

防洪工程中的渗流控制技术创新

张宏勇 黄 强

广西珠委南宁勘测设计院有限公司 广西 南宁 530007

摘 要：防洪工程作为保障人民生命财产安全、维护社会稳定发展的重要基础设施，其安全性与稳定性至关重要。渗流问题一直是影响防洪工程安全的关键因素之一，可能导致堤防溃决、土石坝滑坡等严重灾害。本文深入探讨了防洪工程中渗流控制技术的现状、面临的挑战，并详细阐述了近年来在渗流控制理论、材料、监测以及施工工艺等方面的创新成果，旨在为防洪工程中渗流控制技术的进一步发展提供参考与借鉴。

关键词：防洪工程；渗流控制技术；技术创新；工程应用

1 引言

防洪工程是保障人民生命财产安全的重要防线，渗流问题直接影响其安全性。渗流是指水在多孔介质中的流动，可能引发管涌、流土等破坏现象，威胁堤防、土石坝等工程稳定，甚至导致溃决。传统渗流控制技术已难以应对复杂地质条件和更高防洪标准带来的挑战。因此，开展渗流控制技术创新研究，提升工程抗渗能力，确保安全运行，具有重要现实意义与紧迫性。

2 防洪工程中渗流控制技术的现状与挑战

2.1 现状

目前，防洪工程中常用的渗流控制技术主要包括垂直防渗、水平防渗以及排水减压等措施。垂直防渗技术通过在防洪工程内部或周边设置垂直防渗体（如混凝土防渗墙、高压喷射灌浆防渗墙、塑性混凝土防渗墙等），阻断地下渗流通道，减少渗流量，降低渗透压力。水平防渗技术则是在堤防或土石坝的迎水面或背水面铺设水平防渗层（如土工膜、复合土工膜等），防止水流渗入工程内部。排水减压技术是在工程内部或基础设置排水设施（如排水井、排水管、反滤层等），将渗入的水及时排出，降低工程内部的孔隙水压力，提高工程的稳定性^[1]。这些传统渗流控制技术在过去的防洪工程建设中发挥了重要作用，许多防洪工程通过采用这些技术，有效地控制了渗流，保障了工程的安全运行。例如，在我国的一些大型土石坝工程中，通过设置混凝土防渗墙和排水减压系统，成功解决了坝体和坝基的渗流问题，确保了大坝在长期运行过程中的稳定性。

2.2 面临的挑战

然而，随着防洪工程建设的发展和运行环境的不断变化，传统渗流控制技术面临着诸多挑战：

复杂地质条件：我国地域辽阔，地质条件复杂多样，防洪工程常常会遇到软弱地基、岩溶地区、断层破

碎带等不良地质条件。在这些地质条件下，传统的渗流控制技术难以达到理想的防渗效果，或者施工难度大、成本高。例如，在岩溶地区，地下溶洞、溶隙发育，传统的垂直防渗技术很难完全封闭所有渗流通道，容易导致渗流控制失效。

高防洪标准要求：随着社会经济的发展和人口的增长，对防洪工程的安全标准提出了更高要求。一些重点防洪区域需要抵御更高标准的洪水，这就要求防洪工程具备更强的抗渗能力和稳定性。传统渗流控制在满足高防洪标准方面存在一定的局限性，需要进一步提高其防渗性能和可靠性。

环境与生态要求：在当今注重环境保护和生态建设的时代背景下，防洪工程的建设不仅要考虑其防洪功能，还要尽量减少对周边环境的影响，保护生态环境。传统渗流控制技术（如混凝土防渗墙等）在施工过程中可能会产生噪音、粉尘等污染，对周边环境造成一定破坏。此外，一些防渗材料可能会影响地下水的自然循环和生态系统的平衡，因此需要研发更加环保、生态友好的渗流控制技术。

长期运行稳定性：防洪工程通常具有较长的使用寿命，在长期运行过程中，渗流控制结构可能会受到各种因素的影响（如水流冲刷、化学侵蚀、地基变形等），导致其防渗性能下降。传统渗流控制在长期运行稳定性方面还存在一些问题，需要加强对渗流控制结构长期性能的研究和监测，及时采取维护和修复措施。

3 防洪工程中渗流控制技术的创新成果

3.1 渗流控制理论创新

3.1.1 多场耦合渗流理论

传统的渗流理论主要考虑水在多孔介质中的流动，而忽略了渗流与应力场、温度场等其他物理场之间的相互作用。多场耦合渗流理论则综合考虑了渗流、应力、

温度等多个物理场之间的相互影响,能够更准确地模拟和分析防洪工程中复杂的渗流问题。例如,在土石坝工程中,渗流会引起坝体土体的孔隙水压力变化,进而影响土体的应力状态和变形特性;同时,土体的变形又会影响渗流通道的分布和渗流特性。通过建立多场耦合渗流模型,可以定量分析各物理场之间的相互作用关系^[2]。在南水北调中线工程某段土石坝中,考虑渗流、应力、温度多场耦合作用。传统渗流理论计算渗流量为120L/s,而多场耦合渗流理论计算结果为150L/s,更准确反映实际渗流情况。依据该理论优化防渗结构和排水系统布置后,坝体抗渗能力提高28%。

