

DOI: 10.7672/sgjs2025100001

# 装配式混凝土建筑综合效益评价体系研究\*

王茹<sup>1,2</sup>, 张小峰<sup>1</sup>, 吴超杰<sup>1</sup>

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055;  
2. 西安建筑科技大学结构工程与抗震教育部重点实验室, 陕西 西安 710055)

**[摘要]** 国内装配式混凝土建筑评价标准体系尚处于不断完善的阶段, 评价指标较单一, 无法充分发挥其在结构和成本上的优势, 还会带来易建性差的问题。从易建性效益、安全效益、经济效益、环境效益和社会效益等方面分析, 通过文献调查、调研问卷初筛评价指标, 结合专家咨询构建了装配式混凝土建筑综合效益评价指标体系, 运用AHP-CRITIC组合赋权方法克服单一方法赋权的主客观缺陷, 实现对评价指标更加科学合理的组合赋权。同时基于模糊综合评价法建立了装配式混凝土建筑综合效益评价模型, 并通过对所构建的评价模型进行验证, 对比分析了装配式混凝土建筑与现浇建筑及不同设计方案的装配式混凝土建筑之间的综合效益评价结果。

**[关键词]** 装配式; 混凝土; 综合效益; 评价体系; 模糊综合评价

**[中图分类号]** TU741 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 2097-0897(2025)10-0001-07

## Research on Comprehensive Benefit Evaluation System of Prefabricated Concrete Buildings

WANG Ru<sup>1,2</sup>, ZHANG Xiaofeng<sup>1</sup>, WU Chaojie<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China; 2. Key Lab of Structural Engineering and Earthquake Resistance, Ministry of Education, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China)

**Abstract:** The evaluation standard system of prefabricated concrete buildings in China is still in the stage of continuous improvement. The evaluation index is relatively single, which cannot give full play to its advantages in structure and cost, and will also bring about the problem of poor buildability. From the aspects of easy-to-build benefits, safety benefits, economic benefits, environmental benefits and social benefits, the evaluation index system of comprehensive benefits of prefabricated concrete buildings is constructed through literature survey, questionnaire preliminary screening evaluation index, combined with expert consultation. The AHP-CRITIC combination weighting method overcomes the subjective and objective defects of single method weighting, and realizes more scientific and reasonable combination weighting of evaluation indicators. At the same time, based on the fuzzy comprehensive evaluation method, the comprehensive benefit evaluation model of prefabricated concrete buildings is established, and the comprehensive benefit evaluation results between prefabricated concrete buildings and cast-in-place buildings and prefabricated concrete buildings with different design schemes are compared and analyzed by verifying the constructed evaluation model.

**Keywords:** prefabricated; concrete; comprehensive benefits; evaluation system; fuzzy comprehensive evaluation

### 0 引言

国内外学者对装配式混凝土建筑评价的研究已取得了较大进展, 为本研究奠定了理论基础。但已有研究缺乏从宏观角度出发的综合效益评价研究, 对装配式混凝土建筑综合效益评价及方案优化的

\* 陕西省重点研发计划-重点产业链项目(2024SF2-GJHX-65); 西安市社发科技创新项目(23SFSF0013)

**[作者简介]** 王茹, 教授, 博士生导师, E-mail: wangru@xauat.edu.cn

**[收稿日期]** 2025-01-07

指导意义有限。因此,本文从易建性、安全、经济、社会、环境5个维度出发建立综合评价指标体系,运用AHP-CRITIC组合赋权方法克服单一方法赋权的主观缺陷,实现对评价指标更科学合理的赋权,基于模糊综合评价法建立综合评价模型,并通过选择不同技术指标的案例验证评价模型的有效性。

## 1 基本理论和方法

层次分析法(AHP)主要用于解决优化决策与分析类问题<sup>[1]</sup>,属于主观赋权法。CRITIC<sup>[2]</sup>又称基于指标相关性的客观权重法(criteria importance though intercriteria correlation)。模糊综合评价法(fuzzy comprehensive evaluation, FCE)起源于模糊数学。模糊数学主要用于解决精确数学无法描述的模糊性问题,采用隶属函数对其进行描述<sup>[3]</sup>,该方法适用于评价由多因素制约的研究主体。

本研究构建的综合评价指标体系包含定性指标和定量指标,无法通过直观比较获得精确性高的结果,在指标赋权环节需得到精确性较高的评价结果,考虑主客观赋权方法缺陷,本文选用AHP-CRITIC组合赋权法来确定评价指标的权重,充分利用主客观因素,使赋权更科学合理。基于模糊数学理论,模糊综合评价法根据模糊关系合成理论,将模糊指标(定性问题)量化处理,最终实现对研究对象的综合评价<sup>[4]</sup>。

## 2 装配式混凝土建筑综合效益评价指标体系

### 2.1 评价指标选取

在研究装配式混凝土建筑评价体系过程中,大多考虑经济、社会、环境、技术方面的影响因素,忽略了在易建性方面的影响。本文充分考虑国内装配式混凝土建筑的建造特点,结合现行国家装配式建筑规范标准文件,在现有研究的基础上将易建性、安全、经济、社会和环境5个效益指标作为装配式混凝土建筑综合效益评价指标体系的一级评价指标。

