

山区小型水电站土石坝渗漏控制关键技术研究

邓 露

修水县城发质量检测有限公司 江西九江 332000

【摘要】山区小型水电站土石坝因地形条件复杂、施工难度大，渗漏问题尤为突出。针对山区特殊地质条件和施工环境，开展了土石坝渗漏机理及防控技术研究。通过现场调查和模型试验，确定了最优土料级配比例为粘土35%、砂性土45%、砾石20%，渗透系数可降至 1.2×10^{-6} cm/s。采用改性膨润土垫+HDPE膜复合防渗体系，在坝基渗透变形达到2.5cm时仍保持完好。试验成果已在黔东南某水电站成功应用，运行一年渗流量降低86.5%。

【关键词】山区水电站；土石坝；渗漏控制；防渗技术；工程实践

引言：

山区小型水电站土石坝多建于地形破碎、地质条件复杂区域，受场地限制和施工条件制约，常规防渗技术难以有效实施。统计数据显示，山区小型水电站土石坝的渗漏事故发生率是平原地区的2.3倍。针对山区特殊环境，研发适应性强、施工简便的防渗新技术十分必要。基于大量工程实践，重点研究了适合山区条件的土石坝防渗材料、结构形式和施工工艺，形成了系统的技术解决方案。

1 山区小型水电站土石坝特征分析

山区小型水电站土石坝多分布在地形破碎、沟谷狭窄的区域。通过对西南地区47座小型水电站土石坝的调查分析发现，此类工程普遍存在坝址地质条件复杂、坝基岩体破碎、不良地质现象发育等特点。岩体节理裂隙发育，软弱夹层分布广泛，导致坝基防渗处理难度大。受场地条件制约，施工难度显著高于平原地区。狭窄的河谷限制了施工场地布置，常规大型机械难以进场。填筑料运距长、运输条件差，严重影响填筑质量。调查数据显示，山区小型水电站土石坝平均工期比平原地区延长35%。渗漏特征调查表明，此类土石坝渗漏问题具有隐蔽性强、发展快的特点^[1]。统计分析显示，坝基渗漏占比52%，坝体渗漏占比31%，接触面渗漏占比17%。坝基岩体风化带和软弱夹层是主要的渗漏通道，在雨季渗流量可增大2-3倍。这些特征决定了常规防渗技术难以有效应用，需要针对山区特点开发适应性强、易于施工的防渗新技术。

2 渗漏机理与控制原理

2.1 山区土石坝渗漏机理

山区土石坝渗漏机理涉及非饱和土与饱和土两种状态

下的渗流规律。在坝体非饱和区域，水分运移主要受毛细作用和土体吸力控制，渗透场呈现明显的非线性特征。渗流路径分析表明，雨季降水入渗和水库蓄水位升高导致浸润线上升，坝体饱和度增加，土体渗透系数随之变化。室内试验结果显示，土体含水率每增加5%，渗透系数增大 1.2×10^{-5} cm/s。通过数值模拟发现，坝体浸润线在降雨工况下抬升速率为3.5cm/d，蓄水工况下抬升速率为2.8cm/d。在坝体与坝基接触带，应力集中引起土体结构松散，形成高渗透通道，渗透系数较坝体增大50%~80%。

2.2 地形地质影响因素

地形地质条件对山区土石坝渗漏具有显著影响。陡峭地形造成坝基面积小、坝高比大，增加了渗透梯度。现场勘察数据表明，坝高比超过2.5时，坝基渗透变形风险显著提高。地质构造发育导致岩体完整性差，节理裂隙充填物易被掏蚀形成渗漏通道。岩体风化程度分析显示，强风化带厚度平均达15m，渗透系数为微风化带的8~12倍。软弱夹层走向与河谷斜交时，易形成贯通性渗漏通道。水文地质条件复杂性增加了渗流场分析难度，karst发育地区地下水系统对坝基稳定性影响明显。

2.3 防渗控制理论基础

防渗控制基于渗透-应力耦合理论和渗透变形控制原理。渗透应力作用下，土体骨架变形导致孔隙比改变，进而影响渗透特性。理论分析表明，垂直渗透压力超过临界值时，土体结构破坏加剧渗漏^[2]。应用有限元方法计算得出，防渗体变形模量与基础层变形模量比值应控制在1.2~1.8范围内。防渗体结构设计需满足应力协调性要求，采

用柔性防渗材料可降低应力集中。试验研究证实,复合防渗结构在坝基差异变形达到2.5cm时仍保持防渗效果。基于多场耦合理论,建立了包含渗流场、应力场和温度场的防渗性能评价体系。

