

文章编号:1672-9331(2021)03-0038-07

基于 SEM 和模糊综合评价法的装配式建筑施工安全风险评价

卢 毅,张欣欣

(长沙理工大学 交通运输工程学院,湖南 长沙 410114)

摘 要: 为了更精确地评价装配式建筑施工安全风险,考虑到装配式建筑的施工特点,以人员、材料及设备、技术、管理和环境 5 个方面为视角,构建装配式建筑施工安全风险评价指标体系。采用结构方程模型(structural equation model,SEM)确定各变量的路径系数,计算指标权重,并结合模糊综合评价法确定装配式建筑的施工安全风险等级。实证研究结果表明:所研究项目的施工安全风险等级较高,评价结果与项目实际情况相符。所建模型能较好地确定评价指标权重,量化指标间的相互影响,使评价结果更加精确合理,为装配式建筑施工安全风险评价提供了新的有效方法。

关键词: 装配式建筑;施工安全;风险评价;结构方程模型;模糊综合评价

中图分类号: TU714

文献标志码: A

Risk assessment on construction safety of prefabricated buildings based on SEM and fuzzy comprehensive assessment method

LU Yi,ZHANG Xin-xin

(School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of
Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: In order to more accurately evaluate the construction safety risk of prefabricated buildings, considering the construction characteristics of prefabricated buildings, from the five perspectives of personnel, material and equipment, technology, management, and environment, a risk assessment index system for construction safety of prefabricated buildings was proposed. Structural equation model (SEM) was used to determine the path coefficient of each variable, calculate the index weight, and combined with the fuzzy comprehensive assessment method to evaluate the construction safety risk level of prefabricated buildings. The empirical research results show that the construction safety risk level of the researched project is high, and the assessment results comply with actual project conditions. The proposed model can be used to better determine the weights of the assessment indexes and quantify the mutual impact among the indexes, which results in more accurate and reasonable assessment results and provides a new effective method to assess the construction safety of prefabricated buildings.

Key words: prefabricated building; construction safety; risk assessment; structural equation model; fuzzy comprehensive assessment

收稿日期: 2021-03-09

基金项目: 湖南省交通科技项目(201944)

通讯作者: 卢 毅(1964—),男,教授,主要从事工程项目管理、交通运输工程等方面的研究。

E-mail:2985086508@qq.com

近年来装配式建筑在我国发展迅速,但由于我国引入装配式建筑的时间比较短,装配式建筑在我国仍然存在技术不成熟、预制率低等问题,施工安全风险依然较大^[1]。如果不能及时准确地识别和管控这些风险,将不可避免地造成巨大的人员伤亡和经济损失。因此,施工安全风险评价成为装配式建筑领域被关注和研究的重点问题。

目前,国内外学者关于装配式建筑施工风险的主要研究有:杨斯玲等^[2]运用结构熵权和修正证据理论对装配式建筑施工阶段的安全风险进行了评价;黄林青等^[3]利用专家打分法确定风险评价指标的权重,结合模糊综合评价法确定安全风险等级,对装配式建筑施工安全风险进行了评价;胡庆国等^[4]采用层次分析法和熵权法进行联合赋权,建立了基于同异反分析的装配式建筑施工安全风险评价模型;SHAHTAHERI 等^[5]使用综合公差策略模型对装配式建筑各构件的性能和项目风险进行了预测;HSU 等^[6]提出了一个数学优化模型,该模型能发现装配式建筑施工阶段复杂多变的状况,及时规避风险;ENSHASSI 等^[7]通过概率影响风险模型对几何关系比较复杂的装配式建筑进行安全风险评估。

以上研究为装配式建筑施工安全风险评价提供了多种方法且具有一定效果,但没有彻底解决装配式建筑施工安全风险评价中的主观性和指标间相互影响等问题。考虑到结构方程模型(structural equation model, SEM)能较好地处理变量间的关系,模糊综合评价法具有客观性强的优势且能较好地解决不确定因素,本研究构建了基于 SEM 和模糊综合评价法的装配式建筑施工安全风险评价模型,力图提高装配式建筑施工安全风险评价的有效性,为合理制定风险规避方案提供依据,同时有效降低安全事故的发生概率。

