

DOI: 10.3969/j.issn.1004-4701.2021.02-04

基于检测数据的弧形钢闸门支臂可靠度分析

胡 强^{1,2}, 王 姣^{1,2}, 朱振寰³

(1. 江西省水利科学院, 江西 南昌, 330029; 2. 江西省水工安全工程技术研究中心, 江西 南昌, 330029;
3. 中铁水利水电规划设计集团有限公司, 江西 南昌, 330029)

摘 要: 锈蚀导致钢闸门的静力和动力特性发生变化的同时, 改变了闸门体系的可靠度. 为研究锈蚀对钢闸门可靠度的影响, 本文基于现场检测数据分析了闸门锈蚀特性, 采用三维有限元方法分析弧形钢闸门支臂应力, 并计算了支臂的可靠度. 结果表明, 本文提出的方法可准确地计算钢闸门支臂的可靠度, 以判定闸门的安全性.

关键词: 检测数据; 弧形闸门; 支臂; 可靠度分析

中图分类号: TV663 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4701(2021)02-0101-04

0 引 言

弧形钢闸门广泛地应用于水利水电工程, 在防洪、灌溉及发电等方面发挥着重要作用^[1]. 锈蚀是钢闸门普遍存在的现象, 由于受锈蚀的影响, 钢构件的截面尺寸将会削弱, 导致结构整体刚度减小, 变形增大, 结构应力增大^[3-4]. 随着工程结构分析和设计方法的不断发展与更新, 可靠度理论应用于结构分析的研究逐年增多^[5-7]. 余向明^[8]等基于结构可靠度理论采用 JC 法分别计算了钢闸门初始运行期和工作 30a 后的结构可靠指标, 最终对闸门的可靠度进行了初步的安全评估; 李永科^[9]利用 Ansys 有限元分析软件建立钢闸门三维实体模型, 分析计算闸门内部的荷载效应及抗力, 并计算了不同工况组合下闸门各构件的可靠度.

本文以某水库弧形钢闸门为实例, 基于现场检测的样本数据, 采用三维有限元方法分析支臂可靠度.

1 检测数据的统计分析

1.1 闸门结构简述

某水库溢洪道闸门为斜支臂弧形闸门, 闸门高度 6.0m, 宽度 11.96m, 主要由面板、双主梁、支臂等部件组成, 材料为 Q₂₃₅. 闸门支臂为 H 型钢结构, 翼缘厚 20mm, 腹板厚 12mm. 闸门为 2010 年水库除险加固时制造安装, 服役至今已 10a.

1.2 检测数据统计分析

采用 TT300 超声波测厚仪在闸门下游侧进行检测, 支臂翼缘和腹板各检测 150 个数据, 统计特征值见表 1.

表 1 支臂锈蚀量统计特征表

检测部位	最大锈蚀深度	平均锈蚀深	锈蚀速率/(mm/a)	标准差	设计厚度	蚀余厚度
支臂翼缘	1.08	0.47	0.052	0.50	20.00	19.03
支臂腹板	0.88	0.45	0.050	0.21	12.00	11.34

mm

收稿日期: 2021-01-27

项目来源: 江西省水利厅科技项目(201820YBKT12).

作者简介: 胡 强(1985-), 男, 硕士, 高级工程师.

2 三维有限元模型分析

2.1 有限元模型

(1)单元划分。考虑弧形闸门的结构特点,为准确反映闸门的工作情况与受力状态,采用三维实体单元(Solid185)对闸门整体结构进行模拟。

(2)约束处理。每个节点有沿 x 、 y 、 z 方向平移的3个自由度,可较好反映闸门各部位的受力与变形情

况。

(3)结构尺寸与材料特性。闸门结构材料为 Q_{235} ,材料密度 $\rho=7850\text{kg/m}^3$,泊松比 $\mu=0.3$,弹性模量 $E=2.06\times 10^5\text{MPa}$ 。

