

基于 BIM 的装配式住宅设计碳排放量评价

高培平¹, 于川峰², 包颖颖³, 刘心玥¹

(1. 青岛理工大学建筑设计研究院有限公司, 青岛 266033;
2. 青岛理工大学 建筑与城乡规划学院, 青岛 266033; 3. 江苏上止正工程咨询有限公司, 南京 210016)

摘要: 通过提升预制构件的标准化程度, 在建筑设计阶段减少装配式住宅预制混凝土构件的碳排放量。借助 BIM 技术创建 Revit 模型, 并通过 C# 语言二次开发 Revit, 以迅速计算项目的预制装配率和构件标准化率。通过案例分析发现, 在设计阶段提高预制构件的标准化程度, 能够使项目碳排放量减少 2034.16 kg, 占总预制构件碳排放量的 0.1552%, 同时还能降低预制构件采购造价约 12.85%。可以帮助设计团队控制预制构件的碳排放量, 在改善装配式建筑的环境可持续性方面作出贡献。

关键词: 装配式住宅; 碳排放量; BIM; 预制构件

中图分类号: TU241; TU201.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4602(2025)04-0085-08

Carbon emission assessment of prefabricated residential buildings based on building information modeling

GAO Peiping¹, YU Chuanfeng², BAO Yingying³, LIU Xinyue¹

(1. Qingdao University of Technology Architectural Design and Research Institute Co., Ltd., Qingdao 266033, China;
2. College of Architecture and Urban Planning, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, China;
3. Jiangsu Shangzhizheng Engineering Consulting Co., Ltd., Nanjing 210016, China)

Abstract: The study aims to reduce carbon emissions of prefabricated concrete components used in prefabricated residential buildings during the design phase by enhancing the standardization of prefabricated components. Employing BIM technology to create Revit models and utilizes C# for the secondary development of Revit, enabling rapid calculations of the prefabrication assembly rate and component standardization rate for the project. A case study shows that increasing the standardization of prefabricated components in the design phase can reduce carbon emissions by 2034.16 kg, accounting for 0.1552% of the total carbon emissions from prefabricated components. Additionally, this approach leads to a reduction in the procurement costs of prefabricated components by approximately 12.85%. The findings can assist design teams in managing the carbon emissions of prefabricated components and contribute to enhancing the environmental sustainability of prefabricated buildings.

Key words: prefabricated residential buildings; carbon emission; BIM; prefabricated components

收稿日期: 2024-10-30

基金项目: 国家自然科学基金(52378010)

作者简介: 高培平(1969—), 男, 山东青岛人。硕士, 工程师, 主要从事智慧健康环境、建筑智能化等方面的研究。

E-mail: gaopeiping@qut.edu.cn.

建筑行业作为国家经济的重要支柱,在生产建造过程中会产生大量温室气体。据统计,城市建成区的30%是住宅建设,其中耗用钢材占全国用钢总量的20%,水泥占比17.6%,水资源占比32%^[1]。可见,量化评价装配式住宅的碳排放量水平,是降低建筑行业温室气体排放的重要突破口之一。

装配式住宅采用工业化生产方式来建造住宅,以提高生产效率、降低成本和减少碳排放量^[2]。相较传统住宅,装配式住宅在资源节约、温室气体排放量减少和生态环境保护方面具有显著优势^[3-4]。随着建筑构件场外预制方法的推广,对装配式住宅碳评估的研究越来越多^[5-6]。有研究发现,相较于传统建筑,装配式建筑在每平方米建筑面积上的碳排放量显著减少,其中预制装饰在材料生产阶段的碳排放量减少了29.08%,在整个生命周期内展现出显著的碳排放量优势^[7-8]。HONG等研究了装配式建筑预制构件的生命周期能耗及其对建筑总能耗的影响,发现能源使用的平均增量与预制装配率成线性相关,进一步强调了预制装配率在装配式住宅碳排放量测算中的重要性^[9]。然而,目前装配式建筑的碳排放量评价较少考虑预制构件优化的影响^[10]。