#### 2.1.1 易建性效益指标

易建性指在实现建筑功能目标和质量目标的基础上,通过优化设计或施工方案,提高施工效率,降低建造成本<sup>[5]</sup>。

1)设计阶段易建性效益的评价,主要包括标准化设计、拆分设计、PC构件质量、机械化程度、信息化管理等方面。

2)对于施工阶段的易建性效益,主要指标为装配化施工。

3)装配率指单体建筑室外地坪以上的主体结构、围护墙和内隔墙、装修和设备管线等采用预制

部品部件的综合比例,其决定着PC构件种类和现场安装工作量,直接影响易建性效益。预制率指建筑室外地坪以上主体结构和围护结构中预制构件的混凝土用量占对应部分混凝土总用量的体积比。预制率反映的是混凝土用量的体积比例关系,而装配率是包含了混凝土的体积比、长度比和数量比等的综合比例,故选用装配率能更好地反映易建性效益。

#### 2.1.2 安全效益指标

装配式混凝土建筑<sup>[6]</sup>在设计阶段充分发挥BIM技术作用,将PC构件标准化拆分,并通过深化设计将其优化,预见设计缺陷,在预制厂集中生产为PC构件质量提供保障,以达到减少安全事故的目的。

1)设计层面对建筑安全效益的影响通过影响施工阶段产生,主要分析结构的可靠性和其与施工方案的契合度。

2)施工阶段直接影响装配式混凝土建筑的安全<sup>[7]</sup>,主要分析设备安全性、工序的规范性。

3)在装配式混凝土建筑生命周期里,管理对其安全效益的影响主要表现在管理层的执行力和安全教育两方面。

#### 2.1.3 经济效益指标

为了更好地分析对比装配式混凝土建筑与传统现浇结构的综合经济效益,结合现阶段装配式混凝土建筑技术水平,排除与现浇结构一致的经济性支出后,经过专家咨询,PC构件运输成本已计入专项计费中。因此,装配式混凝土建筑的经济效益指标最终确定为设计成本、PC构件生产成本、PC构件运输成本<sup>[8]</sup>、PC构件安装成本、维护成本、使用成本、回收成本及折旧效益。

#### 2.1.4 环境效益指标

装配式混凝土建筑的环境效益可从资源消耗、能源消耗和环境保护3个维度分析<sup>[9-10]</sup>。环境效益指标最终确定为节水、节地、节材、节能、噪声排放、扬尘排放、固体废物、碳排放。

#### 2.1.5 社会效益指标

建造安全性提升反映建筑工人的安全感,例如构件厂施工较现场施工更具有安全性;劳动生产率指建筑的生产效率<sup>[11]</sup>;社会互适性<sup>[12]</sup>反映工人的工作环境和劳动强度;供应链延伸反映装配式建筑对相关产业链的推动作用;材料再生利用率反映构件的回收利用情况;居民满意度反映人们对人居环境的要求标准。

## 2.2 评价指标体系

本研究通过文献查阅、专家咨询、调查问卷的方法,剔除了重要性较低或与在现浇结构中差异性

小的指标,合并了相似度高的指标,凸显装配式建筑与现浇结构在易建性、经济性等方面的优势,有利于更好地研究装配式建筑综合效益。最终确定综合评价指标体系由5个一级指标和35个二级指标构成,如表1所示。

表1 装配式混凝土建筑综合效益评价指标体系

Table 1 Comprehensive benefit evaluation index system of prefabricated concrete buildings

目标层	准则层	指标层
装配式 混凝土 建筑综 合效益 (U)	易建性效益(U <sub>1</sub> )	装配率(U <sub>11</sub> )
		标准化设计(U <sub>12</sub> )
		拆分设计(U <sub>13</sub> )
		PC构件质量(U <sub>14</sub> )
		机械化程度(U <sub>15</sub> )
		信息化管理(U <sub>16</sub> )
		装配化施工(U <sub>17</sub> )
	安全效益(U <sub>2</sub> )	结构可靠性(U <sub>21</sub> )
		设计方案与施工方案契合度(U <sub>22</sub> )
		设备安全性(U <sub>23</sub> )
		工序规范性(U <sub>24</sub> )
		安全教育(U <sub>25</sub> )
		管理层执行力(U <sub>26</sub> )
	经济效益(U <sub>3</sub> )	设计成本(U <sub>31</sub> )
PC构件生产成本(U <sub>32</sub> )		
PC构件运输成本(U <sub>33</sub> )		
PC构件安装成本(U <sub>34</sub> )		
使用成本(U <sub>35</sub> )		
维修养护(U <sub>36</sub> )		
折旧效益(U <sub>37</sub> )		
回收成本(U <sub>38</sub> )		
环境效益(U <sub>4</sub> )	节水(U <sub>41</sub> )	
	节地(U <sub>42</sub> )	
	节材(U <sub>43</sub> )	
	节能(U <sub>44</sub> )	
	噪声排放(U <sub>45</sub> )	
	扬尘排放(U <sub>46</sub> )	
社会效益(U <sub>5</sub> )	固体废物(U <sub>47</sub> )	
	碳排放(U <sub>48</sub> )	
	建造安全性提升(U <sub>51</sub> )	
	劳动生产率(U <sub>52</sub> )	
	社会互适性(U <sub>53</sub> )	
	供应链延伸(U <sub>54</sub> )	
	材料再生利用率(U <sub>54</sub> )	
居民满意度(U <sub>56</sub> )		