1 模型的建立

模型建立的基本思路是:针对装配式建筑施工安全风险的特点,构建评价指标体系,采用 SEM 确定各变量的路径系数,计算指标权重,并结合模糊评价法构建装配式建筑施工安全风险评价模型,以更有效地确定安全风险评价等级。

1.1 评价指标选取和模糊评价集

由于装配式建筑施工安全风险涉及的影响因素较多且具有不确定性,为了使构建的评价指标体系能充分、准确地反应风险信息,需要对众多的指标因素进行筛选。所选指标数量既不能太多也不能太少,指标太多会造成评价体系过于复杂,出现较多不可控因素;指标过少会导致代表性不够,无法全面反映问题。

各个指标所有可能的评语构成的集合称为评价集。根据装配式建筑项目施工阶段安全风险评价可能出现的结果确定评价集,如“低、中等、高”等。

1.2 指标评价矩阵

在模糊评价集确定后,运用模糊评价集对各个风险评价指标 $X_i (i=1, 2, \dots, n)$ 进行量化,计算各二级评价指标的隶属度值,进而得到模糊评价矩阵:

$$R = \begin{bmatrix} (R | X_1) \\ (R | X_2) \\ \vdots \\ (R | X_n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix}_{n \times m} \quad (1)$$

式中: R 为模糊评价矩阵; r_{ij} 为各指标对应评价集的隶属度值。

1.3 确定评价指标权重

SEM 是一种验证一个或多个自变量与一个或多个因变量之间相关关系的多元分析方法^[8],擅长分析处理测量误差及潜在变量之间的结构关系。SEM 的联立方程组为:

测量方程:

$$x = \Lambda_x \xi + \delta \quad (2)$$

$$y = \Lambda_y \eta + \varepsilon \quad (3)$$

结构方程:

$$\eta = \Psi \eta + \Gamma \xi + \zeta \quad (4)$$

式(2)~(4)中: x, y 为观测变量; η, ξ 为潜在变量; $\Lambda_x, \Lambda_y, \Psi, \Gamma$ 为系数矩阵; $\varepsilon, \delta, \zeta$ 为误差项。

根据构建的评价指标体系,设计、发放调查问卷,对获得的调查问卷数据进行信度和效度检验。在信度和效度检验合格后,将一级评价指标作为潜在变量,二级评价指标作为观测变量,应用 Amos 24.0 进行 SEM 计算,得到各评价指标的路径系数,该系数反映了各个评价指标对安全风险的影响程度。根据路径系数利用下式计算各一级评价指标的权重^[9]:

$$W_{U_i} = \frac{\lambda_{U_i}}{\sum_{i=1}^n \lambda_{U_i}} \quad (5)$$

式中: W_{U_i} 为第 i 个一级评价指标的权重系数; λ_{U_i} 为第 i 个一级评价指标的路径系数; U_i 为第 i 个一级评价指标; i 为评价指标序号。同理可计算二级评价指标的权重。

1.4 模糊综合评价

将装配式建筑项目风险评价指标的权重向量 W 与一级评价指标的模糊评价矩阵 R 相乘, 得到一级评价指标的评价结果向量 B :

$$\begin{aligned} B &= W \times R = \\ & \begin{pmatrix} w_1 & w_2 & \cdots & w_n \end{pmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix}_{n \times m} = \\ & \begin{pmatrix} b_1 & b_2 & \cdots & b_n \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (6)$$

式中: b_i 为风险评价指标对等级模糊子集 V_n 的隶属程度。 b_i 遵循最大隶属度评价原则, 即若 $b_i = \max(b_1, b_2, \cdots, b_n)$, 则 b_i 为该装配式建筑项目评价指标所对应的风险等级。

