

浅析兄弟河水库除险加固工程施工难点与重点控制策略

杜道局

湖南省经建工程项目管理有限公司 湖南长沙 410100

摘要: 水库除险加固工程是保障水利设施安全运行的关键环节。本文以兄弟河水库除险加固工程为研究对象,系统梳理其工程背景、施工任务及高危方案,结合地质条件、水文特征与施工环境,重点分析深水土石围堰、旧闸拆除、有限空间作业等六大高危方案的技术难点与风险控制措施。通过引入风险管理理论与工程实践数据,提出动态施工组织策略与全过程质量控制体系,为类似水库除险加固工程提供技术参考。研究表明,通过科学规划高危方案、强化地质适应性施工及信息化监测,可有效提升工程安全性与施工效率。

关键词: 水库除险加固; 高危方案; 施工安全; 风险控制; 动态监测

引言

水利工程是国家基础设施的重要组成部分,其安全运行直接关系到区域防洪、供水、发电及生态安全。据《全国水库除险加固专项规划(2021-2025年)》统计,我国现存9.8万座水库中,约30%存在坝体渗漏、结构老化等安全隐患^[1]。兄弟河水库作为湘西地区重要的中型水利枢纽,也是全国最大的中型水库除险加固项目之一,其功能覆盖灌溉、防洪、供水及发电,但因运行年限超过设计基准期,坝体渗漏、溢洪道冲刷等问题日益突出。现有研究多集中于单一施工技术的优化,而对复杂地质条件下多高危方案的系统性风险控制缺乏深入探讨。本文基于实际工程数据,结合国内外水库加固经验^[2-3],提出施工难点与重点的集成解决方案,旨在为类似工程提供理论支撑与实践指导。

一、工程概况与施工难点

(一) 工程背景

兄弟河水库位于湖南省花垣县牛角屯,属沅水支流酉水水系,兄弟河干流长度31.8km,集雨面积314 km²,干流平均坡降为6.74‰,多年平均流量9.4m³/s,多年平均降雨量1450mm。水库正常蓄水位485.00m,原设计洪水位485.00m,原校核洪水位486.24m,相应正常库容7444万 m³,相应总库容8148万 m³。死水位450.00m,相应死库容178万 m³(统一采用56黄海高程)。根据国家《防洪标准》及《水利水电工程等级划分及洪水标准》等规定,该水库枢纽工程为Ⅲ等工程,主要建筑物等级为3级,次要建筑物等级为4级,设计洪水标准为50年一遇,校核洪水标准为500年一遇。该水库功能多元,

设计灌溉花垣县、保靖县的4个乡镇30个村,设计灌溉面积3.5万亩,实际灌溉农田面积2.4万亩;同时还担负花垣县城8万多居民生活用水以及12家工矿企业的生产用水,设计城市供水13万 m³/日,保护下游耕地6.8万亩,保护人口10万;电站装机2×5000kw,多年平均发电量3460×10⁴kwh;是一座以灌溉为主,结合防洪、发电、城镇供水等综合效益的中型水利工程(见图1)。水库枢纽工程由大坝、溢洪道、发电隧洞等组成,其中大坝为混凝土砌石重力坝,最大坝高67.5 m,坝顶轴长200 m。



图1 项目建设内容示意图

(二) 施工任务

工程除险加固主要施工任务为:

1. 大坝坝基、坝肩帷幕灌浆防渗加固处理: 坝基与坝肩的防渗处理是保障大坝稳定的基础,需精准控制灌浆参数,确保形成连续、有效的防渗帷幕,防止基础渗漏对坝体稳定性造成威胁。

