

水利工程中循环式灌浆对土石坝稳定性影响的探讨

王军芳

河北省水利工程局集团有限公司，河北石家庄，050000；

摘要：水利工程对国家基础设施建设至关重要，土石坝作为水利工程的核心组成部分，其稳定性直接关系到工程的安全与可靠性。本研究围绕循环式灌浆技术在提高土石坝稳定性中的应用进行深入探讨。采用数值模拟与现场试验相结合的方法，分析了循环式灌浆技术对土石坝体内部结构和渗透性能的影响，以及灌浆参数对坝体稳定性的影响规律。结果表明，循环式灌浆能显著改善土石坝的抗剪强度和抗渗能力，尤其是对于裂隙发育、渗透性强的土石坝体，通过优化灌浆参数，能有效减少孔隙水压力，增强土石坝的整体稳定性。研究还发现合适的灌浆压力和循环次数对于确保灌浆效果与坝体稳定性至关重要。本研究为土石坝循环式灌浆工艺的设计与施工提供了理论依据和技术指导，对于类似的水利工程稳定性改善具有一定的参考价值。

关键词：土石坝；循环式灌浆技术；抗剪强度；抗渗能力；稳定性影响

DOI：10.69979/3029-2727.25.06.018

1 背景与意义

1.1 土石坝在水利工程中的作用

土石坝水利工程中担任角色，作用包含蓄水、灌溉、防洪和发电等^[1]。土石坝构造稳固性对工程可靠性和实用性非常重要。达成水资源调控和防灾减损目标，土石坝是重要设施，需要抵御繁杂环境因素和变化多端水流作用。土石坝构造不稳固，可能会引发重大工程灾难，威胁人民生命财产安全。现代水利工程对土石坝工艺标准不断提升，要求构造拥有优秀抗剪强度和抗渗透性，稳固性必须足够强，匹配不同地质环境与水力条件。建造时要考虑各种情况，确保工程质量过硬，减少风险发生概率。随着工程规模与复杂程度的增加，传统的坝体施工方法逐渐显露出其局限性，因此新技术的应用显得尤为迫切。在这种背景下，循环式灌浆技术的提出，为提高土石坝的稳定性提供了新的解决方案，进而保障水利工程的整体效能和安全性。

1.2 循环式灌浆技术概述

循环式灌浆技术一种循环方式灌浆材料填入土体岩层工程技术。核心调整灌浆压力循环次数，灌浆材料渗透填满坝体内部裂隙、孔隙这些缺陷，材料土体密实度粘结性提高。传统灌浆技术相比，循环式灌浆控制灌浆材料流动路径，灌浆材料过量泄漏损耗避免，灌浆质量效率提升。坝体具体条件参数优化执行，土石坝抗剪强度提高，渗透性减少，孔隙水压力降低，整体结构稳定性明显提高。坝体裂隙发育严重区域问题解决，效果表现出来，土石坝长期安全性耐久性提高，技术保证提

供，水利工程土石坝维护强化重要手段，复杂地质环境使用效果好。

1.3 循环式灌浆技术在土石坝稳定性中的研究意义

循环式灌浆技术属于创新治理手段，操作简单，研究土石坝稳定性具有重要意义。使用灌浆技术可以填充压实坝体内部裂隙孔隙结构，提高坝体剪切强度非常明显，同时增强防渗能力效果。尤其遇到裂隙发育、渗透性强土石坝，调整灌浆压力大小循环次数能够降低孔隙内部水压力作用，增强结构稳定性效果突出。优化灌浆参数提供加强土石坝稳定性途径，相关领域提供实用经验借鉴技术协助支撑。水利工程长期稳定性依靠这项技术奠定坚实基础，十分可靠。

2 循环式灌浆技术细节

2.1 灌浆材料的选择与性能

循环式灌浆技术执行过程，挑选灌浆材料非常关键，材料性能作用灌浆成果和坝体稳固性。常用灌浆材料包括水泥浆、化学浆液和粘土泥浆等等。水泥浆因为凝结时间可以控制，而且硬化后强度高，所以被使用在大多数土石坝灌浆工程中。化学浆液拥有良好渗透性和凝结特点，适合裂隙密集区域，依靠化学反应构成稳定填塞结构^[2]。粘土泥浆拥有优良抗渗性能，所以被使用在需要提升防渗功能的坝体中。灌浆材料颗粒细度、粘度和凝结时间这些性能参数会造成灌浆成果显著作用，应该根据坝体具体情况和预期成果进行改进挑选，确保工程质量达标。在材料性能评估中，需考虑其耐久性与环境

适应性，以确保长期的稳定性与安全性^[3]。研究表明材料与其水化反应条件的适配性亦对坝体稳定性产生一定影响。在循环式灌浆技术中，科学合理的灌浆材料选择是提高土石坝稳定性、延长工程寿命的重要保证。