2 实证研究

某个装配式建筑住宅项目 N, 占地面积为 34 318.84 m², 总建筑面积为 114 648.92 m², 地上 34 层, 地下 2 层, 建筑高度为 96.84 m。该项目主体结构采用装配式整体框架结构和现浇框架结构, 抗震等级为三级, 预制构件包括内外墙板、空调板、楼梯、叠合板等, 项目预制装配率达到了 62.86%。将所建立的基于 SEM 和模糊综合评价法的装配式建筑施工安全风险评价模型应用于项目 N 进行施工安全风险评价。

2.1 风险评价指标等级评价

根据上述指标的选取原则, 在知网和万方上同时以“装配式建筑”“施工安全风险”为题名或关键词进行检索, 在删除相同的文献后共获得 101 篇文献, 然后剔除没有使用明确研究方法的文献, 共获得 46 篇文献。将文献中提到的影响因素进行归纳, 初步建立装配式建筑施工安全风险因素

专家意见咨询表。通过德尔菲法向专家发放 2 轮咨询表, 请专家使用李克特 5 级量表对指标重要程度、熟悉程度和可获得性等方面进行评价(1~5 表示程度越来越高)。对于咨询表中不完善的地方, 专家可以提出自己的修改意见和建议。在第一轮专家咨询表回收之后, 去掉平均分低于 3.00 分的风险指标, 把咨询表按照专家提出的意见进行完善, 然后发放并回收第二轮专家咨询表, 剔除平均分低于 3.50 分的风险指标, 得到最终的评价指标体系, 如表 1 所示。

采用李克特 5 级量表将项目 N 的施工安全风险评价结果分为 5 个等级^[10], 即评价集 $V = \{\text{低, 较低, 中等, 较高, 高}\}$ 。邀请 15 位专家参与问卷调查, 并依据 5 个等级对 22 个风险指标进行评价和打分, 最终得到各指标的风险等级评价矩阵(见表 1)。

2.2 确定指标的模糊评价矩阵

以表 1 中一级评价指标人员风险 U_1 为例, 计算其二级评价指标的隶属度:

$$\begin{aligned} (R | U_{11}) &= (0.200, 0.200, 0.200, 0.267, 0.133), \\ (R | U_{12}) &= (0.067, 0.267, 0.200, 0.400, 0.067), \\ (R | U_{13}) &= (0.133, 0.267, 0.267, 0.333, 0.000), \\ (R | U_{14}) &= (0.133, 0.200, 0.200, 0.333, 0.133), \\ (R | U_{15}) &= (0.133, 0.267, 0.333, 0.267, 0.000). \end{aligned}$$

因此, 人员风险 U_1 的模糊评价矩阵 R_{U_1} 为:

$$\begin{aligned} R_{U_1} &= \begin{bmatrix} 0.200 & 0.200 & 0.200 & 0.267 & 0.133 \\ 0.067 & 0.267 & 0.200 & 0.400 & 0.067 \\ 0.133 & 0.267 & 0.267 & 0.333 & 0.000 \\ 0.133 & 0.200 & 0.200 & 0.333 & 0.133 \\ 0.133 & 0.267 & 0.333 & 0.267 & 0.000 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

同理可得其他一级评价指标的模糊评价矩阵, 依次为:

$$\begin{aligned} R_{U_2} &= \begin{bmatrix} 0.133 & 0.333 & 0.200 & 0.267 & 0.067 \\ 0.133 & 0.200 & 0.133 & 0.400 & 0.133 \\ 0.067 & 0.267 & 0.267 & 0.333 & 0.067 \\ 0.133 & 0.200 & 0.267 & 0.400 & 0.000 \\ 0.067 & 0.333 & 0.267 & 0.267 & 0.067 \end{bmatrix}, \\ R_{U_3} &= \begin{bmatrix} 0.200 & 0.133 & 0.267 & 0.267 & 0.133 \\ 0.133 & 0.200 & 0.200 & 0.333 & 0.133 \\ 0.133 & 0.267 & 0.267 & 0.267 & 0.067 \\ 0.067 & 0.333 & 0.267 & 0.267 & 0.067 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

