

装配式钢结构住宅成本管理研究

闫林君,李 慧,陈慧鑫,王亚妮

(兰州交通大学土木工程学院,甘肃 兰州 730070)

摘 要:为科学有效地管理和控制装配式钢结构住宅的成本,从成本发生的源头入手,识别并筛选出25个影响因素,构建了基于解释结构模型的装配式钢结构住宅成本影响指标体系,清晰直观地分析各因素之间的相互影响关系。同时,引入理想点法计算各因素的组合权重,以此得出了主要的影响因素。研究结果显示,钢构件及“三板”构件采购的经济性等6个影响因素对装配式钢结构住宅成本的影响较大,故被确定为成本管理的关键要素。为实现对成本的有效管控,根据分析结果,从控制钢构件及“三板”构件的成本等4个方面提出了改进建议。

关键词:装配式钢结构住宅;成本管理;ISM;C-OWA 算子法;理想点法

中图分类号:TU723.3 **文献标志码:**A

引用格式:闫林君,李慧,陈慧鑫,等.装配式钢结构住宅成本管理研究[J].沈阳建筑大学学报(社会科学版),2024,26(3):248-258.

大力发展钢结构建筑是整个建筑行业转型升级的必经之路,在政策环境方面来看,钢结构符合建筑行业的相关政策导向;从技术路径方面来看,钢结构较之混凝土具有工业化生产程度高、绿色环保等优点^[1]。在美国、加拿大等国家^[2-3],钢结构住宅得到了广泛的应用,在中国,钢结构主要应用于通信塔、体育场馆等大型公共建筑中,在住宅中的应用相对较少^[4]。主要原因是由于中国装配式住宅的发展时间相对较短,开发商和业主对其重视程度不够。此外,装配式钢结构住宅的技术成熟度和成本管理略有欠缺,因此限制了中国装配式钢结构住宅的发展^[5-6]。相较于施工技术而言,如何对成本进行合理有效控制对于推进装配式钢结构住宅在中国的发展进程所产生的影响更大^[7]。

Heravi G 等^[8]运用 VSM 法对装配式建

筑生产阶段进行了研究,得出了基于精益原则进行过程管理可以使生产成本降低约16%这一结论。Zhang X X 等^[9]通过引入 LCC 理论从4个角度出发对比分析了装配式钢结构住宅与混凝土住宅之间的效益区别,得出了装配式钢结构住宅效益更好这一结论。Hwang B G 等^[10]通过调查分析筛选出了制约装配式建筑发展的主要因素,并提出了有针对性的解决措施和建议。陈扬等^[11]从收益损失角度出发,引入博弈论及 C-D 生产函数构建了由政府与开发者共同组成的装配式建筑收益损失分摊模型,并根据模型结果提出了改进措施。刘金典等^[12]探究了 BIM 信息化技术和激光扫描相结合的方式,并据此形成了一种装配式管理和质量控制的建造方法。魏然等^[13]依托实际项目,从全生命周期角度对装配式钢结构建筑与混

凝土建筑进行了成本分析,并认为地震高烈度地区的装配式钢结构建筑更具经济效益。王颖林等^[14]归纳整合了装配式钢结构建筑智慧制造成本的影响因素,并基于DEMATEL-AISM 法分析了各影响因素之间的关系并筛选出主要影响因子。

通过对相关文献的梳理可知,装配式钢结构住宅成本管理尚未形成成熟的评价方法和合理的管控措施;研究多针对单一因素,鲜有研究考虑了多因素之间的相互关系及各因素的重要性程度;研究的关注点大多集中于传统的砖混结构和装配式钢筋混凝土结构建筑的成本管理。鉴于此,本研究引入了解释结构模型(Interpretative Structural Modeling, ISM)、层次分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP)和 C-OWA(Combination Ordered Weighted Averaging)算子法,从成本风险源头出发,对装配式钢结构住宅进行了成本影响因素的识别和评估分析,由此找出成本管理的关键因素并提出了有针对性的管控措施及建议。

一、装配式钢结构住宅成本影响因素的确定

在装配式钢结构住宅的全生命周期中,能对成本产生影响的因素众多且复杂,相关研究表明,传统住宅与装配式钢结构住宅的成本差异主要表现在建造阶段(设计、生产、运输、施

工)^[15-17]。为找到合理有效且与之匹配的成本管控路径,在中国知网等论文检索平台输入关键词“装配式建筑”“装配式住宅”及“成本管理”等,搜集总结出装配式建筑与成本管理有关的指标;检索“钢结构”“建造阶段”及“影响因素”等,搜集总结与装配式钢结构住宅建造阶段有关的成本管理指标,共检索出 474 条结果。通过大量阅读近 5 年内在国内核心及以上期刊、行业中具有专业权威性的典型作者所发表的及引用率较高的相关文献,归纳总结出对本次研究影响较为深刻的影响因素。基于以上文献综述识别结果,结合项目实际和改进后的德尔菲法,本研究拟从成本产生的源头角度^[18]出发,选取自然、行为、政策、经济、技术及组织管理角度作为切入视角进行归纳总结。具体识别筛选过程如图 1 所示,由宏观至微观地对成本风险指标进行客观识别及筛选,并建立评估指标体系。最终确定选用的 25 个成本影响因素如表 1 所示。

