

基于灰色区间层次法的装配式建筑施工可持续水平综合评价

司金忠¹, 李海莲^{1,2}, 魁发鹏^{1,3}

(1. 兰州交通大学 土木工程学院, 兰州 730070; 2. 兰州交通大学 甘肃省道路桥梁与地下工程重点实验室, 兰州 730070;
3. 国网金昌供电公司, 甘肃 金昌 737100)

摘要:基于对装配式建筑可持续发展要求,选择装配式建筑不确定因素最多的施工阶段作为研究对象,从社会影响、环境保护、资源利用、经济目标、施工技术、施工管理 6 个维度选取 24 个细化指标建立装配式建筑施工可持续水平综合评价指标体系。将区间层次分析法和灰色聚类法结合,构建基于灰色区间层次分析法的装配式建筑施工可持续水平综合评价模型。利用该评价模型对西北某装配式建筑施工可持续水平进行综合评价。结果表明,该装配式建筑施工可持续水平为较好可持续,综合评价结果与该项目实际施工情况基本吻合,验证了该评价模型的可行性和适用性。

关键词:装配式建筑;可持续评价;施工阶段;区间层次分析法(IAHP);灰色聚类法

中图分类号:TU741 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2022)04-0091-07

随着中国建筑行业规模不断扩大,在推动经济发展的同时,也背负着环境治理和资源消耗的巨大代价。合理利用资源,保护生态环境,推动建筑结构可持续施工愈发得到重视。装配式建筑作为中国建筑产业转型升级的重要方向,对其明确提出了提高工程质量、提高建造效率、减少对人工的依赖以及减少环境污染等发展要求^[1]。目前由于中国关于装配式建筑施工相关规范和标准的不完善,装配式结构施工工艺水平整体偏低,缺乏专业化管理模式以及相关配套设施,导致在施工中经常出现施工、设计等参与各方信息不对称、资源无法充分利用、施工成本较高、人员安全等问题,这与装配式建筑发展初衷严重背离。因此,为满足装配式建筑施工可持续要求,有必要对装配式建筑施工可持续水平进行综合评价。

近年来许多学者在装配式建筑可持续方面做了大量研究。Jiang 等^[2]通过施工项目案例调查,并将遗传算法引入装配式建筑的可持续评价,得出装配式建筑比传统建筑具有明显的可持续性;徐雨濛^[3]从装配式建筑和传统建筑区别出发,借助 AHP 和 GS 理论从经济、资源、环境、社会 4 个方面构建装配式建筑可持续发展评价模型,并提出了降低装

配式建筑成本的措施;石振武等^[4]通过分析装配式建筑的全生命周期,在绿色供应链视角下构建了层次聚类-TOPSIS 评价模型识别装配式建筑绿色供应链的关键节点问题;任梦卓^[5]通过分析装配式建筑预制和施工两阶段对社会和环境的影响,提出了基于 SNA 的装配式建筑预制和施工两阶段可持续评价模型;刘子琦等^[6]从设计到回收整个供应链识别影响装配式建筑可持续发展的影响因素,引入云物元理论对装配式建筑供应链可持续进行评价。这些已有研究成果具有重要参考价值,但是目前研究大多从装配式建筑全生命周期或者完整供应链出发,总体评价装配式建筑的可持续发展,且大量研究主要立足于环境、资源、社会方面^[7-8],而针对装配式建筑施工过程这一阶段的可持续性系统研究尚少。

鉴于此,本文选择装配式建筑全生命周期中不确定性因素最多的施工阶段作为研究对象,从社会、环境、资源、经济、技术、管理 6 个维度对装配式建筑施工可持续水平进行全方位综合评价。通过参考相关研究成果、咨询有施工经验的权威专家,结合装配式混凝土结构施工特点,构建了针对装配式混凝土建筑施工可持续水平综合评价指标体系。

收稿日期:2021-11-25

基金项目:国家自然科学基金(51868042);甘肃省自然科学基金(20JR10RA229);甘肃省高等学校创新基金(2021A-048)。

作者简介:司金忠(1997—),男,甘肃陇西人,兰州交通大学土木工程学院,硕士研究生,研究方向为结构全生命周期和施工可持续性评估;通信作者李海莲(1983—),女,河北秦皇岛人,兰州交通大学土木工程学院,副教授,硕士研究生导师,研究方向为土木工程建造与管理。

