

doi: 10.11731/j.issn.1673-193x.2022.09.030

三度空间视角下的装配式建筑施工安全绩效评价*

周逸伦^{1,2}, 王人龙^{1,2}, 余健俊^{1,2}

(1. 南京工业大学 智慧城市研究中心, 江苏 南京 211816;

2. 南京工业大学 土木工程学院, 江苏 南京 211816)

摘要:为了解决现有的装配式建筑施工安全绩效评价已不能满足建筑业信息化背景下发展需求的问题,基于“三度空间”视角,从物理、社会、信息3个层面,构建包含6个一级指标以及23个二级指标的装配式建筑施工安全绩效评价体系;阐述各指标之间的相互关联;采用ANP网络模型对各指标赋权;利用灰色聚类法对施工安全绩效指标进行评价。研究表明:该评价模型能够分析装配式建筑在社会、物理和信息3个空间维度的安全绩效,得出装配式建筑项目的整体安全绩效水平并识别出关键控制指标,可为装配式建筑安全绩效评价提供新的思路。

关键词:装配式建筑;施工安全;绩效评价;网络分析法(ANP);灰色聚类法(GCM)

中图分类号:X947 文献标志码:A 文章编号:1673-193X(2022)-09-0210-08

Safety performance evaluation of prefabricated building construction from perspective of three-dimensional space

ZHOU Yilun^{1,2}, WANG Renlong^{1,2}, SHE Jianjun^{1,2}

(1. Smart City Research Center, Nanjing Tech University, Nanjing Jiangsu 211816, China;

2. College of Civil Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing Jiangsu 211816, China)

Abstract: To solve the problem that the existing safety performance evaluation of prefabricated building construction can no longer meet the development needs of the construction industry informatization, based on the perspective of three-dimensional space, an evaluation system on the safety performance of prefabricated building construction including 6 first-level indicators and 23 second-level indicators was constructed from three levels of physics, society and information. The correlation between the indicators was explained, then the analytic network process (ANP) model was used to empower the indicators, and the grey clustering method (GCM) was used to evaluate the indicators of construction safety performance. The results showed that the evaluation model could analyze the safety performance of prefabricated buildings in the three spatial dimensions of society, physics and information. The overall safety performance level of the prefabricated building project was obtained and the key control indicators were identified, which provides a new idea for the safety performance evaluation of the prefabricated buildings.

Key words: prefabricated building; construction safety; performance evaluation; analytic network process (ANP); grey clustering method (GCM)

0 引言

装配式建筑因其低能耗排放、高效益质量,有效缩短施工工期等优势,自2016年在国务院的大力倡导之下逐步发展起来。2020年8月国家住建部等部门颁布了《关于加快新型建筑工业化发展的若干意见》,提出

“制定评价标准,建立新型建筑工业化项目评价技术指标体系,重点突出信息化技术应用情况,引领建筑工程项目不断提高劳动生产率和建筑品质”^[1]。

在装配式建筑施工过程中,施工单位对于安全管理目标实现程度的可测量结果表征即为装配式建筑施工安全绩效。目前,已经有多种研究方法和数学模型在安

收稿日期:2022-03-25

* 基金项目:住建部专项课题(ZLAQ(2019)AQ-4)

作者简介:周逸伦,硕士研究生,主要研究方向为建筑信息化技术、建筑运维管理、施工安全管理。

通信作者:余健俊,博士,副教授,主要研究方向为工程项目管理。

全绩效评价中得到应用。李晓娟等^[2]利用 AHP 方法对绩效评价指标进行赋权的模型应用于山区公路施工项目中;Liu 等^[3]构建了适用于中国装配式建筑发展现状的安全绩效评价六因素指标体系并利用 AHP-熵权法以组合赋权其权重;陈勇刚等^[4]基于混合型中心点三角白化权函数和 TAN 模型构建了运输航空飞行安全绩效模糊动态评估模型;陈芳等^[5]基于三角模糊熵权法的物元可拓云构建了管制单位质量安全绩效评价模型;成连华等^[6]将 DEA 方法计算综合效率值的思路应用于煤矿安全绩效评价中并提出了相应的提升措施;康良国等^[7]将大数据环境考虑应用于安全绩效管理并提出了数据流向和框架模型以及管理应用对策。