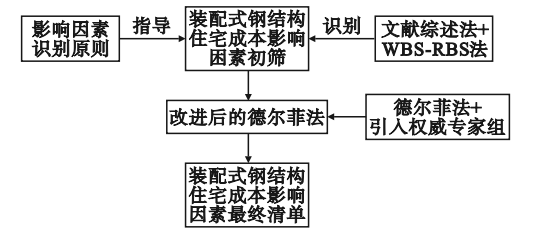


图 1 识别及筛选影响因素的流程

表 1 装配式钢结构住宅成本影响因素及释义

| 影响因素 | 编号 | 因素释义 |
|--------------------|-------|---|
| 自然气候影响 | M_1 | 工程建设通常涵盖一定的时间跨度,其间恶劣的自然气候可能使工程质量、进度及成本受到影响 |
| 地质条件风险 | M_2 | 实际施工过程中,可能存在能对工程成本产生影响的未被精准预测到的地质异常现象 |
| 不可抗力事件 | M_3 | 工程建设中可能发生不可抗力事件,将给施工的正常开展带来一定影响 |
| 钢构件及“三板”构件供应商的可靠度 | M_4 | 装配式钢结构建筑项目的实施涉及大规模钢构件及“三板”组件(预制外墙板、预制楼梯板和预制楼板)的生产活动,此类构件的质量直接关乎工程最终的整体品质与造价控制 |
| 钢构件及“三板”构件采购的经济性 | M_5 | 钢构件及“三板”构件是装配式钢结构建筑材料费支出的主要部分,制定经济实惠、科学合理的采购方案是把控总成本的关键一环 |
| 钢构件及“三板”构件运输路径的经济性 | M_6 | 选取成本效益最佳的构件运输路径,对于有效管控成本风险至关重要 |
| 相关税收政策调整 | M_7 | 一般来说,预制构件会比现场浇筑的税率高 ^[19] ,国家对于装配式钢结构建筑相关税收政策的宏观调控会对成本产生一定影响 |
| 行业标准与规范的健全程度 | M_8 | 相关标准与规范的完备程度在很大程度上左右着项目多个关键环节(设计、采购、施工安装等)的工作效能及其最终的工程质量表现,这种影响可能导致额外成本的滋生 |

续表

| 影响因素 | 编号 | 因素释义 |
|--------------------|----------|--|
| 行业政策变动 | M_9 | 国家对建筑行业的政策扶持与关注度越高,装配式钢结构建设项目在应对行业政策变化时所承受的成本风险将越低 |
| 资金风险 | M_{10} | 开发商资金到位不及时、施工方资金不能及时周转将在一定程度上对施工作业地开展造成不利影响,甚至可能会引发材料管理费上涨及建筑工程窝(停)工所导致的人工费(成本)增加等问题 |
| 机械设备价格变动 | M_{11} | 装配式钢结构建筑的施工特点决定了其对于机械设备使用数量的要求较高,其价格的变动将直接影响装配式钢结构建筑的成本 |
| 钢材及“三板”构件材料价格变动 | M_{12} | 钢材及“三板”构件作为装配式钢结构建筑主体结构施工的主要部件,其价格的变动将直接影响装配式钢结构建筑的成本 |
| 装配式钢结构设计专业程度 | M_{13} | 设计是否专业将直接影响后期施工的可操作性,专业程度较高的设计能提高组装效率、降低时间成本及由安装问题造成的返工成本 |
| 现场安装人员的技术水平 | M_{14} | 装配式钢结构建筑涉及大量钢构件及“三板”构件的现场安装操作,构件安装的程度及质量都会直接影响成品效果和生产成本 |
| 采用的工艺和方法 | M_{15} | 需要对相关人员进行培训,学习先进工艺及方法,由此将产生教育支出 |
| 钢结构及“三板”构件装配技术的成熟度 | M_{16} | 装配技术不够成熟、工作流程不够清晰及安装效率低下,都会直接或间接提高工程成本 |
| 先进信息化手段应用程度 | M_{17} | 提高先进信息化手段应用程度可以有效减少设计失误等原因所造成的增量成本 |
| 螺栓等连接处和挂接质量风险 | M_{18} | 装配式钢结构建筑涉及大量节点连接、焊接及挂接等工作,在进行实际施工吊装时易出现连接处质量不符合设计要求导致需要进行返工等问题,由此造成材料增量成本 |
| 产业链的完整性 | M_{19} | 相关产业链的业态缺失(企业尚未形成规模效应及标准化生产等)和运营低效(生产效率低及管理脱节等)将提高材料成本 |
| 管理制度的健全程度 | M_{20} | 管理制度的健全程度会影响从业人员的工作积极性和工作效率,其中,工作效率越高,越有利于加快工程进度和降低建筑成本 |
| 钢构件等材料储存管理 | M_{21} | 材料储存管理工作到位、储存位置安排得当,可以大大减少因二次搬运造成的材料损耗问题,从而有效降低成本 |
| 装配式钢结构住宅设备现场管理 | M_{22} | 装配式钢结构住宅建设需要大量吊装设备,现场管理及调配设备的水平将在一定程度上影响施工效率 |
| 原材料进出库管理 | M_{23} | 进出库数据能反映材料的实际使用情况,对原材料进出库进行有效管理能及时补充库存,达到降低时间成本、减少材料闲置的目的 |
| 装配式钢结构施工工艺熟练程度 | M_{24} | 在装配式钢结构住宅建筑企业对于施工工艺熟练度不足时,易出现钢构件及“三板”构件发生形变、无法安装甚至构件报废等问题,由此形成额外的成本支出 |
| 装配式钢结构住宅合同管理 | M_{25} | 合同管理不当可能会引发一系列纠纷和索赔问题 |