将区间层次分析法与改进的灰色聚类法结合构建了一种基于灰色区间层次法的装配式建筑施工可持续综合评价模型。采用较为科学的区间层次分析法 (IAHP) 合理分配指标权重,用区间数代替点值来构造判断矩阵,以克服传统 AHP 在指标赋权过程中的不足。然后,引入灰色定权聚类法处理可持续评价中不完整的、灰色的信息,可有效解决所建指标体系由于不完全信息造成评价结果失真的问题。最后将该评价模型应用于工程实例,较科学合理的评价出了该项目的施工可持续水平。

1 可持续综合评价指标体系建立

装配式建筑作为未来建筑行业转型升级的重要方向,其施工可持续水平综合评价指标体系的建立要能够体现项目在整个施工期间可持续要求。不仅要确保工程质量和既定功能,又要实现经济预

算目标,既要考虑资源的利用,还要重视施工对社会及周边环境带来的影响,从而满足装配式建筑施工可持续性要求。基于此,将可持续发展作为装配式建筑施工的指导理念,从社会影响、环境保护、施工技术、资源利用、经济目标和施工管理 6 个维度针对装配式混凝土建筑构建可持续评价指标体系。在指标建立过程中,通过深入了解装配式混凝土结构施工特点和施工可持续发展要求,参考《建筑工程绿色施工评价标准》^[9]和《关于大力发展装配式建筑的指导意见》^[10]相关规范和政府文件,梳理已有对装配式建筑施工可持续研究文献^[11-12],筛选集合影响装配式建筑施工可持续的指标因素,经过咨询具有实际工程经验的专家和学者,最终确定碳排放量和组织调度合理性等 24 个细化指标构建装配式建筑施工可持续水平综合评价指标体系,如图 1 所示。



图 1 装配式建筑施工可持续水平综合评价指标体系

2 可持续水平综合评价模型构建

2.1 区间层次分析法

为减少传统的 AHP 在指标赋权过程中的过于主观性,并且能够较客观的对影响装配式结构施工的因素进行比较,本文采用区间层次分析法^[13-14],用区间数代替点值来构造判断矩阵,并根据区间特征跟法求解判断矩阵权重^[15]。通过传统 1-9 标度法及判断原理对两两指标进行比较,根据指标重要程度赋值量化构造互反区间数判断矩阵,区间的取值范围反映了指标对项目影响因素的模糊性和不确定性。

1)归一化特征向量计算。设区间判断矩阵 $A = (a_{ij})_{n \times n}$, 其中 $a_{ij} = [a_{ij}^-, a_{ij}^+]$, $a_{ji} = \frac{1}{a_{ij}} = [\frac{1}{a_{ij}^+}, \frac{1}{a_{ij}^-}]$, a_{ji} 表示指标 A_j 对与 A_i 相对重要程度比值,且 $1/9 \leq a_{ij}^- \leq a_{ij}^+ \leq 9$, 并记 $A^- = (a_{ij}^-)_{n \times n}$ 、 $A^+ = (a_{ij}^+)_{n \times n}$, 则有 $A = [A^-, A^+]$ 。令 A^- 和 A^+ 对应的特征向量分

别为 $x^- = [x_1^-, x_2^-, \dots, x_n^-]$, $x^+ = [x_1^+, x_2^+, \dots, x_n^+]$, 则 $x = [x^-, x^+]$ 。应用公式 $A\lambda = \lambda X$ 可分别求出判断矩阵 A^- 和 A^+ 的最大特征跟,记为 λ^- 和 λ^+ , 进一步可求出为 λ^- 和 λ^+ 对应的具有正分量的归一化特征向量: x^-, x^+ , 然后根据式(1)可求出区间权重向量 w , 即

w = (w1, w2, ..., wn) = [kx-, mx+] (1)

式中: k 和 m 分别表示判断矩阵 A^+ 和 A^- 所对应的特征值中间系数。

k = \sqrt[n]{\sum_{j=1}^n \frac{1}{\sum_{i=1}^n a_{ij}^+}}, m = \sqrt[n]{\sum_{j=1}^n \frac{1}{\sum_{i=1}^n a_{ij}^-}} (2)

当且仅当 $0 \leq k \leq 1 \leq m$ 时,互补的区间判断矩阵符合一致性检验要求。

2)区间数判断矩阵一致性检验。为了检验权重分配的合理性和避免量化后的指标重要程度相互矛盾,需要计算判断矩阵 A 的一致性比例 CR。

若 $0 \leq CR \leq 0.10$, 则通过一致性检验, 否则需要修正判断矩阵直至满足一致性检验要求。首先根据式(3)计算区间判断矩阵的最大特征跟 $\lambda_{\max}$, 然后代入式(4)计算区间判断矩阵一致性比率 CR。