尽管上述文献为装配式建筑施工安全绩效评价研究提供了支持,但仍然存在一些不足。文献[6-7]所阐述的方法对于数据体量要求较高;文献[3-5]表明在工程实践中必须考虑灰色性与模糊性 2 方面对于绩效评价结果的影响。此外文献[2]所采用的 AHP 方法强调独立性假设,然而在装配式建筑安全绩效评价过程中,需要从系统层面考虑和分析人、物、信息及事件等多因素存在不可忽视的关联。因此本文考虑在信息技术高速发展背景下,提出 1 种综合定量与定性的基于 ANP-GCM 的绩效评价方法。首先,构建三度空间视角下的装配式建筑施工安全绩效指标体系,利用 ANP 分析不同指标之间的影响关系^[8],对施工安全绩效进行定性描述并计算其评价指标权重;然后,运用灰色聚类法以定量化评估各指标对应各个等级的隶属度;最终,得到项目与对应指标的评价等级^[9]。以期可为装配式建筑的安全绩效评价提供实践及理论依据与支持。

1 装配式建筑施工安全绩效评价指标体系

在工程管理领域内,国内外众多学者针对安全绩效评价体系的构建展开了大量研究。张经阳等^[10]分析了煤矿建设项目的 WSR 关系并建立了对应的绩效评价三维度指标体系,构建了基于管理熵理论的评价数学模型;李英攀等^[11]基于装配式建筑 4M1E 要素构建了装配式建筑评价体系,提出通过组合赋权计算指标权重和云模型评分的结合确定装配式建筑项目安全绩效等级的方法,但随着国家不断推进建筑行业信息化革命,传统的装配式建筑施工安全绩效评价体系已不能满足建筑项目对于信息化的需求,目前亟须建立 1 套考虑到信息技术对装配式建设项目各个环节产生影响的背景下的安全绩效评价体系。

1.1 三度空间方法论

三度空间方法论是 Kasai 等^[12]提出的 1 种理解城市化现状和前景的系统论方法。在三度空间方法论视

角下,城市不仅仅是建筑的集群,人类的活动、组织的交流与沟通、信息的交互与传播都是组成城市的重要元素,即城市“三度空间”的组成包括物理、社会和信息 3 个要素。构成城市的所有系统均处于城市的“三度空间”中。每个系统均可在物理、社会和信息空间找到其相应的“投影”^[13]。

1.2 装配式建筑工程项目的三度空间解释

装配式建筑工程项目作为为城市提供实体发展基础的子系统,既组成并完善了城市功能,又保持一定的独立性发挥功能。本文对装配式建筑工程项目三度空间的概念界定如下:

1) 物理空间:是包括装配式建筑工程项目除人以外的所有实体和环境的直观空间,如装配式建筑施工现场中的作业设备、建筑构件、安全物品等正常施工的必需品及施工现场环境。物理空间中的对象通常由自然科学方法、工程技术描述和处理。

2) 社会空间:区别于工程实体和环境,由工程相关人员及其活动构成的空间,具体组成包括人员、施工工艺及技术、组织管理等方面。社会空间中的对象通常由社会科学方法、管理学方法描述和处理。

3) 信息空间:由各类包括 BIM, GIS, Big Data 和 AI 等信息技术及其信息流构成的空间,不同于传统的对于装配式建筑工程项目的解释方法论,三度空间方法论认为信息对于装配式建筑工程项目的现代化和智能化不可或缺,因此在物理和社会空间以外,还应该具有信息空间。

1.3 装配式建筑施工安全绩效评价指标体系及 ANP 结构模型构建

对装配式建筑施工安全绩效产生作用的 2 级指标不仅错综复杂而且指标之间存在相互影响。为了保证安全绩效评价指标体系构建的合理性以及绩效评价结果的客观可靠,本文从三度空间视角对装配式钢筋混凝土建筑工程项目系统进行解构,依据相关研究资料文献,并结合之前研究中在装配式建筑施工现场的考察和访谈记录,分别提取物理空间、社会空间和信息空间中对装配式建筑项目安全管理产生影响的指标,建立初始指标表单。随后采用德尔菲法调研对指标筛选判断的合理性,参与调研的 5 位专家信息如表 1 所示,专家主要来自高校、设计和建设单位,与装配式建筑生产密切相关,后文中提及的相关专家皆为该表所示专家。

得到三度空间视角下的装配式建筑施工安全绩效评价指标如图 1 所示,物理、社会和信息总体构成评价指标的空间维度。

根据构建的三度空间视角下的指标体系,由装配式建筑施工安全绩效目标即目标层,1 级准则层(物理、社会和信息)、2 级准则层(设备及材料因素 A,环境因素 B,

表 1 接受调研的专家信息
 Tabel 1 Information of experts surveyed

序号	来源	人数	备注
1	高校	1	副教授、具备建筑安全管理、智慧建造及相关研究 5 a 以上经验
2	设计单位	2	有 3 a 以上工作经验,装配式建筑项目结构、EMP 设计经验丰富
3	建设单位	2	具备高级职称并且在装配式建筑项目中担任主要领导、安全负责人