二、分析方法及原理

1. 解释结构模型

ISM 是为了更好地分析复杂的社会经济系统结构问题,而研发出的以计算机系统为辅助进行模型结构化分析的技术^[20-21]。ISM 是根据有向图表示的系统要素之间的因果关系来建立邻接矩阵,通过矩阵运算得到可达矩阵,明确系统结构的层级关系,最终使复杂的系统结构呈现出层次清晰、结构可视的多级递阶结构形式(见图 2)。

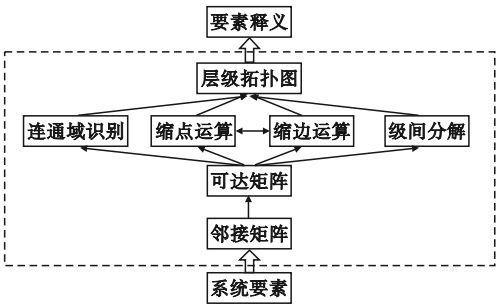


图 2 ISM 流程

(1) 因素集合的确定

设定成本风险影响因素的集合为 S , 且 $S = \{M_0, M_1, \cdots, M_n\}$; 因素系统中第 i 个因素为 $M_i (i = 0, 1, \cdots, n)$ 。

(2) 邻接矩阵的建立

将 M_i 作为一个系统,在此基础上建立邻接矩阵 A ,且 $A = (a_{ij})_{n \times n}$ 。当因素 M_i 对因素 M_j 有直接的影响时,则 $a_{ij} = 1$;若无任何影响,则 $a_{ij} = 0$ 。据此规则,构建出邻接矩阵 A 。

(3) 可达矩阵的建立

如果因素 M_i 可以经过任何有向通路抵达因素 M_j ,则可将因素 M_i 称作因素 M_j 的可达因素。根据布尔矩阵这一运算性质,可以由邻接矩阵 A 求得可达矩阵 R

$$R = I \cup A \cup A^2 \cup A^3 \cdots \cup A^n \tag{1}$$

式中: I 为单位矩阵;可达矩阵 R 为 n 阶的方阵,当 $(A + I)^{K-1} \neq (A + I)^K = (A + I)^{K+1}$ 时,可求出可达矩阵 $R = (A + I)^K$ 。

(4) ISM 层级划分

根据可达矩阵 R ,计算得到系统的可达集 $A(M_i)$ 、因素的先行集 $B(M_i)$ 及二者的交集 $C(M_i)$

$$A(M_i) = \{M_j \in M | M_{ji} = 1\} \tag{2}$$

$$B(M_i) = \{M_i \in M | M_{ij} = 1\} \tag{3}$$

$$C(M_i) = A(M_i) \cap B(M_i) \tag{4}$$

式中: M 为此因素系统中的因素; M_{ji} 为第 j 行第 i 列元素,其中 $M_{ji} = 1$ 表示可达矩阵 R 的每一列 M_j 中为 1 的因素; M_{ij} 为第 i 行第 j 列元素,其中 $M_{ij} = 1$ 表示可达矩阵 R 的每一行 M_i 中为 1 的因素。

在求出 $A(M_i)$ 和 $B(M_i)$ 后,寻找出该层次中 M_i 最上一级的因素,以 $C(M_i) = A(M_i)$ 为判断条件,将符合条件的因素在系统中删去,依此循环操作进行层级划分,直至划分完所有层因素,并根据矩阵关系绘制有向 ISM 层级图。

2. 层次分析法

AHP 是一种将定量与定性相结合处理复杂问题的分析方法^[22-23]。它将复杂问题分解为各个组成因素,根据通过一致性检验的矩阵构建出一个多层次递阶结构模型,并对目标做出科学评价。具体步骤如下。

(1) 分析层级

基于 ISM 所得出的层级关系和因素来建立递阶层次结构,然后进行层级分析。

(2) 构造判断矩阵

判断矩阵表示对于上一层某因素而言,当前层级的各要素对上层与之相关的各因素之间影响程度的相对关系。采用“1~9 标度法”进行重要性比较,构建层级因素间的判断矩阵。

(3) 计算层级权重

基于判断矩阵对矩阵相关风险因素进行权重计算。采用特征值法求得特征向量 W 和最大特征值 λ_{\max} ,其中,特征向量 W 中的各个分量 W_i 为对应因素的指标权重值。

(4) 一致性检验

依据 $CR = CI/RI$ 计算出一致性比率。其中, CR 为一致性比率; CI 为一致性指标,且 $CI = (\lambda_{\max} - n)/(n - 1)$; n 为矩阵阶数; RI 为平均随机一致性指标。当 $CR \leq 0.10$ 时,代表结果可接受(通过了一致性检验),反之则需修正。

(5) 计算因素的综合重要度

通过各层级得出的相对指标权重,依次求出各层级对总目标的综合权重。

3. C-OWA 算子法

2008 年,中国学者徐泽水在 OWA 算子基础上,通过改进数据集结构,进一步优化得出了 C-OWA 算子。其内涵是在处理数据时同时考虑了属性和位置两方面的因素并将其进行加权结合,以此来尽量削弱评价者主观偏差所导致的评价结果失真的不良影响^[24-26]。在确定指标重要性时,C-OWA 算子不仅具有科学合理处理多指标的优势,又能在一定程度上减轻专家主观偏好所造成的影响,非常适用于本研究中成本指标权重的确定。具体步骤如下。