### 3 装配式混凝土建筑综合效益评价模型

#### 3.1 指标权重计算

##### 3.1.1 AHP法计算步骤

##### 1) 建立递阶层次结构模型

根据2.2节确定的综合评价指标体系建立三级递阶层次结构模型,如表1所示。

##### 2) 构造判断矩阵

各层次指标进行比较形成判断矩阵,在前一层次评价指标作为参考的前提下评判各指标相互之

间的重要性,使用1~9标度法进行评判结果的重要性赋值,定量化分析定性问题,进而构建判断矩阵:

$$R = (a_{ij})_{m \times n} = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{m1} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $a_{ij}$ 为 $a_i, a_j$ 的比较结果,为 $i, j$ 元素重要性对比。判断矩阵中因素的尺度量化值及其定义如表2所示。

表2 判断矩阵中因素的尺度量化值及其定义

Table 2 The scale quantization values and their definitions of the factors in the judgment matrix

标度	阐述	比较结果
1	表示两类评价指标因子相比,具有同等重要性	同等重要
3	表示两类评价指标因子相比,指标因子 <i>i</i> 比因子 <i>j</i> 的得分率高10%( <i>i</i> 比 <i>j</i> 稍微重要)	稍微重要
5	表示两类评价指标因子相比,指标因子 <i>i</i> 比因子 <i>j</i> 的得分率高20%( <i>i</i> 比 <i>j</i> 明显重要)	明显重要
7	表示两类评价指标因子相比,指标因子 <i>i</i> 比因子 <i>j</i> 的得分率高30%( <i>i</i> 比 <i>j</i> 强烈重要)	重要得多
9	表示两类评价指标因子相比,指标因子 <i>i</i> 比因子 <i>j</i> 的得分率高40%( <i>i</i> 比 <i>j</i> 极端重要)	极为重要

通过比较同层指标之间的重要性,确定指标的权重,其中 $a_{ij} = 1/a_{ji}, a_{ii} = 1$ 。

##### 3) 计算值表权重值

通过向受访者开展调查问卷,由专家或其他相关从业人员对指标打分,筛选有效数据,构建判断矩阵。本文选用方根法计算指标权重,以上文提到的判断矩阵 $R$ 为例。

分别计算矩阵 $R$ 各行元素的几何平均值,得到向量 $M = (m_1, m_2, \dots, m_n)$ ,其中:

$$m_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

归一化处理向量 $M$ ,得到:

$$\omega_i = \frac{m_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

$W = (\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_n)^T$ 即为指标权重向量,

$0 \leq \omega_i \leq 1$ 且 $\sum_{i=1}^n \omega_i = 1, \omega_i$ 即是所计算的各指标的权重。

##### 4) 判断矩阵一致性检验

专家在判断评价指标的重要性时,难免存在主观性误差,因此须对判断矩阵的误差和相容性进行分析,从而引入一致性检验指标CI和CR来检测判断矩阵 $R$ 的一致性。

求解最大特征值 $\lambda_{\max}$ :

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(RW)_i}{n\omega_i} \quad (4)$$

$(RW)_i$  表示判断矩阵  $R$  的第  $i$  行矩阵(行向量  $1n$ )与  $W$ (列向量  $n1$ )的乘积。

计算  $R$  的一致性指标 CI:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (5)$$

计算  $R$  的一致性比率 CR:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (6)$$

并查出相应的一致性指标 RI(见表3),计算出其一一致性比率 CR。

表3 RI取值

Table 3 Values of RI

$n$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
RI	0	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.19	1.52	1.54

一般情况下,若  $CR < 0.1$ , 则一致性检验通过,所计算的指标权重通过检验,可继续评价,否则需修正判断矩阵,直至其一一致性检验结果符合要求。

### 3.1.2 CRITIC 法计算步骤

1) 各指标之间的相关系数:

$$r_{xy} = \frac{\text{cov}(x, y)}{\sqrt{\text{var}[x] \text{var}[y]}} \quad (7)$$

其中  $\text{cov}(x, y)$  表示指标  $x, y$  之间的协方差;  $\text{var}$  表示方差。

2) 量化第  $j$  个指标与其他指标之间的冲突性:

$$f_j = \sum_{i=1}^n (1 - r_{ij}) \quad (8)$$

3) 第  $j$  个指标的标准差,反映指标的变异性:

$$\delta_j = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)^2} \quad (9)$$

式中:  $\bar{x}_j$  表示第  $j$  个指标的平均值。

4) 第  $j$  个指标所包含的信息量,用  $c_j$  表示:

$$c_j = \delta_j \sum_{i=1}^n (1 - r_{ij}) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)^2} \sum_{i=1}^n (1 - r_{ij}) \quad (10)$$

