

Seepage Control Treatment Technology and Application Effect Analysis of Earth-rock Dam Foundation

Dangwei Wang

China Water Resources and Hydropower Third Engineering Bureau Co., Ltd., Xianyang, Shaanxi, 712000, China

Abstract

The effective integration of new and old seepage prevention systems in earth-rock dam elevation and expansion projects has long been a major technical challenge hindering safe engineering operations. Traditional step-by-step construction methods have consistently plagued the hydraulic engineering community with issues such as poor coordination at critical interfaces (dam body joints, foundation seepage zones, and shoulder seepage areas) and discontinuous process transitions. Addressing the practical needs of the Shenzhen Jingxin Reservoir reinforcement project, a comprehensive full-face synchronous seepage prevention system was developed. This system features I-shaped embedded grooves in seepage walls, high-performance seepage prevention toe plate anchoring, and mobile curtain grouting platforms at dam shoulders. By implementing pressure sensors and adaptive algorithms for dynamic casting progress control, the permeability coefficient was reduced from 1.6×10^{-4} to 5.3×10^{-4} cm/s in conventional methods to below 1×10^{-8} cm/s, achieving a four-order-of-magnitude improvement in seepage prevention efficiency. Engineering practice demonstrates that the total construction period was shortened from 161 days to 113 days after implementing the three-layered process, representing a compression rate exceeding 30% and a direct cost reduction of over 15%. This provides a replicable technical model for similar earth-rock dam reinforcement projects.

Keywords

Earth-rock dam heightening; full-section seepage control; I-shaped keyway; curtain grouting; adaptive control; permeability coefficient

土石坝坝基防渗处理技术及应用效果分析

王党伟

中国水利水电第三工程局有限公司, 中国·陕西·咸阳 712000

摘要

土石坝加高扩建工程中新旧防渗体系的有效搭接, 一直是制约工程安全运行的主要技术难题, 传统分步处理工艺在坝体结合面、坝基渗漏带、坝肩绕渗区等关键部位的施工协同性差、工序衔接不连续等问题一直困扰着水利工程界。根据深圳径心水库除险加固工程实际需要, 以防渗墙工字型嵌槽、高性能防渗趾板锚固、坝肩帷幕灌浆移动平台为核心, 构建起全断面同步防渗技术体系, 通过压力传感器和自适应算法实现浇筑进度的动态优化控制, 渗透系数由传统工艺的 $1.6 \times 10^{-4} \sim 5.3 \times 10^{-4}$ cm/s量级降低到 1×10^{-8} cm/s以下, 防渗效能提高4个数量级。工程实践表明, 3道工序叠加之后总工期从传统的161天缩短为113天, 压缩率超过30%, 直接工程成本降低15%以上, 给同类型土石坝加固工程提供了一个可以复制的技术模式。

关键词

土石坝加高; 全断面防渗; 工字型嵌槽; 帷幕灌浆; 自适应控制; 渗透系数

1 引言

均质土坝是我国水库枢纽工程的主要坝型之一, 长期运行中不可避免地会遇到坝体老化、渗流通道变化、防渗体系功能衰退等问题, 加高扩建工程中新旧坝体结合面的防渗处理, 更是决定工程整体安全性能的重要环节。深圳市径心水库位于大鹏新区葵涌镇下径心村, 属于中型水库Ⅲ等工程, 均质土坝坝顶高程 108.25m, 最大坝高 38m, 坝顶长

170m, 水库枢纽设计洪水标准按 100 年一遇确定, 校核洪水标准按 1000 年一遇复核。该水库在长期运行过程中暴露出的渗漏隐患, 使工程不得不进行除险加固, 但是传统的施工方案沿坝轴线分段浇筑混凝土防渗墙, 或者采用高压旋喷灌浆技术对坝基局部渗透性进行改良, 这些施工方法在实际操作中存在工序复杂、施工周期长、新旧防渗体难以协同等问题, 特别是在高水位运行的情况下, 分层施工很容易造成防渗体的衔接不连续, 从而形成薄弱的渗漏通道。