(1) 确定指标权重评分数据集

邀请 n 位专家对装配式钢结构住宅建造阶段成本风险指标 H_r 的重要程度进行打分,打分采用 10 分制,将打分结果按照从大到小的顺序进行排列得到新的数据集 $Y(y_0 \geq y_1 \geq y_2 \geq y_3 \cdots \geq y_{n-1})$,其中数据集内各项表示各专家打分值。

(2) 计算加权向量

引入排列组合数调整新数据集 y_j 的权

值,可得到 y_j 对应的加权向量 θ_{j+1} ,且满足等

式 $\sum_{j=0}^{n-1} \theta_{j+1} = 1$, 其中, θ_{j+1} 的计算公式为

$$\theta_{j+1} = \frac{C_{n-1}^j}{\sum_{k=0}^{n-1} C_{n-1}^k} = \frac{C_{n-1}^j}{2^{n-1}}, j = 0, 1, \cdots, n-1 \tag{5}$$

式中: C_{n-1}^j 为从 $n-1$ 个数据中获取 j 个数据的组合数。

(3) 计算绝对权重

将步骤(2) 计算出的加权向量 θ_{j+1} 与按步骤(1) 处理得到的指标权重评分数据集 y_j 进行结合, 计算指标 H_τ 的绝对权重值 $\overline{w_i}$

$$\overline{w_i} = \sum_{j=0}^{n-1} \theta_{j+1} y_j, i = 1, 2, \cdots, \tau \tag{6}$$

式中: $\theta_{j+1} \in [0, 1]$; τ 为指标个数。

(4) 计算相对权重

对步骤(3) 计算得到的绝对权重值 $\overline{w_i}$ 作归一化处理, 得到指标 H_τ 的相对权重值 w_i

$$w_i = \frac{\overline{w_i}}{\sum_{i=1}^{\tau} \overline{w_i}}, i = 1, 2, \cdots, \tau \tag{7}$$

4. 基于理想点法的组合权重确定

采用单一主观赋权法的研究主观性太强, 可能导致由于个体的偏好而对结果造成影响; 采用单一客观赋权法的研究理论性太强, 可能较少将工程的实际情况纳入考虑范畴。因此, 本研究基于理想点法结合主客观权重, 尽可能地减少决策结果的偏差, 以此计算出组合权重。

设 AHP 主观赋权法和 C-OWA 客观赋权法计算出的影响因素权重分别为 $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \cdots, \lambda_n)^T$ 和 $\mu = (\mu_1, \mu_2, \cdots, \mu_n)^T$, 假定基于理想点法计算出的组合权重为 $W = (\omega_1, \omega_2, \cdots, \omega_n)^T$ 。

将各属性的理想值定义为 y_j^* , 其计算式为

$$y_j^* = \max y_{ij} = \max r_{ij} \omega_j = \omega_j \max r_{ij} = r_j^* \omega_j \tag{8}$$

式中: $i = 1, 2, \cdots, m$ 且 $j = 1, 2, \cdots, n$; m 为专家个数; n 为影响因素的个数; r_j^* 为指标体系中第 j 个影响因素属性的理想值。

进而将理想方案定义为 A^* , 其表达式为

$$A^* = (y_1^*, y_2^*, \cdots, y_n^*) = (r_1^* \omega_1, r_2^* \omega_2, \cdots, r_n^* \omega_n),$$

则方案 A_i 到理想点 A^* 的欧氏距离 d_i 为

$$d_i = \left[\sum_{j=1}^n (y_{ij} - y_j^*)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = \left[\sum_{j=1}^n (r_{ij} \omega_j - r_j^* \omega_j)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = \left[\sum_{j=1}^n ((r_{ij} - r_j^*) \omega_j)^2 \right]^{\frac{1}{2}}, (i = 1, 2, \cdots, m) \tag{9}$$

式中: ω_j 为第 j 个影响因素的权重。

若方案 A_i 离理想点 A^* 越近, 则 d_i 越小。为了使后续计算更方便, 结果规范清晰, 统一对各权重向量进行归一化处理, 其结果为

$$\begin{cases} \lambda'_j = \frac{\lambda_j}{\sqrt{\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \cdots + \lambda_n^2}} \\ \mu'_j = \frac{\mu_j}{\sqrt{\mu_1^2 + \mu_2^2 + \cdots + \mu_n^2}} \\ \omega'_j = \frac{\omega_j}{\sqrt{\omega_1^2 + \omega_2^2 + \cdots + \omega_n^2}} \end{cases} \tag{10}$$

式中: λ_j, μ_j 及 ω_j 分别为第 j 个影响因素的主观权重、客观权重及组合权重。

对于 λ, μ, ω 依据式(9) 可得各方案 A_i 到理想点 A^* 加权距离的平方及差值为

$$\begin{cases} d_i^2(\lambda') = \sum_{j=1}^n [(r_{ij} - r_j^*) \lambda'_j]^2 \\ d_i^2(\mu') = \sum_{j=1}^n [(r_{ij} - r_j^*) \mu'_j]^2 \\ d_i^2(\omega') = \sum_{j=1}^n [(r_{ij} - r_j^*) \omega'_j]^2 \end{cases} \tag{11}$$

$$d_i^2(\omega') - d_i^2(\lambda') = \sum_{j=1}^n (r_{ij} - r_j^*)^2 (\omega_j'^2 - \lambda_j'^2) \tag{12}$$

$$d_i^2(\omega') - d_i^2(\mu') = \sum_{j=1}^n (r_{ij} - r_j^*)^2 (\omega_j'^2 - \mu_j'^2) \tag{13}$$

