

水利工程中水库堤坝防渗施工技术及防治方法

姚 博

天津市水利工程建设质量与安全监督中心 天津 300200

摘 要：水利工程中水库堤坝的防渗工作至关重要，关乎水库安全运行及周边人民生命财产安全。本文详细分析了堤坝渗漏的自然、人为及综合原因，探讨了土工膜防渗技术、混凝土防渗技术、灌浆防渗技术及复合防渗结构在堤坝防渗施工中的应用。同时结合不同地质、环境及工程条件，明确各技术适用场景，并对应用效果进行量化评价。另外，引入数字孪生与安全监测技术融合方案，完善渗漏防治体系，为堤坝的安全运行提供有力保障。

关键词：水利工程；水库堤坝；防渗施工技术；防治方法；数字孪生

引言：水利工程作为国民经济的基础设施，其安全性与稳定性至关重要。水库堤坝作为水利工程的重要组成部分，承担着蓄水、调流与防洪等重要任务。然而，受多种因素影响，堤坝渗漏问题频发。因此，本文旨在深入探讨水利工程中水库堤坝的防渗施工技术及防治方法，结合实际工程需求明确技术选型逻辑，并引入前沿技术提升防治水平，为堤坝的安全运行提供科学依据。

1 水利工程中水库堤坝防渗的重要性

水利工程中，水库堤坝防渗意义重大，关乎水库安全运行、水资源利用及周边人民生命财产安全。堤坝是水利工程核心，承担蓄水、调流与防洪重任。但受自然侵蚀、地质变动及施工质量等因素影响，堤坝在长期运行中常现渗漏。渗漏会使水库储水量减少，削弱调节能力，加速堤坝结构损坏，缩短水库寿命。若渗漏问题未及时解决，甚至可能引发堤坝溃决，严重威胁下游安全。因此，强化堤坝防渗工作刻不容缓。通过科学防渗设计与施工，运用先进技术和材料，能显著提升堤坝防渗性能，减少渗漏。定期开展渗漏检测与评估，可及时发现并处理潜在隐患，避免结构破坏与安全事故^[1]。有效防渗还能减少水资源浪费与污染，提升利用效率，为经济社会可持续发展筑牢根基。

2 水利工程中水库堤坝渗漏的原因分析

2.1 自然因素

自然因素在水库堤坝渗漏中扮演着重要角色，地质条件是影响堤坝稳定性的首要因素，不同地区的地质结构差异显著，如土壤不均匀沉降、岩石裂隙发育等，都可能成为堤坝渗漏的通道。气候条件也是关键因素，特别是降雨量和地下水位的高低。在降雨量大的地区，持续的雨水渗透会使堤坝内部土壤饱和，降低其抗渗能力。同时，地下水位的变化通过毛细作用影响堤坝防渗层，增加了渗漏风险。

2.2 人为因素

人为因素同样是导致堤坝渗漏的重要原因。设计缺陷可能导致堤坝结构在运营过程中出现渗漏，如防渗层设计厚度不足、材料选择不当等。施工质量也是关键因素，若施工不规范或技术水平不足，堤坝结构可能存在缺陷，如混凝土裂缝、土石坝压实度不足等，这些缺陷易引发渗漏，运营过程中的管理问题也不容忽视，若未能定期检测评估渗漏或未能及时处理潜在问题，渗漏可能逐渐恶化，最终引发安全事故^[2]。

3 水利工程中水库堤坝防渗施工技术

3.1 土工膜防渗技术

适用场景：适用于黏土、砂土等透水性较强的坝基，以及中小型水库、病险水库的防渗改造工程；对堤坝变形适应性要求高、施工空间有限的场景同样适用。

应用与效果：土工膜一般采用高密度聚乙烯（HDPE）、低密度聚乙烯（LDPE）等聚合物材料制成，这些材料具有出色的抗渗性能，其渗透系数通常小于 $1 \times 10^{-12} \text{cm/s}$ ，能有效阻挡水分渗透。以某中型水库堤坝防渗工程为例，该堤坝总长度达1200米，采用1.5毫米厚的HDPE土工膜进行防渗处理。施工前，对堤坝基础进行全面清理，清除尖锐石块、树根等杂物，深度达30厘米，确保基础平整度误差不超过 ± 5 厘米，避免尖锐物体刺破土工膜。铺设时，在坡度小于1:2的堤坝段采用人工铺设，在坡度大于1:2的陡坡段则使用专用铺设机械，铺设速度控制在每小时50-80平方米，保证土工膜与基础紧密贴合，空鼓率控制在2%以内，褶皱高度不超过1厘米。土工膜接缝处理采用热焊工艺，热焊温度控制在280-320℃，焊接速度为每分钟2-3米，接缝强度可达母材强度的80%以上，确保形成连续、可靠的防渗屏障。为进一步提升防渗性能，该工程采用了复合土工膜结构。复合土工膜由1.2毫米厚的土工膜和300g/m²的土工织物复合

