

水利工程堤坝防渗及加固的技术研究

文 / 杨波 宁夏固原市原州区水务局

摘要：我国幅员辽阔，水力资源丰富。为对自然界的水合理调控，人类修建了大量水利工程。中国是拥有水利设施数量最多国家之一，其中堤坝作为水利工程的核心构筑物，承担着防洪、蓄水、输水等关键功能，其运行安全性直接关系到周边区域人民生命财产安全与社会经济稳定。然而，部分堤坝因建设年代久远、地质条件复杂或长期受水流侵蚀、渗流作用影响，逐渐出现坝体渗漏、结构开裂、边坡失稳等病害，严重威胁工程正常运行。鉴于对堤坝防渗及加固技术创新与应用的迫切需求，本文将重点探讨不同地质条件下堤坝渗漏的检测方法、防渗材料的性能优化及加固结构的设计要点，旨在提出适配性强、经济性高的技术方案，为提升水利工程堤坝的耐久性与稳定性提供理论支撑与实践参考。

关键词：水利工程；堤坝；防渗技术；加固技术；渗漏检测；结构稳定性

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.23.069

引言

水利工程是为合理调配地下水，达到除害兴利目的修建的工程。随着水利工程的兴建，水利工程经济不断发展。随着建筑业的发展，各种施工技术得到长足发展，但水利工程堤坝建设与维护仍面临复杂挑战。堤坝在长期服役过程中，受水文地质条件变化、荷载作用反复及环境因素影响，易产生渗流破坏问题，渗流不仅会导致坝体土壤颗粒流失，还会降低坝体结构强度，诱发管涌、流土等灾害。当前，我国既有堤坝中部分工程已进入病害高发期，传统防渗加固技术在应对复杂地质条件或高水头作用时存在局限性，难以满足现代水利工程对安全性能与长期耐久性的要求，因此开展堤坝防渗及加固技术的系统性研究，对保障水利工程长效运行、推动水利事业高质量发展具有重要现实意义。

一、水利工程堤坝防渗加固概述

当前，我国已建水库大坝中90%以上为土石坝，工程防洪标准较低，出现的主要问题是土坝变形稳定得不到保障，成为影响水利工程安全的主要因素，部分土石坝因坝体填土压实度不足、防渗体老化破损，在运行过程中易出现渗流通道，导致坝基渗漏或坝体浸润线抬高，进而引发坝坡滑动、坝体裂缝等安全隐患，严重时甚至造成堤坝溃决事故。土石坝渗漏问题的产生，既与建设阶段的施工质量控制相关，也与长期服役过程中的环境侵蚀、水文条件变化密切相关，需通过系统性的防渗加固措施加以解决。

土石坝在我国有很大的发展前景，具有结构简单、对自然条件适应强和施工管理简便等优点，但需加强对其安全测评，尤其是针对坝体渗流场分布、土体抗剪强度及防渗结构完整性的检测评估，避免因安全测评不到位导致病害隐患被忽视。安全测评需结合堤坝建设档案资料与现场勘查数据，采用渗压计、测斜仪等监测设备

获取实时数据，分析堤坝在不同工况下的受力状态与变形趋势，为后续防渗加固方案制定提供精准依据。

二、水利工程堤坝渗漏原因分析

（一）施工过程管控不当

水利工程施工堤坝渗漏有多方面原因，工程施工问题原因不外乎人、机、料、法、环因素，主要原因包括施工机械设备选择不合理，施工人员专业水平较低，对土石坝填土压实工艺掌握不熟练，导致坝体填土密度未达到设计标准，形成孔隙率过高的薄弱区域，为后期渗流提供通道。施工材料质量把控不严，选用的防渗土料颗粒级配不符合要求，或水泥、外加剂等材料存在质量缺陷，降低坝体防渗性能。施工方法执行不到位，未严格按照分层填筑、分层压实的规范流程操作，局部区域出现漏压、欠压现象，同时施工环境监测缺失，在雨天或地下水位较高时未采取有效防护措施，导致坝体填土遇水软化，进一步加剧施工质量问题^[1]。

