

# 基于 ANP-SPA 的装配式建筑 施工安全风险评价

常春光,赵梓言

(沈阳建筑大学管理学院,辽宁 沈阳 110168)

**摘要:**为加强装配式建筑施工的安全管理,有效降低施工过程的安全隐患,提出了用于评价装配式建筑施工安全风险的新方法。基于网络层次分析法(Analytic Network Process, ANP)对指标体系中各指标的权重进行了计算并确定,依据集对分析法(Set Pair Analysis, SPA)构建了装配式建筑施工安全风险评价模型。结合实际案例进行分析与评价,为实现装配式建筑施工安全管理的科学化、规范化提供了借鉴与参考,从而降低事故的发生率。

**关键词:**装配式建筑;网络层次分析法;集对分析法;安全风险评价

**中图分类号:** TU714

**文献标志码:** A

随着中国社会和经济的不断转型升级,建筑行业在改善人们的生活环境 and 质量方面发挥着重要作用。新的建造方法可以有效地减少施工现场的人数,降低噪声污染并保护环境。在技术革新与改造方面,装配式住宅建造模式的进展势头愈来愈盛。但在装配式建筑市场规模不断扩大的同时,由于其建造方式的特殊性、相关安全技术标准的不完善以及安全管理措施储备缺乏等原因,极易引起不同程度的事故,施工安全形势面临严峻挑战。所以在施工过程中如何降低工程建设中的安全隐患,最大限度地减少安全事故的发生,具有十分重要的现实意义。

目前,关于装配式建筑施工安全风险评价已经有了很多的研究。陈伟等<sup>[1]</sup>采用层次分析法与灰色聚类相结合的方法,建立了评价模型;田原等<sup>[2]</sup>在依据 5M1E 分析法的同时,建立模糊评价模型,评判各个风险因素

的影响程度并提出了相应的控制措施;张洪亮等<sup>[3]</sup>以 ANP-SPA 模型为基础,建立了精益管理实施水平评估系统,为企业比较其执行水平提供了空间和平台;王乾坤等<sup>[4]</sup>运用网络层次分析法研究了装配式建筑的多项目战略风险评价;李强年等<sup>[5]</sup>建立 ANP-Fuzzy 模型对装配式绿色建筑进行了分析评价;项勇等<sup>[6]</sup>将网络分析法与灰色聚类相结合,应用于项目的风险评价;赵维树等<sup>[7]</sup>将熵权法与集对分析法结合,应用于对预制构件的安全风险评价;徐遨蓝等<sup>[8]</sup>提出了熵权法与集对分析法相结合的解决思路;胡庆国等<sup>[9]</sup>提出了组合赋权法与集对分析法相结合,建立了装配式建筑施工安全风险的评价模型。基于上述分析,在确立评价指标体系后,引入网络层次分析法计算各指标的权重,结合集对分析法建立同异反模型来计算联系度,达到对装配式建筑施工安全风险进行更为准确客

观评价的目的,旨在为管控装配式建筑施工安全风险提供一种更为量化的方法。

一、安全风险评价的原理和方法

1. ANP 法理论简述

网络层次分析法 (Analytic Network Process, ANP) 是对数据进行定性和定量分析的常用决策方法之一。ANP 法<sup>[10]</sup>通过建立数学模型来处理复杂系统中存在的非线性问题,其网络结构能够充分反映各个要素或相邻层级之间的相互作用、相互联系。利用超矩阵对可能存在的各种影响因素进行全局分析,来获得它们的综合权重值。与其他方法相比,ANP 法结构的灵活性更强,既能排除主观因素的干扰,又能起到一定的调节作用,进而使指标权重更加科学和准确。

2. 集对分析法理论简述

集对分析法 (Set Pair Analysis, SPA) 是一种对确定性和不确定性问题进行系统性研究的方法,由赵克勤<sup>[11]</sup>在 1989 年提出。假设在某种特定的条件下,有两个具有一定关系的集合,集对分析是对这两个集合间的确

定性和不确定性进行系统和数学的分析。

3. 两种方法的结合

将 ANP 法与 SPA 法相结合应用于装配式建筑施工安全风险领域,采用这种综合评价方法可以有效地降低主观因素对安全分析的影响,使分析结果更加准确,弥补了模糊性评价方法的缺陷和不足,使操作更加数据化,结论更加科学化。