5) 第  $j$  个指标的权重:

$$\omega_j = \frac{c_j}{\sum_{j=1}^m c_j} \quad (11)$$

### 3.1.3 AHP-CRITIC

常用的组合赋权组合方法有线性组合与非线性组合两种,设  $\alpha_j$  为主观权重,  $\beta_j$  为客观权重。

1) 线性组合

$$\omega_j = \mu\alpha_j + (1 - \mu)\beta_j \quad (12)$$

当决策重点参考专家经验时,大于 0.5, 否则小于 0.5。

2) 非线性组合

$$\omega_j = \frac{\alpha_j \beta_j}{\sum_{j=1}^n \alpha_j \beta_j} \quad (13)$$

为了最大程度保证权重的客观性,反映敏感因素,本文基于最小鉴别信息原理选用非线性 AHP-CRITIC 组合赋权法。

## 3.2 基于 FCE 的综合评价模型

综合效益评价是模糊性质的概念,影响因素繁多,且多是模糊、难以精确量化的。综合上述原因,选用 FCE 作为本研究的评价方法。

### 3.2.1 构建指标集和评语集

依据表1建立的综合评价指标体系的二级指标,构建指标集和评语集。

1) 构建指标集

$$U = \{U_1, U_2, U_3, U_4, U_5\}, U_1 = \{U_{11}, U_{12}, U_{13}, U_{14}, U_{15}, U_{16}, U_{17}\}, U_2 = \{U_{21}, U_{22}, U_{23}, U_{24}, U_{25}, U_{26}\}, U_3 = \{U_{31}, U_{32}, U_{33}, U_{34}, U_{35}, U_{36}, U_{37}, U_{38}\}, U_4 = \{U_{41}, U_{42}, U_{43}, U_{44}, U_{45}, U_{46}, U_{47}, U_{48}\}, U_5 = \{U_{51}, U_{52}, U_{53}, U_{54}, U_{55}, U_{56}\}。$$

2) 构建评语集

构建评语集  $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\}$ ,  $v_1 \sim v_5$  依次代表优秀、良好、一般、较差、很差。

### 3.2.2 构造评价矩阵

令  $R = (r_{ij})_{36 \times 5}$ , 其中  $r_{ij}$  为指标隶属度,  $0 \leq r_{ij} \leq 1$ 。本文采用综合评价中的单因素评价方法,定性指标的隶属度采用专家打分的方式确定,专家分5个优劣等级进行打分,只需计算评价指标分布在不同评语级的人数比例即可确定其隶属度。通过调研问卷向5位行业专家和学者对评价体系中的定量指标拟定分级标准,由问卷数据计算期望值,并参考相关规范和资料修正,分级标准如表4所示。

表4 案例对象主要技术指标

Table 4 Main technical indicators of case objects

评价指标	优秀	良好	一般	较差	很差	
装配率/%	>75	60~75	50~60	30~50	<30	
易建性设计(得分)	>90	75~90	60~75	40~60	<40	
易建性施工(得分)	>90	75~90	60~75	20~60	<20	
节能/[ $(\text{kW} \cdot \text{h}) \cdot \text{m}^{-2}$ ]	<5	5~10	10~20	20~35	>35	
碳排放/[ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}) \cdot \text{a}$ ]	<25	25~30	30~45	45~70	>70	
噪声/dB	昼	<50	50~55	55~60	60~70	>70
	夜	<40	40~45	45~50	50~55	>55
固体废物/[ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-2})$ ]	<20	20~35	35~50	50~70	>70	

隶属度使用半梯形分布函数确定:

$$\mu(u_i) = \begin{cases} \frac{u_i - a_i}{c_j - a_i} & a_i \leq u_i \leq c_j \\ \frac{b_j - u_i}{b_j - c_j} & c_j \leq u_i \leq b_j \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (14)$$

式中: $\mu(u_i)$  是  $V_j$  的隶属度函数;  $u_i$  为评价指标值;  $a_i, b_i, c_i$  分别为评价指标的实数边界。

将求得的隶属度分层次按顺序排列,所得矩阵即为所求评价矩阵。

### 3.2.3 评价模型权重计算

应用 AHP-CRITIC 组合赋权法作为评价模型的指标赋权方法。分别计算各指标主观权重,客观权重和主客观组合权重计算结果如表 5 所示。

### 3.2.4 综合评价结果

模糊综合评价结果向量:

$$\mathbf{Z} = \mathbf{WR} = (z_1, z_2, z_3, z_4, z_5) \quad (15)$$

模糊因子选  $M(\cdot, \oplus)$ , 式中:

$$z_j = \sum_{i=1}^{19} \omega_i r_{ij} \quad (j = 1, 2, 3, 4, 5) \quad (16)$$

归一化处理向量  $\mathbf{Z}$  得评价结果  $V$ 。

## 4 案例分析

### 4.1 项目概况

某装配式工程项目位于陕西省西安市灞河新区灞河东路与霸瑞一路交叉口东南角,项目规划如图 1 所示。建筑群总建筑面积约 92 万  $m^2$ , 单栋设计装配率不低于 30%, 本文选取项目中的 A~E 5 栋建筑为例进行案例分析, 如图 1 所示。所选楼栋主要技术指标如表 6 所示。



图 1 某装配式工程项目建筑群

Fig. 1 Building complex of a prefabricated engineering project

### 4.2 项目综合评价

#### 4.2.1 构造评价矩阵

按照构建的综合评价指标体系,从 5 个一级指标计算 A~E 全部指标对应的隶属度。

以易建性效益指标隶属度计算为例,指标权重采用 AHP-CRITIC 法确定,装配率参照 GB/T 51129—2017《装配式混凝土建筑评价标准》计算,

表 5 装配式混凝土建筑综合效益评价指标权重

Table 5 Weight of comprehensive benefit evaluation index of prefabricated concrete building

