

基于 BIM 与有限元耦合的港口高桩码头结构耐久性评估及修复方案优化研究

赵雨来

天津港航工程有限公司, 天津 300450

DOI:10.61369/ETQM.2026050013

摘 要 : 针对港口高桩码头结构耐久性评估中数据孤立、模拟精度不足, 以及修复方案决策主观性强、难以平衡多重目标等关键问题, 本文开展了基于 BIM 与有限元耦合的耐久性评估及修复方案优化研究。文章构建了基于 BIM 与有限元耦合的结构耐久性评估体系, 通过集成环境荷载与结构全生命周期信息, 实现数据的关联管理; 利用有限元模型开展性能退化精细化数值模拟, 并结合层次分析法与模糊综合评价法, 建立了多源信息融合的耐久性综合评估方法。构建了高桩码头修复方案多目标优化模型, 以修复效果、经济成本和施工工期为核心协同优化目标, 以技术、安全及运营等为约束条件, 引入 NSGA- II 算法求解 Pareto 最优解集, 实现了多重约束下的修复方案智能化决策。基于 BIM 平台设计开发了耐久性评估与修复决策系统, 实现了多源数据集成、自动化评估、方案优化与三维可视化展示的一体化管理。研究有效提升了高桩码头耐久性评估的准确性与修复决策的科学性, 为港口工程结构全生命周期运维管理的数字化与智能化提供了有力支撑。

关 键 词 : 高桩码头; BIM; 有限元; 耐久性评估

Research on Durability Assessment and Repair Scheme Optimization of High-Piled Wharf Structures in Ports Based on BIM-Finite Element Coupling

Zhao Yulai

Tianjin Port Engineering Co., Ltd., Tianjin 300450

Abstract : Addressing key challenges in the durability assessment of high-piled wharf structures in ports, such as isolated data, insufficient simulation accuracy, and the subjective nature of repair scheme decision-making that struggles to balance multiple objectives, this paper conducts research on durability assessment and repair scheme optimization based on the coupling of Building Information Modeling (BIM) and finite element analysis. The study establishes a structural durability assessment system based on BIM-finite element coupling, enabling the associated management of data by integrating environmental loads and structural lifecycle information. Utilizing finite element models for refined numerical simulations of performance degradation, it combines the Analytic Hierarchy Process (AHP) with the Fuzzy Comprehensive Evaluation (FCE) method to develop a comprehensive durability assessment approach that integrates multi-source information. A multi-objective optimization model for repair schemes of high-piled wharfs is constructed, with repair effectiveness, economic cost, and construction duration as core collaborative optimization objectives, and technical, safety, and operational constraints as limiting factors. The Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA- II) is introduced to solve for the Pareto optimal solution set, enabling intelligent decision-making for repair schemes under multiple constraints. A durability assessment and repair decision-making system is designed and developed based on the BIM platform, achieving integrated management of multi-source data integration, automated assessment, scheme optimization, and three-dimensional visualization. The research effectively enhances the accuracy of durability assessments for high-piled wharfs and the scientific basis of repair decisions, providing robust support for the digitalization and intelligent management of the full lifecycle operation and maintenance of port engineering structures.

Keywords : high-piled wharf; BIM; finite element; durability assessment

引言

港口作为连接海洋以及内陆运输的核心枢纽，在国民经济以及对外贸易当中所起到的作用是不可替代的，高桩码头由于具有透空性良好、对水流影响较小等方面的优势，所以成为了我国软土地基海岸运用得最为广泛的港口结构形式。然而，长期在复杂海洋环境当中服役的高桩码头结构，其劣化机理较为复杂，这就使得它的耐久性评估以及修复决策在很长时间内都会面临信息割裂、分析精度不足等方面的瓶颈，鉴于此，本文将提出基于 BIM 以及有限元耦合来开展高桩码头耐久性评估以及修复决策的研究框架，把 BIM 全生命周期信息集成优势与有限元结构损伤精细化模拟能力进行融合，有效地实现对传统方法局限的突破。本研究的目的是提高高桩码头耐久性评估的准确性以及修复决策的科学性，从而为港口工程向智慧化、精细化运维转型提供理论支撑以及技术保障。