表 1 各指标风险等级评价矩阵

Table 1 Assessment matrix of risk level of each index

一级评价指标	二级评价指标	风险等级评价矩阵				
		低	较低	中等	较高	高
人员风险 U_1	人员安全意识水平 U_{11}	3	3	3	4	2
	人员违规操作 U_{12}	1	4	3	6	1
	人员安全防护用品的佩戴 U_{13}	2	4	4	5	0
	人员身心健康状况 U_{14}	2	3	3	5	2
	人员经验和技术水平 U_{15}	2	4	5	4	0
材料及设备风险 U_2	设备机具的选择 U_{21}	2	5	3	4	1
	设备的维护和检修 U_{22}	2	3	2	6	2
	预制构件的生产质量 U_{23}	1	4	4	5	1
	预制构件的不安全状态 U_{24}	2	3	4	6	0
	施工材料堆放状况 U_{25}	1	5	4	4	1
技术风险 U_3	预制构件拼装定位的准确度 U_{31}	3	2	4	4	2
	安全检测技术 U_{32}	2	3	3	5	2
	质量安全技术交底 U_{33}	2	4	4	4	1
	安全防护技术 U_{34}	1	5	4	4	1
管理风险 U_4	多方协调管理状况 U_{41}	2	4	4	5	0
	安全管理制度的建立和执行 U_{42}	1	5	3	6	0
	管理标准和监理机制 U_{43}	2	3	4	5	1
	安全教育及培训 U_{44}	3	3	3	6	0
环境风险 U_5	作业面和光线照明情况 U_{51}	2	5	3	4	1
	临边洞口防护措施 U_{52}	1	4	3	6	1
	施工场地周围的危险源 U_{53}	2	4	4	5	0
	不可抗力因素 U_{54}	1	5	4	4	1

$$\begin{aligned} R_{U_4} &= \begin{bmatrix} 0.133 & 0.267 & 0.267 & 0.333 & 0.000 \\ 0.067 & 0.333 & 0.200 & 0.400 & 0.000 \\ 0.133 & 0.200 & 0.267 & 0.333 & 0.067 \\ 0.200 & 0.200 & 0.200 & 0.400 & 0.000 \\ 0.133 & 0.333 & 0.200 & 0.267 & 0.067 \end{bmatrix}, \\ R_{U_5} &= \begin{bmatrix} 0.067 & 0.267 & 0.200 & 0.400 & 0.067 \\ 0.133 & 0.267 & 0.267 & 0.333 & 0.000 \\ 0.067 & 0.333 & 0.267 & 0.267 & 0.067 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

2.3 确定指标权重

根据表 1 的风险评价指标进行问卷设计和调查,共发放 330 份问卷,回收 324 份,剔除 22 份无效问卷,有效率为 93.2%。为了保证数据的有效性,利用 SPSS 22.0 软件对调查问卷的数据进行信度和效度检验。检验结果显示:Cronbach's α 值为 0.900,KMO 值为 0.916,Bartlett 检验值为 0.000,小于 0.001。因此,数据信度、效度良好,适合用来做研究分析。

采用软件 Amos 24.0 对上述风险因素的数据进行拟合度检验。在已有研究的基础上选择表 2 所示的 7 个指标进行模型的拟合评估。各拟合评估指标的可接受范围详见文献[11-13]。

经过软件 Amos 24.0 运算得到装配式建筑施工安全风险一阶验证性因子分析模型,如图 1 所示。对模型的输出结果进行分析可知:各观测变量的残差 e_i ($i=1,2,3,\cdots,22$) 均为正值,22 个指标的路径系数介于 0.51~0.72,且均在 0.50~0.95 范围之内。 $\chi^2/df=1.313<3.000$, $I_{GF}=0.923>0.900$, $I_{AGF}=0.902>0.900$, $I_{CF}=0.965>0.900$, $I_{TL}=0.959>0.900$, $I_{IF}=0.965>0.900$, $R_{MSEA}=0.034<0.050$,各指标适配度良好。因此,该一阶模型具有较好的拟合性。一级评价指标之间的关联系数多集中在 0.6~0.7 之间,所有指标均达到了 0.05 的显著水平,这表明它们之间可能存在更高阶的共同影响因素。因

