

水利工程中的土石坝渗流控制技术研究

刘 霞

(博兴县城乡水务发展服务中心, 山东 滨州 256500)

摘要 土石坝因其施工简便和低成本, 被广泛应用于水利工程中。然而, 土石坝渗流问题复杂且多样, 渗流控制技术在工程中面临挑战。本文分析了土石坝的构造与渗流特性, 探讨了渗流的基本原理及影响因素, 提出了渗流屏障、排水系统设计、加固与密实技术等控制方法, 并结合案例评估了技术的实际效果, 分析了其在工程实践中的问题与挑战, 总结了渗流控制技术的发展趋势与面临的难题, 以期为促进土石坝渗流控制效果提升提供有益参考。

关键词 土石坝; 渗流控制; 智能化监测; 渗流特性

中图分类号: TV641

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.09.037

0 引言

土石坝作为常见的水利工程坝型, 因其施工简单和成本低廉被广泛采用。然而, 渗流问题逐渐成为影响坝体稳定性和安全性的重要因素。有效控制渗流, 不仅有助于保障坝体结构的安全, 也是延长坝体使用寿命的关键。随着技术的发展, 渗流控制技术得到了广泛应用, 但仍面临不少挑战。本文通过探索更加高效的渗流控制方法, 为水利工程提供理论支持和技术保障。

1 土石坝渗流特性分析

1.1 土石坝的构造与分类

土石坝的构造通常由坝体、坝基、排水系统等组成。坝体由土质材料和石料交替堆积而成, 在坝体的中部设置排水系统以减缓渗流的影响。根据不同的设计和材料, 土石坝可以分为粘土坝、砂砾坝、混合坝等类型。粘土坝由于其较低的渗透性, 适用于防止渗流的坝体设计^[1]。坝体内的粘土层较为密实, 能够有效阻止水流的通过。砂砾坝结构相对较为松散, 抗冲击能力较强。混合坝则结合了两种类型坝体的优点, 通过交替堆积不同材料以实现较为理想的渗流控制效果。

1.2 渗流现象的基本原理

渗流现象指水分通过土石坝材料的孔隙或裂缝渗透的过程。水的渗透主要受到坝体材料的孔隙度、渗透系数及水力梯度的影响。土石坝中水的流动受坝体密实程度、孔隙结构以及水流压力等因素的制约, 影响渗流速率和渗透方向。水分在坝体内的流动在水力梯度作用下会导致渗流速度的变化, 若渗流速度过大,

可能会破坏坝体结构, 进而引发坝体滑坡或渗漏等灾害事故。渗流现象与水文地质条件密切相关, 具体表现为不同坝体材料和地质环境对渗流的影响差异。因此, 对渗流现象的理解为后续的渗流控制技术提供了理论基础。

1.3 土石坝渗流特征的影响因素

土石坝渗流特征受到多个因素的影响, 其中最关键的包括坝体材料的性质、坝体设计与施工质量以及外部水文条件。坝体材料的性质直接决定了渗流特征, 不同材料的孔隙率和渗透系数不同, 进而影响水流的渗透能力。砂砾或卵石等颗粒状材料的渗透性较强, 而粘土等材料则较为密实, 渗透性差。坝体设计与施工质量亦影响渗流特征, 特别是坝体的密实度和排水系统的有效性, 不当设计或施工可能导致渗流通道的形成, 增加渗流风险^[2]。外部水文条件, 如降水量、上游水位等, 也对渗流过程起到重要作用。

1.4 渗流模型与数值模拟方法

渗流模型是对土石坝渗流过程进行定量描述的重要工具, 能够帮助工程师预测渗流对坝体的影响及其安全性。通过对坝体的渗透系数、孔隙度等参数的分析, 可以建立数学模型, 对坝体内水流的分布和流动情况进行模拟。这些模型通常依赖于土石坝的物理特性和水文环境数据, 并通过数值方法进行求解。数值模拟方法, 特别是有限元法、有限差分法等技术, 已成为研究土石坝渗流问题的常用工具。通过数值模拟, 可以对坝体内的渗流路径、渗流量以及渗流压力等进行精准计算, 从而为坝体设计和渗流控制技术的选择提供依据。数值模拟不仅能够反映渗流的动态过程,

还能帮助预测不同条件下坝体的渗流特性，为工程设计和安全评估提供科学依据。

2 土石坝渗流控制技术的主要方法

2.1 渗流屏障技术

渗流屏障技术通过设置不透水或低渗透性的屏障层，有效阻止水流渗透，从而减少渗流流量。常用的屏障材料包括粘土、膨润土及合成材料等。渗流屏障通常设置在坝体的上游或下游部分，其厚度和材料选择需根据坝体的渗透特性、水流速度及坝体的渗透系数来精确设计。在实际应用中，渗流屏障不仅要具备优异的抗渗性，还需考虑与坝体的兼容性，确保在坝体受力或沉降过程中，屏障能够持续保持密封性能。