人员因素 C 、工艺技术因素 D 、管理因素 E 和 BIM 信息因素 F , 即 1 级安全绩效评价指标) 和网络层 (将装配式建筑施工安全绩效影响因素按大类分成不同的绩效影响组, 即 2 级安全绩效评价指标) 及它们之间的相互影响的可达关系共同构成装配式建筑施工安全绩效评价 ANP 结构模型。

采取德尔菲法向 5 名专家咨询意见, 结合对南京某装配式建筑项目的实地调查和实证分析; 然后, 通过判断调查表确定评价准则、网络节点即指标之间的相互影响关系; 最终, 创建三度空间视角下的装配式建筑施工

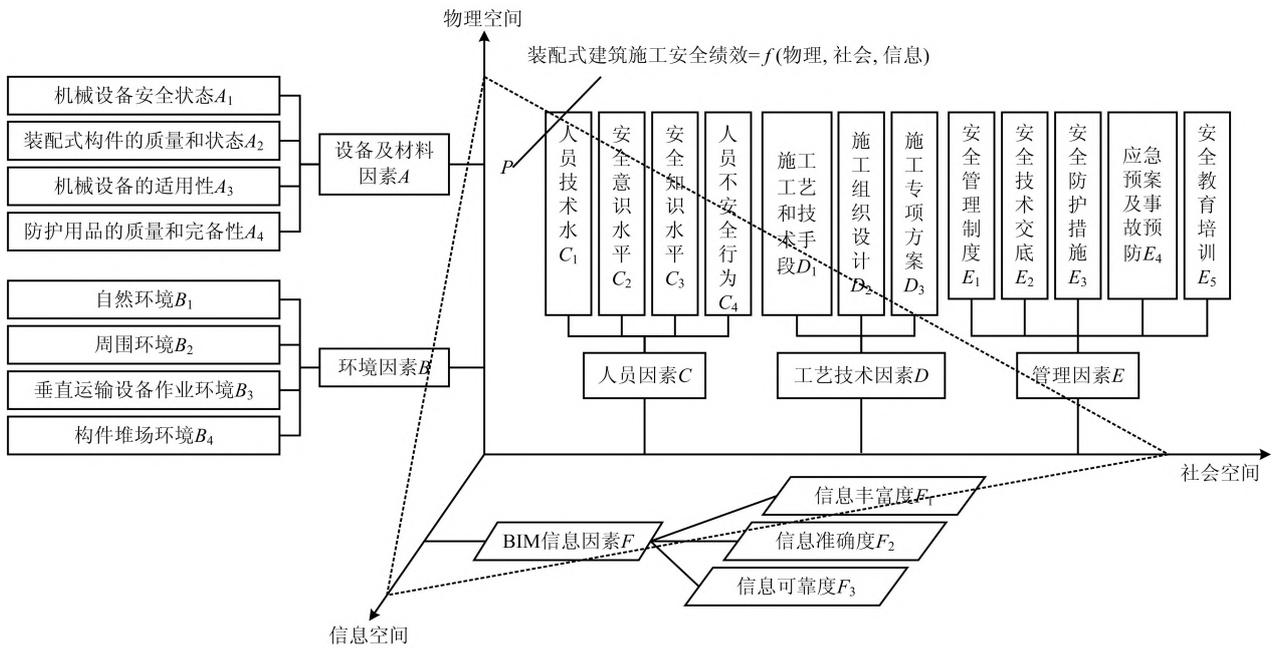


图 1 三度空间视角下装配式建筑施工安全绩效评价体系

Fig. 1 Evaluation system for safety performance of prefabricated buildings construction from perspective of three-dimensional space

安全绩效评价 ANP 网络结构模型如图 2 所示。

2 ANP - GCM 安全绩效评价模型

2.1 基于 ANP 的指标权重确定

为了更好地反映装配式建筑安全绩效评价指标的特征, 指标权重的确定具有关键性作用。选择 ANP 方法对指标赋权, 能够反映装配式建筑项目中人、机、物和环境之间复杂的相互影响关系, 指标权重确定的具体步骤如下:

1) ANP 网络建构关系构建

构建如图 2 所展示的三度空间视角下装配式建筑施工安全绩效评价 ANP 网络层次结构模型。

2) 构建未加权初始超矩阵

采用 1~9 标度法的专家调查问卷比较评价指标的相对优势度, 构建判断矩阵并进行一致性检验以验证。

此时权重向量为 $w' = (w'_1, w'_2, \dots, w'_n)$, 记 W_{ij} 如式 (1) 所示:

$$W_{ij} = \begin{pmatrix} w_{i1}^j & \dots & w_{in}^j \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{i1}^j & \dots & w_{in}^j \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中: W_{ij} 为判断矩阵; 列向量 w_{in}^j 为安全绩效评价指标 P_{in} 对 P_{jn} 的影响度排序向量。