一、基于耦合模型的结构耐久性评估体系

（一）环境荷载与结构信息的集成分析

港口工程是联系海洋、腹地和内陆运输的一个天然界面，也是自然灾害的集中交汇点^[1]。梳理港口高桩码头海洋盐雾腐蚀、波浪冲击力等主要环境荷载，通过现场监测、文献调研等方式收集量化数据，明确其分布特征、作用规律及变化趋势，建立环境荷载数据库^[2]。基于 BIM 平台构建码头三维数字化模型，整合桩体、横梁等构件全生命周期信息，利用参数化建模实现构件信息关联管理，保障数据一致性与可追溯性；优化简化 BIM 模型，建立与有限元模型的数据接口，实现信息双向传递、提升效率。开展环境荷载与结构信息耦合分析，明确荷载对各构件的作用机制，识别结构耐久性关键影响因素，为后续性能退化模拟与耐久性评估奠定基础。

（二）结构性能退化数值模拟

基于 BIM 与有限元耦合模型，开展港口高桩码头结构性能退化精细化数值模拟，精准反映长期服役损伤演化规律^[3]。利用 BIM 传递的结构参数，通过有限元软件构建码头结构有限元模型，定义构件单元、材料本构及边界条件，并结合海洋环境引入腐蚀损伤模型，建立性能退化时间相关模型^[4]。结合环境荷载数据模拟结构长期服役过程，分析不同节点性能指标，重点模拟各类耐久性损伤及演化路径，通过敏感性分析识别影响耐久性的关键变量。将模拟结果与 BIM 关联实现可视化，结合现场检测数据验证修正，提升模拟精度，为耐久性评估提供准确依据。

（三）基于多源信息的耐久性综合评估方法

结合 BIM 集成多源信息与有限元数值模拟结果，建立多源信息融合的港口高桩码头结构耐久性综合评估方法，实现结构耐久性状态的全面准确评价^[5]。结合码头结构特点与服役环境，确定包含结构损伤、材料性能等方面的评估指标体系，明确各指标评价标准与分级阈值；采用层次分析法确定各指标权重，结合专家经验保障科学性；引入模糊综合评价法处理多源信息不确定性，实现信息融合；基于 BIM 平台实现评估自动化计算与可视化，生成评估报告，同时预测结构未来耐久性状态，为修复方案制定提供依据。

二、高桩码头结构修复方案优化模型构建

（一）修复方案优化目标与约束条件

结合港口高桩码头运营需求与工程实际，明确修复方案优化

目标、约束条件，构建多目标优化模型核心框架。优化目标采用多目标协同思路，核心包括三方面^[6]。修复效果目标，提升结构耐久性、保障运营安全、延长服役寿命；经济成本目标，最小化修复总投资（含材料、施工、运维等费用）；工期目标，缩短施工周期，减少对港口运营的影响与停运损失，实现三者协同平衡^[7]。约束条件结合工程实际与规范要求，主要包括技术约束（方案可行、材料工艺合规）、安全约束（力学及安全性能达标）、环境约束（环保无污染、符合海洋环保规定）、运营约束（避开繁忙时段、减少运营干扰）。最后对优化目标与约束条件进行量化处理，将其转化为可计算指标与数学表达式，为后续模型构建与求解奠定基础。

