

装配式建筑施工安全风险评价研究

——基于 G1 - 熵权法及未确知测度模型

常春光,牛抒慧

(沈阳建筑大学管理学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要:为在装配式建筑施工过程中预防安全事故,有效地实现安全风险把控,进行科学的安全评价,采取 G1 - 熵权法得到了综合指标权重,运用未确知测度模型对装配式建筑施工安全风险进行了分析,依照置信度识别准则判断其风险等级,并取实际工程进行案例分析,得到了良好评价的结果,为装配式建筑施工安全管理提供了借鉴与参考。

关键词:装配式建筑;未确知测度理论;G1 法;熵权法;安全风险评价

中图分类号:TU714 **文献标识码:**A

当前,随着社会不断发展,建筑行业建造方式的变革已是大势所趋。装配式建筑因其设计标准化、构件部品化、施工机械化、管理信息化,具有建造速度快、劳动效率高、生产成本低等优点,弥补了传统建造模式高污染、高能耗的不足。这种新型的建造方式在欧美一些发达国家及日本等国已然成为主流。近年来,我国积极探索发展装配式建筑,但由于起步较晚、管理不够完善、技术工艺不够成熟等原因,伤亡事故频频发生,其安全风险问题一直是建筑行业亟待解决的重点问题之一。

目前,针对如何评价分析装配式建筑施工安全问题,国内学者已经进行了较为深入的研究,陈伟等^[1]应用层次分析法及灰色聚类评价方法,构建了施工安全评价指标体系及评价模型;徐姣姣等^[2]基于系统动力学和层次分析法对装配式建筑安全风险影响因素的重要性程度进行了分析;刘名强等^[3]从装配式建筑吊装作业环节着手,运用粗糙集与

相关向量机构建预警模型,并通过改进粒子群算法给出了计算方法及模型流程;黄桂林等^[4]结合可拓学理论构建了综合模糊可拓评价模型,系统地评估了装配式住宅施工过程中的安全风险状况;王宇^[5]针对施工中存在的安全风险因素,运用贝叶斯网络从风险发生概率和风险损失程度两方面进行了科学的识别和评价;冯亚娟等^[6]应用熵权法和集对分析法,构建装配式建筑施工安全评价模型,评价和预测施工安全状况,得出了较为客观的安全等级和安全态势;也有学者将 BIM 技术^[7]、云模型^[8-9]等引入安全评价体系。由此可见,装配式建筑施工安全风险评价方法种类繁多,各具特点。

然而,装配式建筑施工现场条件复杂,各安全风险因素相互影响,存在着大量的不确定性和多变性,装配式建筑施工安全的评估和管理还有许多不足,需要进行更加深入的研究。笔者引入了未确知测度理论,该理论

是由我国学者王光远于 20 世纪 90 年代提出的一种新的不确定性信息理论,对处理多因素的不确定信息能够取得良好的效果,已在多个领域得到广泛的应用^[10-12]。笔者将 G1 法与熵权法进行组合赋权,并将其与未确知测度理论相结合,应用于装配式建筑施工安全评价,同时,对传统 G1 法^[13-14]进行改进,用相邻指标数据占比来代替人为赋予相对重要性程度值,降低了因主观因素影响造成的指标权重偏差,再结合熵权法,进一步提高了指标权重的客观可靠性,为解决装配式建筑施工安全管理过程中存在的问题提供了新的方法。

一、安全风险评价相关理论

1. 未确知测度理论

假设 n 个评价因素组成评价空间为 $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$, 指标空间为 $I = \{I_1, I_2, \dots, I_m\}$ 。测量值 X_{ij} 为第 i 个评价因素 X_i 中第 j ($j=1, 2, \dots, m$) 个评价指标 I_j 的值, 则 X_i 的 m 维向量表示为 $X_i = \{X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{im}\}$ 。假设 X_{ij} 有 P 个评价等级, 组成的评价等级空间为 $C = \{C_1, C_2, \dots, C_p\}$, 且 $C_i \cap C_j = \varnothing$ ($i \neq j, j=1, 2, \dots, m$), 其中, \varnothing 为空集, C_k 为第 k 个评价等级, 设 k 级比 $k+1$ 级安全等级高, 记为 $C_1 > C_2 > \dots > C_p$ 。