近年来,学者们利用建筑信息模型(Building Information Modeling, BIM)技术,对预制构件的温室气体排放进行了定量分析^[11]。相较于传统设计方法,基于BIM技术的设计方法可以提供更丰富的建筑构件信息^[12]。在建筑设计领域,为了避免影响最终决策,必须在设计阶段优化建筑碳排放量^[13]。单独研究预制构件有助于在设计阶段识别影响其温室气体排放的因素^[10]。因此,设计师可以利用BIM模型在设计阶段快速评估不同的预制构件方案,选择最优解。

现有研究主要通过案例对比的方法分析装配式建筑对环境的影响,忽略了预制装配率和构件标准化率对建筑碳排放量的影响。因此,本研究引入BIM技术来识别建筑方案中预制构件的相关信息,结合建筑的预制装配率、构件标准化率对预制构件碳排放量进行全面评估。研究成果将有助于建筑设计决策和更好地评估预制构件的环境效益。

1 研究方法

1.1 计算边界

在计算碳排放量时,明确系统计算边界至关重要^[1]。以往的研究忽略了设计阶段建筑的预制装配率和标准化率对碳排放量的影响。建筑设计作为建筑全生命周期最开始的阶段,对建筑碳排放量有直接影响^[14-15]。鉴于最终采用的构件类型尚不明确,项目边界需涵盖不同设计阶段的模型精度要求。研究参考BIM中的模型发展等级(Level of Development, LOD)标准定义计算边界。为避免因模型精度不足导致碳排放量计算偏差(如LOD100/LOD200可能遗漏关键构件),本研究采用LOD300的BIM模型作为最终计算边界,确保所有预制构件的材料消耗、生产工艺等数据完整且可追溯。

综合考虑预制构件的直接碳排放量和间接碳排放量,建筑材料的碳排放量占比在96.2%~99%^[14]。因此,可以将建筑材料的碳排放量视为预制构件的总排放量。本研究仅关注预制构件生产过程的碳排放量,主要包括材料消耗和预制模板消耗。计算了预制构件生产过程的温室气体排放,即二氧化碳(CO₂)、甲烷(CH₄)、氧化亚氮(N₂O)、氢氟碳化物(HFCs)、全氟化碳(PFCs)、六氟化硫(SF₆)6种气体^[16],考虑到二氧化碳是温室气体的主要成分,将其他温室气体转换成相同当量的二氧化碳进行计算。

1.2 分类与编码

在项目计算时,将构件作为基本单位。为了区分不同的构件,分类各构件并分别编码,同时准确定义相关属性信息。由于构件之间存在信息交叉,因此需要建立统一的编码体系以确保信息的正确处理与接收。分类标准如表1所示。

在利用BIM构建Autodesk Revit模型时,通过添加共享参数可以在设计阶段有效地区分构件,为后续的生产建造奠定基础。要注意的是,分类方法应科学且实用。

1.3 计算

本研究适用于装配式混凝土结构住宅的碳排放量定量计算。图1展示了在设计阶段预制构件碳排放量评估流程:①在Revit模型中对构件进行编码;②判断构件预制装配率、构件标准化率对碳排放量的影响并相互比较;③在计算边界内定量计算预制构件碳排放量,并结合拟定的流程对预制构件进行评估,以在建筑设计阶段降低预制构件碳排放量。