（二）修复策略与比选方案库

为给优化模型提供充足备选方案，需针对港口高桩码头不同耐久性损伤类型与程度，制定多样化修复策略并构建修复方案比选库^[8]。梳理混凝土碳化、钢筋锈蚀等常见损伤类型，结合工程经验与规范，制定对应修复策略（如钢筋锈蚀采用除锈、补涂防腐涂层等，桩体冲刷采用抛石防护等，裂缝采用灌浆封堵等）。结合修复材料、施工工艺与修复时机的组合构建比选库，对比符合海洋环境要求的各类材料性能与成本，选取便捷高效、对运营影响小的施工工艺，确定最佳修复时机。初步筛选方案剔除不可行选项，保障优化模型求解效率与结果合理性，并建立方案库动态更新机制，结合工程实际与技术发展补充新方案。

（三）基于多目标优化算法的方案决策

引入多目标优化算法，结合优化目标、约束条件与修复方案比选库，实现高桩码头结构修复方案智能化决策^[9]。构建多目标优化数学模型，以修复效果、经济成本、工期为目标，以技术、安全等为约束，经归一化处理消除量纲影响；选用 NSGA-II 算法，设置相关参数求解模型，得到 Pareto 最优解集；通过综合评价体系筛选最优方案，并将其与 BIM 模型关联，实现修复施工可视化指导。

三、BIM 平台下的耐久性评估与修复决策系统设计

（一）系统总体架构设计

基于 BIM 平台，结合耐久性评估体系与修复方案优化模型，设计港口高桩码头结构耐久性评估与修复决策系统，实现评估、优化、决策、管理一体化^[10]。系统采用分层设计，分为数据层、模型层、功能层与应用层，各层协同工作保障系统稳定高效。数

据层为基础，整合存储 BIM 模型、环境荷载、结构检测等多源数据，通过统一数据库实现集中管理与高效查询，依托数据接口实现与相关软件、设备的对接及数据自动导入更新。模型层为核心，包含 BIM 耦合模型、耐久性评估模型、修复方案优化模型，各模型协同为系统功能提供核心支撑。功能层整合模型层算法与功能模块，实现 BIM 模型管理、多源数据集成、耐久性评估等核心功能，满足业务需求。应用层面向工程技术人员、管理人员，提供友好界面，实现功能便捷操作与结果展示，适配不同用户需求。

（二）关键功能模块实现

基于系统总体架构，重点构建五大关键功能模块，以全面提升系统的工程实用性与智能化水平。在数据与模型底座层，BIM 模型管理模块聚焦高桩码头 BIM 模型的全流程解析与统筹，支持三维可视化漫游、构件属性穿透查询及模型轻量化处理，打通 BIM 与有限元模型的双向数据链路以实现参数的实时联动更新，夯实数字基底；多源数据集成模块则构建统一数据底座，深度融合环境荷载、结构检测、数值模拟及修复方案等多源异构数据，依托图表曲线等可视化手段精准刻画数据分布与演变趋势，为科学决策提供坚实的数据驱动。在智能应用层，耐久性评估模块内嵌专业算法引擎，无缝对接检测与模拟数据自动推算评估指标与综合定级，一键生成详尽报告并直观映射结构损伤状态；修复方案优化模块融合多目标优化算法与专家比选库，支持用户自定义目标与约束进行智能寻优，全景呈现修复效能、成本与工期等核心指标，并提供多方案平行对比与交互式调整，确保决策最优。贯穿全流程的可视化展示模块则深度释放 BIM 潜能，将结构全息模型、损伤演化、评估分级及修复推演进行立体融合，支持多视点漫游与细节缩放，将全生命周期状态具象化，为工程人员打造沉浸式的直观决策体验。

（三）系统数据流转与协同管理

为保障系统各模块间的高效协同与顺畅运行，设计输入-处理-输出-反馈的数据闭环流转机制。在数据输入环节，依托标准化数据接口将 BIM 模型数据、环境荷载数据及现场检测数据等多源异构数据汇入系统数据库，完成数据的清洗与初始化；在数据处理环节，系统调用模型层的耐久性评估模型与修复优化模型对底层数据进行深度解析与智能推演，生成精准的评估结论