此,需构建二阶验证性因子分析模型进行进一步分析,二阶模型如图 2 所示。

表 2 拟合评估指标

Table 2 Fitting assessment indexes

拟合评估指标	指标名称	可接受范围
χ^2/df	卡方自由度比	(1.000,3.000)拟合良好
I_{GF}	适配度指数	>0.800 拟合较好
		>0.900 拟合良好
I_{AGF}	调整后的适配度指数	>0.800 拟合较好
		>0.900 拟合良好
R_{MSEA}	渐进残差均方和平方根	<0.050 拟合良好
		<0.080 拟合较好
I_{CF}	比较适配指数	>0.900 拟合良好
		>0.900 拟合良好
I_{TL}	非规准适配指数	>0.900 拟合良好
		>0.900 拟合良好
I_{IF}	增值适配指数	>0.900 拟合良好

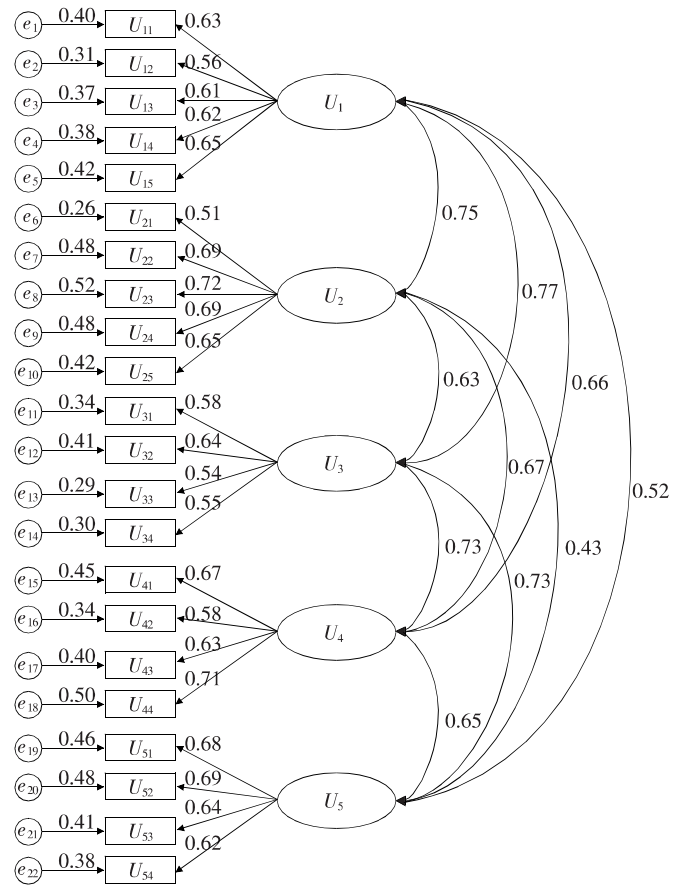


图 1 一阶验证性因子分析模型

Fig. 1 First-order confirmatory factor analysis model

对图 2 所构建的二阶模型进行拟合运算并对输出结果进行分析可知:各观测变量和潜在变量的残差 e_i ($i=1,2,3,\cdots,27$) 均为正值,各变量的路径系数均介于 0.50~0.95,且均在 0.50~0.95

的范围之内。 $\chi^2/df=1.409<3.000$, $I_{GF}=0.914>0.900$, $I_{CF}=0.953>0.900$, $I_{TL}=0.946>0.900$, $I_{IF}=0.953>0.900$, $R_{MSEA}=0.038<0.050$,虽然 $I_{AGF}=0.894$,略小于 0.900,但仍在大于 0.800 的可接受范围内。因此,该二阶模型总体上拟合良好,适合用来做研究分析。根据图 2 中的各风险指标之间的路径系数,运用式(5)进行计算,即可得到各级指标的权重,见表 3。

