

doi: 10.16104/j.issn.1673-1891.2023.02.005

基于FAHP的既有房屋改建施工安全风险评估模型及应用

梁冠军, 尤超, 张勇, 安静

(滁州职业技术学院建筑工程学院, 安徽滁州 239000)

摘要: 根据既有房屋改建工程的工程特点, 运用模糊层次分析(fuzzy analytic hierarchy process, FAHP)法, 建立既有房屋改建施工安全风险评估模型。该模型实施包含6个步骤: (1) 施工风险因素搜集与识别; (2) 建立判断矩阵; (3) 权重计算; (4) 构建隶属函数; (5) 计算隶属度; (6) 模糊权重综合运算, 最终得出既有房屋改建施工各风险因素占比, 进一步确定改建施工的安全等级。通过工程实例验证, 该模型和实例结果具有较好的一致性, 因而, FAHP法在既有房屋改建施工安全风险评估中的应用效果很好, 值得推广。

关键词: 模糊层次分析法; 既有房屋; 改建; 安全评估; 隶属函数

中图分类号: TU746.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-1891(2023)02-0028-06

Risk Assessment Model and Its Application on Existing Building Reconstruction Based on FAHP

LIANG Guanjun, YOU Chao, ZHANG Yong, AN Jing

(College of Civil Engineering, Chuzhou Vocational and Technical College, Chuzhou, Anhui 239000, China)

Abstract: According to the engineering characteristics of the reconstruction of existing buildings, the fuzzy analytic hierarchy process (FAHP) method is used to establish the risk assessment model for the reconstruction of existing buildings. The implementation of the model includes six steps: (1) collection and identification of construction risk factors; (2) establishment of judgment matrix; (3) weight calculation; (4) construction of membership function; (5) calculation of the degree of membership; (6) comprehensive operation of fuzzy weight. Finally, the proportions of risk factors in the reconstruction of existing buildings are obtained, and the safety levels of reconstruction are further determined. It is verified by an example that the model and the result of the example have satisfactory consistency. Therefore, the application of FAHP method in the risk assessment of the reconstruction of existing buildings is very effective and worth popularizing.

Keywords: fuzzy analytic hierarchy process method; existing building; building reconstruction; risk assessment; membership function

0 引言

近年来, 既有房屋坍塌事故时有发生^[1-5], 尤其是酒店、住宅、办公楼等改建、扩建、装修时, 施工队违规作业, 破坏了房屋原有的承重结构, 改变了上部结构的传力路径, 造成大量的人民生命财产的严重损失。

模糊层次分析(FAHP)法是一种在工程领域评估不确定性影响后果的常用方法^[6-7], 利用该方法在房屋建筑结构安全性风险评估方面, 已经出现了一

些典型的研究成果。赵明^[8]从建筑构造角度出发建立了混凝土建筑房屋安全评价体系, 该体系包含6个一级评价指标和23个二级指标, 将评价结果划分为4个安全等级, 评价指标较为全面, 结果相对可靠; 杨修歌^[9]根据村镇房屋布局和结构形式, 把村镇房屋划分为包含基础构件、竖向承重构件、上部构件的3个一级评价指标、9个二级评价指标, 建立通用的安全评估体系, 较为全面地评估房屋的使用现状; 根据建筑房屋结构的复杂性与安全评价因素的模糊多样性, 魏海霞等^[10]建立房屋结构的安全评价

收稿日期: 2023-02-12

基金项目: 安徽省教育厅自然科学重点研究项目(KJ2020A0994、2022AH052650); 安徽省教育厅高校优秀青年人才支持项目(gxyq2022231); 安徽省教育厅高校优秀拔尖人才培养项目(gxgnfx2022156)。

作者简介: 梁冠军(1983—), 男, 安徽涡阳人, 副教授, 硕士, 主要研究方向: 土木工程安全评估。

体系, 该体系引入两类隶属函数, 对现有规范中对复杂建筑结构的适用性进一步完善。然而, 上述文献研究结合建筑结构构件自身特性, 仅从结构设计角度进行安全评价, 而缺少针对诸多施工技术因素和相关的管理因素。