表 1 预制住宅构件

技术配置选项	构件类型	构件编码
主体结构 and 外围护结构预制构件 Z_1	预制混凝土剪力外墙	JG-HNTGJ-HNTJL
	预制夹心保温外墙板	WWH-JXBWB
	预制双层叠合剪力墙板	JG-HNTGJ-DHJLQ
	预制混凝土剪力内墙	JG-HNTGJ-HNTJL
	预制梁	JG-HNTGJ-HNTL
	预制叠合板	JG-HNTGJ-DHB
	预制楼梯板	JG-HNTGJ-LTB
	预制阳台板	WWH-YTB
	预制空调板	WWH-KTB
	PCF 混凝土外墙挂板	JG-HNTGJ-PCF
	混凝土外挂墙板	WWH-HNTWG
	预制混凝土飘窗墙板	JG-HNTGJ-PCQB
	预制女儿墙	WWH-NEQ
	装配式内外围护构件 Z_2	蒸压轻质加气混凝土外墙板
轻钢龙骨石膏板隔墙		NZ-NFGGJ-SGBGQ
蒸压轻质加气混凝土内墙板		WWH-QZWQB
钢筋陶粒混凝土轻质墙板		NZ-NFGGJ-TLQB
内装建筑部品 Z_3	集成式厨房	NZ-JCSCF
	集成式卫生间	NZ-JCSWS
	装配式吊顶	NZ-JCSWS
	楼地面干式铺装	NZ-LDMXT-LDMGS
	装配式墙板(带饰面)	NZ-ZPSQB
	装配式栏杆	WWH-LG

1.3.1 预制装配率计算

预制装配率是衡量装配式建筑中工业化技术应用程度的重要指标。预制装配率是指单体建筑室外地坪以上的预制构件的体积或面积在该部分总体积或面积的占比,计算见式(1)。

$$Z = \sum_{i=1}^3 \alpha_i Z_i \quad (1)$$

式中: Z 为预制装配率; α_i 为预制装配率计算权重系数(表 2); Z_i 为不同预制装配率, $i=1, 2, 3$ 。

建筑主体结构和外围护结构预制构件的预制装配率计算见式(2):

$$Z_1 = \frac{\sum_i^n V_{pre,i}}{\sum_i^n V_{total,i}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: Z_1 为建筑中主体结构和外围护结构构件的预制装配率; $V_{pre,i}$ 为建筑主体结构和外围

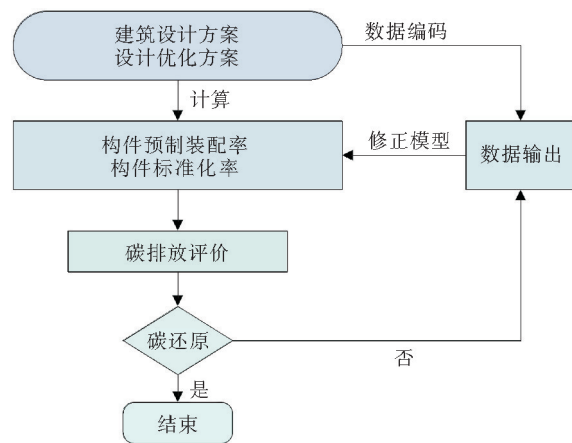


图 1 设计阶段碳排放量评估流程

表 2 权重系数

分类指标	α_1	α_2	α_3
权重	0.5	0.3	0.2

注:数据来源于《江苏省装配式建筑预制装配率计算细则》。

护结构预制混凝土构件体积之和; $V_{\text{total},i}$ 为建筑对应混凝土构件体积之和; i 为预制构件的类型。

建筑装配式内外围护构件的预制装配率计算见式(3):

$$Z_2 = \frac{\sum_i^n A_{\text{pre},i}}{\sum_i^n A_{\text{total},i}} \times 100\% \quad (3)$$

式中: Z_2 为建筑中装配式内外围护构件的预制装配率; $A_{\text{pre},i}$ 为建筑装配式内外围护构件表面积之和; $A_{\text{total},i}$ 为建筑全部内外围护构件表面积之和。

建筑内部工业化设备的预制装配率计算见式(4):

$$Z_3 = \frac{\sum_i^n S_{\text{pre},i}}{\sum_i^n S_{\text{total},i}} \times 100\% \quad (4)$$

式中: Z_3 为建筑中内部工业化设备的预制装配率; $S_{\text{pre},i}$ 为建筑内部工业化设备投影面积或表面积之和; $S_{\text{total},i}$ 为建筑全部设备投影面积或表面积之和。