为科学计算主客观权重的影响值, 本研究引入组合赋权法, 构建如式(14) 所示的非线性规划模型, 并求解目标函数与理想点之间的最小偏差值

$$\begin{aligned} \min f(\omega') &= \sum_{i=1}^m \{ [d_i^2(\omega') - d_i^2(\lambda')]^2 + \\ &[d_i^2(\omega') - d_i^2(\mu')]^2 \} = \\ &\sum_{i=1}^m \{ \left[\sum_{j=1}^n (r_{ij} - r_j^*)^2 (\omega_j'^2 - \lambda_j'^2) \right]^2 + \\ &\left[\sum_{j=1}^n (r_{ij} - r_j^*)^2 (\omega_j'^2 - \mu_j'^2) \right]^2 \} \\ \text{s. t. } &\begin{cases} \sum_{j=1}^n \omega_j'^2 = 1 \\ \omega_j' \geq 0, j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \end{aligned} \tag{14}$$

最终通过运算求得的组合权重为

$$W = \left(\sqrt{\frac{\lambda_1'^2 + \mu_1'^2}{2}}, \sqrt{\frac{\lambda_2'^2 + \mu_2'^2}{2}}, \dots, \sqrt{\frac{\lambda_n'^2 + \mu_n'^2}{2}} \right)^T \tag{15}$$

三、装配式钢结构住宅成本影响因素分析

1. ISM 模型的建立

基于问卷调查及德尔菲法得出的结果,结合装配式钢结构住宅相关文献,综合确定了 $M_0 \sim M_{25}$ (M_0 为装配式钢结构住宅成本) 各因素之间的关系及邻接矩阵。由 A 根据式(1)求得可达矩阵 R ; 根据式(2) 及式(3) 计算得出层级划分结果(见表 2), 最终构建出装配式钢结构住宅成本 ISM 模型(见图 3), 其中 $A \sim G$ 分别对应 $L_1 \sim L_7$ 的影响因素。

表 2 层级划分情况

| 影响因素 | 可达集 | 先行集 | 交集 | 层级 |
|----------|---|---|---------|-------|
| M_0 | {0} | {0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25} | {0} | L_1 |
| M_1 | {0,1,2,3,5,12,20,21,23,24,25} | {1,2,3,8} | {1,2,3} | L_6 |
| M_2 | {0,1,2,3,5,12,20,21,23,24,25} | {1,2,3,8} | {1,2,3} | L_6 |
| M_3 | {0,1,2,3,5,12,20,21,23,24,25} | {1,2,3,8} | {1,2,3} | L_6 |
| M_4 | {0,4,5,12,15,16,19,24} | {4,8,9,10} | {4} | L_5 |
| M_5 | {0,5} | {4,5,6,7,8,9,10,11,12,15,16,19,24} | {5} | L_2 |
| M_6 | {0,5,6,11,12,15,16,19,24} | {6,7,8,9,10,11} | {6,11} | L_5 |
| M_7 | {0,5,6,7,11,12,15,16,19,24} | {7,8,9} | {7} | L_6 |
| M_8 | {0,1,2,3,4,5,6,8,10,12,15,16,19,20,21,23,24,25} | {8} | {8} | L_7 |
| M_9 | {0,4,5,6,7,9,10,11,12,15,16,19,20,21,23,24,25} | {9} | {9} | L_7 |
| M_{10} | {0,4,5,6,10,11,12,15,16,19,24} | {7,8,10} | {10} | L_6 |
| M_{11} | {0,5,6,11,12,15,16,19,24} | {6,7,8,9,10,11} | {6,11} | L_5 |
| M_{12} | {0,5,12} | {4,6,7,8,9,10,11,12,19} | {12} | L_3 |
| M_{13} | {0,13,16,18} | {13,17} | {13} | L_3 |
| M_{14} | {0,14,16,18} | {14,17} | {14} | L_3 |
| M_{15} | {0,5,15,16,24} | {4,6,7,8,9,10,11,15,19} | {15} | L_3 |
| M_{16} | {0,16} | {4,6,7,8,9,10,11,13,14,15,16,17,19,24} | {16} | L_2 |
| M_{17} | {0,13,14,16,17} | {17} | {17} | L_4 |
| M_{18} | {0,18} | {13,14,17,18} | {18} | L_2 |
| M_{19} | {0,5,12,15,16,19,24} | {4,6,7,8,9,10,11,19} | {19} | L_4 |
| M_{20} | {0,5,12,20,21,23,24,25} | {1,2,3,7,8,9,20,25} | {20,25} | L_5 |
| M_{21} | {0,21,24} | {1,2,3,7,8,9,20,21,23,25} | {21} | L_3 |
| M_{22} | {0,22,24} | {22} | {22} | L_3 |
| M_{23} | {0,5,12,21,23,24} | {1,2,3,7,8,9,20,23,25} | {23} | L_4 |
| M_{24} | {0,24} | {1,2,3,4,6,7,8,9,10,11,15,19,20,21,22,23,24,25} | {24} | L_2 |
| M_{25} | {0,5,12,20,21,23,24,25} | {1,2,3,7,8,9,20,25} | {20,25} | L_5 |