目标层	准则层	权重( $\omega_i$ )			指标层	权重( $\omega_i$ )							
		主观权重	客观权重	组合权重		主观权重	客观权重	组合权重					
$U_1$	0.248	0.166	0.223		$U_{11}$	0.319	0.112	0.274					
					$U_{12}$	0.246	0.108	0.204					
					$U_{13}$	0.140	0.115	0.123					
					$U_{14}$	0.142	0.201	0.218					
					$U_{15}$	0.035	0.130	0.035					
					$U_{16}$	0.052	0.201	0.080					
					$U_{17}$	0.066	0.133	0.068					
					$U_{21}$	0.401	0.147	0.365					
					$U_{22}$	0.169	0.146	0.153					
					$U_{23}$	0.243	0.183	0.275					
					$U_{24}$	0.036	0.179	0.039					
					$U_{25}$	0.054	0.149	0.050					
					$U_{26}$	0.097	0.196	0.117					
					$U_{31}$	0.079	0.140	0.085					
					$U_{32}$	0.274	0.119	0.254					
					$U_2$	0.254	0.161	0.222		$U_{33}$	0.121	0.118	0.111
										$U_{34}$	0.121	0.138	0.129
$U_{35}$	0.314	0.139	0.339										
$U_{36}$	0.034	0.119	0.031										
$U_{37}$	0.028	0.106	0.023										
$U_{38}$	0.030	0.120	0.028										
$U_{41}$	0.280	0.131	0.294										
$U_{42}$	0.022	0.125	0.022										
$U_{43}$	0.059	0.122	0.058										
$U_{44}$	0.143	0.126	0.144										
$U_{45}$	0.067	0.142	0.076										
$U_{46}$	0.124	0.128	0.127										
$U_{47}$	0.024	0.112	0.022										
$U_{48}$	0.281	0.114	0.257										
$U_{51}$	0.090	0.167	0.090										
$U_{52}$	0.227	0.176	0.241										
$U_3$	0.351	0.187	0.356							$U_{53}$	0.047	0.161	0.046
					$U_{54}$	0.219	0.169	0.223					
					$U_{55}$	0.254	0.137	0.211					
					$U_{56}$	0.164	0.191	0.189					
					$U_4$	0.084	0.272	0.124					

表 6 案例对象主要技术指标

Table 6 Main technical indicators of case objects

主要技术指标	A	B	C	D	E
装配率/%	0	57.31	66.00	78.00	91.10
结构类型	剪力墙	剪力墙	剪力墙	剪力墙	剪力墙
建筑面积/ $m^2$	27 626.0	20 496.7	4 950.0	4 744.0	9 838.7
层高/m	2.85	2.85	3.2	3.2	3.2
层数	31	23	10	10	5
屋面防水等级	1级	1级	1级	1级	1级
抗震设防烈度	8度	8度	8度	8度	8度
建筑耐火等级	一级	一级	一级	一级	一级
设计使用年限/年	50	50	50	50	50

参照现行易建性设计标准由专家定量指标打分量化。综合 A~E 建筑的易建性效益指标隶属度,可得对应评价矩阵  $R_1$ , 并结合易建性效益指标权重  $W_1$  计算结果,由一级模糊运算得易建性效益评价向

量  $Z_1$  及归一化结果。

根据上表所示易建性效益的评价指标隶属度得到相应的评价矩阵  $R_1$  :

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0.100 & 0.200 & 0.400 & 0.200 & 0.100 \\ 0.100 & 0.100 & 0.500 & 0.100 & 0.200 \\ 0.100 & 0.100 & 0.300 & 0.300 & 0.200 \\ 0.100 & 0.100 & 0.100 & 0.500 & 0.200 \\ 0.100 & 0.100 & 0.600 & 0.100 & 0.100 \\ 0.100 & 0.200 & 0.500 & 0.100 & 0.100 \\ 0.100 & 0.100 & 0.400 & 0.100 & 0.300 \end{bmatrix}$$

由  $Z_1 = W_1 R_1 = (z_1, z_2, z_3, z_4, z_5)$  计算易建性效益的评价向量  $Z_1$  并进行归一化处理,得:

$$Z_1 = (0.100 \quad 0.135 \quad 0.358 \quad 0.239 \quad 0.168)$$

同理得其他评价向量及归一化结果。

#### 4.2.2 综合评价

将求得的子目标评价向量  $Z_i (i = 1, 2, 3, 4, 5)$  合并形成总评价矩阵  $R$ 。例如 A 建筑:

$$Z = WR$$

$$W = [0.223 \quad 0.222 \quad 0.356 \quad 0.124 \quad 0.074]$$

$$R = \begin{bmatrix} 0.100 & 0.135 & 0.358 & 0.239 & 0.168 \\ 0.116 & 0.193 & 0.194 & 0.256 & 0.242 \\ 0.117 & 0.149 & 0.294 & 0.282 & 0.158 \\ 0.100 & 0.100 & 0.123 & 0.248 & 0.429 \\ 0.100 & 0.146 & 0.210 & 0.444 & 0.100 \end{bmatrix}$$