（二）防渗结构施工质量缺陷

混凝土防渗墙作用是避免水体侵入堤坝，堤坝施工技术决定防渗墙使用寿命。调查发现当前很多水利工程施工质量存在各种缺陷，需要提高相关施工人员技术水平，部分工程在防渗墙浇筑过程中，混凝土配合比设计不合理，水灰比过大或骨料级配失衡，导致防渗墙结构强度不足、密实性差，出现裂缝或蜂窝麻面。防渗墙与坝基、坝体的结合部位处理不当，未进行有效凿毛或设置止水构造，形成渗漏通道。施工过程中对防渗墙垂直度、深度的控制精度不足，墙体存在倾斜、断桩等问题，削弱整体防渗效果，无法有效阻断水体渗透路径。

（三）工程设计方案不合理

堤坝建设中要按照设计方案施工，工程设计要严格按勘察数据进行，影响堤坝稳定性的因素较多，如设计方案不合理等，部分工程在设计阶段未充分结合现场勘

察的地质水文数据，对坝基土层分布、透水层厚度判断不准确，导致防渗体系设计与实际地质条件不匹配，无法有效拦截渗流。堤坝断面尺寸设计偏小，坝坡坡率过陡，未根据坝体填土性质与荷载情况优化结构参数，降低坝体抗渗与抗滑稳定性。设计中防渗材料选型不当，未考虑材料长期服役的耐久性与环境适应性，或未设置合理的排水系统，导致坝体浸润线过高，加剧渗流破坏风险。

三、水利工程堤坝防渗及加固的技术

(一) 防渗墙的处理技术

我国目前主要采用堤坝防渗墙的处理工艺，该工艺不会影响到周围环境或生态环境，且操作流程简单，无较大的机械设施，施工过程中对堤坝原有结构扰动小，适用于既有堤坝的防渗修复与新建堤坝的防渗体系构建。防渗墙施工需先进行导墙开挖，导墙采用混凝土浇筑，截面尺寸控制为宽 0.6-0.8m、高 1.0-1.2m，导墙中心线与防渗墙设计轴线偏差不得超过 5cm，确保后续成槽精度。成槽作业采用液压抓斗或冲击钻机，槽段长度划分根据地质条件确定，黏土层段长控制为 6-8m，砂卵石层段长缩短至 4-6m，槽孔垂直度偏差需小于 1/500，槽底沉渣厚度不超过 10cm。成槽完成后需进行清孔换浆，将槽内泥浆含砂量降至 5% 以下，黏度调整至 18-22s，随后采用导管法浇筑混凝土，混凝土坍落度控制在 18-22cm，扩散度不小于 34cm，浇筑上升速度不低于 2m/h，确保防渗墙密实连续。

因此，该处理方法常用于处理相对复杂的堤坝渗漏

问题。但需要注意，在施工前应仔细勘察周边地质水文条件，明确透水层分布深度、地下水位高程及土层物理力学参数，根据勘察结果确定防渗墙深度与厚度，一般防渗墙深度需穿透透水层进入不透水层 0.5-1.0m，墙厚根据水头高度设计，水头 ≤ 20m 时墙厚取 0.6-0.8m，水头 > 20m 时墙厚增至 0.8-1.2m。施工过程中需实时监测槽孔液位，保持槽内泥浆液面高于地下水位 1.5m 以上，防止孔壁坍塌，同时做好混凝土浇筑质量检测，采用超声波检测法对防渗墙完整性进行检测，确保墙体无孔洞、裂缝等缺陷^[2]。

堤坝加固防渗措施常用高压喷射灌浆法，该方法分为单管喷射、双管喷射、三管喷射 3 种。施工中需综合考量地质条件、渗漏程度及工程要求选择喷射类型，砂土层优先选用三管喷射，压缩空气压力控制为 0.7-0.8MPa，高压水压力 20-30MPa，浆液压力 0.3-0.5MPa；黏土层选用双管喷射，高压水压力 15-25MPa，浆液压力 0.2-0.4MPa；浅表层渗漏处理可采用单管喷射，浆液压力 0.3-0.6MPa。喷射孔间距根据喷射半径确定，三管喷射孔距 1.5-2.0m，双管喷射孔距 1.2-1.5m，单管喷射孔距 0.8-1.2m。施工时需控制喷射提升速度，砂土层提升速度 5-8cm/min，黏土层提升速度 3-5cm/min，旋转速度 10-15r/min，确保浆液与土体充分混合，形成直径不小于 0.8m 的防渗体。施工后需对喷射体进行取芯检测，芯样连续完整度需达到 85% 以上，渗透系数需小于 1×10^{-6} cm/s，确保防渗效果达标。