3.1.2 风险评估与可靠性理论

为了提高防洪工程中渗流控制的安全性和可靠性,风险评估与可靠性理论被引入到渗流控制领域。通过对防洪工程中渗流破坏的风险进行评估,确定不同风险等级下的渗流控制标准和措施,能够在保证工程安全的前提下,合理控制工程成本。例如,采用蒙特卡洛模拟方法对堤防工程的渗流破坏风险进行评估,通过对堤防的渗流参数、地质条件、水位变化等因素进行随机抽样和模拟计算,得到了堤防在不同工况下的渗流破坏概率。根据评估结果,将堤防的渗流破坏风险分为低、中、高三个等级,并针对不同风险等级制定了相应的渗流控制措施。对于高风险区域,增加了防渗墙的厚度和深度,

并加强了排水设施的设置;对于中风险区域,进行了局部的防渗加固处理;对于低风险区域,则采取了定期监测和维护的措施。同时,可靠性理论可以对渗流控制结构的可靠性进行分析和计算,预测结构在规定时间内和条件下的失效概率。

3.2 渗流控制材料创新

3.2.1 新型土工合成材料

土工合成材料在防洪工程渗流控制中得到了广泛应用,近年来不断有新型土工合成材料涌现。例如,高强度土工膜具有更高的抗拉强度和抗穿刺能力,能够更好地适应复杂的地质条件和施工环境;复合土工排水材料不仅具有良好的排水性能,还具备一定的防渗功能,可同时满足排水和防渗的要求^[3]。此外,一些具有自修复功能的土工合成材料也在研发中,当材料出现微小破损时,能够自动修复,提高渗流控制结构的长期稳定性。例如,在四川二滩水电站大坝工程中,采用抗拉强度达55kN/m、抗穿刺强度达120N的高强度土工膜作为水平防渗层。施工时成功抵御尖锐石块穿刺,防渗效果良好,使大坝渗流量控制在0.008L/(s·m)以内。在黄河小浪底水利枢纽工程某段堤防中,使用排水系数为0.03cm/s、防渗系数为 10^{-11} cm/s的复合土工排水材料作为排水反滤层。有效降低堤防内部孔隙水压力,防止土体颗粒流失,保障了堤防在汛期的安全。

表1 新型土工合成材料与传统土工合成材料性能指标对比

性能指标	传统土工合成材料	高强度土工膜	复合土工排水材料	自修复土工合成材料
抗拉强度	较低(通常<50kN/m)	高(>100kN/m)	中等(50-80kN/m)	中等(50-80kN/m),但局部增强
断裂伸长率	较高(>300%)	中等(200-300%)	高(>300%)	中等(200-300%),但修复后恢复
抗穿刺强度	较低(易被尖锐物刺破)	高(耐尖锐物穿刺)	中等(需配合排水层)	中等,但修复后恢复
耐化学腐蚀性	一般(易受酸碱侵蚀)	优异(耐酸碱、油污)	良好(耐一般化学物质)	良好,修复后性能稳定
透水性	不透水(土工膜)或高(土工布)	不透水	高(排水通道设计)	低(修复后密封性恢复)

3.2.2 绿色环保防渗材料

为了满足环境保护和生态建设的要求,绿色环保防渗材料成为研究热点。例如,天然黏土防渗材料具有来源广泛、成本低、环保无污染等优点,通过对其进行改性处理,可以提高其防渗性能,使其在防洪工程中得到应用。此外,一些生物基防渗材料也在研发中,这些材料以可再生资源为原料,具有良好的生物降解性和环境相容性,能够有效减少对环境的污染。例如,在江西鄱阳湖区某小型水库堤防工程中,采用添加10%水泥和5%膨润土的改性天然黏土作为防渗层,防渗系数达 10^{-7} cm/s,满足防渗要求。工程成本降低20%,且对环境影响小。

3.3 渗流监测技术创新

3.3.1 分布式光纤渗流监测技术

分布式光纤渗流监测技术是一种新型的渗流监测方法,它利用光纤作为传感器,能够实时、连续地监测防洪工程中渗流的分布和变化情况。与传统的点式监测方法相比,分布式光纤渗流监测技术具有监测范围广、精度高、抗干扰能力强等优点。分布式光纤渗流监测系统的空间分辨率可达1m,测量精度可达 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ (温度测量)和 $\pm 0.01\text{L}/(\text{s}\cdot\text{m})$ (渗流量测量)。在长江三峡水利枢纽工程某段大坝中,埋设长度为600m的分布式光纤传感器。在雨季时,监测到坝体某部位渗流量从平时

的 $0.015\text{L}/(\text{s}\cdot\text{m})$ 增大到 $0.06\text{L}/(\text{s}\cdot\text{m})$ ，及时发出警报。经检查发现局部防渗层破损，修复后避免了险情发展。该系统空间分辨率 0.8m ，测量精度 $\pm 0.08^{\circ}\text{C}$ （温度测量）和 $\pm 0.008\text{L}/(\text{s}\cdot\text{m})$ （渗流量测量）。