表 6 L₅ 级 AHP 综合权重

| L ₅ 级 | E ₁ (0.137) | E ₂ (0.137) | E ₃ (0.148) | E ₄ (0.296) | E ₅ (0.148) | λ_i |
|------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------|
| F ₁ | 0 | 0.046 | 0 | 0 | 0 | 0.046 |
| F ₂ | 0 | 0.046 | 0 | 0 | 0 | 0.046 |
| F ₃ | 0 | 0.046 | 0 | 0 | 0 | 0.046 |
| F ₄ | 0 | 0.013 | 0 | 0 | 0 | 0.013 |
| F ₅ | 0 | 0.078 | 0.148 | 0 | 0 | 0.226 |

表 7 L₆ 级 AHP 综合权重

| L ₆ 级 | F ₁ (0.046) | F ₂ (0.046) | F ₃ (0.046) | F ₄ (0.013) | F ₅ (0.226) | λ_i |
|------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------|
| G ₁ | 0 | 0.046 | 0 | 0.004 | 0.075 | 0.125 |
| G ₂ | 0 | 0 | 0 | 0.009 | 0.151 | 0.160 |

3. 基于 C-OWA 算子法的权重计算及理想点法的组合权重确定

邀请了 10 位专家,主要包括来自装配式钢结构住宅项目的业主和预制构件生产方、运输单位、施工单位及设计、监理单位等,除此之外,还有一些拥有丰富施工管理经验的一线工作人员。专家们采用了 10 分制打分法对装配式钢结构住宅的 25 个成本影响因

素进行了评分,本研究对打分数据进行了处理,按照从大到小的顺序重新排列。随后,利用式(5)~式(7)编写 MATLAB 代码,计算得出了 C-OWA 算子法的客观权重值。同时,为了尽可能地减少决策结果的偏差,本研究基于式(8)~式(15)的理想点法计算出了各组合权重值(见表 8)。

表 8 理想点法组合权重排序

| 影响因素 | 主观权重(λ_i) | 客观权重(μ_i) | 组合权重(ω_i) | 影响因素 | 主观权重(λ_i) | 客观权重(μ_i) | 组合权重(ω_i) |
|-----------------|---------------------|-----------------|--------------------|-----------------|---------------------|-----------------|--------------------|
| M ₅ | 0.481 | 0.063 | 0.082 | M ₁₁ | 0.148 | 0.034 | 0.033 |
| M ₁₂ | 0.401 | 0.069 | 0.076 | M ₂₀ | 0.137 | 0.033 | 0.031 |
| M ₁₉ | 0.444 | 0.049 | 0.072 | M ₉ | 0.160 | 0.028 | 0.030 |
| M ₁₆ | 0.295 | 0.054 | 0.058 | M ₁₅ | 0.144 | 0.031 | 0.030 |
| M ₁₇ | 0.309 | 0.042 | 0.053 | M ₂₁ | 0.137 | 0.038 | 0.029 |
| M ₂₄ | 0.183 | 0.062 | 0.052 | M ₈ | 0.125 | 0.031 | 0.029 |
| M ₆ | 0.296 | 0.038 | 0.050 | M ₁₃ | 0.064 | 0.034 | 0.027 |
| M ₁₄ | 0.245 | 0.038 | 0.044 | M ₁₈ | 0.041 | 0.034 | 0.026 |
| M ₂₅ | 0.137 | 0.050 | 0.042 | M ₃ | 0.046 | 0.033 | 0.025 |
| M ₁₀ | 0.226 | 0.034 | 0.040 | M ₁ | 0.046 | 0.032 | 0.024 |
| M ₂₂ | 0.110 | 0.043 | 0.036 | M ₂ | 0.046 | 0.031 | 0.024 |
| M ₂₃ | 0.137 | 0.038 | 0.034 | M ₇ | 0.013 | 0.027 | 0.020 |
| M ₄ | 0.148 | 0.034 | 0.033 | | | | |

4. 分析与讨论

由图 3 可知,装配式钢结构住宅的成本影响因素形成了自上而下 7 级(L₁~L₇)3 阶的递阶层次化结构。其中,3 阶分别是:深层因素,即最底层(L₇)因素;中间层因素,即 L₃~L₆因素;表层因素,即 L₂因素。层级越高,因素的被影响属性越强;层级越低,因素的影响属性越强。结合最终的组合权重排序(见表 8)可以得出以下结论。

(1)深层因素属于政策因素。国家在政策、财政等方面对建筑行业,尤其是对装配式钢结构这种建筑类型的发展提供了支持。然

而,若未能对装配式钢结构住宅相关税收政策进行有效的宏观调控或是行业标准和规范未能紧跟时代进行更迭,则可能直接加大构件的成本,从而导致整体成本上升。

(2)中间层因素包括设计人员的专业水平、现场安装人员的技术水平及现场管理能力,这些是提高工作效率和降低装配式钢结构住宅成本的基本保障。设计人员对构件拆分的设计越合理,则越能提高构件安装的可操作性,且能降低构件生产和安装成本。管理人员对施工现场的组织管理能力越弱,则工作效率越低、进度越慢,从而增加了施工成