【作者简介】王党伟(1986-), 男, 中国陕西咸阳人, 本科, 工程师, 从事碾压混凝土工程施工研究。

2 土石坝加高工程防渗搭接技术原理与体系

2.1 新旧防渗体系协同工作机理

新旧防渗体系协同依靠界面力学耦合和渗流场重构,原有防渗墙长期运行后应力稳定,加高施工容易造成结合面应力集中和变形不协调。径心水库采用工字型嵌入槽结构,经有限元优化槽体比例,折角倒圆角处理使界面剪应力峰值下降约40%。协同工作通过三层力学路径来实现,刚性连接传力依靠纵向锚筋和横向箍筋形成空间骨架,传递轴向力和弯矩;柔性变形协调用渗透系数 $\leq 1 \times 10^{-9}$ cm/s的膨润土密封胶填充搭接部位,既防渗又适应变形;渗流场重构之后,帷幕灌浆、防渗墙、面板—土工膜体系形成立体封闭防渗网络^[1]。

2.2 全断面同步防渗技术核心原理

全断面同步防渗技术打破传统的串行施工模式,将防渗墙浇筑、坝体填筑和帷幕灌浆三者在空间和时间上叠加并行。施工区划定核心保护区,防渗墙养护区上下游10m内、帷幕灌浆孔半径5m内禁止振动碾压,只允许轻型静压且距离墙体 ≥ 3 m。技术核心为压力传感器和自适应算法集成,传感器采集三类压力数据,经过Savitzky-Golay算法降噪和加权平均优化后,按照四级风险动态调节参数,压力 < 0.4 MPa保持默认值,0.4~0.5MPa调整浇筑速度0.9倍、振捣功率55kW,0.5~0.6MPa浇筑速度0.8倍、振捣功率60kW、锚筋预应力加100kN, ≥ 0.6 MPa启动紧急响应,浇筑速度0.5倍、振捣功率70kW、锚筋预应力加200kN,形成闭环控制。

2.3 关键搭接部位应力应变分析

关键部位应考虑施工期和运行期的荷载变化,防渗墙工字型嵌入槽倒圆角后应力集中系数从2.8降低到1.7,最大主应力控制在混凝土抗拉强度设计值的0.6倍以内。防渗趾板搭接部位纵向锚筋伸出长度不小于40倍钢筋直径,老墙顶面铺设2~3cm水泥砂浆过渡层,界面抗剪强度提高约30%。坝肩帷幕与防渗墙呈L型交接,3序孔孔距从12m加密到3m,孔深延伸到基岩透水性 ≤ 5 Lu层位,灌浆压力控制在1.5~2MPa,压水试验抽检透水性 ≤ 3 Lu为合格,在周边防渗墙养护 ≥ 3 天、强度达70%后再启动灌浆^[2]。

3 关键搭接施工技术与工艺控制

3.1 防渗墙工字型嵌槽施工技术

工字型嵌槽的施工质量决定着新旧防渗墙连接的可靠性,工字型嵌槽的工艺流程包括槽型切割、表面处理、钢筋植入、混凝土浇筑四个主要步骤。槽型切割用金刚石锯片按预定的轮廓线做精确切割,工字型折角处倒圆角半径不小于50mm,避免应力集中。切割完成后用风镐凿除原墙顶浮浆层不小于5cm深度,直到露出新鲜混凝土面且表面粗糙度达到M5级标准、露石率不低于75%。表面处理用高压水枪以不小于8MPa的压力冲洗,验收时用酚酞试液检测表面酸碱度、pH值不大于10。

导墙用C30钢筋混凝土浇筑,厚度不小于20cm,深度

嵌入原状土不小于50cm,导墙轴线与防渗墙轴线的偏差控制在 ± 15 mm以内。混凝土浇筑采用导管法水下浇筑工艺,C25防渗混凝土坍落度控制在 18 ± 2 cm,掺加微膨胀剂补偿收缩变形,分层浇筑厚度不大于50cm。压力传感器联动PLC系统对浇筑压力进行实时监测,并根据浇筑压力的变化来调节泵送速度和振捣参数,导管埋深控制在2~6m之间,浇筑速度不低于2m/h。单段防渗墙完成后养护不少于7天,强度达到设计值70%以上时,方可进行上方坝体填筑作业。见图1。