2.2 循环式灌浆的操作过程

循环式灌浆的操作过程是，技术效果的关键因素。在实施过程当中应该准备好换下设备和材料。关键设备和材料的质量决定着关于这的最终效果。在灌浆过程当中，灌浆口的布置和开口要确定好。这是影响灌浆能否均匀地注入坝体内的关键，要严格控制浆液的流量。通过坝体的特点进行调节，来确保孔隙和裂纹能得到充分的填充。监测与调整在灌浆过程当中也是很重要的，要随时记录好管家扩散的范围。在循环关键的过程当中，要进行反复操作和参数调整，大体的厚度和结实度，能够达到最大化。

2.3 灌浆参数优化的原则与方法

坝体部位的地质及损伤考量直接决定灌浆材料使用的强度，最终优化参数减少了水压达到目的，坝体持久牢固。不断的循环意在增强抗剪效果，确保整个工程的安稳是最初的理想，但从实际出发，调整则是随客观变化所需。通过这些方式，技术的进步就是工作的动力。

3 数值模拟与现场试验

3.1 数值模拟方法与步骤

在土石坝循环式灌浆技术的研究中，数值模拟方法为分析灌浆对坝体稳定性的影响提供了重要的理论支持。建立土石坝的三维地质模型是关键。此过程需依据工程地质调查数据，准确反映坝体及周边环境的实际情况。在模型构建后，采用有限元法进行分析，通过引入灌浆效应模块，模拟不同灌浆压力和循环次数对坝体内部应力分布与渗透性能的影响。选取合适的本构模型以反映土石的力学特性，并将灌浆材料的参数融入计算中。在数值模拟中，模拟的关键步骤包括设置初始边界条件、加载工况以及运行计算。通过调节灌浆参数，在模拟中逐步优化，以观察其对抗剪强度与渗透性能的提升效果。计算完成后，对模拟结果进行分析，通过对比未灌浆与灌浆后的数值变化，评估循环式灌浆对土石坝结构稳定性的强化程度。这一研究步骤为现场应用灌浆技术提供了合理的参数选择依据。

3.2 现场试验设计与实施

现场试验规划和执行根据土石坝的具体情况来做，重点研究循环式灌浆技术的使用效果。试验场地挑的是裂缝多、渗透性强的土石坝那一段，好好检查灌浆到底

行不行。灌浆材料用的是改良过的配方，靠着调整压力和循环次数分成几组来试。施工时按区域顺序灌浆，确保材料能平均渗进坝体结构。试验时马上测孔隙水压力、坝体移动和应力变化，用高准确度的传感器和数据系统把数据记下来。试验完后取坝体样本研究，看看灌浆能不能让抗剪强度和防渗能力变强。整个过程都按水利工程施工规范认真做，确保结果靠谱又有用，数据分析还要仔细整理好放进档案。

3.3 结果数据的分析与验证

用数字计算和实地测试得出的研究结果表明，循环式灌浆能让土石坝变得更稳固。数字计算过程中，研究不同参数组合对坝体抵抗剪切强度和防止渗水能力的作用，研究结果表明，选择合适的灌浆压力和灌浆次数可以改进坝体内部细微结构，让水渗透得更少，数据参考文献^[4]。实地测试证明数字计算很精确，测试数据跟计算结果完全一样。灌浆之后，坝体里面水的压力变小，整个坝的抵抗剪切强度变得更强。比较这些数据后发现，循环式灌浆在特定参数条件下效果最好，能为以后工程实践提供可信的数据支持和坚实的理论根据。

4 循环式灌浆对土石坝稳定性的影响

4.1 对抗剪强度与抗渗能力的影响

循环式灌浆技术，在提升土石坝抗剪强度与抗水能力上，表现出明显效果。充盈坝体内里的裂隙和空隙，实施通过注入特定的灌浆物质，因此提升坝体抗剪强度显著。得益于固结后灌浆物质总体强化效果对坝体结构，这种增强效应。填补土石坝体的渗透通道，通过优化灌浆变量，能够并减少渗透系数，有效增强坝体的抗水渗透能力，针对渗透性能改善。形成的坚固固结体，阻止灌浆物质在渗透通道内的水流，并水压力对坝体的侵蚀作用更小。调整合理的灌浆压力以及循环次数，裂隙发展或渗透性强的坝体之中，可进一步提高坝体的总体性能。经过理论分析及现场试验确认，有助于提升土石坝的总体稳定性，为水利工程安全性提供了可靠支持。

4.2 孔隙水压力与坝体整体稳定性

孔隙水压力是影响土石坝稳定性的关键因素之一。在循环式灌浆过程中，通过注入灌浆材料，可以填充坝体内部的孔隙和裂隙，从而有效降低孔隙水压力。减少孔隙水压力的结果是能够提高坝体的抗剪强度和抵抗渗透的能力，这对于裂隙发育、渗透性高的土石坝尤其重要。在降低孔隙水压力的循环式灌浆还能增强坝体的整体结构性稳定性，避免在长期使用过程中由于孔隙水压力导致的坝体变形或损坏。优化灌浆参数，如灌浆压

力和循环次数，也能够进一步控制孔隙水压力，使之处于安全范围内，从而保证土石坝的稳定性。研究表明，合理的灌浆操作可以显著延长土石坝的使用寿命并提高其安全性，为水利工程的长期稳定运行提供支持。