表7 目标评价矩阵和评价向量

Table 7 Objective evaluation matrix and evaluation vector

楼号	评价矩阵	归一化评价向量
A	$R = \begin{bmatrix} 0.100 & 0.135 & 0.358 & 0.239 & 0.168 \\ 0.116 & 0.193 & 0.194 & 0.256 & 0.242 \\ 0.117 & 0.149 & 0.294 & 0.282 & 0.158 \\ 0.100 & 0.100 & 0.123 & 0.248 & 0.429 \\ 0.100 & 0.146 & 0.210 & 0.444 & 0.100 \end{bmatrix}$	$Z = (0.110 \quad 0.149 \quad 0.259 \quad 0.274 \quad 0.208)$
B	$R = \begin{bmatrix} 0.318 & 0.159 & 0.214 & 0.121 & 0.100 \\ 0.127 & 0.492 & 0.169 & 0.112 & 0.100 \\ 0.118 & 0.523 & 0.153 & 0.106 & 0.100 \\ 0.142 & 0.501 & 0.116 & 0.140 & 0.100 \\ 0.160 & 0.478 & 0.152 & 0.100 & 0.109 \end{bmatrix}$	$Z = (0.174 \quad 0.437 \quad 0.169 \quad 0.117 \quad 0.103)$
C	$R = \begin{bmatrix} 0.213 & 0.318 & 0.249 & 0.120 & 0.100 \\ 0.510 & 0.142 & 0.117 & 0.131 & 0.100 \\ 0.234 & 0.319 & 0.175 & 0.161 & 0.111 \\ 0.280 & 0.327 & 0.155 & 0.137 & 0.100 \\ 0.386 & 0.280 & 0.115 & 0.105 & 0.115 \end{bmatrix}$	$Z = (0.308 \quad 0.278 \quad 0.172 \quad 0.138 \quad 0.105)$
D	$R = \begin{bmatrix} 0.119 & 0.208 & 0.351 & 0.222 & 0.100 \\ 0.413 & 0.164 & 0.207 & 0.112 & 0.105 \\ 0.277 & 0.283 & 0.168 & 0.161 & 0.111 \\ 0.453 & 0.183 & 0.135 & 0.129 & 0.100 \\ 0.472 & 0.175 & 0.131 & 0.100 & 0.121 \end{bmatrix}$	$Z = (0.308 \quad 0.219 \quad 0.211 \quad 0.155 \quad 0.107)$
E	$R = \begin{bmatrix} 0.127 & 0.249 & 0.128 & 0.372 & 0.124 \\ 0.349 & 0.230 & 0.207 & 0.104 & 0.110 \\ 0.147 & 0.259 & 0.341 & 0.153 & 0.100 \\ 0.326 & 0.273 & 0.123 & 0.168 & 0.110 \\ 0.404 & 0.250 & 0.124 & 0.122 & 0.100 \end{bmatrix}$	$Z = (0.228 \quad 0.251 \quad 0.220 \quad 0.190 \quad 0.112)$

计算并对  $Z$  归一化处理:

$$Z = [0.110 \quad 0.149 \quad 0.259 \quad 0.274 \quad 0.208]$$

由  $Z_r = \max\{z_j\} (j = 1, 2, 3, \dots, n)$  知  $Z_r = 0.274$ , 评价结果为“较差”。所求总目标评价向量  $Z$  如表7所示。

根据上述分析过程所得评价向量,由  $Z_r = \max\{z_j\} (j = 1, 2, 3, \dots, n)$  得各栋建筑评价结果,如表8所示。

表8 各建筑综合效益评价结果

Table 8 Comprehensive benefit evaluation results of each building

效益	楼号				
	A	B	C	D	E
$U$	较差	良好	优秀	优秀	良好
$U_1$	一般	优秀	良好	一般	较差
$U_2$	较差	良好	优秀	优秀	优秀
$U_3$	一般	良好	良好	良好	一般
$U_4$	很差	良好	良好	优秀	优秀
$U_5$	较差	良好	优秀	优秀	优秀

#### 4.3 结果分析

通过使用本文建立的装配式建筑综合评价模型对所选工程实例进行综合评价,结果表明:装配式建筑综合效益优于传统现浇建筑。评价结果显示,C,D综合效益为优秀,B,E为良好,全现浇建筑A为较差。综合效益与装配率不完全成正比,在所

分析的案例中,装配率由0提升到66%的过程中,综合效益呈上升趋势,66%到78%阶段无明显变化,装配率从78%提升到91.1%的过程中,综合效益呈下滑趋势,如图2所示。因此在满足使用需求的前提下,推荐设计合适的装配率以保证综合效益最优,推荐50%~80%的装配率。

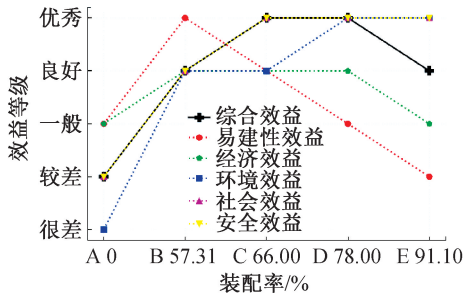


图2 效益变化趋势

Fig. 2 Trend chart of benefit change

1) B, C 易建性效益表现较好,分别为优秀、良好,随着装配率的进一步提升,易建性效益呈下滑趋势, D, E 分别为一般、较差。高装配率伴随多种规格 PC 构件,由于标准化设计和构件拆分设计未达到与高装配率应有的契合度,反而增大了构件生产和现场吊装的难度,相反,现浇结构由于成熟的技术体系,易建性效果为一般,优于 E。实际建造过程中应优化深化设计,避免一味追求高装配率,在设计过程中,应重点考虑使用需求及施工难度,保证项目易建性。