对于粘土坝，通常采用高密实度的粘土层或膨润土垫层作为渗流屏障，这些材料的低渗透性能够有效阻止水分的渗透。近年来，高分子合成材料在渗流屏障中的应用逐渐增多，这些材料具备较强的抗渗能力，特别适用于水流较大的区域，能够有效防止水流渗透。通过合理设计渗流屏障，能够有效减小坝体内部的水力梯度，进而提高坝体的稳定性。

2.2 排水系统设计

排水系统在土石坝渗流控制中扮演着至关重要的角色。排水系统的主要作用是及时排除坝体内部的积水，减小水流对坝体结构产生的水压，从而有效降低渗流引发的风险^[3]。排水系统包括坝体内的排水孔、排水管道、排水层等构成部分。排水孔布置在坝体内部的关键位置，能够确保水分快速流出，防止水压过大导致坝体的结构性损害。排水管道和排水层则在坝体周围形成一个导水通道，控制水流的流动速度并引导水流顺畅排出。

在排水系统的设计中，坝体的渗透性和地质条件必须充分考虑。对于渗透性较高的坝体区域，排水孔的布置需要更加密集，以保证渗流量的快速排出。对于粘土坝等渗透性较低的坝体，排水系统设计时要特别注意排水孔的数量和分布，避免因排水不畅引发局部水压积聚，增加坝体破坏的风险。优化排水系统不仅有助于降低渗流压力，还能有效延长坝体的使用寿命。

2.3 土石坝加固与密实技术

土石坝的加固与密实技术主要通过提高坝体的密实度，降低坝体的渗透性，从而有效控制渗流。加固与密实的技术措施包括机械压实、添加稳定剂以及采用高密度材料等。这些方法能够大幅减少坝体的孔隙度，进而显著降低渗透系数，减缓水流渗透的速度。

通过这些措施，坝体的整体结构变得更加稳固，水流的渗透途径得到有效封堵，降低了渗流的风险。

在加固施工过程中，使用现代化压实设备对坝体土石进行加固，使坝体的密实性达到较高水平，显著提升坝体抗渗能力。此外，化学稳定剂的应用，如水泥、石灰等无机材料，也能有效增强坝体的抗渗性。在水流压力较大的区域，结合加固与密实技术，不仅提高了坝体的稳定性，也防止了渗漏及其他由渗流引发的问题，确保了坝体的长期安全性。

2.4 防渗材料的应用

防渗材料的应用是土石坝渗流控制技术中的重要手段之一。通过合理选择和应用不同类型的防渗材料，可以有效提高坝体的防渗能力，减少水流渗透造成的风险。常用的防渗材料包括膨润土、合成材料、混凝土防渗层等，这些材料具有较低的渗透性，并能够与坝体有效结合，形成坚固的防渗层^[4]。

膨润土因其具有较强的膨胀性和低渗透性，广泛应用于防渗工程中。膨润土可与水泥等材料混合，形成密实的防渗层，确保坝体的长期稳定性。此外，合成材料如高分子防渗膜也逐渐应用于坝体防渗中，这些材料不仅具有较好的抗渗性能，还具备较强的耐久性和抗老化性能，适用于恶劣环境下的长时间使用。

3 土石坝渗流控制技术的应用策略

3.1 选择渗流控制材料与工艺

在土石坝的渗流控制中，材料的选择直接影响渗流控制效果。渗流控制材料需要具备良好的抗渗性能和适应复杂地质条件的能力。常见的材料包括粘土、膨润土、合成防渗膜和聚合物材料等。膨润土由于其优异的膨胀性和极低的渗透性，通常被选用作为防渗屏障，能够有效防止水流渗透，并维持坝体的结构稳定性^[5]。除此之外，合成防渗膜因其耐久性和较高的抗渗性，也广泛应用于一些特殊环境中，特别是在土壤渗透性较高的地区，能够显著提升坝体防渗能力。

在工艺方面，现代工程施工中常采用高压喷射灌浆技术和防渗墙注浆工艺。这些工艺通过将特定的灌浆材料注入坝体裂缝或孔隙中，进一步提高坝体的密实度，封闭渗透通道，从而有效防止渗流。例如，在某些坝体存在较大裂隙的地区，通过高强度注浆工艺，可以快速填补裂缝，阻止水流进一步渗透。这类工艺不仅在加固坝体的稳定性方面具有显著效果，还能增强坝体在恶劣环境下的长期使用安全性，尤其是对于渗漏风险较高的区域，其效果更加明显。