(1) 单指标未确知测度函数的构造

若测量值 X_{ij} 属于第 k 个等级 C_k 的程度为

$$\mu_{ijk} = \mu(x_{ij} \in C_k) \tag{1}$$

式中: $0 \leq \mu(x_{ij} \in C_k) \leq 1; i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m; k=1, 2, \dots, p$ 。

$$\mu(x_{ij} \in C) = 1 \quad i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m \tag{2}$$

$$\mu(x_{ij} \in \bigcup_{l=1}^k C_l) = \sum_{l=1}^k \mu(x_{ij} \in C_l) \quad k=1, 2, \dots, P \tag{3}$$

其中, 式(1)为 μ 对评价空间 C 满足“非负有界性”; 式(2)为 μ 对评价空间 C 满足“归一性”; 式(3)为 μ 对评价空间 C 满足“可加性”, 同时满足式(1)、式(2)和式(3)的 μ 称为未确知测度, 简称测度。

构造单指标测度函数 $\mu(x_{ij} \in C_k)$ ($i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m; k=1, 2, \dots, p$), 求出评

估对象 X_i 的各指标测度值 μ_{ijk} , 则单指标测度评估矩阵为

$$(\mu_{ijk})_{m \times p} = \begin{bmatrix} \mu_{i11} & \mu_{i12} & \cdots & \mu_{i1p} \\ \mu_{i21} & \mu_{i22} & \cdots & \mu_{i2p} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \mu_{im1} & \mu_{im2} & \cdots & \mu_{imp} \end{bmatrix} \tag{4}$$

(2) 多指标未确知测度函数的构造

若 $0 \leq \mu_{ik} \leq 1, \mu_{ik} = \sum_{j=1}^n \omega'_j \mu_{ijk}$ ($k=1, 2, \dots, p$), ω'_j 为指标综合权重, 则多目标测度矩阵为

$$(\mu_{ik})_{n \times p} = \begin{bmatrix} \mu_{11} & \mu_{12} & \cdots & \mu_{1p} \\ \mu_{21} & \mu_{22} & \cdots & \mu_{2p} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \mu_{n1} & \mu_{n2} & \cdots & \mu_{np} \end{bmatrix} \tag{5}$$

(3) 置信度识别

为得出最终评价结果, 引入置信度识别准则, 设 λ 为置信度 ($\lambda \geq 0.5$, 通常取 $\lambda = 0.6$), 若 $C_1 > C_2 > \dots > C_p$, 且令

$$k_0 = \min(k: \sum_{l=1}^k \mu_{il} \geq \lambda, k=1, 2, \dots, p) \tag{6}$$

则认为评估对象的风险等级为 C_{k_0} 。

2. G1 – 熵权法确定指标权重

确定指标权重是评价过程中至关重要的一项。目前, 指标权重的确定方法有主观赋权法、客观赋权法和组合赋权法。主观赋权法是根据决策者的主观意向进行赋权的一种方法, 客观赋权法是根据原始数据运用统计方法计算, 从而获得权重值的一种方法。笔者充分考虑主客观因素, 采用 G1 法与熵权法进行组合赋权。与其他方法相比, 此计算过程既能排除人为主观因素的干扰, 又能对指标权重起到一定的调节作用, 进而从指标对评价对象的区分程度的角度来确定指标权重, 结果直观易理解且容易让人接受, 适用范围较广。

(1) G1 法确定指标权重

G1 法是层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP) 的改进, 作为主观赋权法之一, 不仅具有 AHP 法能够体现专家意愿的特点, 还无需构建判断矩阵和进行一致性检验, 简化了计算。G1 法具体步骤如下:

①确定序列顺序。通过问卷调查,将指标 I_1, I_2, \dots, I_m 按照其相对于有关评价目标的重要性程度由大到小进行排序,指标重要性程度越大,其权重系数值也就越大,且满足 $\omega_1 + \omega_2 + \dots + \omega_m = 1$ 。