(4)计算荷载和工况。计算荷载主要考虑作用于闸门的静水压力和自重,设计水头 5.5m 。

按上述构建的弧形闸门静力分析有限元模型见图1。闸门整个结构共划分为48738个单元,83327个节点。

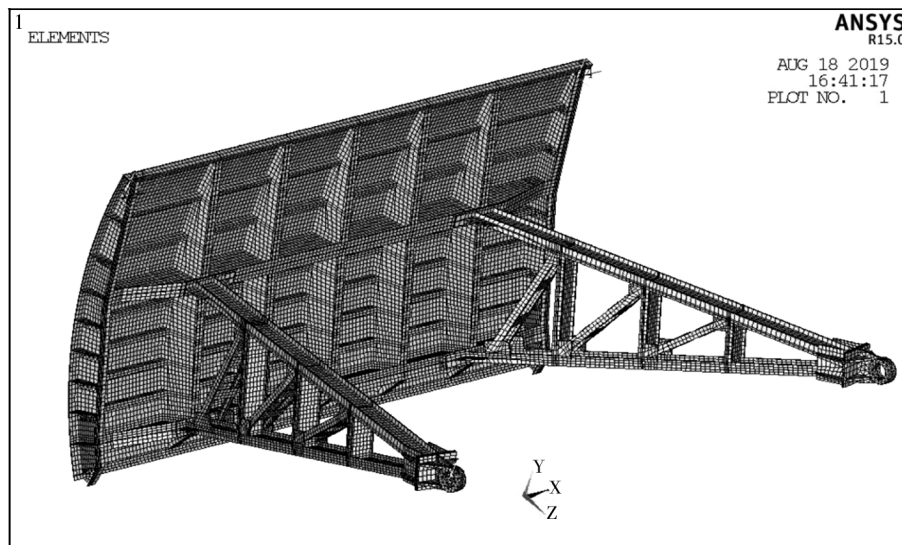


图1 闸门静力分析有限元模型图

2.2 锈蚀模拟

本次采用平均蚀余厚度法进行模拟计算,即将构件的蚀余厚度设置为设计尺寸 R 减去构件平均锈蚀值与一倍标准差 σ 后的值,对闸门有限元模型尺寸进行均匀削减。

2.3 应力分析

支臂是压应力很大的偏心受压杆件,主要承受沿支臂方向的轴向应力与弯曲应力。本文采用第四强度理论校核弧形钢闸门的强度,其折算应力可用Von Mises应力进行表示和计算。根据前文建立的有限元模型,可计算不同锈蚀程度下支臂的Von Mises应力值,详见表2。

由表2可知:支臂翼缘和腹板轴向应力最大值均为负值,说明支臂主要承受来自主梁的压力;上、下支臂翼缘的轴向应力均大于其腹板的轴向应力,且下支臂所受轴向应力大于上支臂所受的轴向应力,支臂的

表2 支臂锈蚀对支臂轴向应力的影响

锈蚀深度/mm	0.97	2.00	4.00
上支臂翼缘轴向应力/MPa	-59.7	-64.6	-75.2
上支臂腹板轴向应力/MPa	-44.3	-48.2	-55.6
下支臂翼缘轴向应力/MPa	-68.8	-72.8	-83.3
下支臂腹板轴向应力/MPa	-52.5	-56.9	-66.7

最大轴向应力出现在下支臂的翼缘上。

不同的锈蚀程度会导致支臂臂杆的内力分布变化,从而导致支臂的弯矩发生变化。在支臂不同锈蚀程度下,选取弯矩最大值计算支臂下臂杆的弯矩,见表3。

通过计算,不同锈蚀程度条件下支臂下臂杆平面内和平面外稳定等效应力结果见表4。

表 3 支臂锈蚀对支臂下臂杆弯矩的影响

锈蚀深度/mm	0.97	2.00	4.00
弯矩/(kN·m)	31.21	29.36	25.89

表 4 锈蚀对支臂下臂杆稳定应力的影响

锈蚀深度/mm	0.97	2.00	4.00
平面内稳定应力/MPa	88.42	93.28	103.73
平面外稳定应力/MPa	82.83	87.37	97.09

3 支臂可靠度分析

3.1 强度可靠度

考虑轴向应力对支臂强度可靠度的影响, 其极限状态方程可表示为^[10]:

$$Z=R-\sigma=0 \quad (1)$$

式中: R 为支臂钢材极限抗压强度的最大抗力, MPa; σ 为支臂轴向应力最大值, MPa。

本次选取闸门支臂不同的锈蚀程度来研究支臂轴向应力的变化, 根据表 2 计算结果可知, 锈蚀作用对下支臂翼缘的轴向应力影响最大。运用最小二乘法求得下支臂翼缘轴向应力与支臂锈蚀量之间的回归方程为:

$$\sigma=0.451h_3^2+2.544h_3+65.908 \quad (2)$$

式中: σ 为支臂最大轴向应力, MPa; h_3 为支臂翼缘锈蚀深度, mm。

据此建立支臂强度极限状态方程:

$$Z=R-0.451h_3^2-2.544h_3-65.908=0 \quad (3)$$

式中材料抗力和锈蚀量均服从正态分布。屈服强度的标准值可从文献^[9]中查得: R (257.9, 30.9) MPa; 锈蚀深度根据检测数据统计得出: h_3 (0.47, 0.50) mm。利用 JC 法计算支臂的可靠指标, 其可靠指标 β 、失效概率 P_f 的计算结果见表 5。