处理技术	工艺环节	规格要求	适用条件
堤坝防渗墙	导墙施工	混凝土材质，宽 0.6-0.8m、高 1.0-1.2m，轴线偏差 ≤ 5cm	既有 / 新建堤坝
	成槽作业	液压抓斗 / 冲击钻机，黏土层段长 6-8m、砂卵石层 4-6m，垂直度 < 1/500，沉渣 ≤ 10cm	-
	浇筑	坍落度 18-22cm，浇筑速度 ≥ 2m/h，水头 ≤ 20m 墙厚 0.6-0.8m、> 20m 取 0.8-1.2m	-
高压喷射灌浆	三管喷射	气压 0.7-0.8MPa、水压 20-30MPa，孔距 1.5-2.0m，提升速度 5-8cm/min	砂土层
	双管喷射	水压 15-25MPa，孔距 1.2-1.5m，提升速度 3-5cm/min	黏土层
	单管喷射	浆压 0.3-0.6MPa，孔距 0.8-1.2m，旋转速度 10-15r/min	浅表层

表 1 防渗墙的处理技术

(二) 灌浆防渗技术

在堤坝防渗加固施工中，灌浆防渗技术是一种普遍采用的方法，其操作过程如下。

其一，在渗漏加固施工前，要深入堤坝渗漏处开展实地勘察，并对不同特性和周边环境条件及堤坝发生渗

漏问题的原因开展探讨，勘察需采用地质雷达、渗压监测等技术手段，确定渗漏通道的位置、走向及尺寸，同时采集坝体土壤样本，检测土壤颗粒级配、渗透系数及含水率，其中渗透系数需测定至 1×10^{-3} - 1×10^{-7} cm/s 范围，为灌浆材料选型与参数设计提供依据。勘察完成后

需编制详细施工方案,明确灌浆范围、孔位布置原则及灌浆压力控制标准,确保方案与渗漏实际情况高度匹配。

其二,应对堤坝裂缝的表层开展全方位处理,如采用专用设备清除裂缝表层上的尘土、松散土体及杂草,使用高压水枪(压力0.3-0.5MPa)冲洗裂缝表面,直至露出新鲜、密实的土体结构。对于宽度大于0.5cm的裂缝,需用钢钎或风镐沿裂缝走向开凿V型槽,槽口宽度控制为10-15cm,深度8-12cm;宽度小于0.5cm的裂缝,需用角磨机打磨裂缝周边5-10cm范围的表面,去除风化层。处理完成后,需用棉布擦拭裂缝表面,确保无残留杂质,随后涂刷水泥基界面剂,界面剂涂刷厚度控制为0.5-1.0mm,增强灌浆材料与坝体的粘结强度^[3]。

其三,待彻底风干后,开展埋设灌浆孔工作,灌浆孔分为骑缝和斜孔2种。工作人员应结合具体情况进行选择,必要时也可同时使用。骑缝孔适用于裂缝走向清晰、宽度均匀的情况,孔位需沿裂缝中心线布置,孔距根据裂缝宽度确定,宽度0.5-2cm时孔距1.5-2.0m,宽度>2cm时孔距1.0-1.5m,钻孔深度需穿透裂缝底部50-80cm,孔径选用50-75mm。斜孔适用于裂缝隐蔽或走向复杂的情况,钻孔方向与裂缝平面呈30°-45°夹角,孔位布置在裂缝两侧20-30cm处,孔距2.0-2.5m,钻孔深度需确保孔底穿过裂缝,孔径与骑缝孔一致。灌浆孔埋设时需安装孔口管,孔口管采用PVC管,长度30-50cm,管壁与孔壁间用水泥砂浆封堵,封堵深度不小于20cm,待水泥砂浆强度达到设计强度的70%以上后,方可进行后续灌浆作业。