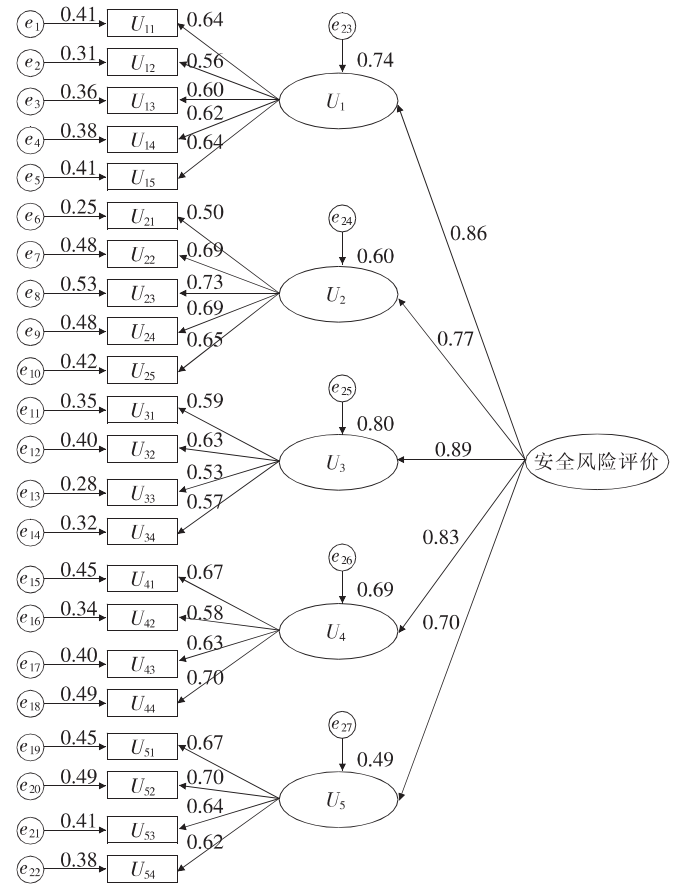


图 2 二阶验证性因子分析模型

Fig. 2 Second-order confirmatory factor analysis model

2.4 模糊综合评价

以表 3 中的人员风险评价指标为例,5 个二级评价指标的权重因子组成一个权重向量 W_{U_1} ,即 $W_{U_1}=(0.209,0.183,0.196,0.203,0.209)$ 。由式(6)计算得到人员风险指标的综合评价结果为: $B_1=W_{U_1}R_{U_1}=(0.135,0.239,0.241,0.318,0.067)$ 。同理,可得其他风险指标的综合评价结果为:

$$\begin{aligned}
 B_2 &= W_{U_2} R_{U_2} = \\
 &[0.105 \quad 0.262 \quad 0.228 \quad 0.338 \quad 0.067], \\
 B_3 &= W_{U_3} R_{U_3} = \\
 &[0.134 \quad 0.231 \quad 0.249 \quad 0.285 \quad 0.102],
 \end{aligned}$$

表 3 指标权重

Table 3 Weight of indexes

一级评价指标	一级评价 指标权重	二级评价指标权重				
		子风险 1	子风险 2	子风险 3	子风险 4	子风险 5
人员风险 U_1	0.212	0.209	0.183	0.196	0.203	0.209
材料及设备风险 U_2	0.190	0.153	0.212	0.224	0.212	0.199
技术风险 U_3	0.220	0.254	0.272	0.228	0.246	—
管理风险 U_4	0.205	0.260	0.225	0.244	0.271	—
环境风险 U_5	0.173	0.255	0.266	0.243	0.236	—

$$B_4 = W_{U_4} R_{U_4} =$$
$$[0.136 \quad 0.247 \quad 0.234 \quad 0.366 \quad 0.016],$$

$$B_5 = W_{U_5} R_{U_5} =$$
$$[0.100 \quad 0.299 \quad 0.232 \quad 0.318 \quad 0.051].$$