二、装配式建筑施工安全风险评价指标体系的构建及权重的确定

1. 指标体系的构建

在充分考虑装配式建筑特性的基础上,通过大量阅读文献和有关标准,深入分析各类因素的相似性及影响程度并构建了相关指标体系。首先,提取契合装配式建筑特点的施工安全风险因素;其次,将风险因素划分为人员、材料、机械设备、施工技术、管理和环境 6 类一级指标;再次,将一级指标再细化为 20 个二级指标;最后,建立了装配式建筑施工安全风险评价指标体系(见表 1)。

表 1 装配式建筑施工安全风险评价指标体系

目标层	准则层	指标层
装配式建筑施工安全风险 C	人员风险 C <sub>1</sub>	工人操作水平欠缺 C <sub>11</sub>
		安全意识薄弱 C <sub>12</sub>
		违规违章操作 C <sub>13</sub>
		相关安全教育培训欠缺 C <sub>14</sub>
	材料风险 C <sub>2</sub>	构件出厂质量不达标 C <sub>21</sub>
		预制构件的连接强度低 C <sub>22</sub>
		施工材料随意堆放 C <sub>23</sub>
	机械设备风险 C <sub>3</sub>	设备故障、老化 C <sub>31</sub>
		吊装等设备的检修与维护不到位 C <sub>32</sub>
		运输、起重、灌浆等设备的选择、布置不合理 C <sub>33</sub>
		临时支撑体系防护不到位 C <sub>41</sub>
		叠合楼板的吊点设计不准确 C <sub>42</sub>
	施工技术风险 C <sub>4</sub>	安全监测技术手段不健全 C <sub>43</sub>
		边缘构件的组装与连接等技术不先进 C <sub>44</sub>
	管理风险 C <sub>5</sub>	各级沟通不顺畅 C <sub>51</sub>
		安全管理制度不明确 C <sub>52</sub>
		管理人员经验及能力不足 C <sub>53</sub>
	环境风险 C <sub>6</sub>	装配区域场地、施工杂乱 C <sub>61</sub>
		资金供应不及时 C <sub>62</sub>
		安全标准政策法律缺失 C <sub>63</sub>

2. ANP 法指标权重的确定

装配式建筑施工中的安全风险因素繁

多<sup>[12]</sup>,且相互依赖、相互影响,在确定权重时,建立网络层次结构可以充分考虑不同层

次指标之间的逆向反馈关系以及同一层次指标间的相互依赖关系。

(1) 网络结构模型的建立

充分考虑各指标间的关联关系, 根据 ANP 的逻辑思路对各指标因素之间的作用关系和影响关系进行判定, 建立网络结构模型(见图 1)。

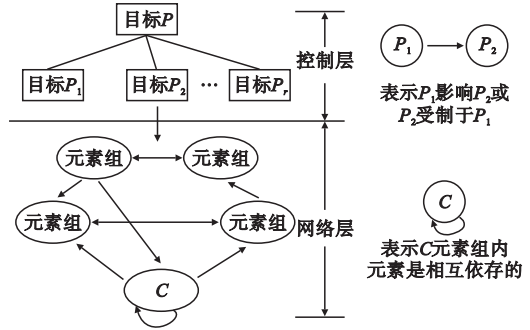


图 1 典型的 ANP 结构

(2) 指标权重的确定

①超矩阵的建立。控制层元素为  $P_r$ ; 网络层指标集为  $\{C_1, C_2, \dots, C_N\}$ , 其中的某一指标  $C_i (i=1, 2, \dots, N)$  中包含二级指标  $C_{i1}, C_{i2}, \dots, C_{in}$ 。以  $P_r$  为准则, 以  $C_j$  中的元素  $C_{jl} (l=1, 2, \dots, n)$  为次准则, 把  $C_i$  中的各指标与  $C_{jl}$  相互比较, 构造判断矩阵。可得归一化特征向量  $W_{ij}$ , 即

$$W_{ij} = \begin{pmatrix} w_{i1}^{(j1)} & w_{i1}^{(j2)} & \dots & w_{i1}^{(jn)} \\ w_{i2}^{(j1)} & w_{i2}^{(j2)} & \dots & w_{i2}^{(jn)} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ w_{in}^{(j1)} & w_{in}^{(j2)} & \dots & w_{in}^{(jn)} \end{pmatrix} \quad (i, j = 1, 2, \dots, N) \quad (1)$$