1.3.2 构件标准化率计算

本研究针对装配式建筑构件引入“标准化率”的概念,计算见式(5)。通过控制预制构件标准化率数值,定量分析预制构件的碳排放量。研究目的是在建筑设计阶段通过控制构件种类和数量,实现预制构件碳排放量最优化。

$$N = \sum_i^n \frac{N_{\text{std},i} / K_{\text{hole},i} \times 100}{C_{\text{type},i}} \times 100\% \quad (5)$$

式中: N 为单体建筑标准化率; $N_{\text{std},i}$ 为相同分类、编码、尺寸构件的数量; $K_{\text{hole},i}$ 为相同分类、编码构件开孔的数量; $C_{\text{type},i}$ 为预制构件开孔的种类。

通过构件标准化率的自动计算,能够量化地识别当前设计方案对后续生产的影响,并以此为依据进行标准化的设计优化工作。根据《全国统一建筑工程基础定额》(GJD-101-95),大钢模板周转次数为 200 次,组合式钢模板周转次数为 50~120 次^[17]。鉴于钢模板周转次数有增加的趋势,本研究将钢模板周转次数均设定为 100 次。

1.3.3 碳排放量计算

我国普遍采用碳排放量定量计算的方法,因此本研究沿用此方法。根据 2019 年颁布的《建筑碳排放量计算标准》(GB/T 51366—2019),预制构件的碳排放量计算仅需考虑建筑材料的碳排放量,因此,本研究专注于构件材料的碳排放量。部分建筑材料碳排放量因子如表 3 所示。

为保证计算的准确性,选择合理的碳排放量因子非常重要。碳排放量因子的确定通常依据以下 4 个方面^[12,15,17]:①参考国家、省和行业部门的数据库;②参考国内外数据库与已有研究成果;③直接测量;④不采用无法找到或者无法保证质量的数据,并在计算过程中加以说明。

表 3 部分建筑材料碳排放量因子

材料类别	碳排放量因子数值	材料类别	碳排放量因子数值
普通硅酸盐水泥/($\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$)	735.000	碎石($d=10\sim30 \text{ mm}$)/($\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$)	2.180
C30 混凝土/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	295.000	页岩石/($\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$)	5.080
C50 混凝土/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	385.000	黏土/($\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$)	2.690
石灰生产(市场平均)/($\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$)	1190.000	普通碳钢(市场平均)/($\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$)	2050.000
消石灰(熟石灰、氢氧化钙)/($\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$)	747.000	聚氯乙烯(市场平均)/($\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$)	7300.000
天然石膏/($\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$)	32.800	自来水/($\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$)	0.168
砂($f=1.6\sim3.0$)/($\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$)	2.510		

注:①温室气体碳排放量因子来自《建筑碳排放量计算标准》(GB/T 51366—2019);②文中碳排放量因子单位均为二氧化碳当量;③ d 为碎石的粒径范围;④ f 为砂的细度模数。

1.3.4 工程造价计算

在建筑工程中,材料费用在工程造价中占据较大比例,对工程造价的评估至关重要^[18]。因此,本研究利用方案优化前后预制构件采购价格的变化状况估算工程造价的变化趋势。数据采用 2023 年度山东省预制构件一般市场价格,如表 4 所示。

2 案例研究

本研究采用上述方法对我国南京市某栋装配式住宅进行评估。住宅共 26 层,总建筑面积 11 995.1 m²。标准层轴测如图 2 所示。据统计共 3198 个预制构件,项目预制装配率为 24.29%。预制构件的各项参数及碳排放量计算如表 5 所示。

3 结果和讨论

本文以预制构件为研究对象,以优化预制构件碳排放量为研究目标,为了更全面地分析预制构件优化的结果,详细对比了建筑设计方案(Scheme of Architecture