一级评价指标的模糊权向量 $W = (0.212, 0.190, 0.220, 0.205, 0.173)$, 则一级评价指标模糊综合评价结果为:

$$B^* = W \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \end{bmatrix} =$$
$$[0.123 \quad 0.254 \quad 0.237 \quad 0.324 \quad 0.061].$$

由此评价结果可知:评定为低风险等级的比重为 12.3%, 较低风险等级的比重为 25.4%, 中等风险等级的比重为 23.7%, 较高风险等级的比重为 32.4%, 高风险等级的比重为 6.1%。根据最大隶属度原则, 该装配式建筑项目施工安全风险评价等级为较高。与项目 N 的施工安全风险管理的实践结果进行对比可知, 该结果与项目实际情况一致。

2.5 结果分析与建议

项目 N 的最终安全风险等级为较高。由表 3 中的一级评价指标权重可知, 技术和人员因素对安全风险的影响较为突出, 其中安全检测技术和预制构件拼装定位的准确度对技术风险的影响较大。因此, 要加大技术研发与创新的投入、注重培养专业队伍、加大对 BIM 等关键技术的运用。人员因素对安全风险的影响也较大, 主要原因是作业人员安全意识淡薄和经验技术水平不足。因此, 要加强作业人员的安全意识, 对施工阶段的各个方面开展专业技能培训, 提高作业人员的操作熟练程度和技术水平, 最大可能地杜绝操作失误, 并最终达到减少安全事故发生的目的。

从表 3 中的二级评价指标权重可知, 安全检测技术、多方协调管理状况、安全教育及培训和临

边洞口的防护措施是影响该项目施工安全的重要因子。因此, 可从以下几个方面对风险进行管控:

1) 针对“安全检测技术”风险因素, 可邀请资深专家和专业技术人员进行现场指导, 且现场安装环节的作业人员要具有较强的专业素质, 能熟练地指出具体的吊装点。此外, 充分运用 BIM 和 RFID 技术对施工全过程进行模拟和动态监控, 并落实施工中的监管措施, 对施工中存在的不合理现象及时纠正, 减少安全事故的发生。

2) 针对“多方协调管理状况”风险因素, 在施工单位进入施工现场前要完成组织机构的设立, 明确各部门负责人和相应职责, 将各部门的岗位责任与经济指标挂钩。完善项目各部门之间的信息交流技术和平台, 建立有效的沟通机制, 组织例行会议, 对出现的问题及时沟通解决。

3) 针对“安全教育及培训”风险因素, 应定期开展教育和专业技能培训, 邀请专家对作业人员进行岗前培训, 并对培训成果进行考核, 考核合格后颁发上岗证, 作业人员持证上岗。在每项施工工作开工前提前进行施工预演, 提高作业人员的综合能力, 从而减少施工现场安全事故的发生。

4) 针对“临边洞口防护措施”风险因素, 对临边洞口采取安全防护措施, 定期进行检查。调整施工现场临边洞口周围的照明设备, 确保在夜间施工时照明充足。确保临边洞口旁的安全警示牌放置合理。

3 结论

1) 本研究通过文献研究和问卷调查, 从人员、材料及设备、技术、管理和环境 5 个方面构建了 22 个二级评价指标, 运用 SEM 和模糊综合评价法对项目 N 进行评价。各一级评价指标对装配式建筑施工安全风险的影响程度由大到小依次为: 技术风险、人员风险、管理风险、材料及设备风险、环境

风险。

2) 所建立的模型有以下优点:一是发挥了SEM能较好地考虑变量之间相互关系的优势,克服了一般方法无法考虑指标间相互影响而孤立地确定指标权重的弊端;二是利用模糊综合评价法确定风险等级,不仅增强了评价结果的客观性,且能把定性问题转化为定量问题,使评价结果更加科学合理,为装配式建筑施工安全风险评价提供了新思路。因此,该模型不仅为施工单位合理规避风险提供了参考依据,也促进了装配式建筑风险管理水平的提升。

