

水库土坝除险加固及渗流稳定有限元分析

简 铭

(高州市鉴龙水利水电勘测设计有限公司, 广东 高州 525200)

摘 要 本文以某水库土坝出现坝体渗漏及坝基透水率超标导致安全余度不足为研究对象, 针对隐患, 先系统制定除险加固方案, 再开展渗流—稳定耦合分析。比选垂直与水平防渗后, 选定高压喷射灌浆垂直防渗墙作为主线措施。随后建立有限元模型, 复核加固后的渗流场与坝坡稳定: 防渗墙显著压低浸润线, 抗滑安全系数同步提高, 指标满足现行规范。本研究取得的成果, 以为同类水库土坝工程提供具有可操作性的技术路径, 同时也提供了精准可靠的量化分析方法, 有助于推动该领域工程质量的提升与安全保障。

关键词 水库土坝; 除险加固; 渗流稳定; 有限元分析

中图分类号: TV62

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.33.040

0 引言

水库作为骨干水利工程, 在防洪、灌溉和供水等方面承担着不可替代的角色。然而, 受建设年代久远、设计标准偏低、施工质量参差不齐等因素影响, 大量土坝已出现不同程度的病险, 直接威胁运行安全。其中, 渗流异常最为常见, 若持续发展, 坝体渗透变形可能演变为溃坝。因此, 尽快实施除险加固并准确评价渗流稳定性, 已成为当务之急。值得一提的是, 有限元分析方法属于一种行之有效的数值计算方式, 它能够较为精准地模拟土坝的渗流场与应力场, 进而为除险加固设计以及安全评估工作提供科学、可信的依据。

1 工程病险现状

1.1 工程概况

某水库位于珠江流域, 总库容 2 850 万 m^3 , 属中型工程。大坝为均质土坝, 坝顶高程 125.5 m, 最大坝高 42 m, 坝顶长 380 m。工程 1972 年建成投运, 多年运行后已暴露多项病险: 一是坝体渗漏。填筑质量差, 干密度仅为 1.52 g/cm^3 , 低于设计值 1.65 g/cm^3 ; 渗透系数 $1.2 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$, 也高于允许上限 $5 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ 。二是坝基透水过强。强风化砂岩坝基透水率 $q=15 \text{ Lu}$, 远超设计 5 Lu , 引发显著绕坝渗漏。三是观测设施缺失。1998 年渗流观测系统失效后, 再无实时数据, 安全评估缺乏依据。

1.2 病险成因分析

该水库土坝的病险集中体现在三个方面。其一, 施工质量先天不足。当年采用“边勘测、边设计、边施工”的“三边”做法, 工序衔接缺少系统规划, 现场控制薄弱。填筑料含泥量失控, 峰值达 28%, 远超允许范围; 碾压

遍数仅 4 遍, 比设计少两遍, 压实度明显不足。其二, 坝址地质条件复杂。覆盖层厚约 8 m, 清基不彻底, 残留透水体, 为渗漏提供了隐蔽通道, 削弱坝体稳定。其三, 长期运行后老化加剧。护坡块石松动率已达 35%, 反滤层失效面积占 22%, 防护与排水功能同步退化。

1.3 安全隐患评估

按照《水库大坝安全评价导则》(SL 258-2017) 复核后, 大坝主要暴露出三项缺陷。第一, 结构稳定性不足。正常蓄水位 122 m 时, 下游坝坡抗滑稳定安全系数实测仅 1.12, 低于规范要求的 1.25, 表明常规运行条件下坝体已潜藏局部失稳风险; 若遇极端工况或长期荷载, 坝坡可能滑动变形。第二, 渗透安全超标。校核洪水位 124.8 m 下, 坝基渗透坡降实测 0.38, 超出允许值 0.25 达 52%; 年渗漏量 85 万 m^3 , 相当于设计库容的 3.0%, 证实坝基存在强透水通道。持续渗漏不仅浪费水资源, 还可能诱发库岸塌陷、管涌等次生灾害, 威胁水库安全。第三, 渗漏削弱效益。年损失 85 万 m^3 蓄水, 使水库调蓄能力显著下降, 直接降低工程整体收益^[1]。

2 水库土坝除险加固设计

2.1 防渗方案比选

2.1.1 垂直防渗方案

(1) 方案一: 高压喷射灌浆防渗墙。墙体厚度取 0.8 m, 施工时须嵌入相对不透水层 ($q1\text{Lu}$) 2 m。成墙采用三重管法, 浆液水灰比 0.8:1。钻机就位偏差限 5 cm, 喷嘴提升速度 15 cm/min, 浆液压力保持 35 MPa。防渗墙总面积 12 500 m^2 , 混凝土量 1 875 m^3 。(2) 方案二: 混凝土防渗墙。技术参数上, 墙体厚 0.6 m, 深度与前面提到的标准一致。成槽用冲击钻, 全程泥浆