2) 在安全效益方面,全现浇结构 A 为较差, B 为良好, C, D, E 均为优秀。装配式混凝土建筑的构件均在构件厂预制,经过标准化设计,其质量、性能及精度远优于现浇建造方式;将现场浇筑的工作转移到工厂内进行,大幅度降低了施工安全风险,改善了工人的工作环境,相较于传统现浇生产方式具有显著的安全效益优势。

3) 经济效益评价结果表明适宜装配率的 B, C, D 有较好的经济效益表现,均为良好。然而,装配率最高的 E 经济效益表现一般,与传统现浇结构 A 相同,均为一般。装配式混凝土建筑由于设计和建造过程尚处于发展中, PC 构件拆分、生产、运输、吊装及模具设计等投入成本较高,目前阶段较难显现出在经济上的优势,但其长期经济效益表现较乐观;高装配率意味着 PC 构件拆分、运输、存放、吊装的过程控制复杂度越高,同时影响着易建性效益,经济效益仍有优化空间。

## 5 结语

本文综合有效地评价装配式混凝土建筑建设

水平,从设计到施工,在满足装配率要求的前提下,同时关注其易建性、经济、安全、环境及社会等方面的综合效益,能了解各种因素对装配式混凝土建筑的影响程度,为装配式混凝土建筑综合评价设计、施工、运维及装配式混凝土建筑方案决策提供有力参考。主要研究结论如下。

1) 构建了装配式混凝土建筑综合效益评价指标体系,运用 AHP-CRITIC 组合赋权方法计算评价指标权重,基于 FCE 建立综合效益评价模型,通过不同案例验证评价模型的有效性。

2) 研究了装配率与综合效益之间的相互关系,分析结果表明:装配率为 50%~80%,综合效益亦呈上升趋势;装配率高于 80%时,建造难度大大提升,综合效益呈现下滑趋势。

3) 分析了装配式建筑当前的不足:现浇结构体系技术和管理体系较成熟,在成本控制方面经验丰富,而装配式混凝土建筑由于设计和建造技术尚处于发展中,投入成本较高,随着装配式混凝土建筑建造模式的推进,技术不断创新,成本不断降低,其经济效益优势会进一步凸显。

## 参考文献:

- [1] 宋林光,张洪龙,段占立,等. 基于层次分析法对施工阶段环境影响的综合评价分析[J]. 环境工程, 2023, 41(S2): 738-741.  
SONG L G, ZHANG H L, DUAN Z L, et al. Comprehensive evaluation and analysis of environmental impact on construction stage based on hierarchical analysis method[J]. Environmental engineering, 2023, 41(S2): 738-741.
- [2] 吴瑞英,孙怀卫,严冬,等. 基于格网数据和博弈论组合赋权的 中巴经济走廊 洪灾风险评价[J]. 农业工程学报, 2021, 37(14): 145-54.  
WU R Y, SUN H W, YAN D, et al. Evaluation of flood disaster risk in China-Pakistan Economic Corridor by combination weighting based on improved game theory and grid data[J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2021, 37(14): 145-154.
- [3] 程昊淼,王伯伟. 绅士化街区城市形态特征与模糊综合评估[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2021, 53(5): 79-86.  
CHENG H M, WANG B W. Fuzzy comprehensive assessment and characteristics of urban form in gentrification neighbourhoods[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2021, 53(5): 79-86.
- [4] 王春燕,乔娟. 改进的层次分析法及模糊综合评价法在病险水库除险加固治理效果评价中的应用[J]. 水电能源科学, 2019, 37(10): 64-7.  
WANG C Y, QIAO J. Application of improved analytic hierarchy process and fuzzy comprehensive evaluation in evaluation of treatment effect of disease-dangerous reservoir [J]. Water resources and power, 2019, 37(10): 64-67.

在楼层3~4层范围内快速增大,当楼层>4层时,边柱剪力快速减小。模型 $F_3$ 楼体的边柱剪力变化与模型 $F_1 \sim F_2$ 基本相同,未布设填充墙的楼结构边柱剪力明显大于布设填充墙的楼结构边柱剪力。

#### 4 结语

1)随着楼层的增高,楼层结构在 $x$ 向和 $y$ 向的位移逐渐增大,墙体填充率越大,楼结构的整体刚度越大,抗变形能力越强。随着墙体填充率的增大,楼结构 $x$ 向和 $y$ 向的顶层位移随之减小,相比同楼层未设置填充墙的边柱剪力,布设了填充墙的楼层边柱剪力明显减小。