$W_{ij}$  的列向量就是  $C_i$  中的元素  $C_{i1}, C_{i2}, \dots, C_{in}$  对  $C_j$  中的元素  $C_{j1}, C_{j2}, \dots, C_{jn}$  的影响因素排序向量。对  $i, j = 1, 2, \dots, N$ , 重复以上过程, 便可得到超矩阵  $W$ :

$$W = \begin{pmatrix} W_{11} & W_{12} & \dots & W_{1N} \\ W_{21} & W_{22} & \dots & W_{2N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ W_{N1} & W_{N2} & \dots & W_{NN} \end{pmatrix} \quad (2)$$

②加权超矩阵计算。 $W_{ij}$  是归一化的, 但是超矩阵  $W$  不是归一化的。因此需进行  $C_i (i=1, 2, \dots, N)$  对  $C_j (j=1, 2, \dots, N)$  重要性

的两两比较, 即可获得  $W_{ij}$  的归一化特征向量  $[a_{1j}, a_{2j}, \dots, a_{Nj}]$ 。与  $C_j$  无关的元素组对应的排序向量分量为 0, 从而得到加权矩阵  $A$ , 即

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1N} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{N1} & a_{N2} & \dots & a_{NN} \end{pmatrix} \quad (3)$$

对超矩阵  $W$  的元素加权, 即得加权超矩阵  $\bar{W}$ , 即

$$\bar{W} = a_{ij} W_{ij} (i, j = 1, 2, \dots, N) \quad (4)$$

式中:  $a_{ij}$  为  $A$  中第  $i$  行第  $j$  列元素值。

③极限超矩阵计算。加权超矩阵  $\bar{W}$  是列随机矩阵, 对其进行稳定性处理, 直至矩阵中的每个列向量都不变, 得极限矩阵  $W^\infty$ , 即

$$W^\infty = \lim_{k \rightarrow \infty} \bar{W}^k \quad (5)$$

式中:  $k$  为迭代幂次数;  $\bar{W}^k$  为  $\bar{W}$  的  $k$  次幂。

如果该极限值收敛且唯一, 则  $W^\infty$  的第  $j$  列就是其他各指标对指标  $j$  的极限相对排序量。逐次计算, 就可以得到所需要的权重数据。

三、装配式建筑施工安全风险评价模型的建立

在装配式建筑施工安全风险评价中, SPA 法通过对同一背景下具有一定关联的两个集合的特性进行同异反分析和度量, 得到表达它们之间同异反关系的联系度表达式, 提出一种可以基于确定性和不确定性、定性和定量相结合的评价模型。

1. 引入集对和联系度的概念

集对是由两个具有某种关系的集合构成的一个基本单元。假定在一个特定的问题中, 存在  $E, F$  两个集合, 把它们组成一对形成的集对表示为  $X$ , 通过分析, 得出  $Y$  个特性。其中,  $D$  为两集合的同一特性;  $T$  为两集合的对立特性;  $Q = Y - D - T$  为  $E, F$  两个集合的差异特性。现在定义  $X$  的同一度为  $\frac{D}{Y}$ ; 差异度为  $\frac{Q}{Y}$ ; 对立度为  $\frac{T}{Y}$ 。联系度为  $u = \frac{D}{Y} +$

$\frac{Q}{Y}i + \frac{T}{Y}j$ ,其中, $i$  为差异度标记, $j$  为对立度标记。

2. 联系度计算

集对分析理论中联系度的公式通常表达为  $u = a + bi + cj$ 。其中, $a$  为两个集合的同一程度; $b$  为差异程度; $c$  为对立程度。差异度系数  $i$  根据实际情况取  $-1$  和  $1$  之间的任意数,对立度系数  $j$  运算时取  $-1$ 。矩阵形式的联系度为

$$u = W \cdot R \cdot E =$$

$$(W_1, W_2, \cdots, W_n) \begin{pmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ a_n & b_n & c_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ i \\ j \end{pmatrix} \quad (6)$$