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(\mathbf{A} \mathbf{w}_i)}{n \mathbf{w}_i}$$

(3)

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{\lambda_{\max} - n}{(n-1)RI}$$

(4)

式中: n 为判断矩阵阶数; RI 为随机一致性指标; CI 为一致性指标。

3) 根据式(5)将区间数特征跟法求出的区间权重转化为中心形式。

$$w_i = [y(A_i), r_i]$$

(5)

式中: $y(A_i)$ 表示准则层指标权重的相对重要性估计, $y(A_i) = \frac{1}{2}(kx_i^- + mx_i^+)$; $r_i = y(A_i) - kx_i^-$ 表示准则层指标权重估计的不确定性。一般情况下, 指标权重估计的不确定性 r_i 相比于指标权重估计值 $y(A_i)$ 很小, 认为中心区间形式能够较准确估计区间权重, 即将 w_i 中的 $y(A_i)$ 归一化后来反映准则层指标相对于总目标的权重大小。同理根据过程 1)~3) 可求得每一准则层下各方案层指标权重。

2.2 基于灰色定权聚类的评价模型

灰色聚类法是利用灰色关联矩阵或灰度量白化权函数对评价对象进行分类后, 通过白化权函数对灰色信息进行转化, 并在转化过程中考虑指标的权重, 进而将灰色系统转换成白色系统, 最终完成目标综合评价^[16-18], 因此灰色聚类法是研究不完

全信息系统的有效方法。本文提出的装配式建筑施工可持续水平综合评价模型在灰色聚类法的应用范围之内。但是传统的灰色聚类法无法较好地反映不同评价指标在聚类过程中作用的差异性。基于此, 本文将装配式建筑施工可持续水平划分为 5 个灰类, 采用灰色定权聚类法对各评价指标进行赋权。该方法较传统的三角白化权函数更有效性, 可有效避免传统的灰色聚类法无法较好地反映不同评价指标在聚类过程中作用的差异性这一弊端。

2.2.1 确定灰类并建立灰色白化权函数

根据中国可持续发展评价管理办法及装配式建筑施工特点, 将装配式建筑施工可持续水平分为 5 个等级, 即确定“可持续、较好可持续、一般可持续、较差可持续、不可持续”5 个灰类, 各灰类等级由 1、2、3、4、5 描述, 阈值中心点向量为 $U = (9, 7, 5, 3, 1)$ 。5 个灰类各自对应的可持续性等级及阈值见表 1。根据装配式结构施工内涵和表 2 中评价的灰类和所对应的阈值, 建立装配式建筑施工可持续性等级评价的 5 个灰类所对应的白化权函数及函数图像, 见表 2。

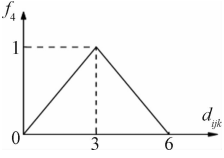
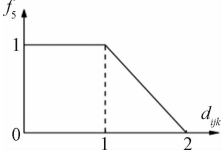
表 1 灰类、阈值和可持续性等级

灰类	阈值	可持续性等级
$e=1$	$[0, 9, \infty]$	可持续
$e=2$	$[0, 7, 14]$	较好可持续
$e=3$	$[0, 5, 10]$	一般可持续
$e=4$	$[0, 3, 6]$	较差可持续
$e=5$	$[0, 1, 2]$	不可持续

表 2 可持续评价白化权函数

灰类	白化权函数	白化权函数图像
$e=1$	$f_1[d_{ijk}] = \begin{cases} \frac{d_{ijk}}{9}, & d_{ijk} \in [0, 9] \\ 1, & d_{ijk} \in [9, \infty] \\ 0, & d_{ijk} \notin [0, \infty] \end{cases}$	
$e=2$	$f_2[d_{ijk}] = \begin{cases} \frac{d_{ijk}}{7}, & d_{ijk} \in [0, 7] \\ \frac{14-d_{ijk}}{7}, & d_{ijk} \in [7, 14] \\ 0, & d_{ijk} \notin [0, 14] \end{cases}$	
$e=3$	$f_3[d_{ijk}] = \begin{cases} \frac{d_{ijk}}{5}, & d_{ijk} \in [0, 5] \\ \frac{10-d_{ijk}}{5}, & d_{ijk} \in [5, 10] \\ 0, & d_{ijk} \notin [0, 10] \end{cases}$	

