

## 4 工艺影响因素分析与工程实例

### 4.1 施工工艺影响试验

为从源头控制水利工程锚杆施工质量,设计正交试验,研究水灰比(W/C)和注浆压力(P)对注浆密实度的影响。

水灰比(W/C):水灰比过大会导致浆液离析、泌水,在锚杆上部形成空洞,或在围岩裂隙发育处造成浆液过度流失,波形上表现为多处小幅值反射或整体信号衰减异常;水灰比过小则导致浆液流动性差,易堵塞注浆管,造成长段缺陷。经试验,得出适用于该电站地质条件的M30水泥砂浆最优水灰比为0.38。

注浆压力(P):抽水蓄能电站输水隧洞和地下厂房围岩条件多变。注浆压力不足,无法将浆液充分填充至钻孔周边岩体裂隙及杆体周边,易在杆体上部形成空洞;压力过高则可能劈裂岩体,造成浆液流失。试验确定最佳注浆压力范围为0.5~0.8 MPa,并建议根据围岩类别进行微调。

清孔质量:钻孔残留岩粉、碎屑会形成软弱夹层,严重影响砂浆与孔壁粘结,波形上表现为杆底反射信号微弱或杆身多处异常反射。对于水利工程长期处于水压和反复荷载作用的特点,严格的清孔工艺是保证锚杆耐久性的前提。

### 4.2 工程实例

验证在甘肃某抽水蓄能电站地下厂房拱顶的系统锚杆施工中,设计锚杆长度6.0m,注浆压力采用0.6MPa,水灰比为0.38。

检测实施:采用锚杆无损检测仪对随机抽取的25根锚杆进行检测,检测流程包括波速校准、信号采集、频率分析和缺陷定位,确保数据准确性和工程安全性。引入量化判别参数,对判别结果进行校正。

典型缺陷判别:对其中一根波形异常的锚杆进行分析。波形显示在距杆顶约1.8m处存在一同向反射波。利用建立的量化指标,估算该缺陷长度约为0.5m,反射系数较大,初步判别为空洞缺陷。频谱分析显示该反射波高频成分保留较好,支持空洞判别。通过信号频率成分分析,识别注浆体内部缺陷引起的频率偏移,为密实度评估提供频谱依据。

验证与处理:经与施工记录核对,该部位注浆时曾因设备原因导致注浆短暂中断。基于量化判别结果,判断该缺陷对顶拱局部稳定构成潜在风险,对该锚杆进行补打处理。复检波形显示反射信号显著减弱,密实度达到设计要求。

工艺优化效果:针对发现问题,项目指挥部采纳本研究建议,在全工区强化注浆设备稳定性监控,严格执行确定的水灰比和压力参数,有效提升了后续主厂房及压力管道等关键部位锚杆施工一次合格率。

## 5 结语

结合甘肃某抽水蓄能电站工程实践,通过系统的模拟试验与理论分析,在锚杆注浆密实度无损检测精量化判别方面取得以下主要结论:

(1)建立了融合波速 $c$ 、能量衰减系数 $\alpha$ 、主频偏移量 $f_0$ 及反射系数 $K$ 的综合量化判别指标体系,实现从定性判断到精量化评估的跨越。该体系可有效识别缺陷位置、尺寸并初步判别类型,缺陷定位精度较高,满足隐蔽工程质量精细化管理需求

(2)明确了水灰比与注浆压力等关键施工参数对注浆密实度的影响规律,给出了本站在该标段的最优工艺参数范围(水灰比0.38,注浆压力0.5~0.8MPa),为从施工源头控制质量提供了依据。

(3)工程实例证明,本研究方法不仅能精准判别缺陷,更能为修复决策和工艺优化提供直接技术支持,对提升抽水蓄能电站等大型水利工程锚杆支护的可靠性与安全性具有推广应用价值。

(4)随着人工智能、数字孪生等新技术的发展,锚杆无损检测将正朝着智能化、精准化方向迈进,对提升抽水蓄能电站等大型水利工程锚杆支护的可靠性与安全性具有重要推广应用价值。