表 4 山东省预制构件市场价格

构件编码	价格/(元·m ⁻³)
WWH-YTB	2000
WWH-HNTWG	2200
JG-HNTDJ-HNTJL	2300
JG-HNTGJ-LTB	2000
JG-HNTGJ-DHB	2100

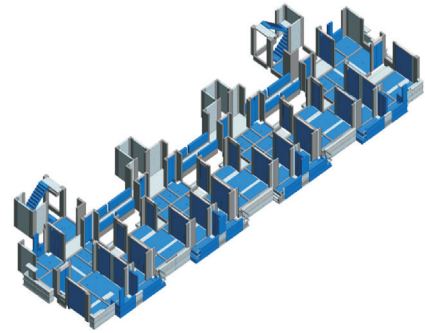


图 2 标准层轴测

表 5 案例预制构件计算结果

构件编码	规格/mm	数量/个	装配占比/%	采购价格/元	碳排放量/kg
WWH-YTB	1000×200×2700	182	21.21	196 560.00	67 008.73
	1200×200×2700	52	6.06	67 392.00	2 3041.05
	5400×150×60	52	6.06	5 054.40	1 836.52
	5200×150×60	156	18.19	14 601.60	5 167.52
	1200×150×1200	208	24.24	89 856.00	30 729.18
	2800×150×1200	208	24.24	209 664.00	71 561.48
WWH-HNTWG	2900×110×2900	52	25.00	105 831.44	33 169.27
	3200×110×2900	52	25.00	116 779.52	36 594.16
	1450×110×2900	104	50.00	105 831.44	33 231.26
JG-HNTDJ-HNTJL	2000×300×2900	52	6.67	208 104.00	61 466.34
	1850×300×2900	208	26.67	769 984.80	226 677.94
	2600×300×2900	52	6.67	270 535.20	79 855.52
	1300×200×2900	104	13.33	180 356.80	53 593.95
	1100×200×2900	182	23.33	267 066.80	78 722.80
	1850×200×2900	156	20.00	384 992.40	113 553.47
JG-HNTGJ-LTB	2600×200×2900	26	3.33	90 178.40	27 213.84
	3000×1200×1600	104	100.00	599.04	53 344.69
JG-HNTGJ-DHB	2900×1650×60	208	16.67	125 405.28	41 561.31
	2900×1250×60	208	16.67	95 004.00	31 510.43
	2900×2900×60	208	16.67	220 409.28	72 970.30
	3250×2800×60	208	16.67	238 492.80	78 949.26
	1900×1400×60	208	16.67	69 713.28	39 531.47
	2800×1750×60	208	16.67	128 419.20	49 385.92
总值	—	—	—	3 960 831.68	1 310 676.41

Design, SAD)和建筑设计的优化方案(Optimization Scheme of Architecture Design, OSAD)的预制构件碳排放量数据,在预制装配率不变的情况下定量分析预制构件碳排放量与优化设计之间的关系。

3.1 预制构件碳排放量分析

表6列出了建筑设计优化方案的预制构件计算结果。从图3可以看出,优化方案的WWH-HNTWG预制构件比原设计方案碳排放量降低0.43%,共计减少碳排放量439.60 kg。JG-HNTDJ-HNTJL预制构件比原方案碳排放量降低10.01%,共计减少碳排放量777.36 kg。JG-HNTGJ-DHB预制构件比原设计方案碳排放量降低0.26%,共计减少碳排放量817.19 kg。

表6 优化方案的预制构件计算结果

构件编码	规格/mm	数量/个	装配占比/%	采购价格/元	碳排放量/kg
WWH-HNTWG	1450×110×2900	208	80.00	211 662.88	65 960.93
	3200×110×2900	52	20.00	116 779.52	36 594.16
JG-HNTDJ-HNTJL	2000×300×2900	104	12.12	416 208.00	122 932.68
	1850×300×2900	208	24.24	769 984.80	226 677.94
	600×300×2900	52	6.06	62 431.20	18 558.26
	1300×200×2900	156	18.18	270 535.20	79 861.35
	1100×200×2900	182	21.21	267 066.80	78 722.80
	1850×200×2900	156	18.18	384 992.40	113 553.47
JG-HNTGJ-DHB	2900×1650×60	416	24.90	250 810.56	82 604.60
	2900×1250×60	416	24.90	190 008.00	62 620.20
	3250×1400×60	632	37.80	362 325.60	119 064.90
	3250×1750×60	208	12.40	149 058.00	49 385.90
总值	—	—	—	3 451 862.96	1 308 642.25

