设,水文信息滞后;应急演练走过场,人员不熟悉逃生和抢险流程。三类风险相互叠加放大,使整体风险呈非线性增长。

3 当前围堰、基坑施工安全管理现存问题

3.1 前期风险辨识不全面、方案针对性不足

多数项目在围堰基坑施工前未开展系统性危险源辨识和风险评估,对水文地质条件分析不深入,风险辨识停留在定性描述层面,缺乏定量风险等级划分和管控优先级排序。施工方案编制中,围堰防渗、基坑支护等关键内容照搬类似工程模板,未充分结合本工程实际条件

进行针对性设计。方案审批走过场,缺乏专家论证和风险专项评审。技术交底层级缺失或内容简化,安全措施未能有效传导至一线作业人员。一旦实际条件与设计方案出现偏差,施工方缺乏应变预案和技术储备,只能边施工边修改,风险辨识缺位使后续管控始终处于被动应对状态。

3.2 支护、排水、防渗施工管控不规范

支护、排水、防渗是围堰基坑施工安全的三道核心防线,但现场管控不规范问题突出。支护施工中,锚杆长度、角度、锚固饱满度等关键指标检测不到位;喷射混凝土厚度不均、强度检测不足,回弹料被二次利用严重影响强度;钢拱架连接不牢固、间距超规范。排水施工中,系统设计能力不足,水泵无备用冗余,设备故障即发生积水;排水沟淤塞后未及时清理。防渗施工中,灌浆压力控制不严、升压过快导致劈裂;结束标准执行不严格,吃浆量异常未分析原因;防渗墙槽段连接存在薄弱通道。三道防线管控失位,使围堰基坑长期带病运行,风险持续累积。

3.3 汛期、雨水天气动态风险管控缺失

汛期和持续降雨是围堰基坑安全风险最集中的时段,动态管控能力普遍薄弱。多数项目未建立与上游水文站、气象部门的常态化信息共享机制,对突发洪水、强降雨预见期短,无法提前部署防范。汛期值班制度执行不严格,值班人员对水位、降雨、渗流等关键参数不敏感,异常发现不及时。面对持续降雨,排水和防雨措施滞后于雨情,雨前未提前降低水位、增加抽排能力,雨中未加密巡查。降雨后积水和边坡饱和问题排查不及时,复工前未进行安全确认。动态管控缺失使汛期围堰基坑面临风险失控^[3]。

3.4 现场监测不到位、预警机制不完善

监测预警是围堰基坑安全的“晴雨表”,但现场监测普遍存在测点布置不合理、监测频率不足、数据应用不到位等问题。围堰监测中渗流量、浸润线等关键指标测点缺失或位置不当;基坑监测中位移测点间距过大、覆盖不足,锚杆应力监测点偏少。汛期或变形加速阶段监测频率未相应加密,异常数据发现滞后。监测数据与施工决策之间缺乏有效衔接——数据仅用于归档,未建立预警阈值和分级报警机制,管理人员无法及时获取风险信息。部分项目设备陈旧、精度不足,自动化程度低,监测预警形同虚设,使围堰基坑安全失去了最重要的风险前哨。

4 水利水电围堰、基坑施工安全风险管控对策

4.1 完善前期专项方案与风险预控机制

从源头消除风险是最有效的管理手段,须将风险预控贯穿于方案编制和施工准备全过程。施工前须开展基于围堰—基坑系统关联的专项风险评估,系统识别渗漏、冲刷、变形、涌水等各类风险源,按风险等级编制分级管控清单,高风险项目必须编制专项安全技术方案并经专家评审。方案设计须充分考虑最不利工况组合(超标洪水+持续降雨+设备故障),确定合理的围堰挡水标准、基坑支护型式和排水能力配置,留足安全裕度。针对围堰与基坑的相互影响,制定协同施工时序方案,明确围堰达到设计高程后方可进行大规模基坑开挖。建立开工前的安全条件核查制度,逐项核查地质勘察深度、方案审批完整性、应急物资储备、人员培训考核等前置条件。技术交底须做到“一工序一交底”,将方案中的风险控制措施和操作标准逐级传达到一线班组。