评价指标相互影响的未加权超矩阵如式 (2) 所示:

$$W = \begin{pmatrix} w_{11} & \dots & w_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{N1} & \dots & w_{NN} \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中: w_{ij} 为判断矩阵 W_{ij} 中的元素。

3) 计算加权超矩阵

对 W 进行归一化处理, 计算 W_{ij} 的归一化特征向量

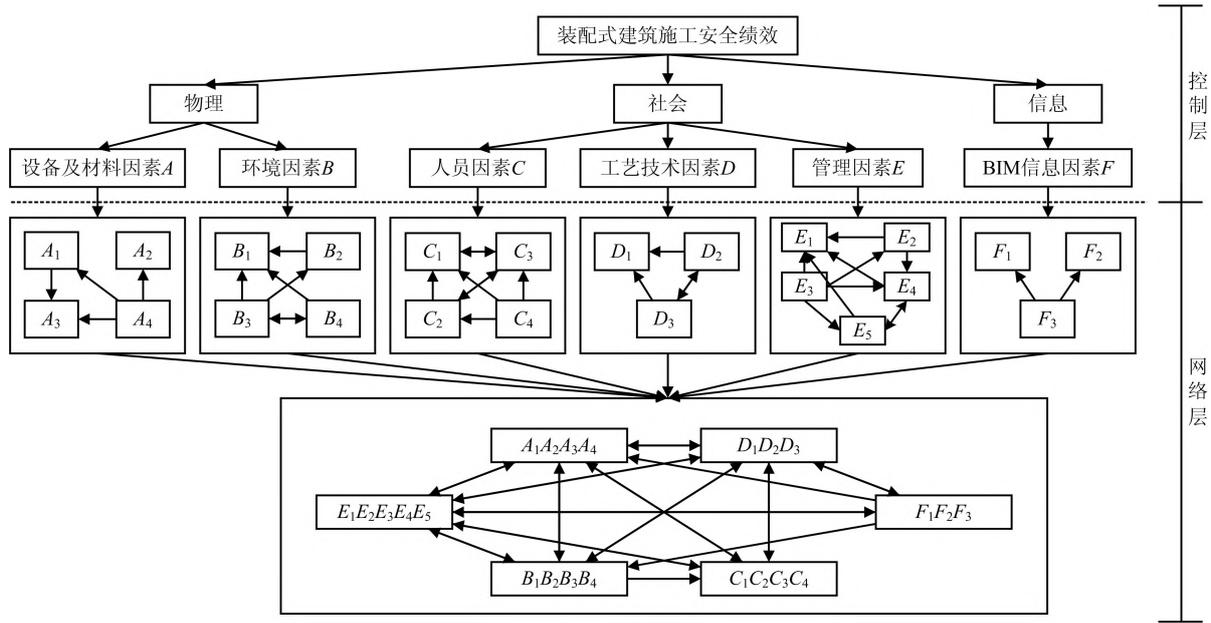


图2 三度空间视角下装配式建筑施工安全绩效评价 ANP 结构模型

Fig. 2 ANP structural model for safety performance evaluation of prefabricated building construction from perspective of three-dimensional space

$(a_{1j}, a_{2j}, \dots, a_{Nj})$, 与 P_j 无关的安全绩效评价排序向量值为 0, 得到加权矩阵, 如式(3)所示:

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{N1} & \dots & a_{NN} \end{pmatrix} \quad (3)$$

式中:列向量 a_{ij} 是 W_{ij} 的归一化特征向量。

对超矩阵 W 的元素加权, 得到加权超矩阵, 如式(4)所示:

$$\bar{W}_{ij} = a_{ij} W_{ij} \quad (4)$$

式中: \bar{W}_{ij} 为加权超矩阵。

对超矩阵做稳定性处理, 计算极限超矩阵, 如式(5)所示:

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

式中: W^∞ 为极限超矩阵; k 为趋于无穷大的实数。

W^∞ 的列向量即为装配式建筑施工安全绩效评价指标 P_{in_i} 权重向量 W' , 如式(6)所示:

$$W' = (W'_{11}, W'_{12}, \dots, W'_{Nn_n})^T \quad (6)$$

式中: W' 为评价指标 P_{in_i} 权重向量。

则各安全绩效评价指标 P_{ij} 在各自所属类别 P_i 中规范化权重向量, 如式(7)所示:

$$W'_i = (W'_{i1}, W'_{i2}, \dots, W'_{in_i})^T \quad (7)$$

式中: W'_i 为评价指标 P_{ij} 在各自所属类别 P_i 中规范化权重向量。

2.2 基于灰色聚类的安全绩效评价

1) 安全绩效评价灰类的确定

采用灰色聚类方法对指标进行打分, 能够兼顾由装配式建筑项目安全绩效评价指标的灰色性特点导致的专家主观评价偏好和定量的数据信息。将安全绩效评价等级划为 5 个灰类, 具体灰类区间相应百分制取值如表 2 所示。