灌浆作业需按“由疏到密、由浅到深、分序加密”的原则进行,灌浆材料选用水泥浆或水泥黏土浆,水泥采用强度等级32.5R的普通硅酸盐水泥,水泥浆水灰比控制为0.8:1-1.2:1,水泥黏土浆中黏土掺量不超过水泥用量的30%。灌浆压力需根据坝体土壤强度确定,砂土层初始压力0.2-0.3MPa,逐步提升至0.4-0.5MPa;黏土层初始压力0.1-0.2MPa,逐步提升至0.3-0.4MPa,压力提升速率控制为0.05MPa/5min,避免压力骤升导致坝体变形。灌浆过程中需监测浆液注入量与回浆浓度,当注入量连续30min小于1L/min,且回浆浓度与进浆浓度一致时,可停止该孔灌浆。灌浆完成后需及时封堵孔口,采用同配比浆液填充孔道,封堵后养护时间不少于7d,养护期间需定期监测裂缝周边渗流情况,确保渗漏问题得到彻底解决。

(三) 渗漏涌水处理技术

水反应材料可适用到许多堤坝渗漏处理中,在挖掘隧道或建设水坝时发生渗漏,可能淹没建设现场,破坏现场设施,甚至引发堤坝结构失稳,因此渗漏涌水需优先采用快速封堵技术控制险情。水反应材料主要选用遇

水膨胀止水条、水溶性聚氨酯灌浆材料,其中遇水膨胀止水条膨胀倍率需达到300%-500%,膨胀后体积稳定性保持率不低于80%(28d),水溶性聚氨酯灌浆材料凝固时间可调节范围为30s-10min,固体抗压强度不小于2MPa,渗透系数小于 1×10^{-7} cm/s,确保材料适配不同渗漏涌水工况。

所以,必须第一时间密封堤坝渗漏处。密封施工时,水反应材料较为重要。针对水利项目中堤坝渗漏问题,需先对渗漏点进行定位与分级,根据涌水量大小划分险情等级:涌水量<0.5L/min为轻微渗漏,0.5-5L/min为中度渗漏,>5L/min为严重渗漏。轻微渗漏处理时,先清理渗漏点周边50cm范围内的松散土体,将遇水膨胀止水条裁剪成与渗漏缝匹配的长度,嵌入缝内后用水泥基砂浆压实封堵,砂浆抗压强度等级不低于M10,封堵厚度不小于5cm,养护时间不少于3d。

中度渗漏处理需采用“止水条+灌浆”组合工艺,先在渗漏点周边按梅花形布置灌浆孔,孔距30-40cm,孔径40-50mm,钻孔深度穿透渗漏层10-15cm,植入灌浆管后,将遇水膨胀止水条缠绕于灌浆管根部,再用速凝水泥(初凝时间<15min)封堵孔口。灌浆时选用水溶性聚氨酯材料,灌浆压力控制为0.3-0.6MPa,按“低压慢灌”原则注入,直至浆液从渗漏点溢出且浓度与进浆浓度一致时停止,灌浆完成后封闭灌浆管,养护24h后检查渗漏情况^[4]。

结语

综上所述,水利工程堤坝防渗及加固要立足工程实际地质水文条件,统筹技术适配性与经济性,根据渗漏类型、加固需求选择科学技术方案。施工中需严格控制材料性能与工艺参数,强化全过程质量监测,确保防渗加固效果长效稳定。未来还需深化新型材料与智能化监测技术融合,为堤坝安全运行提供更坚实保障,助力水利工程可持续发展。

参考文献

- [1] 张哲. 水利工程建设中河道堤坝施工技术细节分析研究[J]. 陕西水利, 2025, (06): 151-152+155.
- [2] 葛道明. 水利工程堤坝多维防渗施工技术分析[J]. 科学技术创新, 2025, (16): 114-117.
- [3] 濮苏辉, 黄伟, 蔡冒冒. 讨论水利工程中的水库堤坝防渗施工技术的重要性及防治策略[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2025, (12): 100-102.
- [4] 李琪珊. 水利工程堤坝施工中的防渗漏加固施工技术研究[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2025, (10): 205-207.

作者简介: 杨波(1979年-), 男, 汉, 宁夏固原, 本科, 研究方向: 水利工程。