本研究通过预制构件的优化设计,得到了具有更低碳排放量的设计方案。

3.2 工程造价分析

对比表5、表6可以看出,研究提出的建筑优化方案在显著减少预制构件碳排放量的同时,也显著降低了方案的工程造价。虽然WWH-HNTWG与JG-HNTDJ-HNTJL构件优化前后造价不变,但利用JG-HNTGJ-DHB构件代替WWH-YTB与JG-HNTGJ-LTB构件的优化方式使预制构件采购价格减少了508 968.72元,降低了12.85%。研究表明,高效的预制构件在降低建筑工程造价方面具有一定优势。

3.3 敏感性分析

装配式住宅的碳排放量可能受到预制构件的装配率、标准化率和计算边界的影响。尽管存在一定偏差,但定量计算不同设计方案中预制构件的碳排放量是可行的。在计算过程中,计算边界和装配建筑的预制装配率始终保持不变。本研究通过对预制构件的标准化率进行敏感性分析,以评估其对降低碳排放量的有效性。

基于此,本文分析了WWH-HNTWG、JG-HNTDJ-HNTJL、JG-HNTDJ-DHB 3种预制构件的碳排放量。如图4所示,WWH-HNTWG构件的标准化率上升了16.67%。JG-HNTDJ-HNTJL构件的标准化率上升了2.38%。JG-HNTGJ-DHB构件的标准化率上升了3.33%。

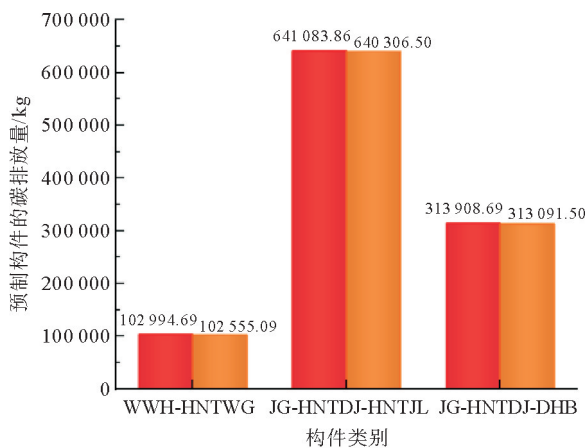


图3 预制构件碳排放量
■ SAD; ■ OSAD

图5表明,通过建筑优化设计,可以显著减少预制构件的碳排放量。优化后的碳排放量减少了2034.16 kg, 占有预制构件碳排放量的0.16%。这证实了高效的预制构件设计在预制装配式住宅中具有重要地位。研究表明,为减少装配式住宅的碳排放量,可以在设计阶段提高预制构件的标准化率。考虑到这些设计因素,设计师可以通过优化预制构件的设计方案实现低碳设计。