②相邻指标重要性比较。排序后的相邻指标 I_{k-1} 与 I_k 间的相对重要程度之比 γ_k 满足

$$\gamma_k = \frac{\omega_{k-1}}{\omega_k} \quad k = m, m-1, \dots, 2 \tag{7}$$

γ_k 的赋值可取 1.0, 1.2, \dots , 1.8, 数值越大,表明相邻指标重要性差距越大。

③权重系数 ω_k 计算。根据得到的 γ_k 的赋值,权重系数为

$$\omega_k = (1 + \sum_{k=2}^m \prod_{i=k}^m \gamma_i)^{-1} \tag{8}$$

$$\omega_{k-1} = \gamma_k \omega_k \quad k = m, m-1, \dots, 2 \tag{9}$$

G1 法所确定的指标主观权重 $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m)$ 。

(2)熵权法确定指标权重

熵权法是客观赋权法的一种,在具体使用中,通过信息熵计算各指标的权重,再利用熵权进一步修正其权重,最终得出较为客观的指标权重结果。评价过程中,指标的熵值越小,则该指标的样本数据就越有序,相应的权重也就越大,在评价中所起到的作用也越大,反之亦然。

设 ν_j 为待测指标 I_j 的权重, $0 \leq \nu_j \leq 1$,

$$\sum_{j=1}^n \nu_j = 1。$$

若在 n 个评估对象、 m 个评估指标中,有 p 个评估等级,则第 j 个评估指标的信息熵为

$$H_j = -k \sum_{k=1}^m Q_{ijk} \ln Q_{ijk} \tag{10}$$

式中: $H_j > 0$; $Q_{ijk} = \mu_{ijk} / \sum_{j=1}^m \mu_{ijk}$; $k = 1/\ln p$; 为了使 $\ln \mu_{ijk}$ 有意义,当 $\mu_{ijk} = 0$ 时, $\mu_{ijk} \ln \mu_{ijk} = 0, i = 1, 2, \dots, n$ 。

第 j 个评估指标的偏差度 $d_j = 1 - H_j$,第 j 个评估指标的权重为

$$\nu_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_j} = \frac{1 - H_j}{n - \sum_{j=1}^n H_j} \tag{11}$$

(3)确定指标综合权重

$$\omega'_j = \frac{\nu_j \omega_j}{\sum_{j=1}^m \nu_j \omega_j} \tag{12}$$

二、装配式建筑施工安全风险评价指标体系及安全风险等级的构建

1.安全风险评价指标体系的构建

在装配式建筑施工过程中,各安全风险因素相互制约、相互影响,合适的评价指标对安全风险评价结果的准确性与科学性具有直接影响。与普通建筑相比,装配式建筑施工现场以吊装为主,具有高空作业多,技术工艺要求高,人员结构复杂、流动性大等特点。笔者遵循安全风险的科学性、普遍性和可行性原则,根据海因里希事故因果连锁理论和施工单位普遍认同的生产安全事故三要素等对指标进行归纳总结,通过实际调查、安全事故原因统计等方法,最终从人的不安全行为、物的不安全状态和组织管理的不安全状况 3 个方面进行安全风险评价指标的筛选和确立,结果如图 1 所示。

2.装配式建筑施工安全风险等级的构建

在装配式建筑安全风险评估中,通过分级标准量化法将安全风险划分为 5 个等级,将定性指标转化为半定量指标,每个等级划分赋值标准如表 1 所示。

根据上述有关单指标测度函数的定义和安全风险等级划分标准,可构建装配式建筑施工安全风险评估指标的测度函数。笔者采用的直线型函数,计算相对简单,应用较为广泛。函数表达式如式(13)~式(17)所示。

$$\mu_{ij1} = \begin{cases} 0, & x_{ij} \leq 7.95 \\ \frac{x_{ij} - 7.95}{1.55}, & 7.95 < x_{ij} \leq 9.50 \\ 1, & x_{ij} > 9.50 \end{cases} \tag{13}$$

$$\mu_{ij2} = \begin{cases} 0, & x_{ij} \leq 5.95 \text{ 或 } x_{ij} > 9.50 \\ \frac{x_{ij} - 5.95}{2}, & 5.95 < x_{ij} \leq 7.95 \\ \frac{9.50 - x_{ij}}{1.55}, & 7.95 < x_{ij} \leq 9.50 \end{cases} \tag{14}$$

