

循环荷载下水闸结构安全性分析方法

王维龙 李德明 柏荣军

盐城隆嘉水利建设有限公司, 中国·江苏 盐城 224000

摘要: 一种循环荷载下水闸结构安全性分析方法, 包括: S1、获取水闸结构的基础数据; S2、构建水闸结构的三维有限元模型, 模拟水闸在实际工况下的力学响应; S3、确定循环荷载的特征参数; S4、将循环荷载施加到三维有限元模型上, 获取水闸结构在循环荷载作用下荷载值; S5、计算水闸结构的损伤变量, 确定结构的损伤程度; S6、构建可靠度模型, 对水闸结构进行可靠性分析, 得到水闸结构在循环荷载下的可靠指标; S7、建立水闸结构安全性评价体系, 输出安全性评估报告。本方法实现了对循环荷载下水闸结构的力学响应、损伤程度和可靠性的评估, 为水闸维护管理提供科学依据, 保障水闸安全稳定运行。

关键词: 循环荷载下; 水闸结构; 安全性分析; 方法

Analysis Method for Structural Safety of Water Gates under Cyclic Loading

Wang Weilong, Li Deming, Bai Rongjun

Yancheng Longjia Water Conservancy Construction Co., Ltd., China Jiangsu Yancheng 224000

Abstract: A safety analysis method for sluice structures under cyclic loads, including: S1. Obtaining the basic data of the sluice structure; S2. Construct a three-dimensional finite element model of the water gate structure to simulate the mechanical response of the water gate under actual working conditions; S3. Determine the characteristic parameters of cyclic loads; S4. Apply cyclic loads to the three-dimensional finite element model to obtain the load values of the water gate structure under cyclic loads. S5. Calculate the damage variables of the water gate structure and determine the degree of damage to the structure; S6. Construct a reliability model to conduct reliability analysis on the water gate structure and obtain the reliability index of the water gate structure under cyclic loads. S7. Establish a safety evaluation system for the water gate structure and output a safety assessment report. This method realizes the assessment of the mechanical response, damage degree and reliability of the water gate structure under cyclic loading, providing a scientific basis for the maintenance and management of the water gate and ensuring its safe and stable operation.

Keywords: Under cyclic loading; Gate structure; Safety analysis; Method

0 引言

水闸作为水利工程中的关键设施, 在防洪、灌溉、航运等方面发挥着至关重要的作用。在实际运行过程中, 水闸会受到各种复杂荷载的作用, 其中循环荷载较为常见且影响显著。如水位的周期性涨落、水流的脉动、地震荷载及风浪的反复冲击等都会使水闸结构承受循环荷载。长期处于循环荷载作用下, 水闸结构内部的应力应变状态不断变化, 容易引发结构损伤、疲劳破坏等问题, 严重威胁水闸的安全运行。一旦水闸出现安全问题, 导致洪水泛滥、水资源调配失衡等一系列严重后果, 对人民生命财产安全和社会经济发展造成巨大损失。因此, 准确分析循环荷载下水闸结构的安全性, 对于保障水闸的可靠运行、延长其使用寿命具有重要的现实意义。

传统上, 在分析水闸结构安全性时, 多采用基于经验公式和简化计算模型的方法。这些方法通常将水闸结构视为简单的力学体系, 忽略了结构的复杂性和实际工况的多样性。例如, 在计算水闸的承载能力时, 仅考虑静态荷载作用, 通过简单的材料力学公式估算结构的应力和变形。这种方法的优点是计算过程相对简单, 易于理解和操作, 在早期的水利工程设计和分析中具有一定的应用价值。然而, 其缺点也十分明显。由于忽略了循环荷载以及结构的非线性特性等重要因素, 计算结果与实际情况存在较大偏差, 无法准确评估水闸在复杂工况下的安全性。这导致对水闸结构安全性能的误判, 要么高估结构安全性, 给工程埋下安全隐患; 要么低估结构安全性, 造成不必要的工程加固和投资浪费。

