

doi: 10.16104/j.issn.1673-1891.2023.04.012

# 基于改进 AHP-FCE 法的装配式建筑安全风险分析

曹 泽, 邓欣然

(安徽建筑大学经济与管理学院, 安徽 合肥 230000)

**摘要:**为了解决当下装配式建筑存在的技术不成熟、人才储备不足等诸多问题所引起安全问题,运用德尔菲法结合领域内专家意见选取人员、环境、管理、设备、技术 5 个一级指标和 19 个二级指标,基于改进 AHP-FCE 方法,构建装配式建筑安全风险评估体系,确定各指标影响系数,最后进行比对排序,提炼影响装配式建筑安全的关键因素,并实证分析了某地装配式建筑项目的安全风险。结果表明:根据改进 AHP 模型计算,发现施工组织设计及施工方案、预制构件质量、节点连接准确度在安全风险影响因素中是主要影响因素,所占比重分别为 0.302、0.203、0.141;进一步结合 FCE 法,实证评价某实地项目处于较小风险水平。本文的研究多维度揭示了装配式建筑的安全风险因素,为实地项目安全管理提供了意见参考。

**关键词:**装配式建筑;安全风险因素;改进层次分析法;模糊综合评价

**中图分类号:**TU714;TU741 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-1891(2023)04-0069-07

## Risk Analysis of Assembly Building's Safety Based on Improved AHP-FCE Method

CAO Ze, DENG Xinran

(School of Economics and Management, Anhui Jianzhu University, Hefei, Anhui 230000, China)

**Abstract:**To solve the safety problems caused by immature technology, insufficient talent reserves and many other problems with the current assembly building, we use the Delphi method combined with expert opinions to select five primary indicators of personnel, environment, management, equipment and technology, and their 19 secondary indicators to construct, based on the improved AHP-FCE method, a risk assessment system for assembly building safety. We determine the influence coefficients of each indicator and compare and rank them, refine the key factors that affect the safety of assembly buildings, and empirically analyze the risk of an assembly building project's safety in a certain place. The results show that, according to the improved AHP model calculation, the construction organization and design and the construction plan, the prefabricated components' quality, and the accuracy of node connection are the major risk factors for assembly buildings, with proportions of 0.302, 0.203, and 0.141 respectively. Further, we empirically evaluated a field project with the FCE method, and it's at a relatively lower risk level. Our study multi-dimensionally reveals the risk factors for assembled buildings' safety, and provides references for the safety management of field projects.

**Keywords:**assembly building; safety risk factors; improved analytic hierarchy process; fuzzy comprehensive evaluation

### 0 引言

随着经济社会的发展,中国房地产业进入“新常态”,传统建筑施工方式的弊端越来越明显。相比之下,装配式建筑是用预制部品部件在工地装配而成的建筑,具有施工高效、节约资源、场地占用少、噪声小以及污染小等传统建筑模式不具有的优势。2016年以来,在国务院的大力倡导下,装配式

建筑逐步发展起来<sup>[1]</sup>;2022年,住房和城乡建设部印发《“十四五”建筑业发展规划》,提出到2023年,装配式建筑占新建建筑的比例达到30%以上,装配式建筑无疑成为我国未来建筑业发展新趋势。风险被定义为在工作环境中可能导致事故的因素<sup>[2]</sup>,在装配式建筑的施工过程中,能够造成人员伤害、威胁建筑安全性能的一系列要素即为装配式建筑的安全风险因素。由于我国装配式建筑起步较晚,产

收稿日期:2023-02-24

基金项目:安徽省科研编制计划项目(2022AH050214);安徽省教育厅自然科学基金一般项目(KJ2018JD10)。

作者简介:曹泽(1969—),男,安徽颍上人,教授,博士,主要研究方向:技术经济评价、建筑经济,e-mail: caoze06@163.com。

业链不够成熟且整合度不高,更易发生如高空坠落、坍塌等事故,研究装配式建筑安全风险因素对于发现风险隐患、控制风险薄弱点、降低事故发生率等具有重要意义。当下,国内外对于装配式建筑的研究主要集中在人、物、环境、管理等方面<sup>[3]</sup>,在安全风险方面的研究不多,且研究内容主要集中在探索危险源和项目安全评价上。