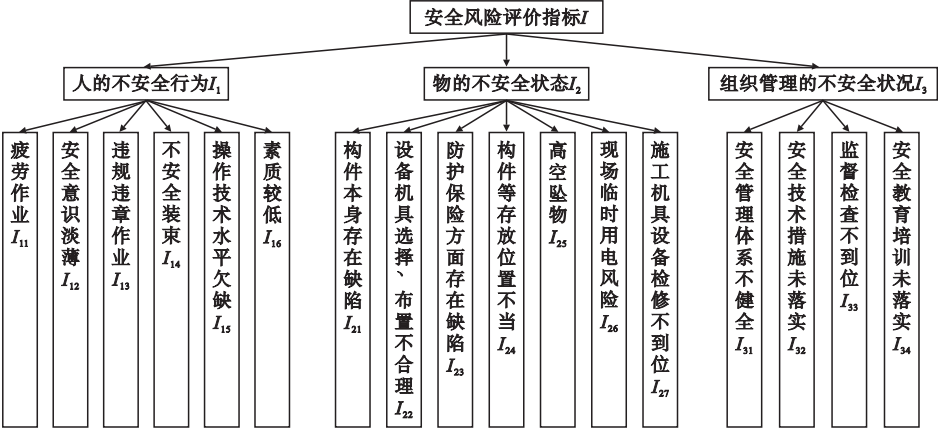


图 1 装配式建筑施工安全风险评价指标体系

表 1 安全风险等级划分标准

安全等级	安全描述	等级赋值
C_1	非常安全	9.0~10.0
C_2	比较安全	7.0~8.9
C_3	一般安全	5.0~6.9
C_4	较不安全	3.0~4.9
C_5	不安全	<3.0

三、案例分析

案例所指装配式项目位于我国北方某城市,该工程共分两个标段建设。其中,一标段总建筑面积 12 万余 m^2 ,共建设 4 栋建筑单体,建筑物地下 2 层—地上 4 层采用传统工艺建造,由第 5 层开始进行标准层的预制装配式结构建造,地上 5 层及以上采用装配整体式混凝土剪力墙结构体系及灌浆套筒体系。整体预制化率达 35% 以上,装配率达到 67.4% 以上。

对该工程进行了问卷调查,内容涉及安全风险评价指标在该工程中的安全风险程度以及各指标对防范安全事故的重要程度,由各工作人员对其指标在该工程中的安全风险等级进行评分,经过筛查,共得到有效问卷 30 份。去掉一个最大值、去掉一个最小值,再计算其平均值,最终得到的数据如表 2 所示。

表 2 项目安全风险取值统计

指标	取值	指标	取值
I_{11}	6.4	I_{24}	5.7
I_{12}	5.8	I_{25}	5.6
I_{13}	7.7	I_{26}	6.2
I_{14}	6.8	I_{27}	7.0
I_{15}	7.2	I_{31}	8.5
I_{16}	6.2	I_{32}	8.4
I_{21}	8.8	I_{33}	7.1
I_{22}	8.2	I_{34}	6.5
I_{23}	6.3		

由式(13)~式(17),将表 2 中的各指标结论值代入未未知函数,得到该装配式项目的单指标未未知测度矩阵

$$\mu_{ij3} = \begin{cases} 0, & x_{ij} \leq 3.95 \text{ 或 } x_{ij} > 7.95 \\ \frac{x_{ij} - 3.95}{2}, & 3.95 < x_{ij} \leq 5.95 \\ \frac{7.95 - x_{ij}}{2}, & 5.95 < x_{ij} \leq 7.95 \end{cases} \quad (15)$$

$$\mu_{ij4} = \begin{cases} 0, & x_{ij} \leq 1.50 \text{ 或 } x_{ij} > 5.95 \\ \frac{x_{ij} - 1.5}{2.45}, & 1.50 < x_{ij} \leq 3.95 \\ \frac{5.95 - x_{ij}}{2}, & 3.95 < x_{ij} \leq 5.95 \end{cases} \quad (16)$$

$$\mu_{ij5} = \begin{cases} 0, & x_{ij} > 3.95 \\ \frac{3.95 - x_{ij}}{2.45}, & 1.50 < x_{ij} \leq 3.95 \\ 1, & x_{ij} \leq 1.50 \end{cases} \quad (17)$$