与最优修复方案；在数据输出与反馈环节，评估结果与修复方案定向输出至应用层辅助用户决策，同时将用户的修正意见与反馈数据回传至数据层与模型层，驱动数据的实时更新与模型的迭代优化。在数据流转的基础上，建立跨角色全流程的协同管理机制以支持多用户、多部门的协同工作。系统通过细粒度权限管理模块，为技术人员、管理人员及施工人员等不同角色动态分配操作权限，筑牢数据安全底线并规范业务流程。同时，打破部门间信息交互壁垒，支持高效的信息共享与沟通协作，实现评估-设计-施工-运维全生命周期各环节的无缝衔接，全面提升港口高桩码头修复工程的实施效能。此外，为确保系统长效稳定运行，构建了常态化维护与敏捷迭代机制。一方面，定期开展系统巡检与维护，修复安全漏洞并优化系统性能，保障平台基座的稳定可靠；另一方面，紧跟前沿工程技术与业务演进需求，及时动态更新系统的核心算法模型、基础数据及功能模块，确保系统的适用性与先进性，为港口高桩码头结构耐久性运维提供坚实且长效的技术支撑。

四、结束语

本文针对港口高桩码头结构耐久性评估以及修复决策方面的关键问题，开展了 BIM 与有限元耦合系统的研究工作，开展构建环境荷载数据库以及高精度有限元模型的工作，提出基于 BIM-有限元耦合的耐久性评估体系，来实现全生命周期信息集成以及性能退化精细化模拟，突破传统评估数据孤岛以及模拟精度较低的瓶颈问题，来为结构分析提供可靠的数据以及理论方面的支撑。针对修复决策这个环节，构建一个对修复效果、经济成本以及施工工期这三大核心目标进行统筹的多目标优化模型，引入 NSGA-II 算法来开展求解工作，得以实现多重约束之下修复方案的智能寻优，能够有效去克服传统决策当中主观性比较强、多目标矛盾难以开展协同工作的局限。在这个基础之上，开展了基于 BIM 平台的耐久性评估与修复决策系统的研发工作，把数据集成、模型分析到评估决策的全流程数字化链路打通，凭借可视化技术来直观地映射结构损伤状态以及修复方案，显著提高了港口工程运维管理工作的效率以及智能化方面的水平。

参考文献

- [1] 吴锋. 港口工程高桩码头结构性能退化研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2015.
- [2] 刘伟. 基于广义帕累托分布的高桩码头结构时变可靠度评估 [D]. 辽宁: 大连海事大学, 2024.
- [3] 黄秋瑾. 港口高桩码头结构全寿命周期设计指标体系及方法研究 [D]. 江苏: 东南大学, 2012. DOI: 10.7666/d.Y2246766.
- [4] 黄长虹. 在役高桩码头耐久性评估方法研究 [D]. 天津: 天津大学, 2003. DOI: 10.7666/d.Y591375.
- [5] 孙明楠, 朱鹏宇. 高桩码头结构耐久性分析 [J]. 港口科技, 2015(11): 11-14, 17. DOI: 10.3969/j.issn.1673-6826.2015.11.004.
- [6] 史青芬. 高桩码头结构安全性评估 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2010. DOI: 10.7666/d.Y1694264.
- [7] 涂启华, 翁龙, 唐光星, 等. 华南地区高桩码头结构检测与评估实例分析 [J]. 水运工程, 2013(4): 93-100. DOI: 10.3969/j.issn.1002-4972.2013.04.018.
- [8] 胡文高. 沿海老旧高桩码头检测与评估实例分析 [J]. 珠江水运, 2021(3): 27-28.
- [9] 孙艺. 海洋环境下高桩码头耐久性分析方法研究 [D]. 天津: 天津大学, 2005. DOI: 10.7666/d.Y1046459.
- [10] 王振云. 福建某高桩码头混凝土耐久性检测与分析 [J]. 珠江水运, 2020(24): 96-98.