续表 2

灰类	白化权函数	白化权函数图像
$e=4$	$f_4[d_{ijk}] = \begin{cases} \frac{d_{ijk}}{3}, & d_{ijk} \in [0, 3] \\ \frac{6-d_{ijk}}{3}, & d_{ijk} \in [3, 6] \\ 0, & d_{ijk} \notin [0, 6] \end{cases}$	
$e=5$	$f_5[d_{ijk}] = \begin{cases} 1, & d_{ijk} \in [0, 1] \\ 2-d_{ijk}, & d_{ijk} \in [1, 2] \\ 0, & d_{ijk} \notin [0, 2] \end{cases}$	

2.2.2 灰色聚类法评价步骤

1)构建灰色评价矩阵。结合装配式结构施工实际情况和可持续性要求,参考 p 位相关领域专家对方案层指标 A_{ij} 的赋值结果,构建初始评价矩阵

$$\mathbf{D}_{ij} = [d_{ijk}]_{s \times p} \tag{6}$$

式中, s 为二级评价指标 A_{ij} 的数量。

2)构建灰色聚类权矩阵。用 $X_{ije} = \sum_{k=1}^p f_e[d_{ijk}]$ 表示某一二级评价指标 A_{ij} 属于灰类 e 的聚类系数,则该指标总的聚类系数表示为 $X_{ij} = \sum_{e=1}^5 X_{ije}$ 。根据评价体系中二级评价指标 A_{ij} 在各个灰类的评价系数得到灰色聚类权向量 $r_{ije} = \frac{X_{ije}}{X_{ij}}$,进而通过整理和计算二级评价指标 A_{ij} 的 5 个灰色评价权值,最终构建灰色聚类权矩阵 $\mathbf{R}_i$ 为

$$\mathbf{R}_i = \begin{bmatrix} R_{i1} \\ R_{i2} \\ \vdots \\ R_{ij} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{i11} & r_{i12} & r_{i13} & r_{i14} & r_{i15} \\ r_{i21} & r_{i22} & r_{i23} & r_{i24} & r_{i25} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{ij1} & r_{ij2} & r_{ij3} & r_{ij4} & r_{ij5} \end{bmatrix} \tag{7}$$

3)集成聚类评价矩阵。将 2)中所构建的灰色聚类权矩阵 $\mathbf{R}_i$ 与相应的二级指标权重向量结合得到初始聚类评价矩阵 $\mathbf{M}_i$ 为

$$\mathbf{M}_i = \mathbf{w}_i \mathbf{R}_i \tag{8}$$

式中, $\mathbf{w}_i$ 为方案层指标权重。

按照相同计算方法可得到一级评价指标 A_i 的灰色聚类权矩阵 $\mathbf{M}$ 为

$$\mathbf{M} = [\mathbf{M}_1, \mathbf{M}_2, \dots, \mathbf{M}_p]^T \tag{9}$$

然后对目标层进行聚类分析,计算目标层综合评价向量 $\boldsymbol{\zeta}$,得到装配式建筑可持续性等级评价最终评价结果。

$$\boldsymbol{\zeta} = \mathbf{W} \mathbf{M} = [\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_p] \tag{10}$$

式中, $\mathbf{W}$ 为准则层指标权重。

4)计算可持续性评价综合值。为了减少传统的最大隶属度原则在确定灰类时造成可持续性评价指标信息的丢失而使评价结果失真,将可持续综合评价向量 $\boldsymbol{\zeta}$ 与阈值 $\mathbf{U}$ 相乘,得到装配式结构施工可持续性评价值 η , η 越大表明装配式建筑施工可持续水平越高。

$$\eta = \boldsymbol{\zeta} \times \mathbf{U}^T \tag{11}$$

2.2.3 综合评价等级划分

为了科学度量装配式建筑施工可持续水平,本文首先对所建立的评价指标进行量化处理,然后对装配式结构施工可持续等级进行科学界定,并对每个等级所对应的实际含义进行精确定位。考虑到装配式结构施工过程的复杂性和不确定性,通过参考中国现行的可持续性评价相关规范和已有研究成果,本文设定装配式结构施工可持续等级取值范围为 $(0, 10]$,采用 5 级度量标准,将装配式结构施工可持续水平划分为不可持续、较差可持续、一般可持续、较好可持续和可持续 5 个等级。具体可持续等级划分和含义见表 3。