将其用图形来表示,结果如图 2 所示。

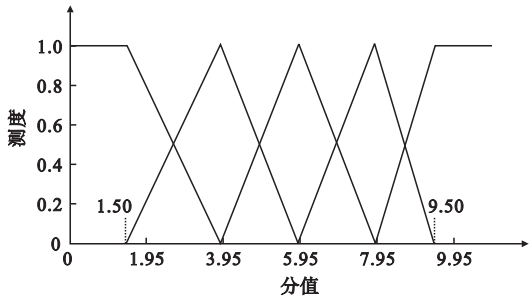


图 2 单因素指标测度函数

$$\mu_{17 \times 5} = \begin{bmatrix} 0 & 0.225 & 0.775 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.925 & 0.075 & 0 \\ 0 & 0.875 & 0.125 & 0 & 0 \\ 0 & 0.425 & 0.575 & 0 & 0 \\ 0 & 0.625 & 0.375 & 0 & 0 \\ 0 & 0.125 & 0.875 & 0 & 0 \\ 0.548 & 0.452 & 0 & 0 & 0 \\ 0.161 & 0.839 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.175 & 0.825 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.875 & 0.125 & 0 \\ 0 & 0 & 0.825 & 0.175 & 0 \\ 0 & 0.125 & 0.875 & 0 & 0 \\ 0 & 0.525 & 0.475 & 0 & 0 \\ 0.355 & 0.645 & 0 & 0 & 0 \\ 0.290 & 0.710 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.575 & 0.425 & 0 & 0 \\ 0 & 0.275 & 0.725 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

表3 风险评价指标重要性调查统计

指标	不重要	较不重要	一般	比较重要	重要
I_{11}	2	6	7	12	3
I_{12}	0	0	4	18	8
I_{13}	0	0	3	7	20
I_{14}	0	1	6	16	7
I_{15}	1	9	15	5	0
I_{16}	2	10	15	3	0
I_{21}	0	1	4	9	16
I_{22}	4	6	13	5	2
I_{23}	0	0	7	9	14

指标	不重要	较不重要	一般	比较重要	重要
I_{24}	3	6	14	6	1
I_{25}	0	0	2	10	18
I_{26}	0	0	5	10	15
I_{27}	0	4	9	10	7
I_{31}	2	4	16	8	0
I_{32}	0	2	5	15	8
I_{33}	0	0	4	11	15
I_{34}	0	2	4	19	5

表4 项目 γ_k 取值统计

指标	γ_k 取值	指标	γ_k 取值
I_{13}	—	I_{32}	1.0
I_{25}	1.2	I_{11}	1.2
I_{21}	1.2	I_{27}	1.2
I_{33}	1.0	I_{31}	1.4
I_{26}	1.0	I_{15}	1.2
I_{23}	1.0	I_{16}	1.0
I_{34}	1.4	I_{24}	1.0
I_{12}	1.0	I_{22}	1.0
I_{14}	1.2		

由式(8)~式(9)求得权重 $\omega = (0.043, 0.062, 0.126, 0.052, 0.021, 0.021, 0.087, 0.021, 0.087, 0.021, 0.105, 0.087, 0.036, 0.026, 0.052, 0.087, 0.062)$ 。

由式(12)可得组合权重 $\omega' = (0.043, 0.074, 0.139, 0.045, 0.019, 0.024, 0.079,$

采用熵权法,由式(10)~式(11)计算单指标测度矩阵中的数据,得到指标权重 $\nu = (0.058, 0.071, 0.066, 0.052, 0.052, 0.066, 0.054, 0.064, 0.063, 0.067, 0.063, 0.067, 0.054, 0.050, 0.052, 0.048, 0.053)$ 。