式中: $W$  为专家的权重矩阵; $R$  为由专家打分得到的评价矩阵; $E$  为联系分量矩阵; $n$  为专家数量。

3. 评价原则

联系度  $i$  可表示同一、对立、差异特性之间的转化、影响和联系。当  $i = -1$  时,差异度向对立度转化;当  $i = 1$  时,差异度向同一度转化;当  $-1 < i < 1$  时,差异度中既具有同一性又具有对立性。依据此性质和均分原则可对

装配式建筑施工安全风险进行动态评价。

四、案例分析

1. 项目概况

以某市一处装配式建筑住宅项目为例,该项目地下两层至地上 3 层采用现浇法,4 至 32 楼为预制装配式结构。装配式建筑面积约 38 610 m<sup>2</sup>,装配率为 61.8%。

2. 指标体系的构建及权重的确定

①ANP 网络结构模型的建立。充分考虑各指标间的关联关系,以 ANP 的逻辑思想作为对各指标因素间影响关系的判定手段,应用 SuperDecision 软件建立相应的网络结构模型。

②指标权重的确定。由于各指标对项目施工安全影响的程度不同,指标权重之间存在内在依存与反馈关系,为了对其进行确定,邀请了相关专家共计 10 人,对两两风险因素的重要性进行判断,采用 1 ~ 9 标度法在 ANP 模型中构建相应的比较矩阵。利用算术平均法整合专家偏好,由于其计算量庞大,故而利用 SuperDecision 软件来进行处理,通过输入专家调查问卷的相关数据,便可快速计算出各指标的权重及排序(见表 2)。

表 2 装配式建筑施工安全风险评价指标权重

目标层	准则层	权重	指标层	指标权重	总权重	排序
装配式 建筑施 工安全 风险 C	人员风险 C <sub>1</sub>	0.349 20	工人操作水平欠缺 C <sub>11</sub>	0.142 80	0.049 87	9
			安全意识薄弱 C <sub>12</sub>	0.278 54	0.097 27	4
			违规违章操作 C <sub>13</sub>	0.296 53	0.103 55	1
			相关安全教育培训欠缺 C <sub>14</sub>	0.282 13	0.098 52	3
	材料风险 C <sub>2</sub>	0.102 42	构件出厂质量不达标 C <sub>21</sub>	0.028 85	0.002 95	20
			预制构件的连接强度低 C <sub>22</sub>	0.501 55	0.051 37	8
			施工材料随意堆放 C <sub>23</sub>	0.469 60	0.048 10	10
	机械设备风险 C <sub>3</sub>	0.109 42	设备故障、老化 C <sub>31</sub>	0.238 54	0.026 10	14
			吊装等设备的检修与维护不到位 C <sub>32</sub>	0.127 49	0.013 95	18
			运输、起重、灌浆等设备的选择、布置不合理 C <sub>33</sub>	0.633 97	0.069 37	6
			临时支撑体系不稳定 C <sub>41</sub>	0.384 86	0.045 93	11
			叠合楼板的吊点设计不准确 C <sub>42</sub>	0.183 25	0.021 87	16
			安全监测技术手段不健全 C <sub>43</sub>	0.289 31	0.034 53	12
			边缘构件的组装与连接等技术不先进 C <sub>44</sub>	0.142 58	0.017 02	17
	管理风险 C <sub>5</sub>	0.253 20	各级沟通不顺畅 C <sub>51</sub>	0.327 43	0.082 91	5
			安全管理制度不明确 C <sub>52</sub>	0.268 42	0.067 96	7
			管理人员经验及能力不足 C <sub>53</sub>	0.404 15	0.102 33	2
			装配区域场地、施工杂乱 C <sub>61</sub>	0.492 66	0.032 72	13
	环境风险 C <sub>6</sub>	0.066 42	资金供应不及时 C <sub>62</sub>	0.130 91	0.008 70	19
			安全标准政策法律缺失 C <sub>63</sub>	0.376 43	0.025 00	15