本文根据既有房屋改建工程的工程特点, 运用 FAHP 法, 建立既有房屋改建施工安全风险评估模型。该模型实施包含 6 个步骤: (1) 施工风险因素搜集与识别; (2) 建立判断矩阵; (3) 权重计算; (4) 构建隶属函数; (5) 计算隶属度; (6) 模糊权重综合运算, 最终得出既有房屋改建施工各风险因素占比, 进一步确定改建施工的安全等级。

1 既有房屋改建施工安全性风险评估模型

1.1 结构安全性风险因素识别

从既有房屋改建施工的特点出发, 参考《危险房屋鉴定标准》(JGJ 125—2016)^[11]、《房屋完损等级鉴定标准》^[12]、《民用建筑可靠性鉴定标准》(GB 50292—2015)^[13]等, 选择合适的层次结构图, 将安

全风险评估问题分为目标层、准则层和指标层的三层次安全风险评价体系。其中, 目标层为既有房屋改建施工安全性风险评估(A); 准则层包括施工技术因素(A₁)和项目管理因素(A₂)这 2 部分; 指标层包括 A_{1i}(i = 1, 2, …, 6)和 A_{2j}(j = 1, 2, …, 5), A_{1i} 为施工技术因素(A₁)下的风险因素, A_{2j} 为项目管理因素(A₂)下的风险因素, 具体层次结构如图 1 所示。

《房屋完损等级鉴定标准》^[12]根据房屋完好损坏程度, 将房屋划分为 5 种完损情况, 即完好、基本完好、一般损坏、严重损坏和危险, 本文将这 5 种完损情况匹配为 5 个不同的风险等级(表 1), 并令既有房屋改建施工安全性风险等级 V=[V₁ V₂ V₃ V₄ V₅]。

1.2 结构安全性风险权重计算

既有房屋改建施工安全风险因素识别后, 分别构造指标层 A_{1i} 和 A_{2j} 的判断矩阵 P₁ 和 P₂。通过专家打分的方式, 分别对指标层 A_{1i} 和 A_{2j} 各风险因素进行两两比较, 运用 1~9 标度法(表 2)进行赋值^[14], 得到相应的判断矩阵 P₁ 和 P₂。

