

土石坝渗流问题的数值模拟与加固措施研究

黄 强 张宏勇

广西珠委南宁勘测设计院有限公司 广西 南宁 530007

摘 要: 本文聚焦于土石坝渗流问题,通过数值模拟方法深入分析土石坝渗流特性。首先阐述土石坝渗流的基本概念、危害及研究意义,接着介绍常用的数值模拟方法,重点运用有限元法对典型土石坝进行渗流数值模拟,分析不同工况下的渗流场分布规律。基于模拟结果,探讨土石坝渗流破坏的主要形式与成因,进而提出针对性的加固措施,并通过模拟验证加固效果。研究表明,数值模拟为土石坝渗流问题研究提供了有效手段,合理加固措施可显著提高土石坝的抗渗稳定性。

关键词: 土石坝; 渗流问题; 数值模拟; 加固措施

1 引言

土石坝作为水利工程中广泛应用的一种坝型,具有取材方便、施工简单、造价低廉等优点。然而,土石坝的渗流问题一直是影响其安全运行的关键因素之一。渗流不仅会导致水库水量损失,还可能引发土石坝的渗透变形、滑坡等破坏,严重威胁大坝及下游地区人民生命财产安全。传统的土石坝渗流研究主要依赖于现场观测和物理模型试验,但这些方法存在周期长、成本高、受场地和边界条件限制等不足。随着计算机技术的飞速发展,数值模拟方法在土石坝渗流问题研究中得到了广泛应用。数值模拟具有成本低、周期短、可模拟复杂边界条件等优点,能够为土石坝的设计、施工和运行管理提供科学依据。本文旨在通过数值模拟方法深入研究土石坝渗流问题,分析渗流场分布规律,探讨渗流破坏成因,并提出有效的加固措施,以提高土石坝的抗渗稳定性和安全性。

2 土石坝渗流问题概述

2.1 土石坝渗流的基本概念

土石坝渗流是指水在土石坝坝体及坝基中的流动现象。当水库水位上升时,水会在水头差的作用下通过坝体和坝基的孔隙、裂隙等通道向下游渗透^[1]。渗流过程中,水会对土石颗粒产生拖曳力,当拖曳力超过土石颗粒之间的抗剪强度时,就会引发渗透变形,如管涌、流土等。

2.2 土石坝渗流的危害

土石坝渗流危害主要体现在以下几个方面:(1)水量损失:渗流会导致水库水量减少,降低水库的灌溉、发电等效益。(2)渗透变形:严重的渗流可能引发管涌、流土等渗透变形,破坏坝体结构,导致大坝失事。(3)滑坡:渗流会使坝体土体的含水量增加,抗剪强度

降低,从而增加坝体滑坡的风险。(4)侵蚀破坏:渗流携带的泥沙会对坝体和坝基产生侵蚀作用,进一步削弱大坝的稳定性。

2.3 研究土石坝渗流问题的意义

研究土石坝渗流问题对于保障大坝安全运行、提高水资源利用效率具有重要意义。通过深入研究土石坝渗流特性,可以准确预测渗流场分布,及时发现潜在的渗流隐患,为土石坝的设计、施工和运行管理提供科学依据。同时,合理的加固措施可以有效提高土石坝的抗渗稳定性,延长大坝的使用寿命,减少维修成本。

3 土石坝渗流数值模拟方法

3.1 常用数值模拟方法介绍

目前,常用的土石坝渗流数值模拟方法主要有有限差分法、有限元法和边界元法等。(1)有限差分法:将求解区域划分为差分网格,用差分方程近似代替微分方程,通过求解差分方程组得到数值解。有限差分法原理简单,计算效率较高,但对于复杂边界条件的处理能力较弱。(2)有限元法:将求解区域离散为有限个单元,在每个单元内构造插值函数,通过变分原理或加权余量法将微分方程转化为代数方程组进行求解。有限元法具有适应性强、精度高、可处理复杂边界条件等优点,在土石坝渗流问题研究中得到了广泛应用。(3)边界元法:只在求解区域的边界上进行离散和插值,将边界积分方程转化为代数方程组求解。边界元法具有降维、计算量小等优点,但对于非均质问题和非线性问题处理能力有限。

3.2 有限元法基本原理

有限元法的基本思想是将连续的求解区域离散为有限个单元,这些单元通过节点相互连接。在每个单元内,假设位移或场函数呈某种简单的函数分布(如线性

分布、二次分布等),通过单元分析得到单元刚度矩阵,再将所有单元刚度矩阵组装成整体刚度矩阵,最后根据边界条件求解整体刚度矩阵对应的线性方程组,得到节点位移或场函数的数值解^[2]。在土石坝渗流问题中,有限元法通常以水头为未知量,通过建立渗流微分方程的弱形式,利用有限元离散和变分原理将渗流问题转化为线性方程组的求解问题。