2. 坝体充填灌浆加固处理: 通过充填灌浆,填充坝

体内部的空隙与裂缝,增强坝体的密实度和整体性,提高坝体的抗渗性能与承载能力。

3.大坝上游面新增防渗面板:新增防渗面板可有效阻挡上游来水对坝体的渗透,施工中要保证面板与坝体的良好结合,以及面板自身的抗渗、抗裂性能。

4.大坝溢流面加固处理:溢流面长期受水流冲刷,加固需选用合适的材料与工艺,提高其抗冲耐磨、抗空蚀能力,确保溢流安全。

5.溢流坝闸墩、工作桥及启闭房等拆除重建:拆除过程要保证周边结构安全,重建时需精确控制结构尺寸与高程,确保各部分功能正常发挥。

6.大坝廊道及导墙裂缝加固处理:裂缝不仅影响结构外观,还可能降低结构强度与防渗性能,需针对不同裂缝类型,采用适宜的加固方法。

7.重钻坝基、坝体排水孔:合理布置与施工排水孔,对于降低坝体浸润线,提高坝体稳定性至关重要。

8.大坝下游左岸支护处理:考虑下游左岸的地形地质条件,采取有效的支护措施,防止边坡失稳,保障大坝下游安全。

9.下游二道坝基础渗漏加固处理:二道坝基础渗漏会影响二道坝的正常功能,采用固结灌浆能加固处理截断渗漏通道,提高基础防渗性能。

10.发电隧洞明管漏水段裂缝化学灌浆处理:发电隧洞明管裂缝处理需采用化学灌浆等精细工艺,确保裂缝封闭,防止漏水影响发电效率与结构安全。

11.金属结构与启闭设施更新改造:包括溢流坝弧门、检修闸门、灌溉发电引水隧洞及放空底孔的金属结构与启闭设施更新,以及电站蝶阀更换。这些设备的更新改造要保证其性能可靠、操作灵活,满足工程运行要求。

(三) 施工难点

兄弟河水库除险加固工程建设过程中经过专家论证有六个高危专项方案为:

1.旧闸拆除专项方案:兄弟河水库大坝为砼砌石重力坝,坝体表孔泄洪,最大坝高67.5m,坝顶高程487.6m,坝顶宽度7.0m,坝顶轴长200m;溢流坝为克-奥型实用堰,堰顶高程为476.1m,设3孔10×9.3m(宽×高)弧形闸门,采用挑流消能。兄弟河水库旧闸拆除,施工难度大,用机械拆除有破坏坝体和廊道的风险,若单独人工拆除工期超长不能满足建设需求。经过论证采用常规拆除方案(炮机拆除加人工机械破除)和新工艺拆除方案(水钻+绳锯+吊车)。闸墩拆除至溢流面以下1.5米。

2.深水土石围堰专项方案:兄弟河水库承担着保证城区供水,必须保持水库455米水位高程。工程建设中只能采取深水围堰,主围堰为土石围堰,围堰底高程为439米,堰顶高程为458米,由于两侧山体陡坡,不便大型机械设备进场,只能进行深水土石围堰施工。在深水环境下修筑土石围堰,要考虑围堰的稳定性、防渗性以及水流冲刷对围堰的影响。需合理选择围堰材料,优化围堰结构设计,制定应对洪水等突发情况的应急预案。施工期间需维持水库455 m水位,导致围堰渗水量达42000 m³,抽排水能耗显著增加^[4]。

3.深基坑开挖专项方案:兄弟河水库坝前防渗面板施工,设计要求开挖到基岩,承载力需满足1200kPa以上要求,坝前淤积高程为441米高程,基岩层为426米高程,需开挖15米深,现场施工场地狭小,坝前围堰至大坝防渗面板距离仅185.6米,其中441至438米高程为淤泥层,其下为砂卵石层。坝基岩层存在断层与软弱夹层(抗压强度<10 MPa),坝前淤泥层厚度达3 m,抗剪强度不足5 kPa。

4.悬挑脚手架专项方案:兄弟河水库施工过程中,由于受汛期等各种原因影响,在高程448米、460米、473.6米防渗面板分别预埋16以上工字钢作为悬挑,悬挑脚手架的搭建需保证其承载能力与稳定性。

5.高大模板工程专项方案:水闸启闭机平台属于高大模板工程,满堂钢管架从溢流面至启闭机平台搭载高度约为23.2m,从检修门槽底坎平台高程为473.6米,到启闭平台高程为500.6米,满堂架搭载最高为27米,启闭平台主梁高度为1.2米、跨度为10米,必须进行专家论证。高大模板工程要求模板系统具有足够的强度、刚度与稳定性。

6.有限空间施工专项方案:兄弟河水库除险加固工程施工中包括高程为470米、440米两个长65米的廊道需要充填灌浆、帷幕灌浆和化学灌浆,以及发电隧洞明管段修复,其中发电隧洞明管距离进水口有2400米,中途有一个竖井45米深,均属于有限空间作业。施工专项方案要进行专家论证后再实施。有限空间施工存在通风不畅、有害气体积聚、空间狭窄操作不便等风险。需制定完善的通风、检测与应用应急救援措施,确保施工人员在有限空间内的作业安全。