随着计算机技术和数值分析方法的发展, 现有技术在水闸结构安全性分析方面取得了一定进展。目前, 有限元分析方法被广泛应用于水闸结构的力学分析。通过建立水闸结构的有限元模型, 可以考虑结构的几何形状、材料特性以及多种荷载工况, 对水闸结构的应力、应变分布进行较为精确的模拟。在考虑循环荷载时, 部分现有技术能够进行简单的时程分析, 获取结构在循环荷载作用下的响应。

然而, 现有技术仍存在一些不足之处。一方面, 在建立有限元模型时, 对于单元划分和参数选取缺乏统一的标准, 不同研究人员的建模方式差异较大, 导致分析结果的可比性和可靠性受到影响。另一方面, 现有技术在评估水闸结构安全性时, 多侧重于结构的力学响应分析, 对结构损伤演化和可靠性评估的综合考虑不够全面, 难以给出准确、全面的水闸结构安全性评价。

因此, 针对于上述问题本申请提出了一种循环荷载下水闸结构安全性分析方法, 解决了上述存在的技术问题。

1 技术方案

基于上述内容, 提出了一种循环荷载下水闸结构安全性分析方法, 包括以下步骤:

S1、获取水闸结构的基础数据, 所述基础数据包括水闸的结构设计参数、材料特性参数。

S2、基于所述基础数据, 构建水闸结构的三维有限元模型, 模拟水闸在实际工况下的力学响应。

S3、根据水闸所在地区的水文资料和运行记录, 确定循环荷载的特征参数, 包括荷载幅值、频率、作用时长和循环次数。

S4、将所述循环荷载施加到三维有限元模型上, 进行时程分析, 获取水闸结构在循环荷载作用下荷载值。

S5、通过荷载值利用结构损伤函数计算水闸结构的损伤变量, 确定结构的损伤程度。

S6、构建可靠度模型, 根据水闸结构循环荷载的不确定性, 对水闸结构进行可靠性分析, 得到结构在循环荷载下可靠指标。

S7、综合所述损伤程度和可靠指标, 建立水闸结构安全性评价体系, 根据该体系对水闸结构的安全性进行分级评估, 输出安全性评估报告。

优选的, 所述 S2 中水闸结构的三维有限元模型构建, 具体包括: 将水闸结构划分为多单元体, 多单元体包括实体单元和板壳单元, 通过获取实体单元和板壳单元的位移向量和应力张量, 构建水闸结构三维有限元模型; 所述实体单元通过八节点六面体等参单元进行划分为微单元体,

获取微单元体位移向量; 所述板壳单元通过四节点薄板单元进行划分为微单元体, 获取微单元体位移向量; 实体单元和板壳单元的应力张量通过弹塑性结构模型获取。

优选的, 所述实体单元通过八节点六面体等参单元进行划分为微单元体, 获取位移向量, 具体包括: 获取微单元体任意点位移向量, 公式为: $\bar{u} = \sum_{i=1}^8 N_i \bar{u}_i$,

其中 \bar{u}_i 为实体形函数, 为点位移向量; 通过微单元体局部坐标计算实体形函数, 公式 $N_i = \frac{1}{8}(1 + \xi_i \xi)(1 + \eta_i \eta)(1 + \zeta_i \zeta)$,

其中为点微单元体局部坐标; 将实体单元中的微单元体位移向量进行组合, 获取实体单元位移向量。

优选的, 所述板壳单元通过四节点薄板单元进行划分为微单元体, 获取位移向量, 具体包括: 获取微单元体任意点位移向量, 公式为: $\bar{w} = \sum_{j=1}^4 N_j w_j + \sum_{j=1}^4 \frac{\partial N_j}{\partial x} \theta_{jy} + \sum_{j=1}^4 \frac{\partial N_j}{\partial y} \theta_{jx}$

其中为点位移向量, 为板壳形函数, 为点绕轴和轴的转角; 通过微单元体局部坐标计算板壳形函数, 公式为:

$N_j = \frac{1}{4}(1 + \delta_j \delta)(1 + \varphi_j \varphi)$, 其中为点微单元体局部坐标; 将板壳单元中的微单元体位移向量进行组合, 获取板壳单元位移向量。

优选的, 所述三维有限元模型通过获取实体单元和板壳单元的应力张量和位移向量构建, 所述应力张量通过弹塑性结构模型获取, 具体为: 获取水闸结构实体单元和板壳单元的损伤变量和应变张量, 构建弹塑性结构模型, 公式为: $\sigma = (1 - D) D_0^e \cdot \varepsilon$, 其中为应力张量, 为初始损伤变量, 获取实体单元和板壳单元的应力张量, 通过实体单元和板壳单元的应力张量结合实体单元和板壳单元的位移向量, 构建三维有限元模型。

优选的, 所述 S4 中将循环荷载施加到三维有限元模型上, 进行时程分析, 获取水闸结构在循环荷载作用下的荷载值, 具体为: 将循环荷载的特征参数进行离散化处理, 按照设定的时间步长, 将循环荷载的作用时长划分为多时间节点, 公式为: $t_n = n \Delta t$, 其中为时间步长值; 在每个时间点根据荷载幅值、频率和循环次数计算当前时刻的荷载值, 公式为: $F(t_n) = A \times \sin(2\pi f t_n) \times g(n)$, 其中为循环次数调整的荷载修正函数, 公式为: $g(n) = \begin{cases} 1, & n \leq N_c \\ 1 - \frac{n - N_c}{N - N_c}, & N_c < n \leq N \end{cases}$, 其中为总时间步数, 为循环次数对应的时间步数; 通过上述公式获取水闸结构在循环荷载作用下的荷载值, 进行评估水闸结构的损伤程度。

优选的, 所述 S5 中获取水闸结构在循环荷载作用下荷载值后, 利用结构损伤函数计算损伤变量, 公式为: $D_c = 1 - \exp \left[- \left(\frac{\sum_{i=1}^N k_i F(t_{n_i})}{c_c} \right)^{a_c} \right]$, 其中为第个时间步长的荷载值, 为时间累积权重系数, 为水闸结构承载能力, 为水闸结构

非线性系数，为总时间步数；通过结构损伤函数将水闸结构分区对应的荷载值进行计算，得到水闸结构分区域的损伤变量。

优选的，根据水闸结构分区域的损伤变量进行确定结构损伤程度，具体为：构建综合评估指标，所述综合评估指标包括损伤变量和损伤变量变化率，公式为：

$I = w_1 D_c + w_2 \frac{dD_c}{dt}$ ，其中、分别为相应的权重系数；设定不同损伤等级下的阈值范围，划分出轻度损伤、中度损伤、重度损伤和严重破坏四个等级，通过实时监测获取综合评估指标，依据确定所在的阈值区间，获取当前的损伤程度。

优选的，所述 S6 中构建可靠度模型，对水闸结构进行可靠性分析，得到结构在循环荷载下的失效概率和可靠指标，具体包括：将循环荷载的不确定性以随机变量向量表示，公式为： $\mathbf{X} = [\mathbf{A}, \mathbf{f}]^T$ ，优选的，所述 S7 中综合损伤程度和可靠指标建立水闸结构安全性评价体系并分级评估，具体包括：构建综合评价函数，公式为：

$E = w_p D_c + w_q (1 - \frac{\beta}{\beta_{max}})$ ，其中为水闸结构的损伤变量，为可靠指标，为理想状态下的最大可靠指标；和分别为损伤程度和可靠指标的权重系数，通过层次分析法根据历史数据和工程标准，划分出值对应的不同安全等级区间，包括优秀、良好、合格、预警和危险五级区间，将计算得到的和代入综合评价函数，得到值，根据值所在的区间确定水闸结构的安全等级，完成分级评估^[1]。