2)当填充率为50%时,在第1阶振型模型 $E_1$ 楼体 $y$ 向以平动为主,但在 $z$ 向处于扭转状态,在第2阶振型楼体 $x$ 向以平动为主,在第3阶振型楼体以 $z$ 向扭转为主,但在 $y$ 向处于平动状态。模型 $E_2$ ,  $E_3$ 在第1阶振型均以 $x$ 向平动为主,在第2阶振型分别以 $z$ 向扭转、 $y$ 向平动为主,在第3阶振型分别以 $y$ 向平动、 $z$ 向扭转为主。

3)在填充率为66.67%条件下,随着楼层的增加,模型 $F_1 \sim F_3$ 楼结构的 $x$ 向和 $y$ 向位移均逐渐增大,相比布设了填充墙的楼层,未布设填充墙时楼体的 $x$ 向和 $y$ 向位移增大迅速,增大幅度明显,填充墙纵向不均匀分布对楼结构顶层位移影响小,但会增大整体楼结构位移。

4)由于填充墙的不均匀分布会造成楼体扭转,增大边柱受到的剪力,因此,在实际框架结构工程建设中,建议框架内采用填充墙全部填充,且所有填充墙材料保持一致,可提高建筑抗震性能。

#### 参考文献:

- [1] 祝岳,杨伟松,张纪刚,等.考虑填充墙平面刚度分布的RC框架结构抗地震倒塌能力研究[J].青岛理工大学学报,2024,45(1):10-18,35.  
ZHU Y, YANG W S, ZHANG J G, et al. Study on the seismic collapse resistance of RC frame structures considering the distribution of plane stiffness of infill walls [J]. Journal of Qingdao University of Technology, 2024, 45(1): 10-18, 35.
- [2] 张仕康,王蕾,徐新生,等.填充墙对GFRP筋混凝土框架结构抗震性能的影响[J].高科技纤维与应用,2023,48(6):34-40.  
ZHANG S K, WANG L, XU X S, et al. The influence of infill walls on the seismic performance of GFRP reinforced concrete frame structures[J]. Hi-tech fibers and applications, 2023, 48(6): 34-40.
- [3] 姜岳,刘艳萍,刘子苑,等.轻质隔墙对框架结构抗震性能的影响仿真研究[J].计算机仿真,2023,40(12):365-368,384.  
JIANG Y, LIU Y P, LIU Z Y, et al. Simulation study on the influence of lightweight partition walls on the seismic performance of frame structures [J]. Computer simulation, 2023, 40(12): 365-368, 384.
- [4] 刘昊鹏,李爽,王浩然.韧性填充墙框架水平荷载-位移曲线简化分析模型[J].建筑结构学报,2023,44(S2):411-426.  
LIU H P, LI S, WANG H R. Simplified analysis model for horizontal load displacement curve of resilient infill wall frame [J]. Journal of building structures, 2023, 44(S2): 411-426.
- [5] 祝岳,杨伟松,李海生,等.考虑填充墙刚度的RC框架结构抗震设计方法研究[J].工程抗震与加固改造,2023,45(5):64-75.  
ZHU Y, YANG W S, LI H S, et al. Research on seismic design method of RC frame structure considering infill wall stiffness[J]. Earthquake resistant engineering and retrofitting, 2023, 45(5): 64-75.
- [6] 哈尔滨工业大学(深圳).建筑易建性评价标准:T/CECS 545—2018[S].北京:中国计划出版社,2018.  
Harbin Institute of Technology, Shenzhen. Standard for building buildability assessment: T/CECS 545—2018 [S]. Beijing: China Planning Publishing House, 2018.
- [7] 马荣全.装配式建筑的发展现状与未来趋势[J].施工技术(中英文),2021,50(13):64-68.  
MA R Q. Development status and future trend of prefabricated construction [J]. Construction technology, 2021, 50(13): 64-68.
- [8] 黄炜,孙玉娇,张家瑞,等.装配式墙体结构新型连接技术研究现状[J].工业建筑,2020,50(7):181-189.  
HUANG W, SUN Y J, ZHANG J R, et al. Research status of new connection technique of prefabricated wall structure [J]. Industrial construction, 2020, 50(7): 181-189.
- [9] 王茹,班丹梅,王月,等.考虑资源约束的预制混凝土构件生产调度问题研究[J].制造业自动化,2020,42(12):63-67.  
WANG R, BAN D M, WANG Y, et al. Research on production scheduling problem of prefabricated concrete components considering resource constraints [J]. Manufacturing automation, 2020, 42(12): 63-67.
- [10] LIU S, LI Z F, TENG Y, et al. A dynamic simulation study on the sustainability of prefabricated buildings [J]. Sustainable cities and society, 2022, 77: 103551.
- [11] WANG Y N, XUE X L, YU T, et al. Mapping the dynamics of China's prefabricated building policies from 1956 to 2019: a bibliometric analysis [J]. Building research & information, 2021, 49(2): 216-233.
- [12] TIDHAR N, LI Y, KRISTOMBU BADUGE K S, et al. A slack approach to optimised modularisation of prefabricated structures using a multi-variable modularisation index [J]. Structures, 2021, 33: 1235-1251.
- [13] 吴柯娴,王竹君,金伟良,等.装配式混凝土结构可持续成本量化分析[J].建筑结构学报,2021,42(5):133-144.  
WU K X, WANG Z J, JIN W L, et al. Quantitative analysis of sustainable cost of prefabricated concrete structures [J]. Journal of building structures, 2021, 42(5): 133-144.

(上接第7页)