而成。土工织物的加入使复合土工膜的抗拉强度从纯土工膜的25兆帕提高到35兆帕,抗撕裂强度从50千牛/米提升至70千牛/米,同时与土壤的摩擦系数从0.3增加到0.5,有效防止土工膜在土壤中滑动。实际应用表明,采用复合土工膜后,堤坝的渗漏量较单纯使用土工膜时降低30%,堤坝的整体稳定性也得到显著增强。经第三方检测机构评估,该技术使堤坝渗透系数从改造前的 $1 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ 降至 $1 \times 10^{-11} \text{cm/s}$,满足长期防渗需求。

3.2 混凝土防渗技术

适用场景:喷射混凝土防渗层适用于基岩裂隙发育、表面不规则的高陡边坡堤坝,以及应急抢险工程;碾压混凝土防渗层适用于平原地区大型水库、坝体规模大且地质条件相对稳定的堤坝。

应用与效果:混凝土防渗技术凭借其高强度、耐久性好的特点,在堤坝防渗施工中广泛应用。喷射混凝土防渗层常用于地质条件复杂、施工空间受限的堤坝工程。例如,在某山区小型水库堤坝防渗施工中,堤坝坡度达1:1.5,且存在多处不规则表面。采用喷射混凝土工艺,选用强度等级为C25的混凝土,配合比为水泥:砂:石子:水=1:2.2:3.5:0.45,水灰比控制在0.45以内。施工时,通过高压喷射设备将混凝土以8-12米/秒的速度喷射到堤坝表面,喷射厚度为15厘米,分3层进行,每层厚度5厘米。喷射过程中,采用机械振捣与人工辅助振捣相结合的方式,确保混凝土密实度达到95%以上。该工艺施工速度快,从准备到完成仅用15天时间,且能适应复杂地形,施工效率比传统浇筑工艺提高了40%。碾压混凝土防渗层则适用于大面积、平坦的堤坝防渗工程。在某平原地区大型水库堤坝防渗施工中,堤坝长度2000米,宽度50米。采用碾压混凝土工艺,混凝土强度等级为C20,配合比为水泥:砂:石子:水=1:2.5:4.0:0.5。使用自重15吨的振动碾进行碾压,碾压遍数为8-10遍,碾压后的混凝土层厚度为30厘米,密实度达到98%以上。该工艺施工效率高,每天可完成500-800平方米的施工面积,且成本比喷射混凝土工艺降低20%。在混凝土防渗施工过程中,严格控制养护条件至关重要。养护期间,采用覆盖保湿膜和定期洒水的方式,保持混凝土表面湿度在90%以上,养护时间不少于28天。经检测,养护良好的混凝土防渗层抗压强度达到设计强度的110%,抗渗等级达到W8,有效提高了堤坝的防渗性能^[1]。工程验收数据显示,喷射混凝土防渗段渗漏量减少85%,碾压混凝土防渗段渗漏量减少90%,结构稳定性显著提升。

3.3 灌浆防渗技术

适用场景:适用于基岩裂隙、土坝内部松散层等隐蔽性渗漏通道的处理,尤其适用于无法进行大面积开挖的堤坝;对堤坝结构扰动要求低的场景也较为适用。

应用与效果:灌浆防渗技术通过向堤坝内部注入灌浆材料,形成致密的防渗屏障。以某存在渗漏隐患的水库堤坝为例,该堤坝高度30米,经探测发现多条渗漏通道,宽度在0.1-0.5毫米之间。灌浆材料选用水泥-水玻璃双液浆,水泥浆水灰比为0.8:1,水玻璃模数为2.8,波美度为35,水泥浆与水玻璃的体积比为1:0.6。灌浆孔布置采用梅花形,孔距2米,排距1.5米,孔深根据渗漏通道位置确定,平均深度15米。灌浆压力根据堤坝地质条件逐步增加,初始压力为0.2兆帕,最终压力控制在0.5兆帕以内,避免对堤坝造成破坏。灌浆过程中,严格控制灌浆速度,初始灌浆速度为10-15升/分钟,随着灌浆进行逐渐降低至5-8升/分钟,确保灌浆材料充分填充渗漏通道。通过实时监测灌浆压力、流量等参数,及时调整灌浆工艺。当灌浆量达到设计灌浆量的90%以上,且单位吸浆量小于0.05升/分钟·米时,结束灌浆。经检测,灌浆后堤坝的渗透系数从灌浆前的 $1 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ 降低到 $1 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ 以下,渗漏量减少了95%,有效解决了堤坝的渗漏问题。后续3年跟踪监测显示,堤坝渗漏量稳定保持在较低水平,证明该技术长期有效性良好。