在危险源的识别方面,李浩然等<sup>[4]</sup>提出在装配式建筑的各阶段管理中,预制构件存放、吊运阶段,进场及运输阶段风险最大;常春光等<sup>[5]</sup>运用二元决策图得出装配式建筑的危险源有高空坠物、安全防护、预制构件和相关设备;李文龙等<sup>[6]</sup>认为装配式建筑的风险主要在于人和物 2 个方面,如施工人员素养、预制构件质量方面;王军武等<sup>[7]</sup>指出起重机械超负荷运行、现场安全管理不到位、吊索吊具存在缺陷等因素是影响装配式建筑吊装施工安全风险的关键风险因素;Bavafa 等<sup>[8]</sup>运用 DEMATEL 及模糊数学模型来识别安全因素,并提出从安全承诺和责任、分包商和人员选择、安全主管和专业人员、安全计划、员工参与 5 个方面进行风险防控;Li 等<sup>[9]</sup>则认为施工前的决策阶段对建筑安全影响最大,应重点关注;何正豪等<sup>[10]</sup>从参建单位的视角看,监理规划与实施细则的质量,装配式施工安全专项方案落实情况,危险性较大的分部分项工程论证等因素为装配式施工安全关键风险因素;姜吉坤等<sup>[11]</sup>从吊装施工的现场看,运用改进的变权物元可拓模型,得出吊装人员安全意识、作业人员状态、安全管理制度是关键风险因素。

在装配式项目的安全评价方面,丁彦等<sup>[12]</sup>运用 ABC 分类法结合主观赋分,对实地装配式建筑项目进行安全评价,总结该项目的 A 级风险为安全防护和技术水平;杨元元等<sup>[13]</sup>使用组合赋权二维云模型对装配式建筑吊装施工进行安全评价,确定实地项目的安全风险等级为三级;Liu 等<sup>[14]</sup>运用模糊分析定性的理念分析关键影响因素,在熵权法求取客观权重的基础上,采用云模型对装配式建筑安全进行风险评价;Zhao 等<sup>[15]</sup>在 IFS 的基础上建立了绩效评价指标,运用 TOPSIS 法对装配式建筑项目进行风险评价。其他方法如李英攀等<sup>[16]</sup>根据人-机-料-法-环(4M1E)、陈为公等<sup>[17]</sup>运用向量夹角余弦方法、付杰<sup>[18]</sup>运用灰色聚类综合评价法构建装配式建筑安全评价模型和安全评价体系,较为全面地概括了影响装配式建筑的风险因素,直观表明其研究项目安全水平高低。

综上所述,国内外学者对装配式建筑安全风险

研究主要集中在风险因素识别和项目安全评价 2 方面,同时,大多方法计算过程复杂,步骤烦冗,容易造成较大误差,也不便于工程实践。本文将改进的层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)和模糊综合评价(fuzzy comprehensive evaluation, FCE)法结合,用定性与定量相结合的方法对装配式建筑安全风险进行分析,评价安全等级,对各指标构建计算矩阵,运用数学变换创立一致性矩阵,避开一致性检验,提高运算效率,最终得到各指标权重。最后基于模型结果和实证分析,揭示装配式建筑安全风险控制的重点,为管理控制装配式建筑安全风险提供参考。

## 1 改进 AHP-FCE 方法论

传统层次分析法(AHP)是按照一定的标度方法,对层次化的指标进行两两比对,结合定性与定量分析,对多个目标进行决策分析的方法。将最终目标分解成不同层级的因素指标,分为目标层、准则层和指标层,形成层次结构模型,采用九标度法,即用数字 1~9 对各指标打分,形成判断矩阵,待通过一致性检验后,计算判断矩阵的最大特征值和特征向量,得到各层次的权重值,将指标层各个指标的权重值乘以所属准则层因素权重值,从而得到各指标的影响因素大小。