3. 集对分析模型的建立

①专家评判。按照已确立的评价指标体

系,就此工程项目邀请设计、施工、管理、检测、监管部门各 1 名专家,对 20 项风险指标

进行等级评判,评判等级分为3类:1代表有影响且影响较大;2代表影响一般且根据实际情况其影响程度既有可能变大也有可能变小;3代表无影响。基于5名专家的专业知识和实践经验,将专家权重设定为 $W=(0.2,0.3,0.2,0.1,0.2)$ ,评分结果如表3所示。

表3 各专家对风险指标的评分结果

专家	$C_{11}$	$C_{12}$	$C_{13}$	$C_{14}$	$C_{21}$	$C_{22}$	$C_{23}$	$C_{31}$	$C_{32}$	$C_{33}$	$C_{41}$	$C_{42}$	$C_{43}$	$C_{44}$	$C_{51}$	$C_{52}$	$C_{53}$	$C_{61}$	$C_{62}$	$C_{63}$
专家1	2	2	1	1	2	2	1	1	3	2	3	2	2	1	1	1	1	2	2	1
专家2	1	2	1	1	1	2	2	1	1	1	2	3	1	1	3	2	1	2	1	2
专家3	1	3	2	1	1	3	1	1	1	1	3	1	1	1	3	1	2	2	2	1
专家4	1	1	2	1	1	2	2	3	1	1	1	2	1	2	3	2	1	3	3	1
专家5	2	3	1	1	2	1	2	2	3	2	3	1	1	1	2	1	2	1	2	1

②联系度计算。根据专家的打分情况和二级指标的综合权重,计算出同、异、反多元评价矩阵 $R$ 。

$$a_1=0.159\ 15+0.002\ 95+0.026\ 10+0.013\ 95+0.063\ 79+0.049\ 30+0.069\ 76+0.128\ 25+0.025\ 00=0.538\ 36$$

$$b_1=0.018\ 91+0.113\ 14+0.051\ 37+0.048\ 10+0.045\ 93+0.034\ 53+0.017\ 02+0.032\ 72+0.008\ 70=0.370\ 40$$

$$c_1=0.069\ 37+0.021\ 87=0.091\ 24$$
  
以此类推得 $a_2, b_2, c_2 \cdots a_5, b_5, c_5$ 。

得
$$R=\begin{pmatrix} 0.538\ 36 & 0.370\ 40 & 0.091\ 24 \\ 0.579\ 48 & 0.336\ 69 & 0.083\ 83 \\ 0.438\ 77 & 0.328\ 82 & 0.232\ 41 \\ 0.493\ 91 & 0.401\ 42 & 0.104\ 67 \\ 0.453\ 11 & 0.342\ 51 & 0.204\ 38 \end{pmatrix}$$

得联系度:  
$$u=W\cdot R\cdot E=(0.2,0.3,0.2,0.1,0.2)$$

$$\begin{pmatrix} 0.538\ 36 & 0.370\ 40 & 0.091\ 24 \\ 0.579\ 48 & 0.336\ 69 & 0.083\ 83 \\ 0.438\ 77 & 0.328\ 82 & 0.232\ 41 \\ 0.493\ 91 & 0.401\ 42 & 0.104\ 67 \\ 0.453\ 11 & 0.342\ 51 & 0.204\ 38 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ i \\ j \end{pmatrix} = 0.509\ 28+0.349\ 5i+0.141\ 22j$$

4. 结果分析

依据均分原则,将联系度 $u$ 的取值范围划分为3个区间: $u$ 处于 $[-1,-0.333)$ 时,代表系统的安全等级为危险; $u$ 处于 $[-0.333,0.333]$ 时,代表系统的安全等级为一般安全; $u$ 处于 $(0.333,1]$ 时,代表系统的安全等级为安全。对差异度系数 $i$ 取边界极端值,便可得出项目系统所处的安全状态,进而对其进行动态分析。

① $i=1;j=-1$ ,即加强对该装配式建筑项目施工安全风险的管理和控制,这代表系统中的差异度都转为同一度,原状态处于“一般安全”的指标转化为“安全”状态。此时联系度 $u=0.717\ 56$ ,系统处于“安全”状态。

