

模糊层次分析法在堤防工程施工质量风险管理中的应用研究

付敏¹, 戴霖^{2,3}

(1. 高安市水利局, 江西 高安 330800; 2. 江西省水利科学院, 江西 南昌 330000; 3. 江西省洪图技术咨询有限公司, 江西 南昌 330000)

摘要: 为解决圩堤除险加固工程施工质量风险识别不全面、管控针对性不强的问题, 以高安市万亩圩堤龙湾堤为研究对象, 开展施工质量风险评估研究。方法上构建了“人员—材料设备—施工技术—管理监督—自然环境”五维指标体系, 采用层次分析法确定指标权重并完成一致性检验, 结合模糊综合评价量化风险等级。结论表明, AHP—模糊综合评价模型可实现“抽检数据—过程记录—专家认知”的统一量化, 适用于圩堤除险加固工程质量风险评估, 可为同类工程提供管控参考。

关键词: 堤防工程; 施工质量; 风险评估; 层次分析法; 模糊综合评价

中图分类号: TV52

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)09-0098-04

Research on Application of Fuzzy Analytic Hierarchy Process in Quality Risk Management of Embankment Engineering Construction

FU Min¹, DAI Lin^{2,3}

(1. Gaoan Water Conservancy Bureau, Gaoan 330800, China; 2. Jiangxi Academy of Water Science and Engineering, Nanchang 330000, China; 3. Jiangxi Hongtu Technical Consulting Co., Ltd., Nanchang 330000, China)

Abstract: To address the issues of incomplete identification of construction quality risks and weak targeted control in the embankment hazard elimination and reinforcement project, taking the 10,000-mu Longwan Embankment in Gaoan City as the research object, a study on the risk assessment of construction quality is carried out. A five-dimensional index system of “personnel - materials and equipment - construction technology - management and supervision - natural environment” is established in terms of methods. The Analytic Hierarchy Process (AHP) is used to determine the index weights and complete the consistency check. And the risk level is quantified by combining fuzzy comprehensive evaluation. The conclusion shows that the AHP - fuzzy comprehensive evaluation model can achieve the unified quantification of “spot-check data - process records - expert cognition”, and is applicable to the quality risk assessment of embankment hazard elimination and reinforcement projects, which can provide a reference for the control of similar projects.

Keywords: embankment engineering; construction quality; risk assessment; analytic hierarchy process; fuzzy comprehensive evaluation

0 引言

水利工程是国家防洪减灾、保障民生的重要基础设施^[1], 其中圩堤工程作为江河防洪体系的关键组成部分, 其施工质量直接关系到沿岸人民生命财

产安全、耕地保护及区域经济社会稳定^[2]。然而, 近年来由于极端气候、地质条件、人为因素等多重影响, 堤防工程安全事故时有发生, 给人民生命财产安全带来严重威胁^[3-4]。

由于堤防工程建设周期长、项目投资高、建设规模大、影响因素多, 传统“合格/不合格”式静态抽检难以揭示过程性风险结构, 无法精准捕捉施工过程中存在的模糊性、不确定性及多因素耦合问题, 导致风险识别不全面、管控针对性不强, 可能产生严重后果^[5-6]。因此, 本文以高安市万亩圩堤龙湾堤除险加固工程为研究对象, 通过模糊层次分析法将层次分

收稿日期: 2026-03-27

作者简介: 付敏(1991—), 女, 硕士, 工程师, 从事河湖长制及水利工程施工管理相关工作。

通信作者: 戴霖(1989—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事水利水电工程规划、设计及施工管理相关工作。电子邮箱: 273242610@qq.com

析法的系统性、逻辑性与模糊综合评价的不确定性处理能力相结合^[7-10],构建一套能够实现“抽检数据—过程记录—专家认知”的统一量化,形成可复算、可追溯的风险评价体系^[11-12],为同类圩堤除险加固工程的质量风险管控提供理论支撑与实践借鉴。