在指标数目较少时,传统层次分析法效果较好;对于指标数较多的情况,采用 1~9 打分将导致差异性不明确,计算次数多。加之九标度的 5 个判断区间难以把握,使得最终判断易出现模糊性与范围性,影响结果的准确性。

本文采用改进的层次分析法,即采用 0~1 打分的三标度法,由 0、0.5、1 进行打分,0 表示因素  $e$  重要性不如因素  $f$ , 0.5 表示因素  $e$  和因素  $f$  同等重要,1 是因素  $e$  重要性高于因素  $f$ 。三标度法加大了指标间的区分度,在指标较多的情况下减少了权重选择的模糊性,最后采用数学方法将权重矩阵转化为一致性矩阵,避开一致性检验,使其满足一致性要求,直接求出指标权重进行比对和最终决策。

模糊综合评价(FCE)法是由美国 Zadeh 教授提出,基于模糊数学理论对不确定性事物的评价方法,运用隶属函数矩阵和运算变换,将定性与定量相结合,对具有模糊性的指标进行分级评价。由于安全风险评价本身具有不确定性,各专家及施工人员对风险指标认识不一,使得风险评价具有主观因素、有不确定性,用模糊评价法将主观评价转换为客观分数,从而实现对安全风险指标的客观评价。

### 1.1 改进 AHP-FCE 计算步骤

本文使用改进的 AHP 和 FCE 结合的方法进行装配式建筑施工安全风险因素评估, 具体步骤如下。

#### 1.1.1 改进 AHP 步骤

1) 建立指标体系。

首先确定目标层; 然后建立准则层, 准则层中的因素即为一级指标  $T_i$ ; 最后建立指标层, 指标层中的因素即为二级指标  $T_{ij}$ 。

2) 按三标度法(0、0.5、1)构建指标的判断矩阵  $A$ 。

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{pmatrix}。$$

3) 对判断矩阵  $A$  进行数学变换, 创建中间过渡矩阵  $B$ 。

$$B = \begin{pmatrix} b_{11} & \cdots & b_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{n1} & \cdots & b_{nn} \end{pmatrix}。$$

设  $b_{ij}$  为过渡矩阵  $B$  中的项, 则  $b_{ij}$  由式(1)求得。

$$b_{ij} = \begin{cases} \frac{(x_i - x_j)(q - 1)}{x_{\max} - x_{\min}} + 1, & x_i \geq x_j \\ \left[ \frac{(x_j - x_i)(q - 1)}{x_{\max} - x_{\min}} + 1 \right]^{-1}, & x_i < x_j \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $x_i = a_{i1} + a_{i2} + \cdots + a_{in}$ ,  $x_j = a_{j1} + a_{j2} + \cdots + a_{jn}$ ,  $x_{\max} = \max(x_1, x_2, \cdots, x_n)$ ,  $x_{\min} = \min(x_1, x_2, \cdots, x_n)$ ,  $q = x_{\max}/x_{\min}$ 。

4) 由过渡矩阵  $B$  计算一致性矩阵  $C$ 。

$$C = \begin{pmatrix} c_{11} & \cdots & c_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{n1} & \cdots & c_{nn} \end{pmatrix}。$$

设  $c_{ij}$  为一致性矩阵  $C$  中的项, 则  $c_{ij}$  由式(2)求得。

$$C_{ij} = e^{\frac{1}{n} \times \sum_{k=1}^n [\ln(b_{ik}) - \ln(b_{jk})]} = e^{\frac{1}{n} \times \ln \frac{b_{i1} \times b_{i2} \times \cdots \times b_{in}}{b_{j1} \times b_{j2} \times \cdots \times b_{jn}}} = \left( \frac{b_{i1} \times b_{i2} \times \cdots \times b_{in}}{b_{j1} \times b_{j2} \times \cdots \times b_{jn}} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (2)$$

由式(2)可知,  $c_{ij}$  满足  $c_{ij} = 1/c_{ji}$ ,  $c_{ij} = c_{ik} \times c_{kj}$  且有  $c_{ii} = 1$ , 故矩阵  $C$  为一次性矩阵, 不用再进行一致性转化。