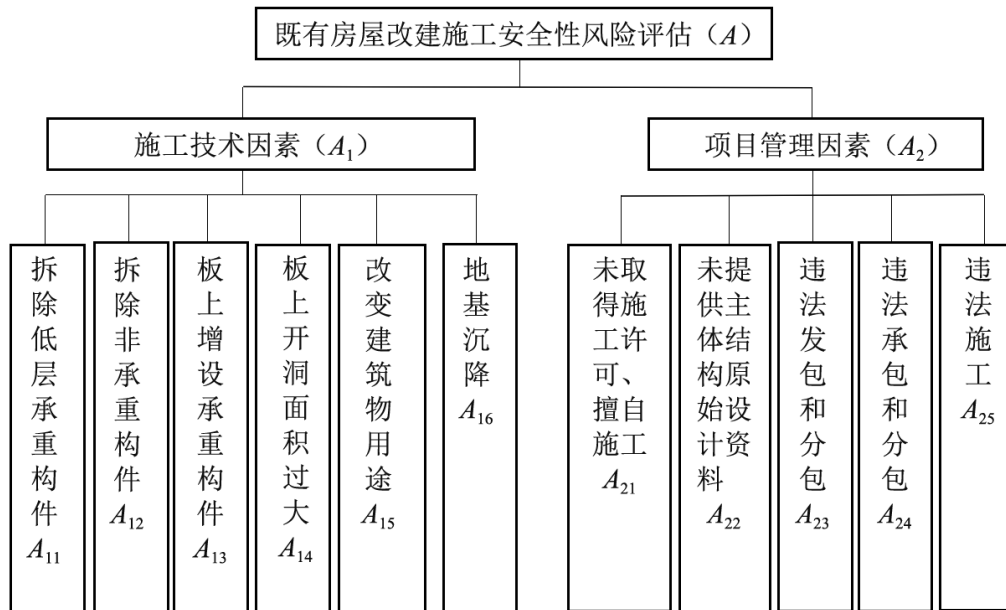


图 1 既有房屋改建施工安全性风险评估层次结构

表 1 房屋完损情况与风险等级匹配表

完损情况	风险等级
完好	极低风险 V ₁
基本完好	低风险 V ₂
一般损坏	中等风险 V ₃
严重损坏	高风险 V ₄
危险	极高风险 V ₅

运用和积法, 计算判断矩阵的特征向量 W_j 和最大特征值 λ_{fmax} (本文 f = 1, 2)。特征向量也就是权重向量。最大特征值 λ_{fmax} 计算公式如式(1)所示

$$\lambda_{fmax} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(P_f W_f)_i}{W_i} \quad (1)$$

式中: P_f 表示特征向量; i 表示风险因素的序号; n 表示指标层内风险因素的数量。

最后利用公式(2)进行一致性检验。

表2 1~9 标度法赋值含义

标度数值	含义
1	两个因素相比,具有同样重要性
3	两个因素相比,前者比后者稍微重要
5	两个因素相比,前者比后者明显重要
7	两个因素相比,前者比后者强烈重要
9	两个因素相比,前者比后者极端重要
2,4,6,8	其重要程度介于上述两相邻评定尺度之间
倒数	若元素 <i>i</i> 和 <i>j</i> 的重要性之比为 a_{ij} ,那么元素 <i>j</i> 和 <i>i</i> 的重要性之比为 $a_{ji} = \frac{1}{a_{ij}}$

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}, CR = \frac{CI}{RI} \quad (2)$$

式中:CI表示一致性指数(consistency index);RI值表示为一致性指标平均值,其值如表3所示;CR值表示为一致性检验指标,当CR值小于0.1时,则认定判断矩阵一致性较为满意,符合检验要求,反之,应重新调整判断矩阵。

表3 一致性指标平均值

<i>n</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.46

将指标层的权重向量与准则层中的权重向量相乘,得到综合权重W。

1.3 结构安全性风险隶属度计算

1.3.1 风险影响后果与风险发生概率的估值

根据风险发生后房屋完损情况,把既有房屋改建施工中的风险影响后果(C)分别赋予1~5的数值。同理,把风险发生概率(P)也分为5种情况,同样赋予相应的数值,如表4所示。

表4 风险影响后果(C)和风险概率(P)的估值

风险影响后果(C)	估值	风险发生概率(P)	估值
完好	1	罕见发生	1
基本完好	2	偶见发生	2
一般损坏	3	可能发生	3
严重损坏	4	预期发生	4
危险	5	频繁发生	5

1.3.2 确定风险隶属函数

采用左右型(L-R)模糊数构建一个梯形分布的风险隶属函数 $V(x)^{[15]}$,考虑风险影响后果(C)和风险发生概率(P)的估值,构造 $x = P \times C$ 在区间[1~

25]的分值,风险等级对应的分值如表5所示。本文中风险隶属函数 $V_N(x)$ 如式(3)~(7)所示,其中,N表示风险等级的级别序号(表1), $N=1,2,\dots,5$ 。

表5 风险等级对应的分数

风险等级	极低风险 V_1	低风险 V_2	中等风险 V_3	高风险 V_4	极高风险 V_5
分数	0~5	5~<10	10~<15	15~<20	20~25

$$V_1(x) = \begin{cases} 1, 0 < x \leq 4 \\ 5 - x, 4 < x \leq 5 \\ 0, x > 5 \end{cases} \quad (3)$$

$$V_2(x) = \begin{cases} x - 4, 4 \leq x < 5 \\ 1, 5 \leq x \leq 9 \\ 10 - x, 9 < x \leq 10 \\ 0, x < 4 \text{ 或 } x > 10 \end{cases} \quad (4)$$

$$V_3(x) = \begin{cases} x - 9, 9 \leq x < 10 \\ 1, 10 \leq x \leq 15 \\ 16 - x, 15 < x \leq 16 \\ 0, x < 9 \text{ 或 } x > 16 \end{cases} \quad (5)$$

$$V_4(x) = \begin{cases} x - 15, 15 \leq x < 16 \\ 1, 16 \leq x \leq 20 \\ 21 - x, 20 < x \leq 21 \\ 0, x < 15 \text{ 或 } x > 21 \end{cases} \quad (6)$$

$$V_5(x) = \begin{cases} x - 20, 20 \leq x < 21 \\ 1, 21 \leq x \leq 25 \\ 0, x < 20 \end{cases} \quad (7)$$