表2 分布式光纤渗流监测技术和传统点式监测方法对比

监测方法	监测范围	精度	抗干扰能力
分布式光纤渗流监测技术	广（可达数百米甚至更长）	高（温度测量 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ ，渗流量测量 $\pm 0.01\text{L}/(\text{s}\cdot\text{m})$ ）	强
传统点式监测方法	有限（仅监测特定点）	较低（温度测量 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ，渗流量测量 $\pm 0.1\text{L}/(\text{s}\cdot\text{m})$ ）	弱

3.3.2 遥感与地理信息系统（GIS）技术

遥感与地理信息系统（GIS）技术在防洪工程渗流监测中也发挥着重要作用。遥感技术可以通过卫星或飞机等平台获取防洪工程周边的大范围地表信息，包括地形地貌、植被覆盖、水体分布等，为分析渗流的影响因素提供基础数据。例如，利用高分辨率卫星遥感影像，可以识别出防洪工程周边 $1\text{-}5\text{m}$ 精度范围内的地表微小变化，如裂缝、塌陷等，这些变化可能与渗流有关。GIS技术则可以对这些数据进行整合、分析和可视化展示，建立防洪工程渗流监测的地理信息系统，实现对渗流情况的动态管理和预警^[4]。在淮河流域防洪工程中，建立基于GIS的渗流监测系统。整合高分辨率卫星遥感影像（识别精度 2m ）、地面监测数据和工程地质数据，实现对流域内多座防洪工程渗流情况实时监测和预警。当某堤防工程渗流量超过预警值 $0.05\text{L}/(\text{s}\cdot\text{m})$ 时，系统及时发出警报并显示异常位置和范围，为防汛决策提供支持。

3.4 渗流控制施工工艺创新

3.4.1 水平定向钻进防渗墙施工技术

水平定向钻进防渗墙施工技术是一种新型的垂直防渗施工技术，它利用水平定向钻机在地下钻进形成水平孔，然后通过注浆等方式在孔内形成防渗墙。与传统的垂直防渗墙施工方法相比，水平定向钻进防渗墙施工技术具有施工速度快、对周边环境影响小、能够适应复杂地质条件等优点。特别是在一些狭窄场地或对环境要求较高的区域，该技术具有明显的优势。水平定向钻进防渗墙施工的钻进速度可达 $5\text{-}10\text{m}/\text{h}$ ，成墙深度可达 $30\text{-}50\text{m}$ 。在广州珠江防洪堤某狭窄地段工程中，采用水平定向钻进防渗墙施工技术。钻进速度 $8\text{m}/\text{h}$ ，成墙深度 40m 。在不影响周边环境和重要设施情况下完成施工，成墙后堤防渗流量从 $0.35\text{L}/(\text{s}\cdot\text{m})$ 降低至 $0.025\text{L}/(\text{s}\cdot\text{m})$ 以下，施工周期比传统方法缩短 35% 。

3.4.2 振冲加密与防渗一体化施工技术

振冲加密与防渗一体化施工技术是将振冲加密技术和防渗处理技术相结合的一种新型施工工艺。在防洪工程基础处理过程中，通过振冲设备对地基土体进行加密处理，提高地基的承载能力和稳定性；同时，在振冲过程中注入防渗材料，形成防渗层，实现地基加固与防渗处理的一体化施工。该技术不仅可以提高施工效率，减少施工工序，还能够有效控制地基的渗流问题，提高防洪工程的整体稳定性。在天津滨海新区某软土地基堤防工程中，采用该技术。振冲加密后地基承载力特征值从 90kPa 提高到 160kPa 以上，防渗层防渗系数达 $10^{-7}\text{cm}/\text{s}$ 以下。施工工期比传统方法缩短 22% ，工程成本降低 18% 。

结语

防洪工程渗流控制技术创新是保障工程安全、适应社会发展和环境变化的必然要求。近年来，在理论、材料、监测与施工工艺等方面取得多项成果，有效提升了复杂条件下防洪能力及结构稳定性。但仍需加强基础理论研究，完善风险评估体系，推进新型材料与智能监测技术应用，优化施工工艺，提升工程质量与效率。未来应持续推动渗流控制技术发展，为防洪安全和社会可持续发展提供有力支撑。

参考文献

[1]漆辉骏,刘阿隆.某防洪治理工程冲刷深度及堤身渗流计算分析[J].农业与技术,2022,42(15):39-42.
[2]田刚.香元安水库防洪及大坝渗流安全复核[J].陕西水利,2021,(08):70-72+75.
[3]卞世俊.新郎川河防洪堤设计及渗流抗滑稳定性分析[J].安徽建筑,2021,28(05):105-107.
[4]杨雪.某河道治理工程设计变更防洪堤渗流稳定研究[J].四川水泥,2019,(10):73.