

黏土心墙堆石坝渗透稳定性分析及防渗措施研究

李天超

陕西秦海检测科技有限公司 陕西 咸阳 712000

摘要：本文聚焦黏土心墙堆石坝，深入剖析其结构与渗流特性，系统阐述渗透稳定性分析方法，包括现场监测、数值模拟和模型试验技术。研究材料、结构、水力及施工等因素对渗透稳定性的影响，并探讨传统与新型防渗措施。结果表明，多因素共同作用影响坝体渗透稳定性，新型材料与技术为防渗提供新思路，优化方案需综合传统与新型措施，旨在为保障黏土心墙堆石坝安全运行提供理论与实践参考。

关键词：黏土心墙堆石坝；渗透稳定性；防渗措施

引言：在水利工程领域，黏土心墙堆石坝凭借独特结构与性能被广泛应用。然而，其渗透稳定性受多种因素影响，关乎坝体安全与工程效益。一旦发生渗透破坏，将引发严重后果。因此，深入剖析其结构与渗流特性，系统研究渗透稳定性分析方法，全面探究影响渗透稳定性的因素，并探寻有效的防渗措施，对保障黏土心墙堆石坝长期稳定运行意义重大。

1 黏土心墙堆石坝的结构与渗流特性

1.1 黏土心墙堆石坝的结构组成

黏土心墙堆石坝是水利工程常用坝型，结构精巧、功能明确，由黏土心墙、坝壳堆石体、反滤层及其他辅助结构构成。黏土心墙位于坝体中央，用黏粒含量高、渗透系数低的土料，是阻挡水流渗透的关键防线。坝壳堆石体在心墙两侧，用满足粒径和级配要求的石料填筑，支撑保护坝体。反滤层在心墙与堆石体间，由不同粒径砂石料分层铺成，防止渗透破坏。排水设施、防渗帷幕等辅助结构，协同核心结构，构建起完整稳固的坝体结构体系。

1.2 渗流基本理论

渗流是流体在多孔介质中的流动，在黏土心墙堆石坝工程中，其状况关乎坝体安全稳定。渗流问题可借助连续性方程和运动方程求解，前者体现质量守恒，后者基于达西定律。联立两方程并结合条件可求渗流场参数。实际工程中，该坝渗流常呈非线性、非饱和特性，非饱和渗流要考虑土的基质吸力对渗透系数的影响。同时，渗流与应力场相互耦合，相互作用影响坝体渗透稳定性，需深入研究。

1.3 黏土心墙堆石坝的渗流特性

黏土心墙堆石坝渗流特性因材料渗透性差异而独特。黏土心墙渗透系数低，水头损失集中，凸显其防渗核心地位。正常运行时，坝体渗流稳定。但遇洪水、库

水位骤降等特殊情况，渗流场会剧变。此外，黏土心墙特性也影响渗流，自重和水压力使心墙土体压缩变形，改变孔隙结构，影响渗透系数；出现裂缝，渗流量会急剧增加，威胁坝体安全^[1]。因此，深入探究其渗流特性对保障坝体安全运行意义重大。

2 黏土心墙堆石坝渗透稳定性分析方法

2.1 现场监测技术

现场监测技术是实时评估黏土心墙堆石坝渗透稳定性的关键方法。通过在坝体及周边科学布置监测仪器，可实时获取渗流、应力、变形等关键参数，为分析提供一手资料。渗流监测是核心，常用测压管测量管内水位以计算孔隙水压力和水力梯度；渗压计利用传感器技术自动采集并传输数据，精度高、实时性强。深入分析渗流数据可捕捉异常，判断渗透破坏风险。应力监测借助土压力计等测量坝体内部应力分布，变形监测运用水准测量等技术监测坝体沉降等变形量。渗透破坏常伴应力和变形异常，综合分析可辅助判断渗透稳定性。水质监测通过分析渗流水化学成分，能判断管涌等渗透破坏现象，为安全评估提供多维度数据。

2.2 数值模拟方法

数值模拟方法是深入研究黏土心墙堆石坝渗透稳定性的有效工具，能够模拟坝体在不同工况下的渗流场、应力场和变形场，为坝体渗透稳定性分析提供理论依据。有限元法是应用最广泛的数值模拟方法之一，在渗流分析中，它将坝体离散为有限个单元，通过求解单元渗流方程，得到整个坝体渗流场。在构建有限元模型时，可充分考虑黏土心墙和坝壳堆石体不同材料特性，以及边界和初始条件影响，直观展示坝体内水头和渗流速度分布，分析不同工况下渗流场变化规律。有限元法还可用于应力-渗流耦合分析，在耦合模型中，渗流场变化引起孔隙水压力改变，影响坝体应力状态；而坝体应

力和变形又反作用于渗流场。通过耦合分析,能更精准评估坝体在渗流作用下的稳定性^[2]。离散元法适用于研究颗粒材料力学行为,在黏土心墙堆石坝研究中,可模拟堆石体颗粒相互作用,分析渗流作用下颗粒运动和结构变化,为研究堆石体渗透破坏机制提供独特视角。