1.3.3 风险因素风险等级隶属度计算

风险因素风险等级隶属度计算过程分为3个步骤:(1)专家根据表2对指标层中各风险因素风险影响后果(C)和风险概率(P)进行估值;(2)将相应的专家估值C和估值P相乘;(3)把C和P的乘积带入

隶属函数 $V_{Nm}(x)$ 计算, 其结果便为该指标(风险因素)的风险等级隶属度。各风险因素风险等级隶属度构成风险因素风险等级评价矩阵 R , 如式(8)所示。

$$R = \begin{bmatrix} V_{11} & \cdots & V_{15} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ V_{n1} & \cdots & V_{n5} \end{bmatrix} \quad (8)$$

1.4 模糊风险权重综合计算

根据相应的矩阵合成法则, 把综合权重 W 与评价矩阵 R 进行模糊计算, 得到既有房屋改建施工安全的总体评估结果 S , 如式(9)所示

$$S = W \circ R \quad (9)$$

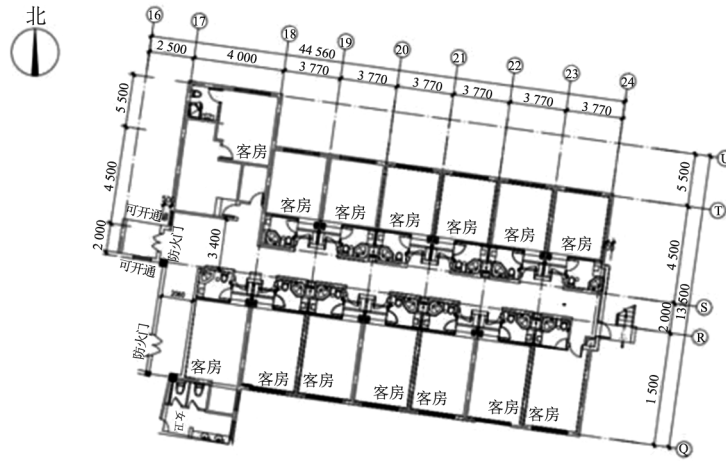


图 2 辅房底层建筑平面图^[16]

该酒店主体建筑为 4 层钢筋混凝土结构(2010 年建成), 辅房为 3 层砖混结构(20 世纪 80 年代中期建设), 墙体采用八五烧结黏土砖砌筑, 墙厚 220 mm, 楼屋面为预制混凝土空心板, 板宽 500 mm, 楼屋面处设有 220 mm×220 mm 钢筋混凝土圈梁, 圈梁配筋 4φ10, 基础为条形砖基础, 基础上地圈梁 220 mm×120 mm。

2.2 结构安全性风险因素识别及风险权重计算结果

按照 1.1 建立目标层既有房屋改建施工安全性风险评估(A)、准则层施工技术因素(A₁)和项目管理因素(A₂)、指标层 A_{1i} 和 A_{2j}。

因准则层包含因素少, 直接给出其权重值, 施工技术因素(A₁)权重为 0.7, 项目管理因素(A₂)权重为 0.3。

邀请岩土勘察、结构设计、施工管理和安全评估方面的 7 位专家, 其中岩土勘察专家 1 名, 其余专家均 2 名, 所邀请专家均具有高级职称。专家按照表 1 的标度法对指标层进行打分, 分别建立判断矩阵 P₁(表 6)和 P₂(表 7)。

式中: ◦ 为模糊算子。

根据模糊识别原理, 并结合最大隶属度原则, 便可确定既有房屋改建施工安全的总体风险等级。

2 实例分析

2.1 既有房屋改建工程概况

本实例选取发生在苏州市吴江区的“‘7·12’四季开源酒店辅房坍塌事故”涉事改建项目, 根据“7·12”四季开源酒店辅房坍塌事故调查报告^[16], 该酒店建筑总面积为 5 338.5m², 包括主体建筑和辅房 2 部分, 辅房东西长 22.9 m, 南北宽 16.27 m, 每层过道南北侧各 6 间房, 如图 2 所示。