4.2 规范围堰防渗、防冲、加固施工管理

围堰的安全核心在于防渗可靠、抗冲稳定和结构牢固三要素的协同保障。防渗施工中,帷幕灌浆须严格按照设计孔位、孔深和灌浆压力执行,升压速率控制在规定范围内,每段灌浆结束标准以单位吸浆量低于规定值且持续稳定为判定依据;防渗墙槽段连接处须进行接头处理和质量检测,确保连续完整。防冲措施方面,围堰上下游坡脚应按设计抛填大块石或浇筑混凝土护脚,抗冲尺寸须满足最大流速条件;合龙口流速最大,须在合龙前后加密检查,发现冲刷立即补抛。加固施工方面,围堰填筑须分层碾压,每层厚度、碾压遍数和压实干密度均须达到设计要求并留存检测记录;围堰加高培厚时须做好新老填筑体的结合面处理。每项工序完成后须经监理验收方可进入下道工序,防渗和加固隐蔽工程须留存影像资料和检测报告,实现施工质量全过程可追溯^[4]。

4.3 强化基坑支护、排水、边坡防护精细化管控

基坑施工须坚持“开挖一级、支护一级、排水同步”的精细化管控原则。支护工程紧跟开挖面,锚杆施工须逐孔检测孔位、孔深和锚固力,喷射混凝土须控制回弹率、确保设计厚度和强度,预应力锚索张拉须分级加载、锁定值符合设计要求。每级开挖完成后尽快完成边坡封闭防护,严禁大面积长时间暴露。排水系统按设计配置足够容量的排水泵和备用电源,排水沟和集水坑保持畅通并定期清淤,暴雨来临前提前降低坑内水位、

增加抽排能力。边坡防护方面,开挖坡比和台阶设置严格按设计执行,严禁超挖或随意改变坡比,坡面截水沟、排水孔保持完好通畅。建立每班开挖前安全确认制度,由安全员和班组长共同检查边坡稳定、排水系统运行和支护结构完好性,签字确认后方可作业。

4.4 建立施工全过程动态监测与预警体系

动态监测与预警是掌握围堰基坑安全状态的核心手段,须在施工全过程保持连续有效运行。监测系统在施工前完成设计,围堰布设水位、渗流量、浸润线和堰体位移等测点,重点覆盖渗流出口、坡脚和合龙段;基坑布设坡顶水平位移、深层水平位移、锚杆应力和地下水位等测点,关键断面加密布置。所有测点在施工启动前完成初始值采集并建立基准。施工期间按规范频次监测,汛期和变形加速阶段加密至每日多次。建立四级预警机制(注意值→警示值→警戒值→行动值),不同级别对应不同响应流程。监测数据实时上传管理平台,进行趋势分析和超限报警,安全管理人员每日审阅并签署意见,发现异常立即研判处置。定期校准维护监测系统,确保预警体系持续有效。

结束语

围堰与基坑施工安全风险深度关联,互为因果,构成统一的风险系统。本文基于系统关联视角,系统分析了两类施工的工艺特点与主要风险类型,识别了渗漏、失稳、涌水、坍塌等关键风险因素,剖析了方案针对性不足、汛期管控缺失、监测预警薄弱等突出问题,进而从风险预控、防渗加固、支护排水精细化管理及全过程动态监测四个方面提出了系统化管控对策。构建以风险预控为先导、以过程管控为核心、以监测预警为支撑的全链条协同防控体系,将围堰与基坑作为统一系统加以管理,是防范链式事故、保障施工安全的关键路径。

参考文献

- [1] 丁保卫. 水利水电施工中施工导流与围堰技术研究[J]. 建材发展导向(上), 2021,19(5):298-299.
- [2] 李天佑, 侯圣朋. 基于物联网的水利水电工程施工安全管理与安全控制[J]. 张江科技评论, 2026(3):42-44.
- [3] 方琳, 赵旭峰, 孙家波, 等. 某水电站导流洞出口围堰选型及施工技术[J]. 人民黄河, 2023,45(6):128-132.
- [4] 马辉文. 碾盘山水利枢纽工程二期围堰基坑排水计算[J]. 水电与新能源, 2024, 38(12):65-68.