护壁,保持槽壁稳定。坝体块石层是最大障碍,地质松散,钻进困难,台班进尺仅 3 m。在经济账方面,单价 1 200 元/m²,总费用约 1 500 万元。

2.1.2 水平防渗方案

一般来说,水平防渗措施主要涵盖黏壤土水平防渗与土工膜水平防渗两种类型。聚焦黏壤土防渗这一方式,尽管在施工技术和质量控制环节,它相较于土工膜防渗更为简便易行,但从防渗性能以及工程投资的经济性角度评估,其表现不尽如人意。不仅如此,运用黏壤土进行防渗还会不可避免地占用部分水库库容空间。考虑到小河边水库库区地质条件复杂、渗漏问题突出,并且该水库已被规划为龙山镇的稳定水源这一实际情况,经过全面且细致的综合考量,最终在水平防渗方案中确定采用土工膜水平防渗。在具体施工流程方面:第一,要拆除坝体上游坝坡的预制块,并将这些预制块与中间的自然土体一同清理,然后进行平整作业;第二,对截流墙实施部分拆除操作;第三,在上游区域新建齿墙;第四,在上游坝面铺设土工膜,一直延伸至坝顶;第五,待土工膜上的沙石垫层铺设完成后,最后砌筑混凝土预制块。根据以上工程特点,进行方案三的设计。

方案三将黏土铺盖与下游减压井组合使用。铺盖厚 2 m,渗透系数 1×10^{-6} cm/s;减压井按 15 m 间距布置,井深 20 m。该方案需征用坝前 300 m 范围的土地,且施工期水库必须放空。预计运行后浸润线可下降 1.5 m,但坝基渗漏仍无法根除^[2]。

2.1.3 比选成果

本项目的除险加固选取了三种方案进行比选,比选结果如表 1 所示。

通过表 1 可知,优先选用高压喷射灌浆方案,其防渗性能、施工效率与经济性综合最优。

2.2 辅助加固措施

首先对坝体进行加固。上游坡面将铺设 30 cm 厚的混凝土预制块护坡,以抵御水流冲刷,确保迎水侧稳定;下游坡面则通过植草与排水棱体协同,既提高整体稳定性,又保证渗水顺畅排出,避免因积水削弱坝体安全。随后修复反滤层。在坝脚重新铺设 1.2 m 厚的级配砂石,严格控制粒径,使 $D_{85}/D_{15}=5$,从而兼顾过滤与排水,防止细颗粒流失,维持坝体长期性能。

最后更新观测系统。坝体将布设 18 支渗压计和 25 根测压管,组成自动化监测网络,实时捕捉渗压变化,一旦出现异常即可预警,为后续处置提供数据支持^[3]。

3 大坝防渗修复后安全复核

3.1 坝体渗流稳定复核

3.1.1 有限元模型建立

(1) 几何模型:按 1:1 比例建立二维模型,坝体划分为 976 个结点,4 872 个六面体单元。(2) 材料参数:坝体土渗透系数 1.2×10^{-4} cm/s \rightarrow 加固后 1.5×10^{-6} cm/s;坝基砂岩 $q=15$ Lu \rightarrow 加固后 $q=0.8$ Lu。(3) 边界条件:上游水位 122 m,下游水位 105 m,降雨强度 50 mm/d。

3.1.2 渗流场分析结果

大坝为均质土坝,上游坡面用混凝土预制块防护,下游坡面铺草皮护坡;筑坝土料取自两岸岸坡的粘土与风化层。稳定及渗流复核选用最大坝高断面作为计算剖面,见图 1。

为掌握土坝在多种运行条件下的渗流稳定性,并据此细化防渗方案的技术指标,确保除险加固设计足够安全,采用 Autobank 水工有限元系统对大坝渗流特征进行模拟。计算假定坝体处于稳定渗流状态,渗流场为符合达西定律的非均质各向异性二维场;软件以节点流量平衡法迭代求解,可自动捕捉浸润线并给出渗流量。设计阶段共设置四种工况以校核坝坡稳定:(1) 正常蓄水位 1 252.73 m;(2) 设计洪水位 1 254.54 m;(3) 校核洪水位 1 255.30 m;(4) 库水位由正常蓄水位骤降至死水位 1 248.5 m。按图 1 断面 1:1 建立有限元网格,模型含 976 个节点、4 872 个单元,结合土体试验参数,Autobank 给出各工况下游坡渗透坡降:稳定期 0.0 154,设计洪水期 0.0 173,校核洪水期 0.0 172,骤降缓降期 0.00 718,均低于粘土允许值 0.38,坝体无渗透破坏风险,渗流性态满足规范。若在坝体铺设水平防渗土工膜,渗流量可显著削减,渗漏问题随之得到控制。

3.1.3 剩余水头系数评估

渗压计实测数据显示,防渗墙后剩余水头系数为 28%,低于 30% 的评判阈值,对应“良好”等级,表明墙体防渗性能可靠^[4]。

表 1 三种方案比选

指标	高压喷射灌浆	混凝土防渗墙	黏土铺盖+减压井
防渗效果	优 ($q \leq 0.5$ Lu)	优 ($q \leq 0.3$ Lu)	中 ($q \leq 3$ Lu)
施工周期	90 天	150 天	180 天
单位造价	850 元/m ³	1 200 元/m ³	680 元/m ³
环境影响	小	中	大