表 2 灰类取值范围的划分

Table 2 Division of grey value range

安全绩效评价等级	不及格	及格	中等	良好	优秀
分值范围	(0, 60]	(60, 70]	(70, 80]	(80, 90]	(90, 100]

2) 构建指标中心点三角白化权函数^[14]

设 λ 为第 k 个灰类的中心点, 并连接第 k 个灰类中心点 $(\lambda, 1)$ 与 $k-1$ 个灰类中心点 $(\lambda_{k-1}, 1)$ 和第 $k+1$ 个灰类中心点 $(\lambda_{k+1}, 1)$, 得到 j 指标关于 k 灰类的三角白化权函数 $f_j^k(x)$, ($j = 1, 2, \dots, m; k = 2, 3, 4$)。如下式(8)~(10)所示:

$$f_j^1(x) = \begin{cases} 0, & x \notin [0, 65] \\ 1, & x \in [0, 30] \\ \frac{65-x}{65-30}, & x \in (30, 65] \end{cases} \quad (8)$$

$$f_j^k(x) = \begin{cases} 0, & x \notin (\lambda_{k-1}, \lambda_{k+1}] \\ \frac{x - \lambda_{k-1}}{\lambda_k - \lambda_{k-1}}, & x \in (\lambda_{k-1}, \lambda_k] \\ \frac{\lambda_{k+1} - x}{\lambda_{k+1} - \lambda_k}, & x \in (\lambda_k, \lambda_{k+1}] \end{cases} \quad (9)$$

$$f_j^s(x) = \begin{cases} 0, & x \notin (85, 100] \\ \frac{x - 85}{95 - 85}, & x \in (85, 95] \\ 1, & x \in (95, 100] \end{cases} \quad (10)$$

式中： x 为专家对评价指标的评分； λ_k 为第 k 个灰类的中心点。

3) 构造模糊隶属度矩阵进行模糊综合评价

计算得出装配式建筑施工安全绩效评价指标的权重 W'_i 。模糊综合评价矩阵 X 的组成元素计算方法如式 (11) 所示：

$$\sigma_i^k = \sum_{j=1}^5 f_j^k(x_{ij}) W'_i \quad (i=1, 2, \dots, 5; k=1, 2, 3, 4) \quad (11)$$

式中： σ_i^k 为评价对象 i 属于危险类型 k 的灰色聚类系数； $f_j^k(x_{ij})$ 为各白化权函数值； W'_i 为 ANP 综合评价权重。

计算综合评价系数，如式 (12) 所示：

$$\gamma^k = \sum_{i=1}^5 \sigma_i^k W'_i \quad (i=1, 2, \dots, 5; k=1, 2, 3, 4) \quad (12)$$

式中： γ^k 为综合评价系数， σ_i^k 为评价对象 i 属于危险类型 k 的灰色聚类系数； W'_i 为 ANP 综合评价权重。

由式 $\max_{0 \leq i \leq 4} \{\gamma^k\} = \gamma^{k^*}$ 及最大隶属度原则可判断装配式建筑施工安全绩效评价等级属于 k^* 灰类，然后确定其安全绩效综合评价等级，最后，依据细化指标的灰色聚类系数分析各个安全绩效评价等级。根据评价结果，找出装配式建筑项目安全管理工作中的薄弱环节以及应该重点关注的对象。

3 案例分析

中建 A 公司在南京承建的某装配式建筑项目，建筑类型为社区综合服务中心，该工程含地下车库 2 层，地上

建筑 11 层，局部 3~4 层，总建筑面积 35 140.77 m²；结构形式为预制装配整体式框架结构，预制构件为预制叠合梁、预制叠合板，预制率为 19.02%，预制装配率为 41.17%。

3.1 基于 ANP 确定安全绩效评价指标权重

采用 Yet Another ANP 软件(简称 yaanp 软件)对指标权重进行计算和确定，在 yaanp 软件中构建 ANP 模型，如图 3 所示。通过 yaanp 软件生成 1~9 标度法判断矩阵的调查问卷。