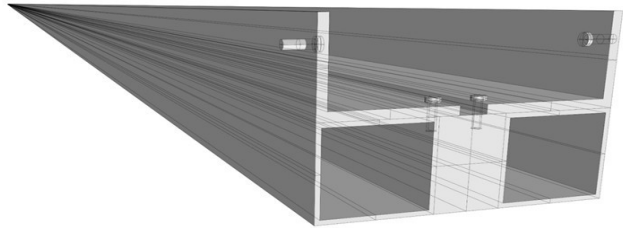


图1 土石坝坝顶防渗墙与所设嵌入槽连接相对位置示意图

3.2 高性能防渗趾板锚固安装工艺

高性能防渗趾板的锚固安装包含嵌入槽处理、钢筋骨架绑扎、模板安装和混凝土浇筑等许多工序的精确配合。原坝体迎水面原混凝土面板顶部设置凹字型固定槽,防渗趾板与固定槽搭接用膨润土密封胶填充,该密封胶渗透系数不大于 1×10^{-9} cm/s。钢筋骨架采用 $\Phi 25$ 主筋和 $\Phi 16$ 分布筋,接头采用帮条焊,焊缝长度不小于10d,吊装时用双机抬吊防止骨架变形。模板安装精度要求侧模与分缝设计线偏差不大于 ± 3 mm,垂直度偏差不大于 ± 3 mm。趾板混凝土浇筑采用C30微膨胀混凝土,浇筑完成后做接缝注水试验,在0.5m水头下保压30min无渗漏为合格,用超声波检测内部密实度,缺陷面积不超过0.1%^[3]。

3.3 坝肩帷幕灌浆移动平台作业

坝肩帷幕灌浆施工的难点就是沿坝体斜坡面移动作业,移动平台技术的应用很好地解决了这一难题。移动平台由支撑立柱、斜支撑、万向轮、平台板和牵引系统等组成,底部用锚栓固定在地面上,入土深度不小于50cm,平台安装防护栏杆高度不小于1.2m。平台移动采用卷扬机牵引方式沿斜坡轨道缓慢推进,移动速度控制在0.5m/s以下,到达设计灌浆孔位后使灌浆孔中心与平台作业区中心对齐、偏差控制在5cm以内^[4]。

帷幕灌浆沿坝体呈L型布置,3序孔施工按先疏后密的原则,I序孔间距12m,II序孔加密到6m,III序孔加密到3m,孔深延伸到基岩透水性 ≤ 5 Lu的层位。灌浆压力控制在1.5~2MPa之间,同一区域内I序孔灌浆完成,初凝时间约24h之后才能进行II序孔施工。灌浆质量以检查孔压水试验成果为主要评判依据,检查孔数量为灌浆孔总数的

10%，透水率 $\leq 3Lu$ 为合格。

3.4 土工膜铺设与焊接质量控制

土工膜是坝体上游面防渗的关键，径心水库采用1.5mm厚的土工膜，铺设前检查尺寸、外观、性能，保证表面平整无缺陷，具有足够的强度、韧性、抗撕裂、抗穿刺性能。新老土工膜搭接处应采用同材质、同厚度的土工膜，防止由于化学性质不同造成接缝老化不均。铺设采用沿坡自上而下滚铺的方式，土工膜锚固于挤压边墙内深度不小于50cm，锚固槽回填密实保证可靠性。膜材搭接宽度 $\geq 10cm$ ，新膜与老膜平行对齐并预留15~20cm搭接量，防止张拉过紧或者产生褶皱，用专用夹具固定膜片，夹具间距 $\leq 50cm$ 防止焊接时位移。焊接采用双焊缝热熔工艺，温度控制在260~280℃，速度2~3m/min，温度过高容易造成膜材烧穿老化，过低则焊缝强度不够。焊接后焊缝两侧各50cm范围内用木夯轻击释放应力，防止应力集中产生开裂。焊缝质量采用真空检测法，抽负压至0.08MPa，保压5min降压 $\leq 10\%$ 为合格，不合格焊缝需补焊重检。土工膜连接后用打压试验检验整体密封性，试验压力和保压时间按设计要求进行。施工时严格保护已铺设的土工膜，禁止尖锐物体接触，人员穿软底鞋行走，机械设备不得直接在膜面上行驶或停放^[5]。