3.2 优化渗流控制结构设计

优化土石坝渗流控制结构的设计是提升坝体防渗能力的关键。渗流控制结构不仅需要考虑坝体的地质条件、坝体高度,还应结合坝体的渗透系数及水流特性进行合理选择。常见的渗流控制结构包括防渗墙、排水层、防渗垫层等,这些结构能有效减少水流的渗透性或改善坝体的排水能力。防渗墙通常用于坝体的关键位置,具备较低的渗透性,可以有效隔绝水流,避免水流渗透至坝体内部。排水层则通过在坝体内设置导水通道,减少水流在坝体内的滞留,保证水流能顺畅排出,减轻水压力对坝体的影响。

例如:在某些高坝的建设中,采用了多层防渗墙与排水层的复合设计,防渗墙主要设置在坝体的上游,确保上游水流不渗入坝体;而排水层则设计在坝体的中部,保证水流能够顺利排出,避免由于水流积聚引发的坝体变形。类似的设计也可见于一些重点水利工程,如大型水库坝体,其通过合理配置防渗结构,显著降低了渗流引发的风险,确保了坝体的稳定性和安全性。通过合理配置不同类型的防渗结构,不仅优化了坝体的防渗效果,还延长了坝体的使用寿命,保障了长周期的水工安全。

3.3 实施渗流监测与智能化控制

随着信息技术和智能化技术的快速发展,渗流监测与智能化控制已成为土石坝渗流控制的重要手段。通过在坝体关键部位布置传感器,可以实现对坝体渗流状况的实时监控,获得有关渗流量、渗流方向及水位等重要数据。这些监测数据为分析坝体状态、预防潜在渗流问题提供了精准依据。常见的监测设备包括基于电磁波原理的渗流监测仪和振动传感器等,这些设备能够在不同深度和范围内精确捕捉水流动态,及时反映坝体内部的变化,避免渗流问题的积累^[6]。

在某些大型水利工程中,智能化控制系统已经广泛应用于渗流监测中,能够通过实时数据分析,对坝体状态进行快速反应。例如:在某坝体区域渗流量超出设定阈值时,智能系统会自动启动应急排水功能,或根据实时监测数据调节水位来缓解压力,从而避免坝体结构受损。这类智能化系统在多个在建或运营中的大型水库工程中得到了应用,极大提升了渗流控制的精准性和实时响应能力,进一步确保了坝体的安全性和稳定性。

3.4 推动综合应用与技术集成

在土石坝渗流控制中,单一技术手段往往难以应对复杂多变的地质和水文条件。因此,综合应用和技

术集成成为提升渗流控制效果的重要途径。通过将渗流屏障技术、排水系统设计、加固与密实技术等多种手段结合,能够形成一个全面有效的防渗体系,极大地减少渗流对坝体的负面影响。技术集成的核心在于通过不同技术之间的互补作用,弥补单一技术的局限性,实现更高效、更持久的渗流控制效果。

在某些大型水库项目中,设计团队采用了渗流屏障与排水系统结合的策略,特别是在坝体的关键区域,通过设置多重防渗层并配合精细化的排水设计,有效降低了渗流压力。此外,随着高分子材料和智能化监测技术的不断发展,将其与传统技术结合应用,可以进一步提升渗流控制的精准度和实时性。例如:在一些正在建设的大坝项目中,智能传感器实时监控坝体的渗流状况,并通过大数据分析系统调节排水系统,减少人为干预。这种技术集成不仅提升了坝体的抗渗能力,也大大增强了工程的长期稳定性和安全性。

4 结语

土石坝渗流控制技术在提升坝体安全性方面发挥了重要作用,随着技术发展,渗流控制手段将更加精准高效。随着新材料、新工艺和新技术的应用,土石坝的渗流控制将更加多元化,特别是在防渗屏障材料和智能监控系统的集成应用上,实现对坝体渗流状态的实时监控与精准调控。未来,研究应着重优化渗流控制技术,开发更加经济高效的解决方案,进一步提升土石坝防渗能力与安全性,为水利工程的可持续发展提供技术支撑。同时,加强新型材料的研究和应用,为渗流控制技术革新奠定基础。

参考文献:

- [1] 孟源. 不良地质条件下的土石坝渗流稳定性分析 [J]. 黑龙江水利科技, 2023, 51(06):31-33, 61.
- [2] 黄曙光. 小型土石坝除险加固及渗流安全稳定分析研究 [J]. 云南水力发电, 2023, 39(01):78-82.
- [3] 王光霞, 万书云, 马慧清. 土石坝渗流及其控制措施研究 [J]. 四川水泥, 2021(01):323-324.
- [4] 贺英芝. 基于 GPU 并行的土石坝渗流计算程序研发及其应用 [D]. 大连: 大连理工大学, 2022.
- [5] 张新闻. 土石坝防渗墙特性参数对渗流稳定性影响分析 [J]. 河南水利与南水北调, 2023, 52(11):124-125.
- [6] 王萍. 土石坝渗流稳定性试验分析 [J]. 陕西水利, 2023(09):181-182, 185.