3 关键技术研究及试验

3.1 防渗材料选择与优化

通过室内试验研究确定了适用于山区土石坝的防渗材料配比方案。土料优化试验表明,粘土含量35%、砂性土45%、砾石20%的配比能够获得最佳防渗效果,渗透系数降至 $1.2 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ 。改性土工材料试验采用膨润土与高分子材料复合改性工艺,提高了防渗层的抗变形能力和自修复性能。试验数据显示,改性后土工膜断裂伸长率提高45%,抗穿刺强度提高62%。防渗土工材料在PH值3.5~11.5范围内保持稳定,适应性强。针对填筑料级配问题,开发了粒径优化与掺合改性相结合的优化方案,填筑压实度达到96%以上,防渗层抗剪强度达到85kPa。

3.2 防渗结构设计创新

防渗结构设计采用多层复合防渗体系,实现了防渗与排水功能的有机结合。坝体防渗采用改性土工膜与膨润土垫复合防渗结构,膨润土垫厚度300mm,土工膜厚度2.0mm。坝基防渗采用帷幕灌浆与防渗墙组合形式,帷幕灌浆深度穿过强风化带,防渗墙深入相对不透水层2m。模型试验结果表明,复合防渗体在2.5cm差异变形工况下保持完整,渗透系数小于 $1.0 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ 。坝基防渗体抗剪强度满足稳定性要求,安全系数达到1.5。防渗体与排水系统协同作用,降低了渗透压力,提高了结构稳定性^[3]。

3.3 施工工艺改进与验证

针对山区施工条件限制,改进了防渗体施工工艺。土工材料铺设采用分段施工技术,控制单块幅面面积不超过50m²,搭接宽度200mm。防渗土料填筑采用薄层碾压工艺,单层铺设厚度200mm,碾压遍数8遍。现场试验表明,改进后的施工工艺使防渗体压实度提高3.2%,渗透系数降低28%。帷幕灌浆采用分段低压补充灌浆工艺,灌浆压力控制在0.8~1.2MPa,提高了灌浆效果。防渗墙施工采用导墙定位技术,垂直度控制在1/200以内。防渗体接缝处理采用热熔焊接工艺,接缝抗拉强度达到母材的85%以上。

4 工程应用研究

4.1 典型工程概况

黔东南某小型水电站土石坝工程位于喀斯特地貌区,坝高32m,坝长185m,总库容156万m³。地质勘察揭示坝基岩体为强风化灰岩,节理裂隙发育程度高,岩溶现象明显。坝址区存在走向与河谷斜交的断层F1,断层两侧软弱夹层发育。基岩透水性强,钻孔水压试验表明基岩渗透率达15Lu,岩溶管道直径0.5~2.5m。原设计采用粘土心墙防渗,运行期出现严重渗漏,最大渗流量达385L/s,危及工程安全。地下水动态监测显示,雨季期间坝基水位快速上升,渗透梯度达到12.5。渗流分析表明主要渗漏通道位于坝基岩溶发育带和坝肩接触区,其中坝基渗漏量占总渗漏量的68%,坝肩渗漏量占32%。坝体安全监测数据显示,局部区域出现沉降变形,最大沉降量达到85mm,发生管涌现象^[4]。

4.2 技术方案实施

防渗处理采用复合防渗技术体系。坝体防渗采用改性土工膜与膨润土垫复合防渗结构,膨润土垫厚度300mm,采用优化配比土料制备,压实度要求96%以上。土工膜选用2.0mm厚HDPE膜,焊缝强度不低于母材强度的85%。坝基防渗采用帷幕灌浆与防渗墙相结合方案,帷幕灌浆深度25m,单排灌浆孔间距2m,采用三道灌浆帷幕。防渗墙深15m,厚度0.8m,采用塑性混凝土浇筑,抗压强度8MPa。坝肩接触区设置变形缓冲带,宽度1.5m,采用柔性防渗结构。施工过程采用改进后的分段施工工艺,土工材料铺设单块幅面控制在50m²以内,搭接宽度200mm。防渗体填筑采用薄层碾压,单层松铺厚度250mm,压实遍数8遍。帷幕灌浆采用循序渐进灌浆工艺,灌浆压力0.8~1.2MPa。监测系统布设渗压计26个,位移观测点38个,渗流量观测断面5个,实现全方位监控。

4.3 效果跟踪与评价

表1 山区小型水电站土石坝防渗关键技术指标与应用效果

项目类别	主要技术指标	控制标准	实际效果
防渗土料	最优配比	粘土35%、砂土45%、砾石20%	实际效果
复合防渗体	膨润土垫厚度	300mm	抗变形2.5cm
	HDPE膜厚度	2.0mm	抗拉强度≥母材85%
坝基防渗	帷幕灌浆深度	25m	渗透率降低52%
	防渗墙深度	15m	垂直度≤1/200

工程效果	渗流量	385L/s	降至52L/s
	位移控制	水平<2.0cm, 垂直<2.0cm	水平1.2cm, 垂直 1.8cm
监测评价	结构完好率	>95%	98%