### 参考文献

- [1] 张晓波,袁俊,何涛,等.岩壁梁锚杆饱满度无损检测分析方法研究[J].水利技术监督,2025(1):45-49.
- [2] 水电水利工程锚杆无损检测技术规程:DL/T 5424-2009[S],2009.
- [3] 水电水利工程预应力锚索施工规范:DL/T 5083-2010[S],2011.
- [4] 秦超.基于应力波传播规律的全长锚杆锚固缺陷检测试验研究[D].东北大学,2021.DOI:10.27007/d.cnki.gdbeu.2021.000881.
- [5] 滕毅,郝阳,吴宇,等.注浆锚杆锚固质量的无损检测试验研究[J].煤炭工程,2019,51(11):123-128.
- [6] 刘克勤,徐菲,王军民.锚杆锚固质量无损检测数据波形分析方法[J].能源与环保,2017,39(12):293-295.DOI:10.19389/j.cnki.1003-0506.2017.12.065.
- [7] 黄海霖.锚杆锚固参数无损检测与智能分析技术研究[D].湖南科技大学,2024.DOI:10.27738/d.cnki.ghnkd.2024.001336.
- [8] 李维树,甘国权,朱容国,等.工程锚杆注浆质量无损检测技术研究与应用[J].岩土力学,2003,(S1):189-194.DOI:10.16285/j.rsm.2003.s1.054.
- [9] 陈建荣,杨人禄,应赞,等.频域曲线的应力反射波法锚杆无损检测分析[J].江西建材,2024,(05):74-76.

# Structural Design and Safety Performance Analysis of Earth-Rock Dam Seepage Control System

Hongxin Niu

Xinjiang Hydrology and Water Resources Survey and Design Institute Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang, 830000, China

## Abstract

As an important water conservancy engineering facility, the design and safety performance analysis of the seepage prevention system in earth-rock dams is crucial. This study provides a detailed discussion on the structural design of the seepage prevention system in earth-rock dams, analyzing the different structural types of the seepage layers, material selection, and their impact on seepage control. By comparing the applicability of various seepage prevention systems, the characteristics and application scope of different seepage layers were clarified. In terms of construction technology, this paper focuses on the construction process, quality control, and performance monitoring measures of the seepage layers to ensure the stability and long-term effectiveness of the seepage prevention system. Furthermore, by considering different operating conditions of the earth-rock dam, the safety performance of the seepage prevention system is studied, and a safety evaluation method and failure mode analysis are proposed, providing theoretical and practical guidance for improving the design and construction technology of the seepage prevention system in earth-rock dams.

## Keywords

earth-rock dam; seepage prevention system; structural design; construction technology; safety performance

## 土石坝防渗体系结构与安全性能分析

牛宏新

新疆水利水电勘测设计研究院有限责任公司, 中国·新疆 乌鲁木齐 830000

## 摘要

土石坝作为重要的水利工程设施,其防渗体系的设计与安全性能分析至关重要。本研究对土石坝防渗体系的结构设计进行了详细探讨,分析了防渗层的不同结构类型、材料选择及其对渗流控制的影响。通过对不同防渗体系的适用性对比,明确了各类防渗层的特点与应用范围。针对施工技术,本文重点介绍了防渗层的施工工艺、质量控制与性能监控措施,以确保防渗体系的稳定性与长效性。进一步,结合土石坝的不同工况,研究了防渗体系的安全性能,提出了防渗体系的安全性评价方法和失效模式分析,为提升土石坝防渗体系的设计和施工技术提供理论依据和实践指导。

