

基于结构有限元分析的水闸健康监测 及除险加固设计探讨

邓国林，撒招练，易伟

昭通市水利水电勘测设计研究院，云南 昭通 657000

DOI:10.61369/WCEST.2026020020

摘 要： 水闸作为水利工程的重要组成部分，在水流和水位控制方面发挥了重要作用，其稳定运行和系统管理是提高水资源利用效率的关键。但闸墩裂缝等一系列质量问题对水闸的安全稳定运行影响显著，强化健康监测并优化除险加固设计尤为重要。对此，本文结合某水闸工程实例，引入有限元分析软件构建仿真模型，对水闸结构参数进行系统收集与分析，重点探究裂缝的成因，提高健康监测效能，为水闸的除险加固设计提供可靠参考，提高工程运维管理水平。

关 键 词： 水闸；有限元分析；健康监测；除险加固设计

Discussion on Sluice Health Monitoring and Reinforcement Design Based on Structural Finite Element Analysis

Deng Guolin, Sa Zhaolian, Yi Wei

Zhaotong Water Resources and Hydropower Survey, Design and Research Institute, Zhaotong, Yunnan 657000

Abstract： As an important part of water conservancy project, sluice plays an important role in flow and water level control. Its stable operation and system management are the key to improve the efficiency of water resources utilization. However, a series of quality problems such as pier cracks have a significant impact on the safe and stable operation of the sluice, so it is particularly important to strengthen health monitoring and optimize the reinforcement design. In this regard, combined with a sluice project, this paper introduces the finite element analysis software to build a simulation model, systematically collects and analyzes the structural parameters of the sluice, focuses on the causes of cracks, improves the health monitoring efficiency, provides a reliable reference for the reinforcement design of the sluice, and improves the engineering operation and maintenance management level.

Keywords： sluice; finite element analysis; health monitoring; danger removal and reinforcement design

引言

水闸在水利工程体系中占据重要地位，兼备防洪、灌溉及航运等功能，作为维系社会经济稳定发展的关键基础设施，保障工程稳定运行具有重要现实意义。裂缝是工程施工建设和后期投入使用环节的常见质量问题，对结构可靠性和工程使用寿命影响明显。水闸的闸墩裂缝问题多出现在浇筑后，使得渗漏可能性提高，且导致裂缝的原因复杂，如温度、混凝土性能等，加强工程健康监测尤为必要。有限元分析（FEA，Finite Element Analysis）是一种前沿模拟分析技术，具体指通过采用近似数学的方法模拟真实物理系统，可以与CAD软件等建模技术无缝衔接，具备强大的网格处理性能，目前在机械制造、材料加工、土木建筑等诸多领域应用广泛，在项目设计优化方面作用显著。但该项技术在水闸工程健康监测和设计中的应用研究较少，其应用价值仍有待明确。本文结合工程实例，在全面采集健康监测数据信息的基础上，系统探究裂缝成因，并引入有限元分析软件，对结构设计优化效果进行分析。

一、工程概况及裂缝分析

某水闸项目位于某市运河流域范围内，是当地重要的水利工程项目，承担区域防洪、灌溉及水资源调配等重任。闸墩是水闸项目的关键部件，主要用于支撑闸门等，使两岸稳定连接的为边墩，位于中间部位的为中墩。其作为重要部件，承担水闸整体结

构的重量，闸墩质量对水闸结构的综合性能有直接影响。本项目在闸墩的结构使用方面，以钢筋混凝土结构为主，严格按照相关规范标准进行结构设计，确保其能够抵御一定量级的洪水。同时，结合水流条件和闸墩的综合规模明确设计高度、宽度等参数，闸墩的结构形式主要为重力式，底部和底板有效固结，上部为自由端。另外，闸墩的两侧设有门槽，为平面闸门安装提供便