3.2 稳定可靠度

考虑弧形钢闸门支臂强度的可靠度的同时, 还应分析其稳定性能的可靠度。在众多闸门安全事故中, 有相当部分闸门破坏是由于支臂失稳所导致的。支臂稳定性分析主要是研究支臂结构在弯矩作用平面内和弯矩作用平面外的稳定性。根据规范《钢结构设计标准》(GB50017-2017), 支臂下臂杆可作为实腹式压弯构件考虑平面内和平面外稳定等效应力。根据表 4 的计算结果, 采用最小二乘法求得支臂平面内、外稳定应力与支臂锈蚀深度的回归方程分别为:

$$\sigma_{内}=0.167 2h_3^2+4.221 9h_3+84.167 \quad (4)$$

$$\sigma_{外}=0.149 3h_3^2+3.964 5h_3+78.844 \quad (5)$$

据此, 建立的支臂平面内、外稳定极限状态方程为:

$$Z_{内}=R-\sigma_{内}=R-0.167 2h_3^2-4.221 9h_3-84.167 \quad (6)$$

$$Z_{外}=R-\sigma_{外}=R-0.149 3h_3^2-3.964 5h_3-78.844 \quad (7)$$

利用 JC 法计算支臂稳定的可靠指标, 其可靠指标 β 、失效概率 P_f 的计算结果见表 6。

表 5 支臂强度可靠度计算成果

构件	可靠指标 β	失效概率 P_f	规范允许值	是否满足规范
支臂	6.16	3.637×10^{-10}	3.2	满足

表 6 支臂稳定可靠度计算

构件	可靠指标 β	失效概率 P_f	规范允许值	是否满足规范
支臂平面内	5.54	1.512×10^{-8}	3.2	满足
支臂平面外	5.72	5.326×10^{-9}	3.2	满足

3.3 计算成果

根据水利水电工程结构目标可靠指标的规定, 闸门各构件承载能力极限状态的目标可靠指标为 3.2, 通过计算, 弧形钢闸门各结构各项可靠指标均大于目标规定值 (3.2), 满足规范要求。

4 结 论

某在役弧形钢闸门运行多年后, 支臂结构产生局部锈蚀。本文基于现场检测的样本数据, 采用三维有限元方法分析支臂可靠度。结果表明, 支臂的强度、刚度均满足目标可靠指标, 可继续正常使用。

参考文献:

- [1] 张汉云, 张燎军, 田宏吉, 等. 主纵梁弧形闸门锈蚀后工作性态研究[J]. 水利水电技术, 2016, 47(12): 81-84+89.
- [2] 王皎, 刘颖, 危文广, 等. 在役水工钢闸门锈蚀后工作性态的进展研究[J]. 江西水利科技, 2020, 46(02): 90-94.
- [3] 杜明清. 基于结构时变可靠度的平面钢闸门维护技术研究[D]. 长春工程学院, 2018.
- [4] 汪小军. 弧式水工钢闸门锈蚀影响有限元模拟及分析[J]. 中国水能及电气化, 2019(1): 53, 67-69.
- [5] 王超. 考虑锈蚀形态的弧形闸门数值模拟研究 [D]. 合肥工业大学, 2016.
- [6] 徐卫敏, 卢鹏程, 范兴朗. 基于 Gamma 随机过程的水工钢闸门时变可靠度方法[J]. 浙江建筑, 2018, 35(6): 36-39.
- [7] 刘悦鑫. 弧形钢闸门三维非线性有限元分析 [D]. 河北农业大学, 2014.
- [8] 危文广, 黎良辉, 洪文浩, 等. 基于变权法的水工钢闸门安全模糊综合评价 [J]. 水力发电, 2019, 45(2): 93-98.
- [9] 李永科. 弧形钢闸门的优化设计与可靠度分析 [D]. 大连理工大学, 2015.
- [10] 刘柳. 弧形钢闸门空间主框架体系可靠度研究[D]. 西北农林科技大学, 2018.

编辑: 张绍付

Reliability analysis of arm structures for radial gate based on detection data

HU Qiang^{1,2}, WANG Jiao^{1,2}, ZHU Zhenhuan³

(1. Jiangxi Academy of Water Science and Engineering, Nanchang 330029, China;

2. Jiangxi Provincial Research Center on Hydraulic Structures, Nanchang 330029, China;

3. China Railway Water Conservancy and Hydropower Planning and Design Group Co.Ltd., Nanchang 330029, China)

Abstract: Rust causes the static and dynamic characteristics of the steel gate to change, but also changes the reliability of the gate system. In order to study the effect of rust on the reliability of steel gate, this paper analyzes the characteristics of rust based on field detection data, analyzes the stress of arc steel gate support arm by using three-dimensional finite factor method, and calculates the reliability of the support arm. The results show that the method proposed in this paper can accurately calculate the reliability of the steel gate support arm to determine the safety of the gate.

Key words: Detection data; Radial gate; Arm structures; Reliability analysis

翻译: 胡 强