1 工程概况

龙湾堤位于锦江中游左岸,是高安市城市防洪体系的重要控制性工程,长度为7.2 km,保护范围约13.5 km²、耕地约673.33 hm²,涉及祥符镇龙湾、西湖等村及周边蔬菜种植基地。工程设计标准为20年一遇,堤防与穿堤建筑物分别按4级、5级设计,合理使用年限30年。堤防除险加固内容包括:堤身加高厚7.2 km,干砌石护坡(厚0.40 m、砂砾垫层厚0.10 m)与抛石固脚(厚不小于0.60 m、外坡不陡于1:2.0),穿堤建筑物原址拆建与加固,堤顶C25混凝土防汛公路(宽3.5~5.0 m、厚0.20 m)等。

2 研究方法

2.1 层次分析法

2.1.1 构建层次结构模型

以“施工质量风险”为目标层,设置五个准则层指标:人员(C1)、材料设备(C2)、施工技术(C3)、管理监督(C4)和自然环境(C5),见图1。

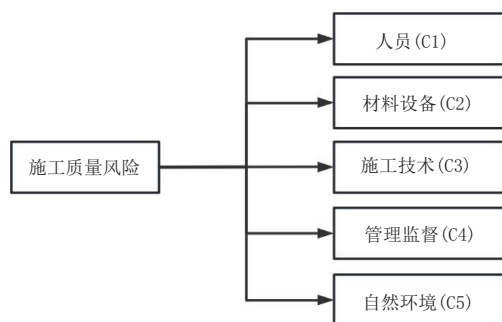


图1 层次结构图

2.1.2 构建判断矩阵

为科学确定各指标权重,本次研究邀请7名水利工程领域高级职称及以上专家组成评价小组,专业构成为:水利工程设计2人、施工管理2人、工程监理1人、质量检测1人、建设管理1人,平均从业年限为10年,确保评价维度全面、专业背景匹配。专家打分采用Saaty 1-9标度法,对准则层指标进行两两比较^[13],构建判断矩阵矩阵 $A = [a_{ij}]$ 。权重向量 $W = (w_1, \dots, w_n)^T$ 由特征根法求解:

$$AW = \lambda_{\max} W, \text{ 并对 } W \text{ 归一化 } \left(\sum_i w_i = 1 \right)。$$

打分前统一发放工程概况、指标定义、达标标准与打分规则,确保专家对评价口径理解一致。

2.1.3 一致性检验

为确保权重分配的合理性,需对判断矩阵进行一致性检验^[14],计算一致性指标(CI)与一致性比率(CR):

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}, CR = \frac{CI}{RI}$$

其中:RI为随机一致性指标。当 $n = 5$ 时取 $RI = 1.12$ 。若 $CR < 0.10$ 则认为判断矩阵一致性可接受;否则需回溯修订专家打分。

2.2 模糊综合评价

2.2.1 确定评语集与评分集

将风险等级划分为五级^[15]:低风险、较低风险、中等风险、较高风险和高风险,对应评分集 $S = \{0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9\}$,具体如表所示。

表1 风险评语—评分映射

等级	高风险	较高风险	中等风险	较低风险	低风险
评分 S_j	0.9	0.7	0.5	0.3	0.1

2.2.2 构造隶属度矩阵

隶属度是将定量检测数据与定性管理记录转化为模糊评价向量的核心步骤,对每个指标 i ,依据现场抽检数据、监测记录和专家判读,确定其属于5个风险等级的隶属度向量:

$$R_i = (r_{i1}, r_{i2}, r_{i3}, r_{i4}, r_{i5})$$

确定方法如下:

(1)定量指标(如材料强度、堤身压实度等):根据现场抽检数据或试验报告,结合达标线与规范允许偏差,采用三角形或梯形隶属度函数将实测值映射至5个风险等级。

(2)定性指标(如旁站到位率、资料归档时效等):根据过程记录、监理日志、整改通知单等资料,结合专家经验,采用专家直接赋值法确定。

所有隶属度向量均满足:

$$\sum_{j=1}^5 r_{ij} = 1$$

将所有指标的隶属度向量汇总,形成同层隶属度矩阵 R 。

2.2.3 模糊加权合成与综合评分

以权重向量 W 对同层隶属度矩阵 R 进行加权合成,得到综合隶属度向量:

$$B = W^T R = (b_1, b_2, b_3, b_4, b_5), \sum_{j=1}^5 b_j = 1.$$

据此计算综合风险得分:

$$Q = B \cdot S^T = \sum_{j=1}^5 b_j S_j.$$

2.2.4 风险等级判定

结合工程管理要求与同类项目经验,采用如下分级阈值:当 $Q < 0.40$ 时,判定为较低风险(可控);当 $0.40 \leq Q < 0.60$ 时,判定为中等风险(需加强过程控制);当 $Q \geq 0.60$ 时,判定为较高或高风险(应立即整改与复核)。见表2。