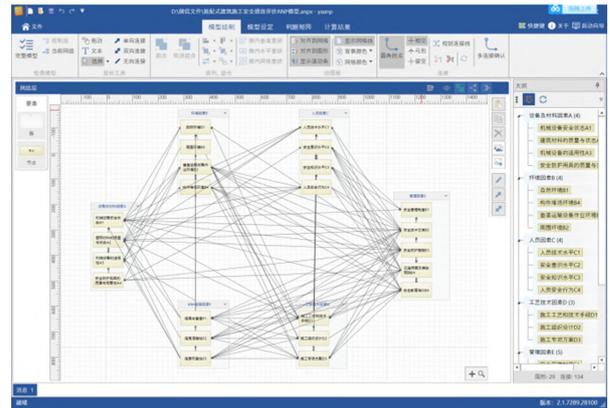


图 3 Yet Another ANP 软件构建 ANP 网络模型

Fig. 3 ANP network model constructed by Yet Another ANP software

向 5 名专家发放调查问卷，依据问卷调查结果输入各个次准则指标下的判断矩阵，随后进行一致性检验，对不一致判断矩阵进行修正，计算得到未加权超矩阵、加权超矩阵和极限超矩阵，当极限收敛且唯一时，获得基于专家群决策的各安全绩效评价 1, 2 级指标的权重，如表 3 所示。

表 3 装配式建筑施工安全绩效评价指标权重

Table 3 Weight of safety performance evaluation index of prefabricated building construction

1 级指标	1 级指标权重	2 级指标	2 级指标权重	1 级指标	1 级指标权重	2 级指标	2 级指标权重
设备及材料因素 A	0.084 6	机械设备安全状态 A ₁	0.01	工艺技 术因素 D	0.142 4	施工工艺和技术手段 D ₁	0.078
		装配式构件的质量和状态 A ₂	0.052 9			施工组织设计 D ₂	0.019 5
		机械设备的适用性 A ₃	0.014 2			施工专项方案 D ₃	0.044 9
		防护用品的质量和完备性 A ₄	0.007 5			安全管理制度 E ₁	0.073 7
环境因素 B	0.033 3	自然环境 B ₁	0.009 8	管理 因素 E	0.301 3	安全技术交底 E ₂	0.082
		周围环境 B ₂	0.000 3			安全防护措施 E ₃	0.012
		垂直运输设备作业环境 B ₃	0.015 1			应急预案及事故预防 E ₄	0.026 9
		构件堆场环境 B ₄	0.008 1			安全教育培训 E ₅	0.106 7
人员因素 C	0.356 3	人员技术水平 C ₁	0.095 8	BIM 信 息因素 F	0.082 1	信息丰富度 F ₁	0.033
		安全意识水平 C ₂	0.067 8			信息准确性 F ₂	0.034 3
		安全知识水平 C ₃	0.172 8			信息可靠性 F ₃	0.014 8
		人员不安全行为 C ₄	0.019 9				

3.2 基于灰色聚类的安全绩效评价

邀请5位专家依据项目资料和工程实际情况对上文 ANP 模型中的23个2级指标进行评分,评分依据为

本项目在所列的安全绩效评价指标方面的落实和完成情况,得到中建A公司在南京某装配式建筑项目施工安全绩效评价结果如表4所示。

表4 某项目装配式建筑施工安全绩效指标评分及安全绩效评价测算

Table 4 Safety performance index score and safety performance evaluation calculation of prefabricated building construction in the project

安全绩效评价 评价指标	安全绩效指标专家评分						安全绩效评价测算					所属灰 类等级
	专家1	专家2	专家3	专家4	专家5	平均分	不及格	及格	中等	良好	优秀	
A ₁	86	77	72	80	83	79.6	0	0	0.260	0.460	0.020	良好
A ₂	98	93	96	95	97	95.8	0	0	0	0	0.720	优秀
A ₃	90	92	95	97	93	93.4	0	0	0	0	0.720	优秀
A ₄	68	71	74	73	75	72.2	0	0.080	0.720	0	0	中等
B ₁	92	90	88	89	85	88.8	0	0	0	0.320	0.380	优秀
B ₂	96	86	88	92	94	91.2	0	0	0	0.240	0.560	优秀
B ₃	93	87	84	89	90	88.6	0	0	0	0.340	0.380	优秀
B ₄	83	77	73	78	80	78.2	0	0	0.360	0.360	0	中等
C ₁	70	72	79	75	81	75.2	0	0	0.480	0.200	0	中等
C ₂	77	69	78	72	73	73.8	0	0.040	0.580	0.100	0	中等
C ₃	61	68	62	65	70	65.2	0.040	0.540	0.160	0	0	及格
C ₄	83	77	74	80	75	77.8	0	0	0.500	0.300	0	中等
D ₁	94	89	88	91	90	90.4	0	0	0	0.120	0.540	优秀
D ₂	79	75	73	79	82	77.6	0	0	0.440	0.300	0	中等
D ₃	92	82	85	87	86	86.4	0	0	0	0.620	0.200	良好
E ₁	93	87	85	88	90	88.6	0	0	0	0.400	0.360	良好
E ₂	76	82	84	80	81	80.6	0	0	0.160	0.560	0	良好
E ₃	97	92	93	90	95	93.4	0	0	0	0	0.720	优秀
E ₄	93	89	86	88	90	89.2	0	0	0	0.280	0.420	优秀
E ₅	91	82	87	85	84	85.8	0	0	0	0.640	0.160	良好
F ₁	65	70	68	72	69	68.8	0	0.320	0.380	0	0	中等
F ₂	74	81	80	79	83	79.4	0	0	0.220	0.460	0	良好
F ₃	69	75	76	73	79	74.4	0	0	0.040	0.640	0	中等
项目综合绩效评价等级							0	0.174	0.213	0.234	0.171	良好