4 防渗体系应用效果与效益分析

4.1 防渗效能提升量化分析

防渗效能的量化评价是以渗透系数为主要指标。径心水库除险加固工程采用全断面同步防渗技术之后，综合渗透系数控制在 $1 \times 10^{-8} cm/s$ 以下，传统的单一防渗处理方式渗透系数大多控制在 $1.6 \times 10^{-4} \sim 5.3 \times 10^{-4} cm/s$ 范围内，新技术防渗效能提高4个数量级。防渗效能的提高是多种技术措施共同作用的结果，工字型嵌槽结构增大了新旧防渗墙接触面积，延长了渗径，高性能防渗趾板的膨润土密封胶填充消除了搭接部位的渗流薄弱点，坝肩帷幕灌浆将基岩透水率降到3Lu以下，土工膜双焊缝热熔焊接保证了膜材搭接部位的防渗连续性，真空检测合格率达到100%。渗流监测结果表明，蓄水运行之后渗流量比加固前大大减少，下游坡面没有出现明显的渗水湿润区，帷幕灌浆检查孔透水率均小于3Lu。

4.2 施工效率与经济效益评估

径心水库除险加固工程采用全断面同步防渗技术后，各工序实际施工时间分别为：趾板10天，基层、防渗膜、垫层12天，混凝土面板32天，左岸趾板及帷幕灌浆44天，右岸加高坝体防渗墙15天，总工期113天。传统方案工期为161天，新技术工期节约48天，缩短30%左右。经济效益方面直接工程成本降低15%，人工成本节约33.02万元，坝体回填土方量减少节约2.22万元，省去高压旋喷设备费用约2.83万元，管理成本节约约30万元。间接效益方面提

前一个月完成蓄水任务可获得约63.6万元收益，采用新型全断面防渗结构预计可以减少维修费用约200万元，年均节约运维成本约20万元，综合经济价值超过400万元。

4.3 工程实例应用效果验证

径心水库除险加固工程是该技术的首次系统应用，竣工验收结果表明各项质量指标均达到或优于设计要求：帷幕灌浆检查孔透水率合格率100%，防渗墙混凝土强度满足C25设计等级，面板混凝土抗渗性能满足W6级要求，土工膜焊缝真空检测全部合格。深圳市东江水源工程松子坑水库后续应用再次证明了该技术的普适性、可靠性，施工完成后的新旧防渗体防渗效果质量优良。两个工程实例表明全断面同步防渗法可以克服传统方法的缺点。

4.4 社会与环境综合效益分析

社会效益最核心的体现就是大坝的安全性得到大幅提升，创新的全断面同步防渗技术把大坝渗漏的风险下降了约90%，有效保障下游居民的生命财产安全。径心水库校核洪水位对应的库容为1515万 m^3 ，防渗体系可靠性的提高从根本上降低了溃坝的风险。该技术的核心内容已经申报了2项发明专利，给同类型土石坝加固工程提供施工经验和技術范式。环境效益上施工过程中严格遵守环保规定，用洒水车、雾炮机进行喷雾降尘，建筑垃圾资源化利用，施工结束后及时绿化恢复，实现了环境效益和经济效益的双赢。

5 结语

土石坝加高扩建工程防渗体系新旧搭接加固施工技术，以面板、防渗墙、坝肩帷幕新型结合形式设计和压力传感器自适应控制技术的集成应用，系统解决了传统方案工序协同、施工效率、防渗效能方面的固有缺陷。深圳径心水库、松子坑水库2项工程实例的运用证明，该技术把渗透系数降到 $1 \times 10^{-8} cm/s$ 以下，防渗效果提高4个数量级，总工期缩短30%左右，直接工程成本下降15%以上，大坝渗漏风险降低90%左右。在水资源匮乏以及水库安全要求日趋严格的情况下，此技术对我国众多在役土石坝的除险加固工程具有借鉴意义和推广价值。

参考文献

- [1] 肖晨.土石坝防渗墙参数变化对坝基渗流的影响研究[J].水利科技与经济,2026,32(1):51-56.
- [2] 张晓博.土石坝工程施工中的防渗处理技术探讨[J].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术,2025(5):017-020.
- [3] 欧阳浩.土石坝沥青混凝土防渗心墙的施工技术及质量控制[J].标准生活,2025(7):117-119.
- [4] 姚洪森.水电站坝基防渗处理关键技术[J].现代农村科技,2025(9):143-143.
- [5] 李海霞.帷幕灌浆技术在水库坝基防渗处理中的应用[J].黑龙江水利科技,2025,53(5):62-65.