表 6 判断矩阵 P₁

	A ₁₁	A ₁₂	A ₁₃	A ₁₄	A ₁₅	A ₁₆
A ₁₁	1	7	5	6	8	2
A ₁₂	1/7	1	1/5	1/3	1/2	1/5
A ₁₃	1/5	5	1	2	3	1/2
A ₁₄	1/6	3	1/2	1	2	1/3
A ₁₅	1/8	2	1/3	1/2	1	1/2
A ₁₆	1/2	5	2	3	2	1

表 7 判断矩阵 P₂

风险因素	A ₂₁	A ₂₂	A ₂₃	A ₂₄	A ₂₅
A ₂₁	1	1/5	1/2	1/3	1/5
A ₂₂	5	1	5	3	1/3
A ₂₃	2	1/5	1	1/2	1/5
A ₂₄	3	1/3	2	1	1/3
A ₂₅	5	3	5	3	1

分别应用和积法计算判断矩阵 P_1 和 P_2 的权重向量和最大特征, 并进行一致性检验, 结果表 8 所示。综合权重如表 9 所示。

表 8 和积法计算结果

指标层	判断矩阵权重向量和最大特征值	CR	结论
A_{1i}	$W_1 = [0.453\ 3\ 0.038\ 8\ 0.145\ 0\ 0.089\ 4\ 0.065\ 4\ 0.208\ 1]$, $\lambda_{1max} = 6.236\ 2$	0.038 1	检验通过
A_{2j}	$W_2 = [0.056\ 2\ 0.287\ 7\ 0.080\ 4\ 0.139\ 0\ 0.436\ 7]$, $\lambda_{2max} = 5.222\ 8$	0.049 7	检验通过

表 9 既有房屋改建施工安全性风险评估权重

目标层	准则层	准则层权重	指标层	指标层权重	综合权重
既有房屋改建施工安全性风险评估(A)	施工技术因素(A ₁)	0.7	拆除低层承重构件(A ₁₁)	0.453 3	0.317 3
			拆除非承重构件(A ₁₂)	0.038 8	0.027 2
			板上增设承重构件(A ₁₃)	0.145 0	0.101 5
			板上开洞面积过大(A ₁₄)	0.089 4	0.062 6
			改变房屋使用用途(A ₁₅)	0.065 4	0.045 8
			地基沉降(A ₁₆)	0.208 1	0.145 7
	项目管理因素(A ₂)	0.3	未取得施工许可、擅自施工(A ₂₁)	0.056 2	0.016 9
			未提供主体结构原始设计资料(A ₂₂)	0.287 7	0.086 3
			违法发包、分包(A ₂₃)	0.080 4	0.024 1
			违法承包、分包(A ₂₄)	0.139 0	0.041 7
			违规施工(A ₂₅)	0.436 7	0.131 0

2.3 风险因素风险等级隶属度计算结果

上述专家结合各自的经验对风险影响后果和风险发生概率在 1~5 的范围内进行打分, 归纳汇总的打分值如表 10 所示。将风险影响后果和风险发

生概率的专家打分值相乘, 带入上述隶属函数 $V_N(x)$ 中进行计算, 得到风险因素在各个风险水平中的隶属度, 得到评价矩阵 R , 如式(10)所示。

表 10 专家对 C 和 P 的打分值

	A ₁₁	A ₁₂	A ₁₃	A ₁₄	A ₁₅	A ₁₆	A ₂₁	A ₂₂	A ₂₃	A ₂₄	A ₂₅
风险影响后果 C	5	1	4	3	3	4	2	4	2	3	5
风险发生概率 P	4	3	2	1	4	1	5	5	3	4	4

$$R = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

2.4 模糊综合运算结果

该酒店辅房装修改建项目安全的总体评估结果 S , 如式(11)所示。由式(11)可知, 本改建施工的总风险等级为: 极低风险(23.54%)、低风险(12.56%)、中等风险(10.43%)、高风险(31.73%)和极高风险(21.71%), 其中, 中等风险、高风险和极高风险之和为 63.90%, 高风险和极高风险之和为 53.43%, 可见, 该酒店辅房装修改建工程施工安全风险极大, 在高风险区, 拆除低层承重构件(A₁₁)占