表2 综合得分—风险等级

综合得分区间Q	风险等级	管理动作
$Q < 0.40$	较低(可控)	常态监测,关键点抽检
$0.40 \leq Q < 0.60$	中等	提高复核频次,闭环整改
$Q \geq 0.60$	较高—高	立即停一查一改与复检

3 指标体系构建

本研究建立的指标体系与龙湾堤防现场管理口径保持一致,强调指标的可核查性与可操作性,关键指标及其达标线见表3。

表3 关键指标与达标线

一级指标	关键核查点	达标线
人员(C1)	特种工持证、岗前教育覆盖	持证=100%;班前教育率不小于95%
材料设备(C2)	水泥/砂石取样频率、块石力学、设备完好	水泥200~400 t/组;砂400 m³/组、碎石500 m³/组;块石R不小于40 MPa、软化不小于0.75、吸水不大于10%
施工技术(C3)	堤身压实度、涵身回填、实体几何	堤身K不小于0.91;涵顶2 m内K不小于0.95;干砌厚0.40 m、垫层0.15 m;抛石厚不小于0.6 m
管理监督(C4)	旁站与见证到位、资料时效	旁站完成率不小于95%;见证=100%;内业不大于7日归档且不小于95%
自然环境(C5)	雨季作业窗口、外河水位响应、堤基压浸	有效作业不小于65%;水位超警响应=100%;压浸范围与参数全覆盖

为保障数据的真实性与可追溯性,所有评价数据以“见证取样与第三方试验报告优先、自检为辅”为基本原则。特种工持证与关键材料见证取样均要求达到100%覆盖,涵顶2 m范围内回填压实度 $K \geq 0.95$ 作为硬性红线。任何记录缺项均视为管理风险,在完成资料补录与参数复核前,不得下调风险等级。

4 风险评价与对策建议

4.1 风险评价

依据前述模糊层次分析模型,将五类准则层因

子(人员C1、材料C2、施工技术C3、管理C4、环境C5)经权重归一化与模糊综合计算后,得到龙湾堤防工程施工质量的综合风险得分为 $Q=0.521$ 。根据既定判级口径,该项目整体处于中等风险等级。结果表明,工程总体质量受控,但仍存在一定的不确定性来源,主要集中于人员、管理及环境三项因素,见表4。

表4 综合风险计算结果

指标	权重	模糊得分	加权得分	风险等级
C1 人员	0.22	0.55	0.121	中等偏高
C2 材料	0.18	0.47	0.085	中等
C3 技术	0.26	0.49	0.127	中等
C4 管理	0.20	0.52	0.104	中等偏高
C5 环境	0.14	0.60	0.084	较高
综合值Q	—	—	0.521	中等风险

4.2 风险因素分析

从各准则层的加权得分与风险等级来看,C5(自然环境)得分最高,处于较高风险等级;C1(人员)与C4(管理)得分属中等偏高;C2(材料)与C3(技术)得分相对较低,风险可控。主要风险因素具体分析如下:

人员因素(C1):部分特种工虽持证但实际操作经验不足,且现场临时工流动性大,存在质量控制薄弱环节。

管理监督(C4):监理见证体系完整,但内业资料归档滞后,部分记录补填、追溯性不强。

环境因素(C5):工程区雨季集中、汛期长,有效作业天数不足;且外河水位波动大,对施工窗口造成阶段性中断,部分工序需错峰组织,增加了质量波动与延误风险。

4.3 对策建议

经综合分析,龙湾堤防工程施工质量风险整体可控,属于“需加强过程控制”的中等风险水平。为进一步降低风险,应重点关注以下3方面:

(1)强化人员培训与班组稳定性:针对临时工与外包队伍流动性大、操作经验不足的问题,实行二级复核培训制度,确保关键岗位全员掌握质量控制要点;同时,建立关键岗位人员备案制度,减少施工高峰期的人员随意更换,降低因人员变动导致的质量波动风险。

(2)完善资料管理闭环:针对内业资料归档滞后、追溯性不强的问题,建议推行电子化旁站与见证系统,实现内业同步归档,减少人为延迟对质量追溯的影响。

(3)强化环境管控:针对雨季施工存在的问题,应结合流域降雨规律,提前编制专项施工方案,合理错峰安排关键工序;同时适当提高雨季施工期内的抽检与见证密度,形成“高风险时段加严管控”的动态评估机制。

5 结 论

本文以高安市龙湾堤除险加固工程为依托,构建了基于模糊层次分析法的水利工程施工质量风险评估模型,得出以下主要结论:

第一,成功构建了适用于圩堤除险加固工程的五维 AHP—模糊综合评价模型。该模型包含人员、材料设备、施工技术、管理监督、自然环境五个准则层,该模型充分考虑了具体工程项目影响堤防除险加固过程中的关键因素,具有科学性和可操作性。

第二,该方法能够有效整合定性与定量信息,评价结果经一致性检验合理可信,提高了评价结果的可信程度,适用于圩堤除险加固工程质量风险评估。

第三,南方多雨地区圩堤除险加固施工质量采用模糊 AHP 进行风险评价时,项目应优先防控自然环境风险,重点优化雨季施工与汛期响应;同时需紧盯人员流动性、资料闭环管理两大薄弱环节,可显著提升评价实用性与管控针对性。

第四,本研究构建的指标体系、评价流程与分级管控标准,可为江西及类似地区圩堤除险加固工程的施工质量风险管理提供理论支撑与实践借鉴。

参考文献:

- [1] 李坤,司富安,张小宝,等.长江中下游堤防工程险情特点及成因研究[J].中国水利,2023(20):26-30.
- [2] 侯卫国,尚钦.新时期现代化堤防工程建设探讨[J].人民长江,2023,54(增刊1):72-76.
- [3] 朱伟,王健,黄升光.堤防工程加固标准化建设施工技术研究[J].人民黄河,2025,47(增刊2):19-20.
- [4] 蒋水华,陈颖霞,熊威,等.堤防工程险情风险评估与管控研究进展[J].人民珠江,2024,45(11):1-13.
- [5] 王小兵,章青,夏晓舟.堤防工程安全运行风险分析研究进展[J].人民黄河,2020,42(8):25-31.
- [6] 蔡跃波,向衍,盛金保,等.重大水利工程大坝深水检测及突发事件监测预警与应急处置研究及应用[J].岩土工程学报,2023,45(3):441-458.
- [7] 闫伟.水利水电规划中层次分析法的应用研究[J].水上安全,2025(6):52-54.
- [8] 宫晓华,张强,李枫.模糊层次分析法在淤地坝风险评价中的应用[J].水资源与水工程学报,2022,33(5):131-137;147.
- [9] 辛蕾.基于层次分析法桥梁施工安全风险评估研究——以钢管混凝土拱桥某桥为例[J].四川建材,2026,52(3):167-170.
- [10] 占海波.基于模糊综合评价的大坝运行状态评价分析[J].水利技术监督,2025(1):113-117.
- [11] 魏焱圣,褚润.基于 AHP—模糊综合评价法的河流健康评价[J].水利规划与设计,2025(9):48-54;73.
- [12] 诸卫卫.基于模糊层次分析的水利工程建设风险评估及控制研究[J].珠江水运,2022(21):114-116.
- [13] 詹纪文.基于模糊层次分析法的堤防安全稳定性评价[J].水利科技与经济,2024,30(12):149-152.
- [14] 付文生,陈海燕.基于 AHP—模糊综合评价法的水利防洪工程评价研究[J].四川水利,2024,45(6):104-107;173.
- [15] 王楚.基于模糊层次综合评价法的水利施工质量风险评估研究[J].水利科学与寒区工程,2021,4(3):89-93.