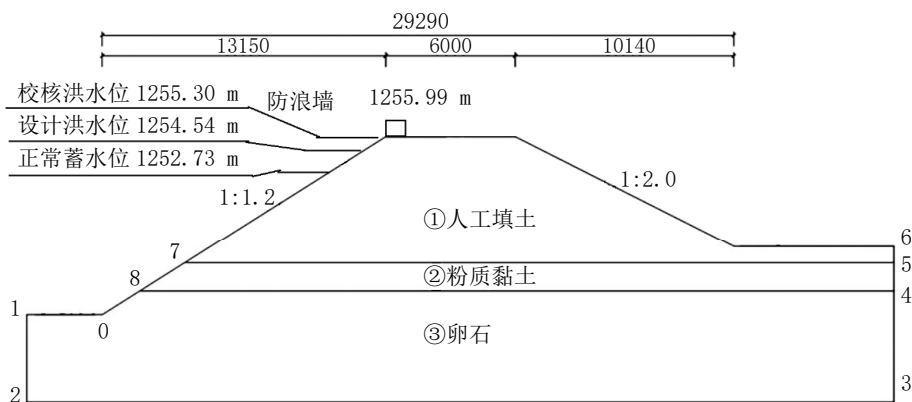


图1 大坝渗流稳定分析断面图

3.2 坝坡稳定安全复核

3.2.1 计算工况

(1) 稳定渗流期: 自重+渗透力, 下游坡稳定。(2) 库水位降落期: 自重+渗透力+孔隙压力, 上游坡稳定。

3.2.2 滑动面法分析

(1) 计算参数: 土体抗剪强度指标 $c=25$ kPa, $\phi=28^\circ$; 孔隙压力系数 $r_u=0.25$ 。(2) 结果对比: 不同工况的滑动面结果分析如表2所示。

表2 不同工况的滑动面结果分析

工况	修复前安全系数	修复后安全系数	规范要求
稳定渗流期	1.12	1.38	≥ 1.25
库水位降落期	1.05	1.27	≥ 1.15

通过表2可知, 修复后坝坡稳定安全系数均满足规范要求, 且较修复前提升23%~26%。

3.3 防渗修复后坝体评价

(1) 渗流安全检测显示, 防渗墙后渗透坡降为0.18, 低于0.25的临界值, 管涌风险可排除; 出逸比降实测0.32, 也低于0.4的允许上限, 表明反滤层工作正常。

(2) 沉降监测显示, 坝体最大累计下沉12 cm, 仍低于25 cm的设计限值; 对应水平位移3.8 cm, 亦未超出8 cm的允许范围, 综合判断结构保持稳固。(3) 2024年汛期实测渗流量为362 m^3/d , 与有限元结果相差4.7%, 模型可靠性由此得到直接印证^[5]。

4 结论与建议

4.1 结论

(1) 针对某水库土坝的险情, 现场调查将渗漏、填筑密实度不足及防渗体系失效列为核心缺陷, 并评估了这些缺陷对大坝安全的影响。(2) 在方案比选阶段, 对技术可行性、经济成本与施工难度做了综合比较, 最终选定混凝土防渗墙与坝前复合土工膜联合布置的

防渗体系。(3) 采用有限元方法对加固后的大坝进行渗流与坝坡稳定复核, 各工况下均满足规范要求, 安全裕度明显提高。(4) 本研究为同类水库土坝除险加固提供了具有可操作性的参照。现场实施时, 应结合具体条件遴选防渗方案, 并对大坝安全进行系统复核, 确保其长期稳定运行。

4.2 建议

(1) 为保障水库土坝的安全稳定运行, 必须进一步加大其日常运维与管理力度。具体而言, 要定期对坝体展开全方位、无死角的检查与严密监测, 如此方能及时察觉潜在安全隐患, 并采取有效措施加以妥善处理。(2) 有必要构建一套完善且科学的水库土坝安全预警体系。此体系应将监测数据与有限元分析成果有机融合, 借助先进的技术手段, 对土坝的安全状况进行实时、精准的评估与预警, 以便在问题出现前提前防范。(3) 应当积极投身于水库土坝除险加固技术的探索与创新工作当中。通过不断的研究与实践, 持续优化除险加固方案, 从而切实提升工程的安全性能, 同时实现经济效益的最大化。

参考文献:

- [1] 吴鑫敏. 水库坝坡稳定性及防渗加固方案分析[J]. 云南水力发电, 2024, 40(04): 109-113.
- [2] 牛文龙, 卢长海, 徐鹏飞, 等. 基于Autobank的某土石坝渗流稳定分析[J]. 工程技术研究, 2022, 07(10): 18-20.
- [3] 陈小洪. 磷矿水库除险加固工程大坝防渗处理设计分析[J]. 中国水能及电气化, 2024(07): 19-22, 70.
- [4] 文佳佳, 刘继彬, 冯翔. 双岔沟水库均质土坝安全评价及除险加固方案分析[J]. 云南水力发电, 2023, 39(06): 75-78.
- [5] 邓永辉, 赵光俊, 赵昌富. 会理市小型水库除险加固建设管理工作分析[J]. 四川水利, 2023, 44(06): 170-173.