5) 计算各指标权重。

参考 Zhao 等<sup>[19]</sup>对权重的计算方法, 使用方根法求各指标权重, 并进行归一化处理, 得到各指标最终权重。

首先, 计算各因素初始权重  $m_i$ , 如式(3)所示:

$$m_i = (c_{i1} + c_{i2} + \cdots + c_{in})^{\frac{1}{n}} \quad (3)$$

其次, 归一化处理得到各指标最终权重  $w_i$ , 如式(4)所示:

$$w_i = m_i / \sum_{i=1}^n m_i \quad (4)$$

最后, 令各指标最终权重组成向量  $W = (w_1, w_2, \cdots, w_n)$ 。

#### 1.1.2 FCE 法步骤

1) 建立评价集。

确定研究对象评语等级, 表示为  $V$ , 本文中装配式建筑安全风险分为 5 级, 取  $V = \{\text{极小风险, 较小风险, 一般风险, 较大风险, 极大风险}\}$ , 分别对应 1~5 级, 对应分数区间为  $\{>80 \sim 100, >60 \sim 80, >40 \sim 60, >20 \sim 40, 0 \sim 20\}$ 。

2) 隶属度矩阵构建。

参考于艳芳等<sup>[20]</sup>的做法, 对各风险指标在项目上的体现赋分, 构建模糊评价矩阵(隶属度矩阵)  $S_i$  ( $t$  取值范围为准则层指标数量, 在本文中,  $t=1, 2, \cdots, 5$ )。

3) 确定风险等级。

结合改进 AHP 所求权重向量  $W = (w_1, w_2, \cdots, w_n)$  和模糊评价矩阵  $S_i$ , 计算  $W \times S_i$  即得各指标隶属度向量  $D_i$ , 组合形成隶属度矩阵  $R$ 。

$$D_i = W \times S_i \quad (5)$$

$$R = \begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \\ \vdots \\ D_t \end{pmatrix} \quad (6)$$

取评价标准集的中位数与各指标隶属度乘积之和求得最终得分。

## 2 基于改进 AHP-FCE 法的装配式建筑安全评价体系构建

### 2.1 指标选取

装配式建筑安全风险指标涉及多个方面, 指标选取的过程中, 总结领域相关专家(包括高校工程管理和建筑工程领域专家、施工现场负责人及部分施工人员)意见, 结合文献梳理, 依据国务院关于促进建筑业持续健康发展的意见, 力求指标的相对独立性, 避免重复或有较强相关性的指标出现, 选择较为系统且全面的指标。最终, 装配式建筑安全风险评价体系的准则层涉及人员、环境、管理、设备和技术风险共 5 个指标, 指标层共 19 个指标, 具体指标如下:

1) 人员风险  $T_1$ : 指施工过程中, 基于人的主动行为或心理活动造成的风险, 本文列举出作业人员安全意识  $T_{11}$ , 作业人员技术水平  $T_{12}$ , 作业人员健康状况  $T_{13}$ , 作业人员文化素质  $T_{14}$ , 作业不规范  $T_{15}$  共 5 项子风险因素。

2) 环境风险  $T_2$ : 指周围环境(自然环境、政策环境等)对施工作业本身或作业人员产生影响而造成的风险, 根据现场调查, 本文共选出现场气候环境  $T_{21}$ , 安全标准政策环境  $T_{22}$ , 吊装作业环境  $T_{23}$  共 3 项子风险因素。

3) 管理风险  $T_3$ : 指在管理运作过程中因信息不对称、判断失误、制度不完备、管理不善等影响了管理水平从而对装配式施工造成风险。本文共筛选出安全事故应急处理  $T_{31}$ 、安全教育培训  $T_{32}$ 、管理制度完善  $T_{33}$ 、构件吊装及堆放管理  $T_{34}$  共 4 项子风险因素。