② $i=-1;j=-1$ ,即疏于对该装配式建筑项目施工安全风险的管理和控制,这代表系统中的差异度都转为对立度,原状态处于“一般安全”的指标转化为“危险”状态。此时联系度 $u=0.018\ 57$ ,该系统处于“一般安全”状态。

③在安全风险因素的控制方面,不管是疏忽还是强化管控,这个项目的系统都没有陷入“危险”状态,说明该项目工程建设中的安全风险得到了有效控制。

④本工程案例的安全状态是良好可控的,但参考联系度的数值大小及各个风险指标权重的排序,可以发现项目的状态仍存在安全风险,在后续的施工过程中,仍然要投入相当的关注及管控,这样才能够更好地保证施工安全和建筑质量。

5. 应对措施和手段

在进行案例安全风险评价分析的基础上,针对本项目的特点,侧重提出了以下几个方面的风险应对措施。人员方面:提高工人操作水平、强化安全意识、加强安全教育培训;材料方面:安全堆放构件、确保构件出厂质量、提高预制构件的连接强度;机械设备方面:合理选择和布置起重等设备,加强机械设备的检修与维护;施工技术方面:创新装配式建筑工程技术、加强临时支撑体系的稳定性;管理方面:加强各级沟通、提高管理人员的能力、完善安全管理制度;环境方面:保持现场

整洁、完善安全标准法律政策等。

五、结 语

对于装配式建筑施工安全风险指标权重的确定,研究采用了 ANP 法来进行计算,然后用 SPA 法计算联系度,对其进行定性定量分析,将这两种方法相结合应用于装配式建筑施工安全风险评价,有效降低了主观因素的影响,获得了更加准确可靠的结果。通过工程实例验证了该方法的技术可行性,符合现代工程需求,为国内外学者在装配式建筑安全领域的学术研究方面提供了参考,同时为建筑业在工程建设中应用的评估模型提供了新思路。

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] 田原,王宝令. 基于熵权-G1 法的装配式建筑施工安全风险研究[J]. 建设监理,2021(8):57-60.

[3] 张洪亮,牛占文. 基于 ANP-SPA 的精益管理实施水平系统性评价[J]. 工业工程,2013,16(2):97-103.

[4] 王乾坤,王亚珊. 基于 ANP 的装配式建筑多项目战略风险评价研究[J]. 武汉理工大学学报,2018,40(4):76-79.

[5] 李强年,鲍俊超,牛昌林. 基于 ANP-Fuzzy 法的装配式绿色建筑评价[J]. 建筑节能,2020,48(10):67-71.

[6] 项勇,张仕廉. 基于灰色聚类-网络分析法的工程项目风险评价[J]. 统计与决策,2012(1):91-93.

[7] 赵维树,吴晓. 基于熵权法和集对分析法的预制构件安全风险评价[J]. 淮阴工学院学报,2020,29(3):71-75.

[8] 徐邀蓝,刘妍,张源. 基于熵权法和集对分析法对装配式建筑施工安全风险的评价[J]. 价值工程,2019,38(19):22-25.

[9] 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.

[10] 王莲芬. 网络分析法(ANP)的理论与算法[J]. 系统工程理论与实践,2001(3):44-50.

[11] 赵克勤. 集对分析与同异反决策[J]. 决策探索,1992(2):14-15.

[12] 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.

Research on Construction Safety Risk Assessment of Prefabricated Building Based on ANP-SPA

CHANG Chunguang,ZHAO Ziyang

(School of Management,Shenyang Jianzhu University,Shenyang 110168,China)

**Abstract:** In order to further strengthen the safety management of prefabricated building construction and effectively reduce the hidden danger of safety, a new method is studied to evaluate the safety risk of prefabricated building construction. Based on the networked Analytic Hierarchy Process(ANP), the weight of each index in the index system was calculated and determined, and based on the set pair analysis method(SPA), the construction safety risk evaluation model of prefabricated building was established. Combined with the actual case analysis and evaluation, this paper provides scientific and standardized reference for the realization of assembly building construction safety management so as to reduce the probability of accident.

**Key words:** prefabricated building; analytic network process; set pair analysis; safety risk assessment