## 关键词

土石坝; 防渗体系; 结构设计; 施工技术; 安全性能

## 1 引言

土石坝作为一种重要的水利基础设施,在防洪、灌溉、水源调配等方面发挥着重要作用。随着水库建设规模的不断扩大,土石坝的防渗要求也愈加严格。防渗体系的设计直接影响土石坝的稳定性与安全性,因此合理的防渗设计至关重要。当前,土石坝防渗体系的设计面临着复杂的地质条件与多样化的环境要求,不同的防渗结构和材料对于坝体的稳定性具有不同的影响。因此,在土石坝的设计与建设过程中,

如何有效选择防渗层类型,优化防渗结构,并在施工过程中保证防渗层的施工质量,已成为亟待解决的技术难题。本文将从防渗体系的设计原则出发,结合实际应用案例,探讨土石坝防渗体系的设计与安全性能,旨在为土石坝的防渗设计与施工提供理论支持和技术指导。

## 2 土石坝防渗体系概述

土石坝是水利工程中常见的坝型之一,广泛应用于防洪、灌溉和水库蓄水等领域。防渗体系在土石坝的设计中扮演着至关重要的角色,它主要用于控制水流的渗漏,确保坝体的稳定性。防渗体系不仅能够有效减少水库蓄水期间的水量损失,还能防止渗透水对坝体结构造成破坏。随着土石坝建设规模的扩大与技术进步,防渗体系的设计逐渐向着高效性和长久性发展。现代防渗技术注重材料的选择与施工工艺的优化,力求实现防渗效果与经济成本之间的平衡。防渗体

【基金项目】新疆最大装机高海拔水电站工程设计关键技术研究(项目编号: SLSJY-研2423)。

【作者简介】牛宏新(1992—),男,中国甘肃会宁人,硕士,工程师,从事水工设计研究。

系的基本结构包括防渗层、排水系统和保护层等，采用多种防渗材料，具有不同的渗透控制效果，能够应对不同地质条件和水文环境的挑战。随着工程实践的深入，土石坝防渗体系逐步向着智能化、自动化方向发展，以提高其使用寿命与可靠性。

### 3 土石坝防渗体系的设计原则与要求

土石坝防渗体系的设计应遵循科学性与实际适应性相结合的原则。在设计过程中，首先需考虑坝体所处的地质条件，包括土壤的渗透性、地下水的流动情况以及坝址的稳定性。此外，防渗设计还需兼顾环境因素，如水文气候的变化和水库蓄水期的影响。防渗层的选择应根据不同地质情况、气候条件及施工技术进行合理布局，确保防渗效果的持续性和可靠性。设计中必须保证防渗层材料的适应性，要求其具有较好的抗渗性能、耐久性与经济性。与此同时，防渗体系的施工工艺要确保施工过程中的材料搭接、接缝处理等环节无疏漏，避免因施工不当导致的渗漏问题。设计还应考虑长期运行中的安全性，通过防渗层的综合效能降低坝体渗透水的风险，并预防潜在的结构破坏。总之，土石坝防渗体系设计需要综合考虑多方面因素，确保其在运行过程中具备良好的防渗效果与结构稳定性<sup>[1]</sup>。

## 4 土石坝防渗体系结构类型选择

### 4.1 土石坝防渗层结构类型

土石坝的防渗层结构类型多种多样，选择合适的结构类型对于保障坝体稳定至关重要。常见的防渗层包括粘土防渗层、混凝土防渗墙以及高分子防渗膜。粘土防渗层通常用于较为宽广的坝体，其渗透系数通常控制在 $10^{-7}$  m/s以下，能够有效减少渗漏。混凝土防渗墙多用于需要较高强度防渗性能的坝体，尤其是在具有较大水压的水库中，混凝土防渗墙具有较强的结构性和抗渗能力。高分子防渗膜以其优良的柔韧性和耐用性广泛应用于土石坝中，渗透系数可低至 $10^{-9}$  m/s，适用于土壤条件较差的区域。此外，复合防渗层结构逐渐受到青睐，其结构包括粘土层、土工布及防渗膜的复合配置，能够在多个层次上提升防渗效果。这些防渗层类型根据不同的坝址条件进行优化选择，以确保最大限度地降低水体渗透风险，图为土石坝防渗体系结构设计剖析图。