4) 设备风险  $T_4$ : 因作业设备的质量问题、设备故障等基于设备运作的客观因素而造成的风险, 本文共选取预制构件质量  $T_{41}$ 、设备定期安全检查  $T_{42}$ 、吊装设备临时支撑强度  $T_{43}$  共 3 项子风险因素。

5) 技术风险  $T_5$ : 基于现有技术的成熟程度(包括但不限于施工技术、管理检测技术等)对工程作业产生的影响, 本文选出节点连接准确度  $T_{51}$ 、安全检测技术  $T_{52}$ 、施工组织设计及施工方案  $T_{53}$ 、构件连接强度  $T_{54}$  共 4 项子风险因素。

### 2.2 权重计算

由改进的 AHP 三标度法, 邀请相关领域专家根据指标间两两比较进行赋值, 得到指标间的判断矩阵如下:

$$A = \begin{pmatrix} 0.5 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0.5 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0.5 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0.5 \end{pmatrix},$$

$$A_{11} = \begin{pmatrix} 0.5 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0.5 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0.5 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0.5 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0.5 \end{pmatrix},$$

$$A_{12} = \begin{pmatrix} 0.5 & 0 & 0 \\ 1 & 0.5 & 0 \\ 1 & 1 & 0.5 \end{pmatrix},$$

$$A_{13} = \begin{pmatrix} 0.5 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0.5 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0.5 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0.5 \end{pmatrix},$$

$$A_{14} = \begin{pmatrix} 0.5 & 1 & 1 \\ 1 & 0.5 & 0 \\ 0 & 1 & 0.5 \end{pmatrix},$$

$$A_{15} = \begin{pmatrix} 0.5 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0.5 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0.5 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0.5 \end{pmatrix}.$$

以准则层(一级指标)为例,  $x_{\max}=4.5, x_{\min}=0.5, q=9$ , 应用式(1)计算其过渡矩阵为

$$B_1 = \begin{pmatrix} 1 & 5 & 3 & 1/3 & 1/5 \\ 1/5 & 1 & 1/3 & 1/7 & 1/9 \\ 1/3 & 3 & 1 & 1/5 & 1/7 \\ 3 & 7 & 5 & 1 & 1/3 \\ 5 & 9 & 7 & 3 & 1 \end{pmatrix}.$$

应用式(2)计算其一致性矩阵

$$C_1 = \begin{pmatrix} 1 & 1.904 & 1.712 & 0.544 & 0.254 \\ 0.254 & 1 & 0.517 & 0.125 & 0.065 \\ 0.491 & 1.933 & 1 & 0.241 & 0.125 \\ 2.036 & 4.210 & 4.146 & 1 & 0.517 \\ 3.936 & 15.494 & 8.015 & 1.933 & 1 \end{pmatrix}.$$

对所求一致性矩阵的行求和, 由式(3)对其和开五次方根, 最后按式(4)进行归一化处理, 得到一级指标权重  $W$ :

$$W_1 = (0.116 \quad 0.035 \quad 0.067 \quad 0.244 \quad 0.538).$$

同理, 求得各二级指标权重:

$$W_{11} = (0.283 \quad 0.074 \quad 0.591 \quad 0.038 \quad 0.015),$$

$$W_{12} = (0.166 \quad 0.041 \quad 0.793),$$

$$W_{13} = (0.261 \quad 0.498 \quad 0.185 \quad 0.055),$$

$$W_{14} = (0.830 \quad 0.136 \quad 0.034),$$

$$W_{15} = (0.262 \quad 0.121 \quad 0.562 \quad 0.055).$$

根据一级指标和二级指标权重, 得到总权重, 如表 1 所示。

## 3 实证分析

### 3.1 工程概况

某公司是国家高新技术企业, 全国优秀施工企业, 公司多次承建“高、大、精、尖”项目, 完成了一大批质量要求高、工期要求紧、难度要求大的大型和特大型工程。近年来, 公司稳健发展, 深耕安徽, 在长三角区域、粤港澳大湾区等地均大力开展经营。某产业基地一期项目由该公司承建。该项目地上为装配式建筑, 采用装配化施工。项目总建筑面积 91 668.36  $m^2$ , 总用地面积 70 705.63  $m^2$ , 主体结构采用预制叠合板, 预制楼梯、预制内隔墙板, 总体预制率不低于 40%, 是标准的装配式建筑。