利,并实现对水流通过的有效控制。

在工程项目长期运行阶段,受一系列内外部因素影响,水闸闸墩的裂缝问题愈加凸显。进一步观察裂缝的特征,其主要分布于闸墩的迎水面和侧向表面,走向表现为垂直于底板和水流方向,一些裂缝则延伸至门槽边缘部位。另外,现场调查结果显示,闸墩下游处裂缝表现为向下倾斜,经测量倾斜角约 45° ,具有显著的斜向延伸特点,钻孔时可见渗出物,呈白色。进一步分析原因,受环境温度变化、地基沉降等一系列因素影响,导致闸墩裂缝问题凸显。另外,水闸底板多数部位和闸墩有效连接,整体受力结构相对复杂,底板尺寸、荷载条件等一系列因素均会产生影响,并且和地基变形密切相关^[1]。这一问题的发生不仅直接影响闸墩的外观,同时对结构性能造成严重威胁。为了加强对工程项目的运维管理,全面分析裂缝成因并优化加固设计方案,本项目引入有限元分析软件,在全面收集项目健康数据的基础上,系统分析裂缝成因,运用专业软件分析加固设计方案的应用效果。

二、基于结构元分析的健康监测与加固设计

(一) 健康数据监测

为了全面掌握闸墩的健康状况,建立了包含多种参数的监测系统。监测的内容为裂缝监测、应变监测、温度监测、水位监测。裂缝监测使用高精度裂缝计,可以实时测量裂缝宽度的变化,精度达到 0.01mm ;应变监测采用振弦式应变计,可以准确地反映混凝土内部的应变状态,测量范围广,稳定性好;温度监测采用数字式温度传感器,可以实时得到闸墩混凝土内部的温度分布;水位监测采用压力式水位计,可以准确测量闸前水位的变化。

监测点布置要全面覆盖,突出重点。对于已经出现的裂缝,在裂缝宽度较大和延伸方向的关键位置布置裂缝计,来实时跟踪裂缝的发展情况。应变监测点主要布置在闸墩迎水面、侧向表面、门槽附近,这些部位是应力集中区,容易出现应力异常造成裂缝。温度监测点在闸墩的不同高度、深度处均匀布置,以获得混凝土内部温度梯度信息。水位监测点设在闸前合适位置,保证能真实反映闸前水位变化对闸墩的作用^[2]。

监测系统采用自动化数据采集的方式,数据采集仪可以对各个监测参数进行实时的数据采集,然后将数据传送到监控中心进行存储和分析。用专业的数据分析软件处理采集到的数据,绘制裂缝宽度变化曲线、应变时程曲线、温度分布云图等,直观地展示闸墩的健康状况。通过对历史数据进行分析发现闸墩裂缝宽度变化同温度变化、水位变化、混凝土应变状态之间存在着一定的关系。温度突然下降时裂缝宽度明显增大,闸前水位升高时闸墩迎水面应变增大,裂缝发展速度加快。

(二) 水闸混凝土应力场分析

为了研究闸墩混凝土的应力场分布,使用有限元结构分析软件建立闸墩的三维有限元模型。模型严格按照闸墩的实际尺寸、结构形式进行建模,考虑混凝土材料的非线性特性,采用合适的

本构模型来描述混凝土在不同应力状态下力学行为。另外对闸墩和闸底板连接处、门槽等重要部位进行精细化建模,使模型较好地反映闸墩实际受力情况。

完成模型构建后,为模型添加结构自重、水压力、温度荷载等关键参数。结构自重根据混凝土密度、体积计算得出,均匀施加到闸墩的各个部位。水压力根据闸前水位变化情况用静水压力公式计算,施加在闸墩迎水面。温度荷载考虑混凝土内部温度梯度的影响,根据健康监测数据得到温度分布情况,把温度场作为体荷载施加到模型上。边界条件上闸墩底部与闸底板固结,约束其所有方向的位移;闸墩顶部为自由端,不施加约束;两侧根据实际情况设置相应的约束条件,模拟闸墩在实际工程中受力状态。