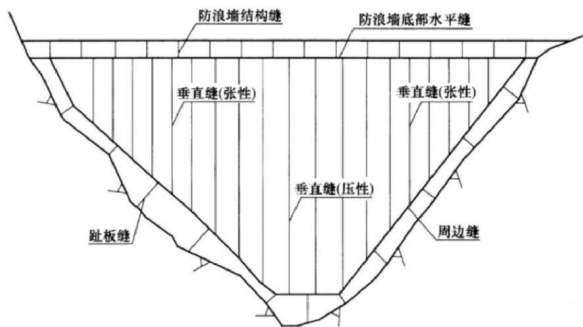


图 1 土石坝防渗体系结构设计剖析图

### 4.2 防渗层材料的选择与性能分析

防渗层材料的选择直接影响土石坝的防渗效果。在土石坝的防渗设计中，常用的防渗材料包括粘土、混凝土、土工膜以及合成材料。粘土具有较好的粘结性和防渗性，但其渗透系数在一定条件下可能升高，通常要求其含水率控制在30%-40%之间，以保持其最佳防渗性能。混凝土防渗层因其高强度与耐久性，常用于坝体中水压较大的区域，水泥与砂浆的配比影响其抗渗性能，通常其渗透系数在 $10^{-6}$  m/s以下。土工膜材料则因其具有较强的耐腐蚀性和抗渗性能，广泛应用于需要薄层防渗的土石坝中，通常渗透系数低于 $10^{-9}$  m/s。此外，合成高分子材料如土工布和聚氯乙烯膜在提高柔韧性和耐久性方面表现突出，它们的使用提高了防渗层的整体性能，尤其是在施工难度较大的区域。选择合适的材料取决于坝体的环境、预算以及施工难度等因素。

### 4.3 不同防渗体系的适用性对比

土石坝的防渗体系根据不同地质条件和使用需求的差异，可分为多种类型。在选择防渗体系时，需要考虑坝体的地质特性、地下水流量以及工程经济性等因素。例如，在地下水流动较快、土壤渗透性较大的地区，通常选择高分子防渗膜或混凝土防渗墙，以提供更高的防渗效能。高分子防渗膜在渗透系数控制上较为出色，适合在较大水库中使用，而其施工简便性也是其优势之一。在地质条件较为稳定、土壤渗透性较低的地区，则可采用粘土防渗层，粘土材料相对经济且在适当含水率下能提供良好的防渗效果。对于需要承受较大水压的坝体，混凝土防渗墙由于其强度较高，更加适用于高水位区域<sup>[2]</sup>。复合防渗体系则适用于地质复杂的区域，其多层次的结构能够有效提高防渗性能。每种防渗体系都有其优缺点，因此需要根据具体坝址的条件，选择最适合的防渗方案。

## 5 土石坝防渗体系的施工技术与质量控制

### 5.1 防渗层施工工艺

土石坝防渗层的施工工艺对于防渗效果的实现至关重要。在施工过程中，防渗层材料的选择与铺设方式要根据设计要求严格控制。对于粘土防渗层，首先需要施工现场进行充分的地质勘察，确保粘土层的厚度和密实度达到设计标准。施工时，粘土防渗层需要分层铺设，每层的厚度应控制在30-50cm之间，采用机械夯实，保证每一层的密实性和防渗效果。混凝土防渗墙的施工需要先进行基础处理，确保土壤稳定后，再浇筑混凝土。施工过程中，必须严格控制混凝土的水灰比，确保混凝土的强度达到设计要求。对于土工膜材料，施工时要求膜材料平整无折叠，并进行热接缝或焊接，确保接缝处的密封性。防渗层的施工质量直接关系到坝体的稳定性和水库的安全，因此施工过程中的每一个细节都不能忽视。

### 5.2 施工过程中防渗性能的监控

防渗性能的监控是保证土石坝防渗体系有效性的关键。