同时,在问卷中将指标的重要程度划分为5个等级,分别为重要、比较重要、一般重要、较不重要、不重要,得出的结论如表3所示,表中数值为认为该指标在该重要程度等级中的人数。采用G1法进行指标权重测量,对传统G1法进行改进,以调查结果中各指标在各个级别离散聚集的程度来确定指标重要性的排序,可以得到 $I_{13} > I_{25} > I_{21} > I_{33} > I_{26} > I_{23} > I_{34} > I_{12} > I_{14} > I_{32} > I_{11} > I_{27} > I_{31} > I_{15} > I_{16} > I_{24} > I_{22}$,用相邻两指标所在级别人数之比来确定 γ_k 的取值,不同级别相邻指标 γ_k 取值定为1.4,可得相应结果(见表4)。

0.023, 0.093, 0.024, 0.112, 0.099, 0.033, 0.022, 0.046, 0.071, 0.055)。

由式(5)可得多指标综合测度矩阵 $\mu_{1 \times 5} = (0.067\ 9, 0.368\ 4, 0.535\ 5, 0.028\ 2, 0)$ 。

取置信度 $\lambda = 0.6$,结合多指标综合测度矩阵,由式(6)可知,当 $k = 3$ 时, $\sum_{l=1}^k \mu_{il} = 0.067\ 9 + 0.368\ 4 + 0.535\ 5 = 0.971\ 8$,大于 $0.6, k_0 = 3$,该项目处于 C_3 级别,一般安全。

四、装配式建筑施工安全相关建议

装配式建筑的施工安全是装配式建筑行业发展的保障。笔者结合上述案例提出一系列建议,对装配式建筑施工安全具有一

定的参考价值。

1. 人的不安全行为方面

由于指标 I_{13} 是所有二级指标中所占比重最大的一项,达到 0.164,故要给予极大重视。一方面,应落实个人责任,在工作中实行奖惩制度,降低违章率;另一方面,要积极进行安全培训,员工经考核合格后方可上岗。施工单位要抓好安全教育,既要结合典型事故案例,使作业人员对从事的工作有更加深刻的认识,也要重视安全生产宣传工作,进一步强化人员的安全意识。

由于高处作业对人员身心状态要求较高,如其身体或心理存在异常情况,应及时调离工作岗位。同时,要加强劳动保护用具的配置和管理,进入施工现场的施工人员和人员必须穿戴相应的劳动防护用品,并按时对其性能进行检查,及时更换。在进行预制构件的组装时,可聘请相关方面的专家和技术人员进行现场指导,提高工人的实际操作水平,降低事故发生的可能性。

2. 物的不安全状态方面

在物的不安全状态中,指标 I_{25} 所占权重达到了 0.127,对施工安全有着较大影响。装配式建筑包括大量高空作业,高空坠物发生的可能性较大,要及时检查吊装设备,防止起吊过程中物件脱落;完善临边防护措施,在楼层临边处搭设防护栏杆,外墙设外挂式脚手架等;及时对作业平台进行清理,并有效防止物体坠落。

同时,装配式建筑构件质量直接影响施工安全,施工单位应严格执行构件进场验收制度,防止不合格构件进入现场。并提前规划构件吊装、堆放顺序,单独设置堆场并予以标识,构件与构件之间留有必要的操作空间和逃生通道,避免影响施工。吊装作业在装配式施工作业中所占比重很大,因此,起重吊装设备的选择至关重要,应考虑起重参数、最大(小)起重幅度和起重量,并结合吊件参数对起重设备能力进行核算,同时,综合考虑堆场位置及周边环境等因素,合理设立安装位置。要定期检查吊装设备,发现问题,及时进

行更换和修理,防止吊装事故发生。

装配式建筑施工过程中需要大量的用电作业,而施工现场用电具有临时性、移动性、环境简陋等特点,加之施工人员缺乏安全用电意识,极易造成触电事故。因此,应加强对施工现场临时用电的管理,按规定设置用电警示牌,维修和搬迁时注意切断电源;加强用电安全培训,严禁用电人员无防护操作。