3) 项目N的风险等级为较高,其中技术因素和人为因素对安全风险的影响较为突出,因此这两个方面是改善提高的重点。最后,提出了降低项目N施工风险的建议。

〔参考文献〕

- [1] 黄婉莉. 装配式建筑在施工管理中的风险因素与应对措施[J]. 价值工程, 2019, 38(36): 18-19.
HUANG Wan-li. Risk factors and countermeasures in construction management of prefabricated buildings[J]. Value Engineering, 2019, 38(36): 18-19.
- [2] 杨斯玲, 黄和平, 刘伟, 等. 基于结构熵权和修正证据理论的装配式建筑施工安全风险评价[J]. 安全与环境工程, 2019, 26: 143-149, 153.
YANG Si-ling, HUANG He-ping, LIU Wei, et al. Safety risk assessment of prefabricated construction based on structural entropy weight and modified evidence theory[J]. Safety and Environmental Engineering, 2019, 26: 143-149, 153.
- [3] 黄林青, 邱江婷, 梁渝, 等. 装配式建筑施工安全模糊综合评价模型[J]. 工程经济, 2019, 29(12): 37-39.
HUANG Lin-qing, QIU Jiang-ting, LIANG Yu, et al. Fuzzy comprehensive evaluation model for construction safety of prefabricated buildings[J]. Engineering Economics, 2019, 29(12): 37-39.
- [4] 胡庆国, 蔡孟龙, 何忠明. 基于组合赋权法与集对分析的装配式建筑施工安全风险评价[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2019, 16(4): 16-26.
HU Qing-guo, CAI Meng-long, HE Zhong-ming. Safety risk assessment of prefabricated building construction based on combination weighting method and set pair analysis[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2019, 16(4): 16-26.
- [5] SHAHTAHERI Y, RAUSCH C, WEST J, et al. Managing risk in modular construction using dimensional and geometric tolerance strategies[J]. Automation in Construction, 2017, 83: 303-315.
- [6] HSU P Y, AURISICCHIO M, ANGELOUDIS P. Risk-averse supply chain for modular construction projects[J]. Automation in Construction, 2019, 106: 1-12.
- [7] ENSHASSI M S, WALBRIDGE S, WEST J S, et al. Probabilistic risk management framework for tolerance-related issues in modularized projects: local and global perspectives[J]. ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems: Part A, 2020, 6(1): 1-16.
- [8] 吴明隆. 结构方程模型: AMOS的操作与应用[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2017.
WU Ming-long. Structural equation model: operation and application of AMOS [M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2017.
- [9] 桑培东, 李金晓. 基于结构方程的装配式建筑项目开发建设风险评价[J]. 土木工程与管理学报, 2017, 34: 89-95.
SANG Pei-dong, LI Jin-xiao. Risk assessment of development and construction of prefabricated construction projects based on structural equations[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2017, 34: 89-95.
- [10] 荀志远, 张丽敏, 徐瑛莲, 等. 基于组合赋权云模型的装配式建筑安全风险评价[J]. 数学的实践与认识, 2020, 50(7): 302-310.
XUN Zhi-yuan, ZHANG Li-min, XU Ying-lian, et al. Safety risk assessment of prefabricated buildings based on combined weighting cloud model [J]. Mathematics in Practice and Knowledge, 2020, 50(7): 302-310.
- [11] SEO H C, LEE Y S, KIM J J, et al. Analyzing safety behaviors of temporary construction workers using structural equation modeling [J]. Safety Science, 2015, 77: 160-168.
- [12] HSU I Y, SU T S, KAO C S, et al. Analysis of business safety performance by structural equation models[J]. Elsevier, 2012, 50(1): 1-11.
- [13] 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.
LI Hao-ran, LI Qi-ming, LU Ying. Analysis of key safety risks in prefabricated building construction based on SEM[J]. Chinese Safety Science Journal, 2019, 29(4): 171-176.