表 1 装配式建筑安全风险评价各指标权重

目标层	准则层	一级指标权重	指标层	二级指标权重	总权重	排序
装配式建筑安全风险	人员风险 $T_1$	0.116	作业人员安全意识 $T_{11}$	0.283	0.034	6
			作业人员技术水平 $T_{12}$	0.074	0.009	13
			作业人员健康状况 $T_{13}$	0.591	0.069	4
			作业人员文化素质 $T_{14}$	0.038	0.004	16
			作业不规范 $T_{15}$	0.015	0.002	18
	环境风险 $T_2$	0.035	现场气候环境 $T_{21}$	0.166	0.006	15
			安全标准政策环境 $T_{22}$	0.041	0.001	19
			吊装作业环境 $T_{23}$	0.793	0.028	10
	管理风险 $T_3$	0.067	安全事故应急处理 $T_{31}$	0.261	0.017	11
			安全教育培训 $T_{32}$	0.498	0.032	8
			管理制度完善 $T_{33}$	0.185	0.012	12
			构件吊装及堆放管理 $T_{34}$	0.055	0.004	16
	设备风险 $T_4$	0.244	预制构件质量 $T_{41}$	0.830	0.203	2
			设备定期安全检查 $T_{42}$	0.136	0.033	7
			吊装设备临时支撑强度 $T_{43}$	0.034	0.008	14
	技术风险 $T_5$	0.538	节点连接准确度 $T_{51}$	0.262	0.141	3
			安全检测技术 $T_{52}$	0.121	0.065	5
			施工组织设计及施工方案 $T_{53}$	0.562	0.302	1
			构件连接强度 $T_{54}$	0.055	0.030	9

3.2 模糊综合评价计算

评价标准根据现场施工情况设定, 选用 Likert 五点计分法, 确定安全风险评价集  $V = \{\text{极小风险、较小风险、一般风险、较大风险、极大风险}\}$ , 分别对应 1~5 级, 对应分数区间为  $\{>80 \sim 100, >60 \sim 80, >40 \sim 60, >20 \sim 40, 0 \sim 20\}$ 。

邀请该公司现场管理人员(项目负责人、工程部负责人等), 施工班组人员组成 10 人专家组, 对所选各项指标根据现场实情进行打分, 综合所有人员的赋分评价, 得到各指标在各风险等级的隶属度, 进而得到指标层隶属度矩阵  $(S_1, S_2, S_3, S_4, S_5)$  如表 2 所示。

3.2.1 二级指标模糊综合评价

根据改进的 AHP 所得各指标权重:

$$D_1 = W_{11} \times S_1 = (0.509 \quad 0.209 \quad 0.197 \quad 0.075 \quad 0.011),$$

$$D_2 = W_{12} \times S_2 = (0.308 \quad 0.297 \quad 0.104 \quad 0.196 \quad 0.113),$$

$$D_3 = W_{13} \times S_3 =$$

$$(0.244 \quad 0.202 \quad 0.316 \quad 0.181 \quad 0.056),$$

$$D_4 = W_{14} \times S_4 =$$

$$(0.456 \quad 0.207 \quad 0.214 \quad 0.110 \quad 0.014),$$

$$D_5 = W_{15} \times S_5 =$$

$$(0.409 \quad 0.207 \quad 0.144 \quad 0.218 \quad 0.023)。$$

得隶属度矩阵:

$$R = \begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \\ D_4 \\ D_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.509 & 0.209 & 0.197 & 0.075 & 0.011 \\ 0.308 & 0.297 & 0.104 & 0.196 & 0.113 \\ 0.244 & 0.202 & 0.316 & 0.181 & 0.056 \\ 0.456 & 0.207 & 0.214 & 0.110 & 0.014 \\ 0.409 & 0.207 & 0.144 & 0.218 & 0.023 \end{pmatrix}。$$