3 装配式建筑施工实例分析

为验证综合评价模型的适用性和可行性,将第 2 章所构建的基于灰色区间层次法的装配式建筑施工可持续水平综合评价模型应用于西北某小区装配式建筑项目,并从兰州交通大学、参与该项目施工单位、科研单位共邀请了 8 位装配式建筑领域专家对该项目施工可持续水平进行评价。该装配式建筑地上 15 层(层高 2.8 m),地下 1 层(层高 3.6 m),建筑面积 4 055.4 m²,地下室为现浇剪力墙结构,地上主体结构为预制装配式混凝土剪力墙结构,保温外牵墙板、叠合楼板、隔墙、楼梯均是工厂预制结构,整体装配率达到 65%,设计使用年限为 70 年。

表 3 装配式建筑施工可持续性等级及含义

可持续性等级	测度值	等级含义
不可持续	[0,2]	装配式建筑施工可持续性非常差,完全达不到施工可持续性要求,资金成本巨大,对社会和谐及周边环境影响巨大,资源利用率极差
较差可持续	(2,4]	装配式建筑施工可持续性较差,管理水平滞后,资源利用率低,施工项目对周边环境影响较大
一般可持续	(4,6]	装配式建筑施工可持续性一般,生态环境效益、经济效益和项目结构可持续性没有达到较好的协调统一,需要加强组织协调
较好可持续	(6,8]	装配式建筑施工具有较好的可持续性,能够在保证施工安全、生态环保的基础上提高建材的循环利用率,基本达到了经济、环境、资源、社会、技术、管理协调统一
可持续	(8,10]	装配式建筑施工具有很好的可持续性,结构性能、经济环境和组织管理高度协调统一,不仅能保证环境适应性和结构安全耐久性,还能较大节约成本,符合以人为本的发展理念

3.1 基于 IAHP 确定指标权重

运用 IAHP 给评价指标赋权,计算过程以准则层指标社会影响下的 5 个二级指标为例,根据传统 1-9 标度法对 5 个二级指标两两对比构造出的区间判断矩阵见表 4。

表 4 二级指标区间判断矩阵

A_1	A_{11}	A_{12}	A_{13}	A_{14}	A_{15}
A_{11}	[1,1]	[2,4]	[3,4]	[1,2]	[2,3]
A_{12}	[1/4,1/2]	[1,1]	[2,3]	[1/3,1/2]	[1/2,1]
A_{13}	[1/4,1/3]	[1/3,1/2]	[1,1]	[1/4,1/3]	[1/2,1]
A_{14}	[1/2,1]	[2,3]	[3,4]	[1,1]	[2,3]
A_{15}	[1/3,1/2]	[1,2]	[1,2]	[1/3,1/2]	[1,1]

分解得到定值矩阵为

$$A^- = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 1 & 2 \\ 1/4 & 1 & 2 & 1/3 & 1/2 \\ 1/4 & 1/3 & 1 & 1/4 & 1/2 \\ 1/2 & 2 & 3 & 1 & 2 \\ 1/3 & 1 & 1 & 1/3 & 1 \end{bmatrix};$$

$$A^+ = \begin{bmatrix} 1 & 4 & 4 & 2 & 3 \\ 1/2 & 1 & 3 & 1/2 & 1 \\ 1/3 & 1/2 & 1 & 1/3 & 1 \\ 1 & 3 & 4 & 1 & 3 \\ 1/2 & 2 & 2 & 1/2 & 1 \end{bmatrix}。$$

根据特征根计算的基本定理可求得判断矩阵 A^- 和 A^+ 分别对应的最大特征根 $\lambda^- = 4.1967, \lambda^+ = 6.2544$; 则将 λ^- 和 λ^+ 所对应的正分量的特征向量归一化后的结果分别为 $x^- = (0.3476, 0.1284, 0.0849, 0.3026, 0.1363)$; $x^+ = (0.3537, 0.1340, 0.0796, 0.2907, 0.1420)$ 。

然后将 λ^- 和 λ^+ 代入式(4),经计算得 $CR = 0.0470 < 0.10$ 满足一致性要求。按式(2)计算区间特征值中间系数 $k = 0.9584, m = 1.0364$, 均满足一致性检验。然后将 x^-, x^+, k, m 代入式(1)可得准则层指标社会影响下面的 5 个二级指标区间权重

向量 $w_1 = \begin{bmatrix} [0.3331, 0.3666] \\ [0.1233, 0.1389] \\ [0.0813, 0.0825] \\ [0.2900, 0.3013] \\ [0.1306, 0.1471] \end{bmatrix}$, 再根据式(3)将

区间权重转化为中心形式得 $\bar{w}_1 = \begin{bmatrix} 0.3499 & 0.0167 \\ 0.1311 & 0.0078 \\ 0.0819 & 0.0006 \\ 0.2956 & 0.0056 \\ 0.1389 & 0.0083 \end{bmatrix}$, 最后归一化可确定最终的