2 附图说明

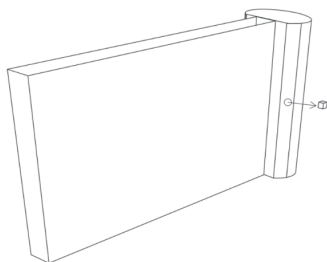


图1 循环荷载下水闸结构安全性分析方法的实体单元划分图

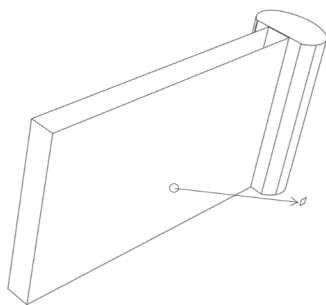


图2 循环荷载下水闸结构安全性分析方法的板壳单元划分图

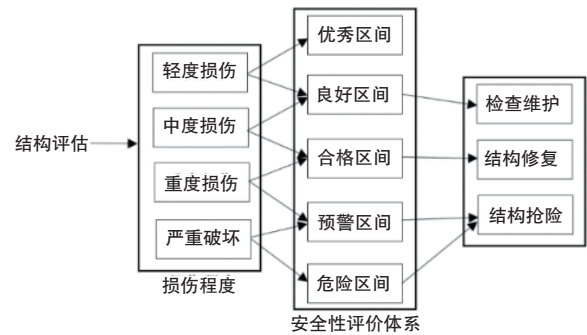


图3 循环荷载下水闸结构安全性分析方法的评价输出图^[2]

3 技术效果

(1) 通过获取水闸结构的基础数据，构建三维有限元模型模拟实际工况下的力学响应，再施加循环荷载进行时程分析这一技术方案，解决了传统方法难以精确模拟水闸在复杂循环荷载下力学状态的技术问题，能够准确获取水闸结构在循环荷载作用下的荷载值，为后续评估结构损伤程度和安全性提供了可靠的数据支持，相比传统方法，大幅提高了对水闸结构力学响应分析的准确性。

(2) 通过利用结构损伤函数计算水闸结构的损伤变量，结合损伤变量和损伤变量变化率构建综合评估指标来确定结构损伤程度的技术方案，解决了难以准确评估水闸结构在循环荷载下损伤程度的技术问题，能够将水闸结构的损伤程度划分为轻度损伤、中度损伤、重度损伤和严重破坏四个等级，实现对结构损伤状态的量化评估，使管理人员可以直观了解水闸的损伤情况，便于及时采取相应的维护或加固措施。

(3) 通过将循环荷载的不确定性以随机变量向量表示，构建极限状态函数并采用一次二阶矩法计算可靠指标的技术方案，解决了在水闸结构安全性分析中难以考虑循环荷载不确定性的技术问题，能够计算出结构在循环荷载下的失效概率和可靠指标，从可靠性角度评估水闸结构的安全性，为工程决策提供更科学的依据，避免因忽视荷载不确定性而导致的安全隐患或过度设计。

(4) 通过构建综合评价函数，结合损伤变量和可靠指标，利用层次分析法划分安全等级区间的技术方案，解决了现有技术难以全面、准确评价水闸结构安全性的技术问题，将水闸结构的安全等级划分为优秀、良好、合格、预警和危险五级，对水闸安全性进行综合分级评估，输出详细的安全性评估报告，方便工程人员全面掌握水闸的安全状况，有针对性地制定管理和维护策略，保障水闸的安全稳定运行^[3]。

参考文献:

[1] 刘智, 胡国平, 陈敬玮等. 一种循环荷载下水闸结构安全性分析方法: 202510440001[P][2025-09-28].

[2] 周建民. 既有混凝土及构件的氯盐侵蚀模拟试验研

究[D]. 浙江工业大学, 2009.DOI:10.7666/d.y1561549.

[3] 俞伟. 粉砂地基上闸室稳定的有限元分析[D]. 新疆农业大学[2025-09-28].