结合上文利用 ANP 网络和判断矩阵求得的安全绩效评价权重,求出各指标的灰类隶属度,依据最大隶属度原则,计算出该项目的安全绩效位于“良好”灰类等级。

3.3 评价结果分析

综合上述结果,在隶属度最大原则下项目各类安全绩效指标评价结果,如表5所示。该项目施工安全绩效整体评价结果为良好,各类指标整体优良率61%。具体到各类安全绩效2级指标的评价中,人员因素绩效水平较低。这与我国建筑行业发展水平较低有关,施工人

员流动性较大,企业不愿意投入大量的时间与资金组织培训;一线施工人员受教育水平较低,安全意识薄弱和安全知识储备不足是导致施工人员总体安全素质水平不高的主要原因。

由表5可知,C₃(人员安全知识水平)仅仅处于及格等级。依据轨迹交叉理论,人的主观性有时会导致施工现场不安全状态和不安全动作的产生进而酿成事故,C₃人员安全知识水平作为人员因素中的关键因素,是减少对装配式建筑施工项目安全状态产生人为影响的重要保证。在装配式建筑施工过程中针对预制砼构件会使

表 5 项目各类安全绩效综合评价结果

Table 5 Comprehensive evaluation results of various safety performance of the project

安全绩效等级	包含绩效评价指标
不及格	
及格	C_3
中等	$A_4, B_4, C_1, C_2, C_4, D_2, F_1, F_3$
良好	$A_1, D_3, E_1, E_2, E_5, F_2$
优秀	$A_2, A_3, B_1, B_2, B_3, D_1, E_3, E_4$

用到专业的复杂施工机械设备,如塔式起重机、龙门架等,这些机械设备的使用需要施工人员具有过硬的专业知识和技术水平。

同时,高专业知识水平可以使人员安全意识得到提升,减少不安全行为的发生,从而提高施工人员总体素质和项目安全生产水平。该建筑单位施工人员的安全意识水平亟待采取有效方法进行提升,企业应该在施工项目中展开具有针对性的安全教育培训,将常规安全教育与针对不同层次的施工人员的专项安全培训有机结合。不断采取新方法、新技术应用到安全教育培训中,使施工人员的安全知识水平在教育培训的影响中得到提升。

值得关注的是,尽管评价结果显示 F_1 (BIM 信息丰富度) 和 F_3 (BIM 信息可靠性) 指标评分较低,但由于 BIM 信息因素整体权重水平同样较低,因此对项目整体的安全绩效影响甚微。这是因为我国建筑项目 BIM 信息技术虽然应用广泛,如碰撞检测、场地模拟,施工模拟等方面,但是缺乏 1 套系统的 BIM 信息技术安全管理方案,而且 BIM 信息技术应用能力参差不齐,导致 BIM 信息因素在装配式建筑施工安全绩效中效果大打折扣。所以为了实现 BIM 信息技术集成、优化^[15],建筑行业需要进一步推动 BIM 等信息化技术在装配式建筑施工安全管理领域的应用框架开发与理论研究,使得 BIM 信息发挥催化剂的功效与作用,真正地在装配式建筑施工安全管理中实现价值。

4 结论

1) 提出三度空间视角下的装配式建筑施工安全绩效评价体系。以国家相关法律法规、政策文件为基础,融合信息化背景,从物理、社会、信息 3 个层面构建设备及材料因素、环境因素、人员因素、工艺技术因素、管理因素和 BIM 信息因素 6 个方面,23 个评价指标的评价模型。