3.2.2 一级指标模糊综合评价

$$D = W_1 \times R = (0.417, 0.209, 0.177, 0.172, 0.025)。$$

取评价集分数区间每个分数段的中位数计算项目风险评价总分  $F = 0.417 \times 90 + 0.209 \times 70 + 0.177 \times 50 + 0.172 \times 30 + 0.025 \times 10 = 66.42$ 。

由模糊综合评价, 最终项目安全风险得分  $F = 66.42$ 。

表 2 各指标因素隶属度

一级指标	二级指标	隶属度 矩阵	隶属度				
			1级	2级	3级	4级	5级
人员风险因素	作业人员安全意识	$S_1$	0.6	0.2	0.2	0	0
	作业人员技术水平		0.4	0.3	0.1	0.1	0.1
	工作人员健康状况		0.5	0.2	0.2	0.1	0
	工作人员文化素质		0.3	0.2	0.3	0.1	0.1
	作业不规范		0.2	0.3	0.2	0.3	0
环境风险因素	现场气候环境	$S_2$	0.3	0.2	0.1	0.2	0.2
	安全标准政策环境		0.5	0.2	0.2	0.1	0
	吊装作业环境		0.3	0.3	0.1	0.2	0.1
管理风险因素	安全事故应急处理	$S_3$	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1
	安全教育培训		0.3	0.1	0.4	0.2	0
	管理制度完善		0.2	0.2	0.4	0.1	0.1
	构件吊装及堆放管理		0.1	0.2	0.3	0.2	0.2
设备风险因素	预制构件材料质量	$S_4$	0.5	0.2	0.2	0.1	0
	设备定期安全检查		0.2	0.2	0.3	0.2	0.1
	吊装设备临时支撑强度		0.4	0.4	0.2	0	0
技术风险因素	节点连接准确度	$S_5$	0.5	0.2	0.3	0	0
	安全监测技术		0.3	0.3	0.2	0.1	0.1
	施工组织设计及施工方案		0.4	0.2	0.1	0.3	0
	构件连接强度		0.3	0.1	0.2	0.2	0.2

### 3.3 评价结果分析

根据上述计算结果,根据最大隶属度原则,该互联网产业基地一期项目的最大评价值为0.417,对应评价集中的一般风险,最终项目得分为66.42分,对应评价集中的较小风险,且2个评价指标得分都十分接近较小风险和一般风险的临界值,可以看出,该项目的最终风险程度介于较小风险和一般风险之间,整体表现上是良好的,但仍有待改进之处。

## 4 结论与建议

### 4.1 结论

在我国大力推行装配式建筑的背景下,本文采用改进的AHP-FCE法进行指标权重确定,并进行了工程实证分析,得出结论如下:

1)采用改进的层次分析法在装配式建筑安全风险分析的研究中,主要风险因素有:施工组织设计及施工方案、预制构件质量、节点连接准确度、作业人员健康状况、安全检测技术,其权重分别为

0.302、0.203、0.141、0.069、0.065。并基于工程实例,对实地项目进行安全分析,结果表明:项目总得分66.42分,属于较小风险,安全状况较好。

2)改进的AHP-FCE法所建立的安全风险评价模型在运用过程中计算量适中,计算效率较高,且在实证分析中的研究结果和工程实际相符合,该模型有较好的适用性,可以应用于安全风险评价过程中。

### 4.2 建议

根据实证分析,对于控制装配式建筑施工过程中的安全风险,改良我国装配式建筑面临的安全问题,本文提出以下建议:

在人员因素方面进行风险控制时,首先改善项目卫生安全条件,可以组织定期体检,关注人员健康状况,邀请相关专家定期开展技术培训。对于环境方面,加强安全巡查,严格按照政府要求的安全标准进行作业,确保吊装作业四周视野开阔,无障碍物,及时关注天气情况,遭遇恶劣天气时应暂缓

施工。出现管理问题时,邀请相关专家明确管理制度细节,详细规划构件堆场位置,确保不对施工作业造成风险,同时注意加强对施工人员的安全教育培训。在设备风险防控中,仔细检验设备及材料质量,严格把关设备进场检查,对设备进行定期检修。