本。产业链的不完整性可能导致预制构件市场出现垄断,造成所需材料物价上升,增加了直接成本。

(3)表层因素包括钢构件及“三板”构件采购的经济性、钢结构及“三板”构件装配技术的成熟度、螺栓等连接处和挂接质量风险、装配式钢结构施工工艺熟练程度。钢结构及“三板”构件采购方案的制定是否经济合理能直接影响装配式钢结构住宅的成本;装配技术越成熟,越能保障装配构件的精度和效率;在构件安装环节中,连接处质量的好坏决定了项目是否需要返工;熟练掌握现场施工工艺能力,将极大提高安装及施工效率、缩短工期,进而减少成本。

(4)由图3可知,钢构件及“三板”构件采购的经济性位于装配式钢结构住宅成本管理因素ISM模型中的第1阶,属于表层因素,即采购方案是否经济会对成本产生直接影响。同时,观察表8中的数据不难发现,该指标权重占比较大,可以佐证该指标是模型中能对成本造成影响的最直接因素。参照主成分分析法,筛选出累计权重占总权重80%的影响因素作为主因子,得到的主因子依次为:钢构件及“三板”构件采购的经济性(M_5)、钢材及“三板”构件材料价格变动(M_{12})、产业链的完整性(M_{19})、钢结构及“三板”构件装配技术的成熟度(M_{16})、先进信息化手段应用程度(M_{17})和装配式钢结构施工工艺熟练程度(M_{24})。

四、装配式钢结构住宅成本管理建议

为进一步提高装配式钢结构住宅项目的成本效益和管理水平,提出以下建议。

(1)控制钢构件及“三板”构件的成本

为更好地控制由构件采购及材料价格变动所带来的成本增量,构件生产厂方应优化生产工艺,通过引进高效便捷、自动化程度高的各种机械设备,逐渐形成一套科学合理的生产流程,建立自动化生产线,实现自动化生产,减少现场工作人员数量,达到减少成本的目的。同时,一套成熟高效的生产线还可以

实现大批量生产、形成规模效应、缩减构件摊销成本。另外,在生产过程中增加模具周转次数,在能有效提高利用率的同时也能有效降低增量成本。参考实地考察的某公司测算结果,构件模具周转次数若超过100次,其摊销费用可减少至80~100元/ m^2 。

(2)完善产业链

在前期政府应充分给予技术政策上的助力,提高相关技术发展水平,到后期适度增加其他政策的支持力度,如通过加大税收优惠政策及扩大范围可以激发企业对推进装配式钢结构住宅发展进程的积极性,不仅有助于推动行业转型,更有助于增加构件生产企业的数目、丰富企业可选择性、打破构件市场垄断局势。完善产业链,并通过建立信息共享机制提升产业链上各方之间的协作能力,能有效打破信息壁垒、提高各阶段施工效率,为实现规模经济打下坚实基础。

(3)健全技术标准及应用先进信息技术

近年来,装配式建筑产业得到了广泛关注,国内各地政府部门也陆续出台了相关政策和标准,但从宏观上来说,装配式钢结构建筑仍缺乏一个通用的标准体系。另外,通过建立健全通用体系下的集成技术规程,可以达到优化构件设计,实现各类构件的标准化、模块化生产,提高构件的利用率、通用率及降低构件生产成本的目的。同时,应结合实际项目引入配套的先进化信息技术,如通过构建BIM信息化管理平台,可以实现装配式钢结构建筑施工进度的可视化,从而使构件生产方有效把控构件的进场时间、减少项目各参与方之间的信息差、降低建材的二次搬运费用及现场储存损耗风险。

(4)提高人员专业度及制定高效施工方案

构件的安装和对现场施工工艺的管理是装配式钢结构建筑施工过程中的主要工作,因此,技术人员和管理人员的专业程度和操作水平将对装配式钢结构住宅成本造成直接影响。施工单位可以通过与国内外企业的合作交流,借鉴先进经验、引进先进技术,通过

完善健全各类工作人员的培养模式,培养出一批职业素养高、专业能力强的新型复合型人才。同时,应制定科学高效的施工工艺方案,如将安装工作按照平行施工的模式划分为若干个流水线同时施工,进而充分发挥机械设备的效能,达到优化资源配置、提高施工效率、缩短工期、降低成本的目的。

五、结 语

首先,通过文献调查法、案例分析法及改进后的德尔菲调查法,对装配式钢结构住宅成本风险指标进行了识别与筛选,建立了成本指标体系,该指标体系从成本发生的源头的 6 个角度(自然、行为、政策、经济、技术、组织)进行构建。其次,引入 ISM 与 AHP 相结合的方式确定各指标的权重,建立了 ISM 装配式钢结构住宅成本结构层级分析模型,该方法清晰直观地展示出各因素之间相互影响的关系,使权重的计算更科学合理。再次,基于理想点法结合主客观权重计算出最后的组合权重,尽可能地减少了决策结果的偏差值,提高了结果的准确性和可信度。最后,对 ISM 模型及得出的权重结果进行了分析与讨论,剖析了复杂系统要素,找出了关键影响因素。

参考文献:

[1] 邢妍菁. 推广钢结构住宅的问题与对策:以上海市为例[J]. 建筑经济,2021,42(S1):359-362.

[2] LI Z, SHEN G Q, XUE X. Critical review of the research on the management of prefabricated construction[J]. Habitat international, 2014, 43: 240-249.

[3] AMTERED E A, KHALED M, MOHAMED G F. Motivations and limitations of prefabricated building: an overview[J]. Applied mechanics and materials, 2015, 802: 668-675.