3.3 数值模拟软件介绍

目前,市场上有许多用于土石坝渗流数值模拟的软件,如GeoStudio、ADINA、ABAQUS等。本文选用GeoStudio软件中的SEEP/W模块进行土石坝渗流数值模拟。SEEP/W是一款专业的渗流分析软件,具有强大的前后处理功能和丰富的材料模型库,能够准确模拟各种复杂条件下的渗流问题。

4 土石坝渗流数值模拟分析

4.1 工程概况

选取某典型土石坝作为研究对象,该坝为某水库主坝,其建筑物级别为3级,设计洪水标准为100年一遇,校核洪水标准为1000年一遇。大坝坝高45.80m,坝顶长度320m,坝体主要由黏土心墙和堆石坝壳组成,坝基为砂砾石层。水库正常蓄水位为191.50m,设计洪水位为193.23m,校核洪水位为194.27m。

4.2 模型建立与参数选取

(1)几何模型建立:根据大坝的实际尺寸和地形地貌,利用GeoStudio软件建立二维渗流数值模型。模型上边界为水库水位,下边界为不透水边界,左右两侧为定水头边界。(2)材料参数选取:根据室内土工试验和现场试验结果,确定坝体和坝基各材料的渗透系数、给水度等渗流参数。黏土心墙的渗透系数为 $1 \times 10^{-7} \text{cm/s}$,堆石坝壳的渗透系数为 $1 \times 10^{-3} \text{cm/s}$,砂砾石坝基的渗透系数为 $3 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ 。

4.3 不同工况下的渗流数值模拟

(1)正常蓄水位工况:模拟水库在正常蓄水位191.50m时的渗流场分布。模拟结果表明,坝体浸润线呈抛物线形状,黏土心墙起到了良好的防渗作用,坝体渗透坡降较小,未出现渗透变形隐患。(2)设计洪水位工况:模拟水库在设计洪水位193.23m时的渗流场分布。与设计洪水位相比,坝体浸润线有所抬高,坝基渗透流量有所增加,但坝体和坝基的渗透坡降仍在允许范围内。(3)校核洪水位工况:模拟水库在校核洪水位194.27m时的渗流场分布。校核洪水位下,坝体浸润线进一步抬高,坝基部分区域的渗透坡降接近允许值,存在一定的渗透变形风险。

4.4 模拟结果分析

通过对不同工况下的渗流数值模拟结果进行分析,可以得出以下结论:水库水位对土石坝渗流场分布有显著影响,水位越高,坝体浸润线越高,坝基渗透流量越大。黏土心墙是土石坝防渗的关键部位,其渗透系数的大小直接影响坝体的渗流特性。合理的黏土心墙设计可以有效降低坝体浸润线,减小坝基渗透流量。在校核洪水水位等极端工况下,土石坝坝基部分区域可能出现渗透变形隐患,需要采取相应的加固措施。

5 土石坝渗流破坏成因分析

5.1 渗流破坏的主要形式

土石坝渗流破坏的主要形式包括管涌、流土和接触冲刷等。(1)管涌:在渗流作用下,土体中的细颗粒被水流带走,形成管状通道的现象。管涌通常发生在渗透坡降较大的砂砾石坝基或坝体填料中^[3]。(2)流土:在渗流作用下,土体中的颗粒群同时发生移动的现象。流土多发生在黏性土坝基或坝体与坝基的接触面上。(3)接触冲刷:当渗流沿着两种不同土层的接触面流动时,将细颗粒带走,导致接触面处土体被冲刷破坏的现象。

5.2 渗流破坏的成因分析

土石坝渗流破坏的成因主要包括以下几个方面:(1)地质条件:坝基的地质条件对渗流破坏有重要影响。如坝基存在软弱夹层、透水层等不良地质条件时,容易引发渗流破坏。(2)土料性质:坝体和坝基土料的渗透系数、颗粒级配等性质直接影响渗流特性。渗透系数过大或颗粒级配不良的土料容易发生管涌等渗透变形。(3)水力条件:水库水位的变化、渗流路径的长短等水力条件对渗流破坏也有重要影响。水位骤降、渗流路径短等情况会增加渗透坡降,加大渗流破坏的风险。(4)施工质量:施工质量是影响土石坝抗渗稳定性的关键因素之一。如坝体填筑不密实、防渗体施工质量差等都会导致渗流通道的形成,引发渗流破坏。

6 土石坝加固措施研究

6.1 常用加固措施介绍

针对土石坝渗流问题,常用的加固措施包括防渗加固、排水减压和反滤保护等。

6.1.1 防渗加固

防渗加固是解决土石坝渗流问题的关键措施之一,其核心原理是通过在坝体或坝基中设置防渗体,构建一道相对不透水的屏障,从而减少渗流量,降低浸润线,提高坝体的抗渗稳定性。(1)黏土斜墙:这是一种较为传统的防渗结构,通常在坝体上游面铺设一层较厚的黏土,形成斜墙。黏土具有良好的防渗性能,能够有效阻