4 水利工程中水库堤坝防渗防治方法

4.1 渗漏检测与监测技术

渗漏检测与监测技术对水库堤坝安全至关重要。据统计,在过往的堤坝安全事故中,约30%源于渗漏未被及时发现。地质雷达探测可精准识别堤坝内部异常,其探测深度误差通常控制在 $\pm 5\%$ 以内,能有效发现直径大于0.3米的空洞或裂缝。声波测试方面,当堤坝材料存在裂缝时,声波传播速度会降低10%-20%,通过测量这一变化可评估密实度。电阻率成像技术能清晰反映堤坝内部水分分布,其分辨率可达0.5米。监测技术中,水位监测数据每15分钟更新一次,水位变化超过0.2米时需重点关注。渗漏量监测误差率一般不超过5%,地下水监测孔深度可达50米以上,能全面掌握周边地下水位动态,为渗漏防治提供可靠依据^[4]。

4.2 渗漏处理与维护措施

发现堤坝渗漏后及时处理与维护是保障其稳定运行的关键。灌浆处理中,常用的水泥-水玻璃双液浆,其凝胶时间可在几秒到几十分钟内调节,能有效填充直径0.1-1毫米的渗漏通道,封堵率可达90%以上。土工膜铺设时,选用厚度0.5-2毫米的高密度聚乙烯土工膜,其抗拉强度可达20-40兆帕,能形成可靠的防渗屏障。混凝土防

渗墙厚度一般为0.6-1.2米,抗压强度可达15-30兆帕,可截断大部分渗漏通道。日常维护方面,每月至少进行一次全面检查,每次清理堤坝表面杂物和植被面积不少于堤坝总面积的5%,排水系统维护每年至少2次,确保排水能力不低于设计标准的95%,降低渗漏风险。

4.3 应急预案与风险管理

完善的应急预案和有效的风险管理是应对堤坝紧急情况的有效保障。在某地区堤坝应急演练中,从预警发出到启动应急响应,时间控制在10分钟以内,各相关部门和人员能在30分钟内到达指定位置。救援措施方面,人员疏散效率可达每小时500人以上,物资调配在2小时内可完成80%以上需求。风险管理上,对堤坝安全状况进行全面评估,采用专业软件分析,风险识别准确率可达85%以上。风险监测和预警系统可实时采集100多个监测点的数据,数据更新频率为每5分钟一次,当风险值超过设定阈值20%时,系统自动发出预警,为应急响应和风险管理提供精准科学依据,最大限度减少灾害损失。

4.4 基于数字孪生的安全监测与智能防控

构建堤坝数字孪生模型,通过物联网传感器(包括位移传感器、渗压计、应变计等)实时采集堤坝结构应力、渗流场、水位变化等数据,以分钟级频率同步至数字孪生平台。利用BIM技术与GIS系统融合,实现堤坝三维可视化建模,直观展示渗漏隐患区域。例如,当某段堤坝渗压计数据异常时,数字孪生模型自动标记风险区域,并通过机器学习算法模拟渗漏发展趋势,预测可能

的溃坝路径。同时,建立专家决策系统,结合历史数据与实时监测信息,为防渗方案调整、应急抢险提供智能化决策支持。经试点应用,该技术使渗漏隐患识别效率提升40%,风险预警提前量增加至72小时,显著增强了堤坝安全防控能力。

结束语

综上所述,水利工程中水库堤坝的防渗工作是一项系统工程,需要综合考虑多种因素,采用多种技术和方法进行综合防治。本文通过分析堤坝渗漏的原因,明确不同防渗施工技术的适用场景与效果评价,并引入数字孪生与安全监测技术,完善了防渗防治体系,为水利工程中水库堤坝的防渗工作提供了有益的借鉴和参考。

参考文献

- [1]赵芳芳.水利工程的堤坝防渗加固施工技术应用[J].工程技术发展,2024,5(1):7-9.DOI:10.12238/etd.v5i1.6649.
- [2]姜红斌.劈裂灌浆技术在水库堤坝防渗加固施工的应用[J].水利科学与寒区工程,2022,5(9):131-133.DOI:10.3969/j.issn.2096-5419.2022.09.035.
- [3]王俊锋.水利工程施工中堤坝防渗加固技术的应用[J].建筑工程技术与设计,2021(30):1229-1230.DOI:10.12159/j.issn.2095-6630.2021.30.0608.
- [4]韦雄.水利工程中水库堤坝防渗施工技术及其防治方法[J].户外装备,2022(12):207-209.DOI:10.12277/j.issn.1673-9434.2022.12.070.