5 个二级指标权重,即 $w_1 = (0.3508, 0.1314, 0.0822, 0.2964, 0.1392)$, 同理可求出准则层指标权重和其他方案层指标综合权重,见表 5。

表 5 施工可持续水平各指标权重

目标层	准则层	权重	方案层	综合权重
装配式混凝土结构施工可持续水平 A	社会影响 A_1	0.0779	健康与安全 A_{11}	0.3508
			促进新社区的发展 A_{12}	0.1314
			建筑服务质量 A_{13}	0.0822
			供应商关系 A_{14}	0.2964
			周边配套度 A_{15}	0.1392
	环境保护 A_2	0.1762	施工废弃物管理 A_{21}	0.2819
			生态技术 A_{22}	0.4174
			碳排放量 A_{23}	0.1801
			噪声污染控制 A_{24}	0.1205
	资源利用 A_3	0.1114	节能与能源利用 A_{31}	0.3170
			低碳材料利用率 A_{32}	0.4106
			节水与水资源利用 A_{33}	0.1185
			建材循环利用情况 A_{34}	0.1539
	经济目标 A_4	0.0529	直接成本控制 A_{41}	0.1442
			社会成本控制 A_{42}	0.5009
			环境成本控制 A_{43}	0.3549
	施工技术 A_5	0.2530	预制构件安装定位技术 A_{51}	0.1078
			预制构件吊装连接技术 A_{52}	0.0828
			无障碍设计 A_{53}	0.3800
			机械化程度 A_{54}	0.1836
	施工管理 A_6	0.3287	施工技术创新 A_{55}	0.2458
			施工信息化管理程度 A_{61}	0.4760
			现场管理机制 A_{62}	0.3161
			组织调度的合理性 A_{63}	0.2079

3.2 施工可持续水平的灰色聚类分析

8 位专家通过对该项目现场资料审阅和专家自身经验,依据构建的白化权函数及施工可持续等级划分区间对确定的方案层指标量化赋值作为装配式建筑施工可持续水平综合评价的原始数据,赋分值越高,说明该项指标在项目施工中情况越好。将赋分值结果代入式(6)构建初始评价矩阵 $D_1 \sim D_6$ 分别为

$$D_1 = \begin{bmatrix} 6.1 & 4.8 & 5.5 & 6.5 & 6.2 & 5.9 & 6.4 & 5.9 \\ 6.5 & 5.6 & 6.0 & 6.2 & 6.5 & 5.5 & 5.7 & 6.3 \\ 8.5 & 7.9 & 7.5 & 8.2 & 7.4 & 8.0 & 7.6 & 7.9 \\ 5.6 & 5.8 & 6.2 & 5.7 & 6.0 & 6.4 & 5.5 & 6.9 \\ 7.8 & 7.3 & 7.4 & 8.0 & 8.6 & 8.3 & 8.0 & 7.8 \end{bmatrix};$$
$$D_2 = \begin{bmatrix} 8.6 & 7.9 & 8.2 & 7.8 & 7.5 & 9.4 & 9.0 & 8.4 \\ 7.5 & 7.7 & 6.9 & 8.0 & 7.2 & 7.6 & 8.4 & 8.0 \\ 7.5 & 7.8 & 8.5 & 8.1 & 7.7 & 7.6 & 8.3 & 8.5 \\ 8.2 & 7.9 & 8.0 & 7.5 & 7.8 & 8.5 & 8.1 & 7.8 \end{bmatrix};$$
$$D_3 = \begin{bmatrix} 7.4 & 7.6 & 7.9 & 8.0 & 8.0 & 6.8 & 7.5 & 7.1 \\ 8.2 & 8.7 & 8.5 & 8.3 & 8.5 & 9.0 & 8.4 & 8.1 \\ 7.1 & 7.7 & 7.2 & 8.0 & 7.5 & 6.9 & 8.0 & 7.0 \\ 7.0 & 7.5 & 7.8 & 7.8 & 8.5 & 7.3 & 8.0 & 7.8 \end{bmatrix};$$
$$D_4 = \begin{bmatrix} 6.6 & 6.1 & 5.9 & 6.5 & 6.8 & 6.2 & 6.9 & 5.4 \\ 6.5 & 6.8 & 5.4 & 6.8 & 6.5 & 5.6 & 6.5 & 6.8 \\ 8.2 & 8.4 & 9.0 & 8.6 & 8.0 & 8.3 & 9.2 & 8.5 \end{bmatrix};$$
$$D_5 = \begin{bmatrix} 8.2 & 8.0 & 7.8 & 8.7 & 7.4 & 7.9 & 8.0 & 8.5 \\ 8.5 & 8.1 & 7.4 & 7.9 & 8.0 & 8.2 & 7.1 & 7.0 \\ 8.0 & 8.5 & 7.7 & 8.4 & 8.1 & 6.9 & 7.3 & 8.3 \\ 9.2 & 8.6 & 8.1 & 8.3 & 8.4 & 8.1 & 8.0 & 8.5 \\ 6.5 & 7.0 & 6.7 & 7.3 & 7.2 & 7.1 & 6.4 & 6.2 \end{bmatrix};$$
$$D_6 = \begin{bmatrix} 9.4 & 9.0 & 8.5 & 8.2 & 9.0 & 8.6 & 8.9 & 8.4 \\ 8.4 & 8.0 & 7.6 & 7.9 & 8.1 & 8.5 & 7.5 & 8.0 \\ 7.8 & 8.5 & 8.2 & 7.5 & 7.9 & 7.7 & 8.5 & 7.8 \end{bmatrix}。$$