3. 组织管理的不安全状况方面

安全管理是施工现场生命、财产安全的根本保障。指标 I_{33} 的权重为 0.071,在组织管理中占比较大,为更好地进行监督管理,安全监督人员可加强现场的监督检查力度,发现安全隐患及时向上级报告,并要求相关人员及时进行整改;可对施工提出合理化建议,使其严格按照工艺要求执行,避免造成严重的安全质量问题。除此之外,还应健全企业安全管理体系、完善现场安全管理制度、明确安全管理要点;严格实施专项工程施工方案及应急方案,对现场实施智慧管控,发现问题及时排查解决,降低装配式建筑施工现场管理风险。

五、结 语

建筑业是国民经济的支柱产业之一,随着我国城市化进程的不断加快,发展装配式建筑已经是必然趋势,然而据住房和城乡建设部统计数据,在建筑面积不断增加的同时,每年的伤亡人数也在不断增长,安全问题十分严峻,严重制约了建筑业的可持续发展。笔者通过 $G1 - 熵权法$ 确定评价指标权重,使指标评价结果更加客观、科学,结合具体实例,运用未确知测度理论建立未确知测度安全风险评价模型,对其风险进行综合评价,其结果与工程实际情况相符,说明该模型具有一定的实用性和科学性,拓宽了装配式建筑施工安全评价研究的思路。通过对其评价结果进行分析,针对装配式建筑施工过程中发现的安全风险提出了相关建议,有助于预防施工安全事故,促使施工单位加强安全风险防控,对建筑行业具有一定的参考意义。

参考文献:

[1] 陈伟,付杰,熊付刚,等. 装配式建筑工程施工安全灰色聚类测评模型[J]. 中国安全科学学报,2016,26(11):70-75.

[2] 徐姣姣,江林,黄萍莉. 基于系统动力学的装配式建筑安全风险影响因素分析[J]. 西华大学学报(自然科学版),2018,37(2):23-28.

[3] 刘名强,李英攀,王芳,等. 基于 RVM 的装配式建筑吊装作业安全预警模型[J]. 中国安全科学学报,2018,28(4):109-114.

[4] 黄桂林,胡明路. 基于可拓学理论的装配式住宅施工过程安全风险评价研究[J]. 工业安全与环保,2017,43(2):33-38.

[5] 王宇. 基于贝叶斯网络的装配式住宅项目施工安全风险研究[D]. 青岛:青岛理工大学,2018.

[6] 冯亚娟,都思竹,张竞一. 基于 EW-SPA 的装配式建筑施工安全评价及预测[J]. 中国安全科学学报,2019,29(5):85-90.

[7] 刘欢. 基于 BIM 的装配式混凝土建筑施工作业安全管理研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2019.

[8] 姜增国,吴壮,张孝千. 基于二维云模型的桥梁施工风险评估[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2019,43(2):218-221.

[9] 康坤. 基于云模型的装配式建筑施工安全评价研究[D]. 西安:西安科技大学,2018.

[10] 刘娇,苑俊丽,常春光. 基于未确知测度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),2017,19(4):387-393.

[11] 李文龙,李慧民,孟海,等. 基于熵权-未确知测度理论的装配式建筑施工安全风险评估[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2019,51(3):369-374.

[12] 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.

[13] 常春光,吴溪,李自浩. 基于 G1-物元分析法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(3):268-274.

[14] 常春光,石秋红. 基于改进 TOPSIS 的装配式建筑施工安全评价研究[J]. 沈阳建筑大学学报(社会科学版),2019,21(3):281-288.

Construction Safety Risk Assessment of Prefabricated Building:
Based on G1 – Entropy Weight Method and
Uncertainty Measure Model

CHANG Chunguang, NIU Shuhui
(School of Management, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China)

Abstract: In order to prevent safety accidents in the process of assembly building construction, effectively control safety risks and carry out scientific safety evaluation, the comprehensive index weight is obtained by adopting G1 – entropy weight method. The uncertainty measure model is used to analyze the safety risk of prefabricated building construction and the risk level is judged according to the confidence recognition criterion. Combined with the analysis of engineering cases, a good evaluation result has been obtained, which provides reference for the safety management of prefabricated building construction.

Key words: prefabricated building; uncertainty measure theory; G1 method; entropy weight method; safety risk assessment

(责任编辑:郝雪 英文审校:林昊)