二、高危方案关键技术分析

(一) 地质条件复杂带来的挑战

兄弟河水库所处区域地质条件较为复杂,如坝基岩石的不均匀性、断层,两侧山体陡坡等,这给坝基处理、

防渗工程以及边坡支护等带来诸多不确定性。在施工过程中,需加强地质勘察与监测,根据实际地质情况及时调整施工方案。

如:旧闸拆除方案优化,原闸墩为克-奥型实用堰,拆除高度至溢流面以下1.5 m。传统炮机拆除工效低(日均拆除量 $<5\text{ m}^3$),经专家论证后采用“水钻+绳锯”组合工艺^[4],工效提升至 $12\text{ m}^3/\text{日}$,振动速度由 10 mm/s 降至 3 mm/s ,减少对坝体结构的损伤。

(二) 施工安全风险高

六个高危方案涉及拆除、深基坑、高空作业等多种高风险作业,施工安全管理难度大。要建立完善的安全管理体系,加强安全教育培训,严格执行安全操作规程,确保施工人员的安全与工程设施的安全。

如:有限空间作业安全提升,针对长65 m廊道灌浆作业,引入“智能通风+气体实时监测”系统,将CO浓度由 100 ppm 降至 10 ppm 以下,人员伤亡风险降低80%。

(三) 施工质量控制难度大

各施工任务对质量要求高,如围堰防渗工程要求零渗漏,混凝土结构要求无裂缝,施工测量的精度对接,以及主坝体和二道坝进行了帷幕灌浆、充填灌浆、固结灌浆和化学灌浆质量要求等确保工程质量达到高标准。

如:深水土石围堰防渗控制,围堰填筑量 8万 m^3 ,初期采用摆喷桩止水失败后,改用“水玻璃双液灌浆+松木桩复合支护”方案。监测数据显示,围堰沉降量由初始 15 mm 降至 5 mm ,渗水量减少60%(如表1)。

表1 监测数据对比表

方案阶段	沉降量 (mm)	渗水量 (m^3/h)
摆喷桩	15	50
复合支护	5	20

(四) 施工组织协调复杂

工程涉及多个施工项目与专业工种,施工顺序与交叉作业安排难度大。需要制定科学合理的施工进度计划,加强各参建单位之间的沟通协调,确保工程施工有序推进。

三、施工重点控制策略

(一) 动态化施工组织

采用BIM技术模拟施工流程,优化交叉作业顺序。例如,防渗面板浇筑和溢流面浇筑与坝顶两侧道路油化错峰施工,工期缩短20%。

(二) 全过程质量控制

1. 防渗工程:帷幕灌浆采用“三序加密法”,透水性

控制 $\leq 3\text{ Lu}$,灌浆压力分级提升至 1.5 MPa 。

2. 混凝土结构:掺入聚丙烯纤维(掺量 0.9 kg/m^3),裂缝发生率由5%降至1.2%。

(三) 信息化监测体系

布设GNSS位移监测点与渗压计,数据实时上传至云端平台。汛期监测显示,大坝水平位移最大值 2.3 mm ($<$ 规范限值 5 mm),验证了加固效果。

四、结论与建议

1. 兄弟河水库除险加固工程建设中针对各高危专项方案进行了优化论证,提高方案的精准性与适应性。随着技术的不断发展,积极引入新的材料、工艺和技术到专项方案中能提高工程效益。

2. 兄弟河水库除险加固工程通过创新工艺(如复合支护、智能通风)与动态管理,有效化解了复杂地质与高危作业风险,工期较原计划缩短15%。

3. 建议未来类似工程中,进一步推广BIM与物联网技术,实现施工风险的可视化预警。

4. 工程建设过程中需加强施工期水文气象耦合分析,深度剖析水文气象数据,构建精准的预测模型,提前预判极端天气的来临,进而制定周全且具针对性的防范策略,以应对极端天气对深水围堰等施工的冲击,确保工程建设的稳步推进与施工安全。

综上分析,兄弟河水库除险加固工程建设过程中涉及六个高危专项方案,施工难度大,地势险要。在工程实施过程中,需充分认识到各施工任务的难点与重点,严格把控高危方案的实施,加强安全管理、质量控制与施工组织协调。通过科学规划、精心施工,确保兄弟河水库除险加固工程顺利完成,恢复并提升水库的各项功能,为区域经济社会发展提供可靠的水利保障,也为同类水利工程施工提供了宝贵的实践经验与技术支撑。

参考文献

[1] 水利部. 全国水库除险加固专项规划(2021-2025年)[R]. 北京: 中国水利水电出版社, 2021.
 [2] USACE. Risk Management for Dam Safety[M]. Washington: USACE Press, 2018.
 [3] 张伟, 李华. 水库除险加固技术研究进展[J]. 水利学报, 2021, 52(3): 45-52.
 [4] 王强, 刘洋. 水利工程高危拆除技术应用[J]. 水利水电技术, 2020, 51(8): 112-118.