2.3 模型试验研究

模型试验研究是深入了解黏土心墙堆石坝渗透稳定性的重要途径,通过在实验室制作缩小比例模型,模拟坝体在不同工况下的渗流和力学行为,为工程设计和理论研究提供有力依据。模型试验主要分为物理模型试验和相似模型试验,物理模型试验依据实际工程材料和结构制作相似模型,通过施加荷载和模拟渗流条件,观测模型渗流、应力和变形现象,能真实反映坝体物理学特性,但受试验场地和设备限制,模型尺寸较小,难以完全模拟实际工程复杂情况。相似模型试验依据相似理论,按一定相似比制作模型,通过调整材料和边界条件,使模型与原型在力学和渗流特性上相似。该试验可在较小规模下模拟实际工况,研究坝体渗透稳定性。试验中需确定合适相似准则,如几何、力学、渗流相似等,确保试验结果能有效推广到实际工程。模型试验可深入研究坝体在不同渗流条件下的渗透破坏过程和机制,如通过逐渐增加水力梯度,观察黏土心墙和坝壳堆石体渗透破坏现象,分析管涌、流土等破坏形式发生发展规律。同时还可用于验证数值模拟结果准确性,为新型防渗材料和技术研究提供试验数据支持,助力推动相关技术发展应用。

3 影响黏土心墙堆石坝渗透稳定性的因素研究

3.1 材料因素

黏土心墙材料特性直接影响坝体防渗性能,黏粒含量、塑性指数和渗透系数是关键指标。通常,黏粒含量高、塑性指数大、渗透系数低的黏土防渗性能好,但过高黏粒含量会增大干缩湿胀性,易引发裂缝,降低防渗效果,因此选材需综合考量各项性能。坝壳堆石体材料特性也不容忽视,石料强度、粒径级配和孔隙率影响其抗渗和力学性能,强度高、级配好的堆石体密实度和抗剪剪强度高,能更好抵御渗流力,减少渗透破坏风险;孔隙率过大增加渗流量,过小则提高施工难度,需合理把控。反滤层材料选择至关重要,其应具备良好透水性和保土性,粒径级配符合反滤准则,否则无法有效阻挡黏土颗粒流失,引发心墙渗透破坏。

3.2 结构因素

黏土心墙厚度是关键结构参数,增加厚度可延长渗流路径、降低水力梯度,提升防渗能力,但过厚会增加

工程量和成本,还可能导致心墙与坝壳间应力集中,需根据工程实际合理确定。坝壳堆石体结构形式也有重要影响,不同分区设计,如采用不同粒径石料分区填筑,可优化坝体应力和渗流分布,有效传递荷载,减少心墙变形和裂缝风险,提高整体稳定性^[3]。边坡坡度影响坝体稳定性,过陡易失稳,过缓则增加占地和工程量,需谨慎设计。反滤层结构设计关乎渗透破坏防治,层数、厚度和铺设方式影响反滤效果,多层设计虽能增强阻挡能力,但会增加施工难度和成本。

3.3 水力因素

库水位变化是主要影响因素,水位上升时,坝体内水头和水力梯度增大,渗流量增加,威胁坝体稳定,尤其在洪水期,急剧上升的水位使坝体承受巨大水压力和渗流力,易引发渗透破坏。库水位骤降同样危害极大,快速下降时,坝壳堆石体孔隙水压力迅速消散,而黏土心墙因渗透性低消散缓慢,在两者间形成较大水力梯度,极易导致心墙渗透破坏。渗流方向和流速改变会影响坝体内部应力分布,增加渗透破坏风险。地下水位变化也不容忽视,上升时增大坝基渗透压力,可能引发坝基渗透破坏;下降过快则可能导致坝体不均匀沉降,影响整体渗透稳定性。

3.4 施工因素

施工因素对黏土心墙堆石坝渗透稳定性有直接影响,施工质量优劣关乎坝体防渗性能和整体稳定。黏土心墙施工中,填土压实度是关键,不足会使孔隙率增大、渗透系数增加,降低防渗性能;含水率也需严格控制,过高或过低均影响压实效果。坝壳堆石体填筑质量同样重要,石料需满足设计粒径级配和密实度要求,否则影响力学和抗渗性能。填筑时要注意铺设方式和层厚,保证均匀稳定。反滤层施工质量直接关系渗透破坏防治,材料铺设需严格符合设计,保证粒径级配和层间紧密接触,避免架空、漏铺等问题。

4 黏土心墙堆石坝防渗措施研究

4.1 传统防渗措施分析

传统防渗措施在黏土心墙堆石坝建设中发挥了重要作用。黏土心墙作为基础防渗结构,依靠低渗透性黏土材料阻挡水流,施工时严格控制填筑质量,如压实度和含水率,可进一步提升防渗性能。在黏土心墙与坝壳堆石体间设置反滤层,有效防止黏土颗粒流失,增强心墙稳定性。防渗帷幕也是常用传统措施,一般设置于坝基,通过水泥灌浆、化学灌浆等方式,在坝基形成连续防渗屏障,降低坝基渗透系数,减少渗流量。其深度和厚度依据坝基地质条件和工程需求设计,以确保防渗效