将初始评价矩阵中的赋值代入表 2 中白化权函数,根据式(7)构建二级指标灰色聚类权矩阵,再根据式(8)、式(9)对权矩阵加权得到装配式混凝土结构施工可持续水平综合评价矩阵为

$$M = \begin{bmatrix} 0.308\ 2 & 0.370\ 3 & 0.307\ 1 & 0.011\ 4 & 0.000\ 0 \\ 0.410\ 5 & 0.400\ 1 & 0.189\ 3 & 0.000\ 0 & 0.000\ 0 \\ 0.409\ 8 & 0.400\ 2 & 0.189\ 9 & 0.000\ 0 & 0.000\ 0 \\ 0.356\ 9 & 0.383\ 0 & 0.249\ 6 & 0.010\ 5 & 0.000\ 0 \\ 0.394\ 4 & 0.399\ 9 & 0.205\ 8 & 0.000\ 0 & 0.000\ 0 \\ 0.450\ 7 & 0.390\ 9 & 0.158\ 4 & 0.000\ 0 & 0.000\ 0 \end{bmatrix}。$$

利用式(10)将准则层权重向量与综合评价矩阵合成得到装配式建筑施工可持续水平综合评价

向量 $\zeta = \mathbf{WM} = (0.408\ 8, 0.393\ 8, 0.195\ 8, 0.001\ 7, 0.000\ 0)$, 由式(11)将可持续水平评价向量与阈值 U 集成可得出装配式建筑施工可持续水平综合评价值 $\eta = \zeta \times U^T = 7.419\ 9$, 由装配式建筑施工可持续水平划分区间(表 3)可知,该装配式项目施工可持续水平为较好可持续。进一步将一级指标进行单值化处理可得到 $A_1 \sim A_6$ 可持续评价值: $\eta_1 = 6.944\ 3; \eta_2 = 7.442\ 1; \eta_3 = 7.439\ 9; \eta_4 = 7.172\ 5; \eta_5 = 7.377\ 3; \eta_6 = 7.584\ 5$, 根据表 3 分析可知本项目社会影响可持续水平为一般可持续,环境保护、施工管理、施工技术等均为较好可持续。通过查阅本项目施工组织设计、竣工报告等文件发现,本项目大量使用了绿色低碳建材,施工全过程采用 BIM 技术进行模拟施工,对现场管理费投入较大,采用了先进的中水回收系统,虽然极大提高了直接成本,但是节约了隐形的环境成本和社会成本。但是,本项目在施工期间发生了一起安全事故,造成一名建筑工人受轻伤,另外由于材料供应出现了一起索赔事件,影响了本项目社会可持续水平。评价结果基本符合本项目实际施工情况。

分析各指标权重可知,施工管理和施工技术是影响装配式建筑施工可持续水平的主要因素。由二级指标权重可知,健康与安全、生态技术、低碳材料利用率、社会成本控制、无障碍设计、施工信息化管理程度是影响装配式建筑施工可持续水平的关键因素,在今后装配式项目的施工中,要重点控制这些因素,使之符合可持续施工要求。

4 结论

1)针对装配式建筑施工特点,分析了影响装配式建筑施工可持续水平的因素,建立了装配式建筑施工可持续水平综合评价指标体系,构建了基于灰色区间层次法(IAHP)的装配式建筑施工可持续水平综合评价模型。

2)在施工可持续水平评价过程中,考虑到装配式建筑施工过程复杂、信息量大等特点,运用区间层次分析法(IAHP)确定指标权重,采用区间数代替点值来构造判断矩阵来处理判断的不确定性,从而增强指标赋权的客观性。引入灰色定权聚类法处理可持续综合评价复杂灰色的信息,避免了所建指标体系由于不完全信息造成评价结果不合理的问题。

3)将该评价模型应用于西北某装配式项目,计算得该项目施工可持续评价值为 7.419 9,对应可持续水平为较好可持续,基本符合该项目实际施工情

况,验证了该评价模型的可行性和适用性。方法简单实用,可为装配式建筑可持续施工提供参考。

参考文献

[1] 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.