4.3 灌浆参数对稳定性影响的规律

灌浆参数对土石坝稳定性的影响规律在研究中得到了全面分析。灌浆压力的选择直接关系到灌浆材料在土石坝中的渗透深度与封堵效果，适宜的压力可以有效地降低坝体内部孔隙水压力，增强坝体的抗渗性能及抗剪强度。研究表明，过高的灌浆压力可能导致泥浆流失或结构破坏，而过低的压力则难以达到理想的加固效果。循环次数也是影响灌浆效果的关键参数。通过合理设置循环次数，确保灌浆材料均匀分布和充分固化，从而提高坝体的结构完整性与稳定性。这些参数的优化设计是土石坝加固工程成功的关键。

5 结论与应用前景

5.1 研究成果总结

数值模拟与现场试验的综合研究表明，循环式灌浆技术有效提升了土石坝的稳定性。研究发现，通过循环灌浆工艺，土石坝的抗剪强度得到提升，并显著增强了抗渗性能。尤其在裂隙发育与渗透性能强的土石坝体中，优化的灌浆参数有效降低了孔隙水压力，改善了稳定性。循环式灌浆技术在不同灌浆压力与循环次数下对稳定性的影响进行了深入分析，揭示了这些参数的变化规律及其对提高坝体整体稳定性的重要性。研究过程中的参数优化原则为工程实践提供了参考依据，强调了细致的灌浆参数选择对于确保土石坝长效稳定的必要性。

通过数值模拟与实验验证，结果显示循环式灌浆对土石坝内部结构的改良与稳定性提升至关重要，尤其在极端环境条件下更为显著。研究指出不同行业应用该技术能有效规避传统灌浆技术中的局限性，尤其是适应土石坝复杂地质条件与多变水文环境的挑战。锁定适宜的灌浆压力与循环次数不仅有助于保障坝体安全，还提升了施工效率与经济性。以上成果确立了循环式灌浆作为现代水利工程中的关键技术之一，提示行业内工程技术人员在实际应用中需重视灌浆工艺的设计与参数的选取，助力工程质量提升与可持续发展。

5.2 循环式灌浆技术的实际应用指南

循环式灌浆技术在土石坝工程中的实际应用需要精确的施工计划和严格的技术控制。施工过程中必须选择适合的灌浆材料，其性能直接影响灌浆效果。常见的

灌浆材料包括水泥基、化学基材料，需要根据具体土石坝的地质条件进行选择，以确保材料的附着力和耐久性。操作过程中，专家建议严格遵循灌浆顺序和流程，以确保浆体能够均匀分布并渗透至土石坝深层。在灌浆参数方面，压力和循环次数是关键因素。适当的灌浆压力能够有效减少裂隙水通道，提高浆体填充效果，而循环次数的确定则需考虑坝体的渗透系数和裂隙发育程度，以便达到优化的增强效果。施工管理中，应通过实时监测和测量孔隙水压力及坝体稳定性，来调整灌浆参数。在应用中，经验表明，针对不同类型的土石坝，进行现场试验以验证数值模拟结果是很有必要的。这不仅有助于提高施工精准度，还能优化技术参数，确保土石坝的长期稳定性和安全性。该技术在应用中展现出广泛的适应性与有效性，为水利工程的安全运行提供了切实的保障。

6 结束语

本研究通过数值模拟和实地试验，探讨了循环式灌浆技术在提升土石坝稳定性方面的应用与效果。结果表明，该技术能显著增强土石坝的抗剪强度和抗渗性，特别是在裂隙多、渗透性高的坝体中，通过优化灌浆参数，可以有效降低孔隙水压力，提高整体稳定性。同时，研究强调了灌浆压力和循环次数的适当选择对于确保灌浆效果和坝体稳定性的重要性。不过，研究也存在一定局限性，如数值模拟的简化假设和实地试验的环境因素影响。未来工作将围绕优化灌浆参数、探索环境因素影响、以及循环式灌浆技术与其他工程加固手段的联用等方面展开。本研究成果为土石坝循环式灌浆工艺的设计与施工提供了理论支持，有助于提升水利工程的安全性和稳定性。

参考文献

- [1] 刘星. 土石坝坝坡抗滑稳定性分析及加固设计探讨 [J]. 产城, 2022, (04): 0179-0181.
- [2] 徐宏志. 土石坝坝坡抗滑稳定性分析及加固设计 [J]. 砖瓦世界, 2023, (16): 58-60.
- [3] 马超. 库水位波动对土石坝稳定性影响研究 [J]. 水利科学与寒区工程, 2023, 6(07): 26-29.
- [4] 郑义俊. 降雨对土石坝坝坡稳定性分析 [J]. 水利技术监督, 2023, (04): 229-232.

作者简介：王军芳，出生年月：1974.01，性别：男，民族：汉，河北元氏人，学历：大专，职称：助理工程师，现就职单位：河北省水利工程局集团有限公司，研究方向：水利水电工程施工。