[4] 周绪红, 王宇航. 我国钢结构住宅产业化发展的现状、问题与对策[J]. 土木工程学报, 2019, 52(1): 1-7.

[5] 李惠玲, 王婷. 我国装配式钢结构住宅产业化发展面临的问题与对策研究[J]. 建筑经济, 2020, 41(3): 20-23.

[6] 李惠玲, 王婷, 张倩雯. 装配式住宅的新型工业化建设水平综合评价实证研究[J]. 沈阳建筑大学学报(社会科学版), 2019, 21(1): 43-50.

[7] 江棹荣. 以标准化、数字化推动装配式钢结构住宅落地的措施分析[J]. 住宅与房地产, 2021, 618(21): 44-45.

[8] HERAVI G, FIROOZI M. Production process improvement of buildings' prefabricated steel frames using value stream mapping[J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2017, 89: 3307-3321.

[9] ZHANG X X, LI W, JIANG P. Comprehensive benefits analysis of steel structure modular residence based on the entropy evaluation[J]. IOP conference series: earth and environmental science, 2017, 61: 012104.

[10] HWANG B G, SHAN M, LOOI K Y. Key constraints and mitigation strategies for prefabricated prefinished volumetric construction[J]. Journal of cleaner production, 2018, 183: 183-193.

[11] 陈杨, 潘雨红, 赵余. 基于收益损失的装配式建筑经济补偿研究[J]. 数学的实践与认识, 2020, 50(8): 292-301.

[12] 刘金典, 张其林, 张金辉. 基于建筑信息模型和激光扫描的装配式建造管理与质量控制[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2020, 48(1): 33-41.

[13] 魏然, 柳向东. 全生命周期下钢结构装配式建筑成本分析[J]. 建筑结构, 2022, 52(S2): 1539-1542.

[14] 王颖林, 李煜龙, 庾明贝. 智慧生产视域下装配式钢结构建筑构配件成本影响因素研究[J]. 建筑经济, 2023, 44(2): 89-97.

[15] LEE Y, KIM J I, KHANZODE A, et al. Empirical study of identifying logistical problems in prefabricated interior wall panel construction[J]. Journal of management in engineering, 2021, 37(3): 05021002.

[16] WASIM M, HAN T M, HUANG H, et al. An approach for sustainable, cost-effective and optimised material design for the prefabricated non-structural components of residential buildings[J]. Journal of building engineering, 2020, 32: 101474.

[17] 陈圆月, 李伟清. 预制装配式建筑生产成本影

- 响因素分析[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2020, 45(2): 68-72.
- [18] 魏宏亮, 牛昌林, 刘福江, 等. 基于 DEMATEL-AISM 法的装配式建筑预制构件成本影响因素分析[J]. 建筑经济, 2021, 42(10): 83-88.
- [19] 刘雪. 基于云模型的 EPC 模式下装配式建筑成本风险评估研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2022.
- [20] 王红春, 陈雅文. 基于 DEMATEL-ISM 模型的装配式建筑供应链韧性影响因素研究[J]. 工程管理学报, 2023, 37(2): 13-18.
- [21] 李瑚均, 陈辉华, 程保全, 等. 基于模糊 ISM-DEMATEL 的地铁施工安全氛围形成模型研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(8): 2200-2208.
- [22] 陈蓉芳, 姜安民, 董彦辰, 等. 装配式建筑施工质量风险评估模型的构建与应用研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(10): 2788-2796.
- [23] NADERZADEH M, MAHDIYEH M R, ARABALIBEIK H, et al. Comparative analysis of AHP-topsis and fuzzy AHP models in selecting appropriate nanocomposites for environmental noise barrier applications[J]. Fluctuation and noise letters, 2017, 16(4): 1750038.
- [24] YAGER R. OWA aggregation over a continuous interval argument with applications to decision making[J]. IEEE transactions on systems, 2004, 34(5): 1952-1963.
- [25] 徐泽水. 拓展的 C-OWA 算子及其在不确定多属性决策中的应用[J]. 系统工程理论与实践, 2005(11): 9-15.
- [26] 刘子琦, 张云宁, 欧阳红祥, 等. 基于云物元理论的装配式建筑供应链可持续性评价[J]. 土木工程与管理学报, 2020, 37(3): 109-115.

Research on Cost Management of Prefabricated Steel Structure Housing

YAN Linjun, LI Hui, CHEN Huixin, WANG Yani

(School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: To scientifically and effectively manage and control the cost of prefabricated steel frame residential buildings, an approach was initiated by addressing the source of cost generation, identifying, and subsequently screening 25 influencing factors. This led to the construction of an impact indicator system for prefabricated steel frame residential building costs based on the Interpretive Structural Modeling (ISM) methodology. The system elucidates the interrelationships among these factors in a clear and intuitive manner. Concurrently, the Ideal Point Method was employed to compute the combined weights of each factor, thereby revealing the principal influencing factors. The research findings indicate that six factors, including the economic feasibility of steel component procurement and that of "Three-board" (referring to prefabricated wall, floor, and roof panels) element acquisition, exert substantial influence on the cost of prefabricated steel frame housing, hence being designated as critical elements for cost management. In order to effectuate effective cost control, according to analysis result, improvement recommendations were put forth in four domains, chief among them being the containment of expenses associated with steel components and "Three-board" elements, derived from the analytical outcomes.

Key words: prefabricated steel structure housing; cost management; ISM; C-OWA operational calculus method; ideal point method

(责任编辑:徐聿聪 英文审校:林 昊)