采用有限元计算得到闸墩混凝土在各种工况下应力场分布云图。分析可知闸墩应力分布有明显的区域性。迎水面受水压力作用,混凝土承受较大的压应力,压应力随水位升高而增大。由于温度变化和混凝土收缩的影响,在侧向表面容易产生拉应力集中现象,在门槽附近和闸墩、闸底板的接缝处拉应力值最大。当拉应力大于混凝土的抗拉强度时就会产生裂缝,并使裂缝不断扩大。另外温度梯度引起的应力也是造成闸墩裂缝的重要因素之一,在温度骤降的时候,闸墩表面混凝土的收缩受到内部混凝土的约束,产生很大的拉应力,从而加速了裂缝的发展。因此,通过有限元结构模型可知温度应力是水闸结构的主要影响因素,是导致裂缝问题的主要原因。具体而言,光照辐射强度、当地环境温度等复杂的环境因素以及在内部结构本身温度影响下,可导致闸墩外露部位和水下部位出现明显的温度梯度变化。同时,长期与短期温度变化对闸墩温度应力分布的影响有所差异,在施工建设阶段,其应力变化相对明显,稳定性不佳,所以需要重点探究水闸运行阶段的温度应力特征^[3]。在长期温度影响方面,由于当地全年气温变化呈现稳定趋势,对地基结构的影响通常在混凝土强度区间内,具有可控性,所以短期温度是关键影响因素。有限元分析软件具有完备的功能模块,能够满足高精度模型的建立和处理等需要,在建筑工程中的结构优化、施工模拟等方面适用性强。在实际应用过程中,需要根据裂缝性质合理选择系统,全面采集项目健康数据,包括材料性能、结构强度等,运用软件功能构建高精度模型进行分析。

(三) 开裂工况设计及监测分析

根据健康监测数据和应力场分析结果来设计出各种可能造成闸墩开裂的工况。主要是温度骤降工况、高水位工况、温度与水位联合作用工况。温度骤降工况模拟寒潮袭击等极端天气条件下闸墩表面温度迅速降低的情况,在模型中施加较大的温度梯度来模拟。高水位工况是闸前水位达到设计洪水位时,闸墩受到较大水压力的工况^[4]。温度和水位联合作用工况考虑的是温度变化和水位变化对闸墩的共同影响,更接近实际工程中复杂的受力状态。具体监测结果见图1。

在预设的开裂工况下对闸墩进行实时监测。用仪器监测裂缝宽度的变化,用应变计监测混凝土内部的应变状态。根据监测结果可知,在不同的工况下闸墩的裂缝发展情况有所差异。温度骤

降时裂缝宽度迅速增大,在闸墩表面和门槽附近裂缝发展速度更快。高水位工况下闸墩迎水面应变增大,但是裂缝宽度变化不大。温度和水位同时作用的时候,裂缝的发展最为明显,裂缝宽度、应变值均达到最大值,说明温度、水位联合效应对闸墩的破坏作用最大。

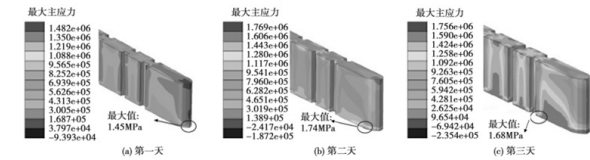


图1 闸墩拉应力监测情况

三、水闸健康监测及加固设计结果分析

短期温度应力变化为闸墩裂缝问题的发生提供了良好环境条件,同时受地基沉降因素影响,加快裂缝发展进程,使裂缝的长度与宽度增加。所以在加固设计方案优化方面,应在尽量不改变施工量、不影响结构力学的基础上进行设计。根据闸墩裂缝问题、健康监测数据和有限元分析结果来制定出一套综合的加固设计方案。主要有表面封闭处理、裂缝灌浆加固、增设预应力锚索和增大混凝土厚度等几种方法。表面封闭处理用环氧树脂砂浆对闸墩表面的裂缝进行封闭,防止水分、有害物质渗入裂缝内部,减缓裂缝的发展速度。裂缝灌浆加固是采用高压灌浆的方式,将环氧树脂灌浆材料注入裂缝中,填充到裂缝的空隙当中,从而提高裂缝部位的混凝土强度以及整体性。在闸墩关键部位增设预应力锚索,施加预应力改善闸墩应力状态,减小拉应力集中,提高闸墩抗裂能力。增加混凝土厚度在闸墩迎水面及侧向表面增加一定厚度的混凝土,提高闸墩的承载能力及抗裂性能。