2) 考虑在装配式建筑施工安全绩效评价指标之间相互影响、相互反馈的问题,提出利用 ANP 和 GCM 相

结合的评价方法,有效地处理绩效评价过程中的模糊性与灰色性 2 方面影响。

3) 通过实际装配式建筑工程项目的安全绩效评价案例,提出针对性的绩效提升方法,符合装配式建筑的安全管理实际需求,指出三度空间视角下的装配式建筑施工安全绩效评价体系具有较强的拓展性,并提出信息化技术(如 BIM 等)的应用在装配式建筑项目中发挥的作用仍然有限,其价值与潜力仍需在后续的研究中继续充分挖掘。

参考文献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 关于加快新型建筑工业化发展的若干意见 [EB/OL]. (2020-08-28) [2022-03-24]. https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/fdzdgknr/tzgg/202009/20200904_247084.html.
- [2] 李晓娟,王勇. 山区公路项目施工安全管理绩效评价研究[J]. 广西大学学报(自然科学版),2018,43(1):349-356.
LI Xiaojuan, WANG Yong. Study on performance evaluation of safety management in mountainroad construction [J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2018, 43 (1): 349-356.
- [3] LIU J K, GONG E Q, 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.
- [4] 陈勇刚,崔康,孙向东,等. 运输航空飞行安全绩效模糊动态评估模型[J]. 中国安全生产科学技术,2020,16(8):173-178.
CHEN Yonggang, CUI Kang, SUN Xiangdong, et al. Fuzzy dynamic evaluation model on flight safety performance of transport aviation [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2020, 16(8): 173-178.
- [5] 陈芳,杨诗琪,沈芮宇. 管制单位质量安全绩效关键因素识别与评价[J]. 中国安全科学学报,2020,30(10):27-33.
CHEN Fang, YANG Shiqi, SHEN Ruiyu. Identification and evaluation of key factors for quality and safety performance in air traffic control units [J]. China Safety Science Journal, 2020, 30(10): 27-33.
- [6] 成连华,张良,任璐. 基于数据包络分析法的煤矿安全绩效评价[J]. 煤矿安全,2015,46(11):245-248.
CHENG Lianhua, ZHANG Liang, REN Lu. Evaluation of coal mine safety performance based on data envelopment analysis [J]. Safety in Coal Mines, 2015, 46(11): 245-248.
- [7] 康良国,吴超. 大数据环境下企业安全绩效管理的基础性问题[J]. 中国安全生产科学技术,2020,16(10):5-11.
KANG Lianguo, WU Chao. Basic problems of safety performance management in enterprises under big data environment [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2020, 16(10): 5-11.
- [8] THOMAS L S. Making and validating complex decisions with the AHP/ANP [J]. Journal of Systems Science and Systems Engineering, 2005(1):1-36.
- [9] 刘思峰,杨英杰. 灰色系统研究进展(2004—2014) [J]. 南京航空航天大学学报,2015,47(1):1-18.
LIU Sifeng, YANG Yingjie. Advance in grey system research

- (2004—2014) [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015, 47(1): 1-18.
- [10] 张经阳,王松江. 基于 WSR——管理熵的煤矿建设项目安全管理绩效评价[J]. 生产力研究, 2013(3): 96-99, 148.
ZHANG Jingyang, WANG Songjiang. Based on WSR—management entropy for safety management performance evaluation of coal mine construction projects [J]. Productivity Research, 2013(3): 96-99, 148.
- [11] 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.
LI Yingpan, LIU Mingqiang, WANG Fang, et al. Safety performance assessment of fabricated building project based on cloud model [J]. China Safety Science Journal, 2017, 27(6): 115-120.
- [12] KASAI S, LI N, FAN G D. A system-of-systems approach to understanding urbanization—state of the art and prospect [J]. Smart and Sustainable Built Environment, 2015, 4(2): 154-171.
- [13] 方东平,李在上,李楠,等. 城市韧性——基于“三度空间下系统的系统”的思考[J]. 土木工程学报, 2017, 50(7): 1-7.
FANG Dongping, LI Zaishang, LI Nan, et al. Urban resilience: a perspective of system of systems in trio spaces [J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(7): 1-7.
- [14] 刘思峰,谢乃明. 基于改进三角白化权函数的灰评估新方法[J]. 系统工程学报, 2011, 26(2): 244-250.
LIU Sifeng, XIE Naiming. New grey evaluation method based on reformative triangular whitenization weight function [J]. Journal of Systems Engineering, 2011, 26(2): 244-250.
- [15] 储天罡,李辉,张善俊. 基于建筑施工过程管理的 BIM 能力成熟度评价[J]. 工程管理学报, 2019, 33(5): 120-124.
CHU Tiangang, LI Hui, ZHANG Shanjun. BIM capability maturity evaluation based on construction process management [J]. Journal of Engineering Management, 2019, 33(5): 120-124.

(责任编辑:李树芳)