[2] JIANG Y S,ZHAO D,WANG D D,et al. Sustainable performance of buildings through modular prefabrication in the construction phase; A comparative study[J]. Sustainability,2019,11(20):5658-5658.

[3] 徐雨濛. 我国装配式建筑的可持续性发展研究[D]. 武汉: 武汉工程大学,2015.

[4] 石振武,王金茹. 绿色供应链视角下装配式建筑可持续性评价研究[J]. 工程管理学报,2020,34(2):32-37.

[5] 任梦卓. 基于 SNA 的装配式建筑预制和施工阶段可持续性评价[D]. 北京:北京交通大学,2019.

[6] 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):109-115,122.

[7] CHANG Y,LI X D,MASANET E,et al. Unlocking the green opportunity for prefabricated buildings and construction in China[J]. Resources, Conservation & Recycling,2018,139{5}:259-261.

[8] 郑玉婷. 装配式建筑可持续发展评价研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2018.

[9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑工程绿色施工评价标准:GB/T 50640—2010[S]. 北京:中国计划出版社,2011.

[10] 宗和. 国务院力推建造方式改革:《关于大力发展装配式建筑的指导意见》的政策解读[J]. 建筑设计管理,2016,33(11):43-44,53.

[11] 柏露. 基于云物元理论的装配式建筑施工可持续性评价研究[D]. 扬州:扬州大学,2020.

[12] 任晓宇,周亚萍,郭树荣. 全生命周期视角下装配式建筑可持续发展评价体系研究[J]. 建筑经济,2019,40(9):95-99.

[13] 吴育华,诸为,李新全,等. 区间层次分析法:IAHP[J]. 天津大学学报,1995,4(5):700-705.

[14] 江杰,汤娟,甘雨,等. 基于组合赋权法的建筑结构安全评价[J]. 科学技术与工程,2021,21(17):7278-7285.

[15] 周毅,赵晓刚. 基于区间层次分析法的石油库防火防爆安全评价[J]. 中国安全科学学报,2011,21(12):58-63.

[16] 李健. 装配式混凝土建筑建造质量评价研究[D]. 青岛:青岛理工大学,2018.

[17] 王祯,周溪召. 平面信号交叉口综合服务水平的灰色定权聚类分析[J]. 科技和产业,2013,13(8):121-125.

[18] 朱记伟,王江瑞,刘阳阳. 基于 COWA-灰色定权聚类法的城市河流生态治理项目运营绩效评价[J]. 水资源与水工程学报,2021,32(1):14-21.

Comprehensive Evaluation of Sustainable Level of Prefabricated Building Construction Based on Grey Interval Analytic Hierarchy Process

SI Jinzhong¹, LI Hailian^{1,2}, KUI Fapeng^{1,3}

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;
2. Key Laboratory of Road & Bridge and Underground Engineering of Gansu Province, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;
3. State Grid JinChangPower Supply Company, Jinchang Gansu 737100, China)

Abstract: Based on the requirements for the sustainable development of prefabricated buildings, the construction stage with the most uncertain factors of prefabricated buildings is selected as the research object. From the six dimensions of social impact, environmental protection, resource utilization, economic objectives, construction technology and construction management, 24 detailed indexes are selected to establish a comprehensive evaluation index system for the sustainable level of prefabricated buildings. With the combination of interval analytic hierarchy process and grey clustering method, a comprehensive evaluation model of sustainable level of prefabricated building construction is constructed based on interval analytic hierarchy process-grey weighted clustering method. The evaluation model is used to comprehensively evaluate the construction sustainability level of a prefabricated building in Northwest China. the results show that the construction sustainability level of the assembly project is good sustainable, and the comprehensive evaluation results are basically consistent with the actual construction situation of the project. The feasibility and applicability of the evaluation model are verified.

Keywords: prefabricated building; sustainable evaluation; construction stage; interval analytic hierarchy process(IAHP); grey clustering method