为了检验加固设计的效果,在加固后重新建立闸墩的有限元模型进行分析。在模型中考虑加固措施的影响,即预应力锚索的预应力作用、新拌混凝土的力学性能等。通过有限元计算得到加固后闸墩的应力场分布及变形情况。加固之后闸墩应力状态明显得到改善,拉应力集中现象被有效地缓解。温度骤降工况、高水位工况下闸墩裂缝发展被控制,裂缝宽度、应变值均减小。增设

预应力锚索、增加混凝土厚度等加固措施,明显改善了闸墩的抗裂性能和承载能力,加固设计达到了预期的目的^[5]。

另外,加固工程完成后继续对闸墩进行健康监测。通过对比加固前后监测数据来检验加固设计的效果。根据监测数据可知,加固后闸墩的裂缝宽度基本不变,没有明显的发展趋势(见图2)。应变监测数据显示闸墩内部应变状态有所改善,拉应变值减小,证明加固措施提高了闸墩的结构强度和稳定性。同时健康监测系统可以及时发现闸墩运行中出现的新问题,给后续的维护管理提供依据。

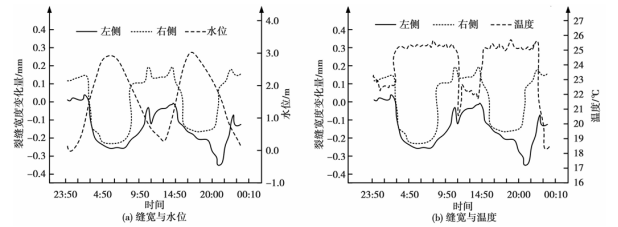


图2 裂缝宽度与水位、温度的变化曲线

四、结语

健康监测是保障水闸工程安全稳定运行的关键基础,而除险加固设计则是进一步保障项目安全运行、延长使用寿命的重要举措。本文结合工程实例,引入有限元分析软件进行设计方案的优化,通过结果可知,方案中最大拉应力分布于闸墩和灌浆材料表层部位,同环境温度具有高度关联性。在除险加固设计方案优化方面,基于对裂缝成因的系统分析,借助有限元结构分析软件模拟不同工况条件下闸墩的应力场分布特征,通过采取表面封闭、调节混凝土厚度等一系列措施,对改善闸墩应力状态的作用明显,强化其抗裂性能与承载性能。因此,在项目健康数据监测和加固设计优化中应用结构有限元分析技术的效果确切,能够提高项目运维管理水平,保障水闸的安全稳定运行。另外,随着科技的发展与进步,需要持续完善软件功能模块,注重技术创新,使其更准确地模拟复杂工况条件下的闸墩力学性能,为工程稳定运行提供有力支持。

参考文献

[1] 叶礼坡,汪力,黄盛辉.基于监测资料和模糊综合评判的水闸安全状态研究[J].云南水力发电,2025,41(6):157-162.
[2] 周松.水闸闸门卡阻自动监测保护系统的研究与应用[J].云南水力发电,2025,41(11):52-56.
[3] 李伟鹏,赵晨晨,朱建传,等.苏州城市中心防洪工程水闸除险加固设计研究[J].水利科技与经济,2025,31(1):84-88.
[4] 虞世华,杜锦智.金塔县平交拦水闸除险加固设计方案选择[J].水利技术监督,2020(4):207-211,227.
[5] 李华卢.小型水闸加固技术及有限元分析[J].中国新技术新产品,2024(21):105-107.