比31.73%,而在极高风险区需考虑未提供主体结构原始设计资料(A_{22})和违规施工(A_{25})的影响。

$$S = W \circ R = \begin{bmatrix} 0.3173 \\ 0.0272 \\ 0.1015 \\ 0.0626 \\ 0.0458 \\ 0.1457 \\ 0.0169 \\ 0.0863 \\ 0.0241 \\ 0.0417 \\ 0.1310 \end{bmatrix}^T \circ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 23.54\% & 12.56\% & 10.43\% & 31.73\% & 21.73\% \end{bmatrix} \quad (11)$$

值得说明的是,该酒店辅房坍塌事故造成17人死亡、5人受伤,直接经济损失约2615万元^[16]。

3 结语

本文根据既有房屋改建施工的工程特点,综合考虑技术和管理因素,提出了基于FAHP法的既有房屋改建施工安全风险评估模型。结合苏州市吴江区四季开源酒店辅房装修改建工程实例进行了安全评估验证,取得了良好的效果,综上,FAHP法可以对既有房屋改建施工进行安全评估,对风险因素占比进行量化,并进行了数学处理,计算结果更精确,本方法实用性强,有一定的推广价值。

参考文献:

- [1] 张展. 江苏苏州吴江区四季开源酒店辅房坍塌事故致17人遇难[J]. 现代职业安全, 2021(8): 8.
- [2] 张展. 福建泉州欣佳酒店“3·7”坍塌事故调查报告公布[J]. 现代职业安全, 2020(8): 9.
- [3] 邓宏旭. 房屋安全鉴定单位应具有设计资质——关于长沙居民自建房倒塌事故的思考[J]. 中国勘察设计, 2022(5): 84-86.
- [4] 吴晓静. 某多层混合结构房屋倒塌原因分析[J]. 福建建设科技, 2022(1): 33-35.
- [5] 费毕刚, 罗丹阳, 李云故. 某房屋结构倒塌事故鉴定分析及建议[J]. 工程建设标准化, 2021(S1): 91-94.
- [6] 冯军, 梁冠军. 模糊层次分析法(FUZZY-AHP)在城市路网施工安全评估中的研究与应用[J]. 安徽建筑, 2020, 27(1): 188-190+264.
- [7] 冯军, 梁冠军. 基于模糊层次分析法的软土地区顶管施工风险评估[J]. 广东土木与建筑, 2019, 26(12): 9-11.
- [8] 赵明. 建筑房屋结构的安全评价体系研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2019.
- [9] 杨修歌. 模糊层次分析法在村镇房屋鉴定中的应用[J]. 盐城工学院学报(自然科学版), 2019, 32(4): 59-62.
- [10] 魏海霞, 赵明, 祝杰. 基于模糊层次分析法的建筑结构安全评价体系研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17(5): 181-186+198.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 危险房屋鉴定标准: JGJ 125—2016[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [12] 城乡建设环境保护部. 房屋完损等级评定标准(试行)城住字[1984]第678号[EB/OL]. (2015-05-14)[2023-07-16]. <https://ziliao.co188.com/p41938135.html>.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 民用建筑可靠性鉴定标准: GB 50292-2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [14] 许树柏. 层次分析法原理[M]. 天津: 天津大学出版社, 1988.
- [15] 杨纶标, 高英仪, 凌卫新. 模糊数学原理及应用[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2011.
- [16] 江苏省人民政府事故调查组. 苏州市吴江区“7.12”四季开源酒店辅房坍塌事故调查报告[EB/OL]. (2022-03-25)[2023-07-16]. <http://www.hzzk.gov.cn/attachment/0/156/156176/4653449.pdf?eqid=97c6ff18005c6a9e0000000464520457>.