在技术风险防控中,建议合理规划施工组织设计及施工方案,保证施工过程顺利,对技术工人定期进行技术考核,考核不达标者进行再培训才可重新上岗,保证施工队伍的技术水平。

#### 参考文献:

- [1] 国务院办公厅. 国务院办公厅关于大力发展装配式建筑的指导意见[J]. 住宅产业, 2016(10):10-12.
- [2] KARASAN A, ILBAHAR E, CEBI S, et al. A new risk assessment approach: safety and critical effect analysis (SCEA) and its extension with Pythagorean fuzzy sets[J]. Safety Science, 2018, 108:173-187.
- [3] 何叶荣, 王润. 基于 AHP-熵权法对装配式建筑安全风险的分析[J]. 南阳理工学院学报, 2022, 14(2):14-20.
- [4] 李皓燃, 李启明, 陆莹. 基于 SEM 的装配式建筑施工安全关键风险分析[J]. 中国安全科学学报, 2019, 29(4):171-176.
- [5] 常春光, 吴溪. 基于 BDD 的装配式建筑施工安全风险评价[J]. 沈阳建筑大学学报(社会科学版), 2018, 20(5):489-494.
- [6] 李文龙, 李慧民, 裴兴旺, 等. 基于结构熵权-可信性测度理论的装配式建筑吊装施工安全风险评估[J]. 武汉大学学报(工学版), 2020, 53(5):410-417.
- [7] 王军武, 潘子瑶, 王靖, 等. 基于 STPA 和模糊 BN 的装配式建筑吊装施工安全风险分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2022, 18(4):12-19.
- [8] BAVAF A, MAHDIYAR A, KADIR M A. Identifying and assessing the critical factors for effective implementation of safety programs in construction projects[J]. Safety Science, 2018, 106: 47-56.
- [9] LI X, WANG C, KASSEM M A, et al. Evaluation method for quality risks of safety in prefabricated building construction using SEM - SDM Approach[J]. Int. J. Environ. Res. Public Health, 2022, 19:5180.
- [10] 何正豪, 田元福. 参建单位视角的装配式建筑施工安全风险因素[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(1):321-326.
- [11] 姜吉坤, 刘紫君, 顾志恒, 等. 基于变权物元可拓模型的装配式建筑吊装施工安全风险评价[J/OL]. 武汉大学学报(工学版):1-13[2023-12-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1675.T.20220920.1353.002.html>.
- [12] 丁彦, 田元福. 装配式建筑施工质量与安全风险评价研究[J]. 建筑经济, 2019, 40(9):80-84.
- [13] 杨元元, 赵延龙. 基于组合赋权二维云模型的装配式建筑构件吊装施工安全风险评价[J]. 自然灾害学报, 2022, 31(3):167-174.
- [14] LIU J, GONG E, WANG D, et al. Cloud model-based safety performance evaluation of prefabricated building project in China [J]. Wireless Personal Communications, 2018, 102(4): 3021-3039.
- [15] ZHAO H, ZHANG X, WANG Y, et al. Performance evaluation of prefabricated construction project based on IFS and TOPSIS method[J]. Engineering Economy, 2019, 29(6):14-17.
- [16] 李英攀, 刘名强, 王芳, 等. 装配式建筑项目安全绩效云模型评价方法[J]. 中国安全科学学报, 2017, 27(6):115-120.
- [17] 陈为公, 杨慧迎, 高志国. 考虑脆弱性的装配式建筑全寿命周期安全评价[J]. 安全与环境学报, 2020, 20(6):2069-2078.
- [18] 付杰. 装配式建筑工程施工安全风险评价[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2017.
- [19] ZHAO W, PENG P, GUO B, et al. Comprehensive social cultural and economic benefits of green buildings based on improved AHP-FCE method[J]. Buildings, 2023, 13:311.
- [20] 于艳芳, 孙俊焯. 电网企业数据资产价值评估研究——以国家电网有限公司为例[J]. 财会通讯, 2023(20):89-97.