挡水流的渗透。在施工过程中,需严格控制黏土的质量和压实度,确保斜墙的防渗效果。同时,要注意斜墙与坝体的连接处理,避免出现渗漏通道。(2)混凝土防渗墙:利用专门的成槽设备,在坝体或坝基中挖掘出一定深度的槽孔,然后在槽孔内浇筑混凝土,形成连续的防渗墙体。混凝土防渗墙具有强度高、防渗性能好、适应性强等优点,可适用于各种复杂的地质条件。它不仅能够有效截断渗流路径,还能增强坝体和坝基的整体稳定性^[4]。(3)土工膜:土工膜是一种新型的防渗材料,具有质轻、柔韧性好、防渗性能优异等特点。在土石坝防渗加固中,可将土工膜铺设在坝体表面或内部,形成防渗层。土工膜施工相对简便,可大幅缩短工期,且对坝体的扰动较小。同时,它还能与坝体材料良好结合,提高坝体的整体防渗能力。

6.1.2 排水减压

排水减压措施的主要作用是将渗流水排出坝外,降低坝体和坝基的渗透坡降,防止渗透变形,保障土石坝的安全运行。(1)棱体排水:在坝脚处用块石堆筑成棱体形状的排水设施。棱体排水不仅能排除坝体和坝基的渗水,还可降低浸润线,增加坝体的稳定性。同时,棱体还能起到保护坝脚的作用,防止水流对坝脚的冲刷。

(2)褥垫排水:在坝基表面铺设一层由块石或卵石组成的褥垫,将渗水引入排水沟排出。褥垫排水适用于地基透水性较强的情况,能有效降低坝基的渗透压力,防止坝基发生渗透变形。(3)排水井:在坝体内或坝基中设置排水井,通过井内的排水管将渗水抽出坝外。排水井具有排水能力强、适应性强等优点,可根据实际情况灵活布置。

6.1.3 反滤保护

在渗流出口处设置反滤层是防止土体颗粒被水流带走、保护渗流出口处土体稳定的重要措施。(1)砂石反滤层:砂石反滤层通常由多层不同粒径的砂石组成,按照从细到粗的顺序依次铺设。其作用原理是允许渗流水通过,同时阻止土体颗粒的移动。在铺设砂石反滤层时,要严格控制各层砂石的粒径和厚度,确保反滤层的质量。例如,在一些土石坝的护坡加固工程中,在渗流出口处设置砂石反滤层,有效防止了土体颗粒的流失,保护了护坡的稳定。(2)土工布反滤层:土工布是一种新型的土工合成材料,具有良好的透水性和反滤性能。它可以根据设计要求进行裁剪和铺设,施工方便快捷。土工布反滤层能够有效地阻挡土体颗粒,同时允许水分

自由通过,起到保护土体的作用。在一些水利工程中,采用土工布反滤层替代传统的砂石反滤层,不仅提高了施工效率,还降低了工程成本。

6.2 加固方案设计与模拟验证

根据前文对土石坝渗流问题的分析结果,设计以下加固方案:(1)防渗加固:在坝基中采用混凝土防渗墙进行防渗处理,防渗墙深度深入相对不透水层2m,厚度为0.8m。(2)排水减压:在下游坝脚处设置棱体排水,棱体高度为3m,顶宽为2m,坡比为1:1.5。(3)反滤保护:在棱体排水与坝体和坝基的接触面上设置两层砂石反滤层,反滤层粒径从上到下逐渐增大。利用GeoStudio软件对加固后的土石坝进行渗流数值模拟,模拟结果表明,加固后坝体浸润线明显降低,坝基渗透流量显著减小,坝体和坝基的渗透坡降均远小于允许值,加固效果显著。

6.3 加固措施效果评估

通过对加固前后土石坝渗流数值模拟结果的对比分析,评估加固措施的效果。评估指标主要包括坝体浸润线高度、坝基渗透流量、渗透坡降等。评估结果表明,所采用的加固措施能够有效提高土石坝的抗渗稳定性,降低渗流破坏的风险,满足工程安全要求。

结语

本文通过数值模拟深入研究土石坝渗流问题,得出结论:数值模拟能准确模拟不同工况下渗流场分布,为研究提供有效手段;水库水位、地质条件等因素对渗流特性影响重大,极端工况下土石坝或有渗透变形隐患;合理加固措施可提高抗渗稳定性、降低渗流破坏风险。不过,研究仍有不足,本文仅考虑二维渗流,未来需开展三维研究;未考虑材料非线性和各向异性,未来要研究其对渗流场影响;加固措施效果多经数值模拟验证,未来应结合实际工程现场试验。

参考文献

- [1]赵海燕.土石坝修复治理渗流和稳定性研究[J].水利科技与经济,2025,31(08):96-101.
- [2]王冰,刘猛,朱家辉.基于线性回归模型的黄前水库土石坝渗流稳定性分析[J].四川水泥,2025,(06):48-50.
- [3]胡明庭,徐金英.土石坝渗流安全稳定分析[J].浙江水利科技,2025,53(02):65-68.
- [4]李恒.渗流和应力耦合作用下加固土石坝的稳定性分析[J].地下水,2025,47(02):238-240.