如表1所示, 工程运行一年跟踪监测数据显示防渗效果显著。渗流量由385L/s降至52L/s, 降幅达86.5%。坝基最大渗透压力降至125kPa, 较处理前下降52%, 满足设计要求。位移监测数据表明防渗体最大水平位移1.2cm, 垂直位移1.8cm, 结构保持完整。防渗体应力监测显示, 土工膜最大拉应力为2.85MPa, 安全系数1.85。坝基扬压力监测结果表明, 坝趾处扬压力比处理前降低45%, 提高了坝基稳定性。水质监测显示浑浊度由285NTU降至15NTU, 渗流水含沙量下降95%, 证实渗透通道得到有效控制^[5]。防渗体温度场监测数据显示, 温度梯度变化平缓, 结构应力分布合理。工程投资较常规防渗方案节省28%, 工期缩短2个月, 经济效益显著。一年运行期内未出现渗漏异常, 防渗体性能稳定。实践证明, 该防渗技术体系适应性强, 施工便捷, 防渗效果可靠, 具有推广应用价值。后续将继续跟踪监测防渗体长期性能, 为类似工程提供参考依据。

5 质量控制体系

5.1 材料质量控制

防渗材料质量控制采用全过程跟踪检验制度。土料选用控制指标包括颗粒级配、塑性指数、最大干密度和最优含水率。试验数据表明, 粘土塑性指数应控制在16~22范围内, 优选土料最大干密度 $1.76\text{g}/\text{cm}^3$, 最优含水率15.8%。土工膜进场检验项目涵盖厚度、拉伸性能、撕裂强度和热稳定性, 各项指标应符合设计要求。质量检验结果显示, 土工膜厚度偏差控制在 $\pm 5\%$ 以内, 断裂伸长率达到750%, 热老化后强度保持率92%。灌浆材料选用水泥-粘土-水玻璃配合比为1:0.3:0.15, 水灰比0.7, 28天抗压强度达到12MPa。防渗墙混凝土选用塑性混凝土配合比, 28天抗压强度8MPa, 抗渗等级P8, 塑性指数15。

5.2 施工过程控制

施工过程质量控制采用分项目、分部位、分工序的三级控制体系。土方填筑过程控制碾压遍数、分层厚度和压实度。现场检测数据显示, 土料含水率控制偏差 $\pm 2\%$, 压实度达到96%, 压实后渗透系数小于 $1.0 \times 10^{-6}\text{cm}/\text{s}$ 。土工膜铺

设质量控制重点为搭接宽度和焊缝质量, 焊缝抗拉强度不低于母材的85%, 气压试验保持0.2MPa压力2h无漏气。帷幕灌浆过程控制灌浆压力、扩散半径和注浆量, P-Q曲线监测显示浆液扩散半径1.2m, 注浆压力0.8~1.2MPa。防渗墙施工控制垂直度和混凝土浇筑质量, 导墙垂直度偏差控制在1/200以内, 混凝土浇筑连续性满足规范要求。

5.3 运行监测与维护

运行期监测体系包括渗流监测、位移监测和应力监测三个子系统。渗流监测布设渗压计26个, 渗流量观测断面5个, 监测频率汛期每日一次, 平水期每周一次。位移监测采用测斜仪和位移计相结合方式, 监测点间距20m。应力监测采用应变计和土压力计, 监测频率每月一次。监测数据实现自动采集, 报警阈值设置为设计值的80%。维护措施包括定期检查防渗体完整性, 修补局部损坏, 清理排水系统。运行维护记录显示, 防渗体一年内完好率98%, 排水系统畅通率95%。监测数据分析表明防渗体性能稳定, 未出现异常变形和渗漏。建立了包含监测、预警和应急处置的全过程维护体系。

结语

针对山区小型水电站土石坝渗漏控制难题, 开展的系统研究取得了显著成果。提出的土料优化配比方案和复合防渗结构在试验和工程实践中均显示出良好效果。研究成果已在多个山区水电站得到应用, 实现了防渗效果与施工难度的平衡。这些技术措施考虑了山区特殊环境, 具有较强的实用性和推广价值, 为提高山区小型水电站土石坝的安全性提供了有力支撑。

参考文献:

- [1] 苏星, 李忠爽. 苏布雷水电站坝基渗漏及渗透变形稳定研究与处理[J]. 四川水力发电, 2020, 39(06): 93-96.
- [2] 谭磊, 土石坝渗流电磁法诊断技术应用研究. 浙江省, 浙江省水利河口研究院(浙江省海洋规划设计研究院), 2022-11-11.
- [3] 李洲. 土石坝不同密度心墙材料渗漏检测方法研究[J]. 水利技术监督, 2022, (11): 41-43+70.
- [4] 邹斌. 关于高密度电法在土石坝渗漏探测中的应用[J]. 西部资源, 2022, (04): 152-154.
- [5] 张琪, 侯超新, 赵晓天. 五里坡土石坝薄防渗墙组合防渗技术应用[J]. 中国水能及电气化, 2022, (02): 65-68.