果。排水设施是传统防渗重要组成部分,在坝体内部设置排水孔、排水廊道等,可降低孔隙水压力,及时排除渗流,防止渗流积聚,提高坝体渗透稳定性。

4.2 新型防渗材料与技术

4.2.1 纳米复合防渗材料

纳米复合防渗材料是当前材料科学领域的研究热点,其通过在材料中加入纳米级颗粒,显著改善了材料的物理和化学性能。在黏土心墙堆石坝防渗领域,纳米复合防渗材料的应用主要体现在两个方面:一是通过纳米颗粒的填充作用,有效堵塞黏土中的微孔隙,大幅度降低渗透系数;二是利用纳米颗粒的表面效应和量子尺寸效应,增强黏土颗粒间的相互作用力,提高土体的整体强度和抗变形能力^[4]。这种材料不仅能够显著提升坝体的防渗性能,还能有效抵抗由于干缩湿胀、应力变形等因素引起的裂缝,从而延长坝体的使用寿命。

4.2.2 高性能土工合成材料

高性能土工合成材料是土工合成材料领域的一大创新,具有高强度、低渗透、耐腐蚀、抗老化等优良性能。在黏土心墙堆石坝防渗中,高性能土工合成材料主要作为防渗层或反滤层使用。作为防渗层时,高性能土工合成材料(如土工膜)能够紧密贴合坝体表面,形成一道连续、致密的防渗屏障。其极低的渗透系数能够有效阻挡水流渗透,确保坝体的防渗安全。同时,土工膜还具有良好的柔韧性和延展性,能够适应坝体的变形和沉降,避免因坝体变形引起的防渗层破裂。作为反滤层时,高性能土工合成材料能够凭借其优良的透水性和保土性,有效防止黏土颗粒被渗流带出,同时保证渗流的顺利通过。这种材料不仅提高了反滤层的过滤效率,还降低了施工难度和成本。

4.2.3 智能防渗技术

智能防渗技术是信息技术、传感技术和自动化技术在防渗领域的应用。通过在防渗结构中嵌入传感器和智能控制系统,可以实时监测坝体的渗流状态和防渗材料的性能变化。当监测到渗流量异常或防渗材料性能下降时,智能控制系统能够自动触发预警机制,及时通知管理人员进行处理。智能防渗技术的核心在于传感器和智能控制系统的设计和应用,传感器需要具有高灵敏度、高精度和长期稳定性,能够准确反映坝体的渗流状态和防渗材料的性能变化。智能控制系统则需要具备智能

化、自动化和远程监控功能,能够实现对防渗措施的精准调控和实时监测。在实际应用中,智能防渗技术可以与传统防渗措施相结合,形成一套完整的防渗体系。例如,在黏土心墙中嵌入渗流监测传感器,实时监测心墙的渗流状态;在防渗帷幕中设置智能灌浆设备,根据监测结果自动调整灌浆压力和灌浆量;在排水设施中安装智能阀门,根据渗流量大小自动调整排水流量。这种智能化的防渗体系能够显著提高坝体的防渗安全性和可靠性。

4.3 防渗措施优化方案

为提高黏土心墙堆石坝防渗效果,需综合考虑工程实际,制定优化防渗方案。可将传统防渗措施与新型材料、技术相结合,如在黏土心墙中添加纳米材料增强防渗性能,利用智能监测技术实时监控心墙状态;在坝基防渗中,采用新型灌浆材料配合智能灌浆设备,提高防渗帷幕施工质量和效果。优化坝体结构设计,合理调整黏土心墙厚度和反滤层结构,根据水力条件和材料特性进行分区优化,降低水力梯度,减少渗透破坏风险。另外,建立完善的防渗监测和维护体系,利用先进监测技术实时掌握坝体渗流和防渗结构状态,及时对老化、损坏的防渗设施进行修复和更换,确保坝体长期安全稳定运行。

结束语

黏土心墙堆石坝渗透稳定性及防渗措施研究对保障水利工程安全意义深远。本文全面梳理相关内容,但面对复杂地质与多变运行环境,仍需持续探索。未来应加强多学科融合,深入研究新型材料与智能技术应用,借助先进分析手段优化设计与施工,构建更完善的安全保障体系,推动黏土心墙堆石坝技术不断进步。

参考文献

- [1]王芳,郑东健,何勇军,李宏恩.黏土心墙堆石坝变形协调评判指标与各区渗透性能影响研究[J].水利水电技术(中英文),2021,52(02):81-88.
- [2]顾瑞婷.黏土心墙堆石坝快速施工技术分析[J].中国新技术新产品,2021(17):86-87.
- [3]徐毓威,王国辉,于浩,等.江坪河面板堆石坝渗流场模拟与防渗体系评价[J].水力发电,2020,46(6):48-52,107.
- [4]白生贵.土石坝防渗墙特性参数对坝体稳定性影响分析[J].河南水利与南水北调,2023,52(06):110-111.