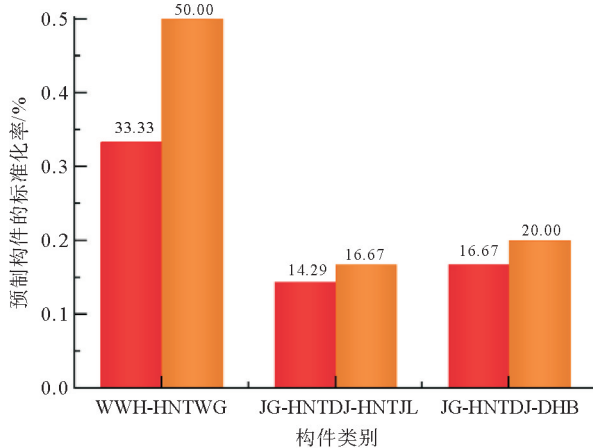


图4 预制构件标准化率
■ SAD; ■ OSAD

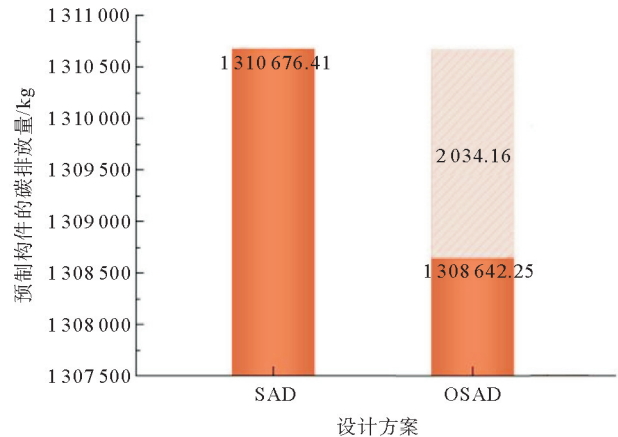


图5 设计方案碳排放量对比
■ 差值; ■ 碳排放量

本研究进一步进行了预制构件碳排放量的敏感性分析,旨在评估标准化率对预制构件碳排放量的影响,以便对设计方案进行更为科学的评估。

在信息技术快速发展的背景下,跨学科研究受到越来越多的关注,BIM技术对装配式住宅的研究得到了进一步拓展。在建筑工业化的背景下,本研究旨在弥补当前预制构件研究优化设计上的不足。

4 结论

近年来,学术界和建筑界一直强调采取必要的措施控制建筑活动排放的二氧化碳量。BIM技术为装配式住宅在设计阶段通过优化预制构件来降低碳排放量提供了可能。因此,作为初步探索,本文介绍了在建筑设计阶段如何降低预制构件的碳排放量。在研究方法方面,提出了预制构件的装配率和标准化率的计算方法。本研究以工程实例为基础,对装配式建筑预制构件碳排放量进行了研究,案例研究得出结论如下:

- 1) 本研究针对装配式住宅预制构件的碳排放量进行了定量分析,提出了一个简化的碳排放量计算模型。
- 2) 装配式建筑的优点已被广泛认可,但其预制构件的标准化是否能有效减少二氧化碳排放量仍存在疑问。本研究通过计算项目的预制构件的装配率和标准化率,评估了提高预制构件标准化率的有效性。
- 3) 研究发现,优化预制构件的标准化率可以显著降低构件的碳排放量,为设计阶段的决策提供了依据。通过构件预制装配率和标准化率评价装配式住宅的方法具有普适性,可以推广到不同地区的装配式住宅项目。

参考文献(References):

- [1] 刘洪娥,彭雄,刘美霞,等. 预制装配与现浇模式住宅建造节能减排评测比较[J]. 工程建设与设计,2016(4):17-20.
LIU Honge, PENG Xiong, LIU Meixia, et al. Comparison of energy-saving and emission reduction evaluation between prefabricated assembly and cast-in-place residential construction models[J]. Engineering Construction and Design, 2016 (4): 17-20.
- [2] 王载. 高层结构全生命周期碳排放评估及低碳设计方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2021.
WANG Zai. Research on carbon emission assessment and low carbon design methods for the full life cycle of high rise structures[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.

- [3] 魏星. 混凝土装配式住宅建筑工程施工技术的优势[J]. 居舍, 2020(32): 73-74.
WEI Xing. Advantages of construction technology for concrete prefabricated residential buildings[J]. Jushe, 2020(32): 73-74.
- [4] 郑西跃. 混凝土装配式住宅建筑施工技术优势探讨[J]. 居舍, 2020(21): 23-24.
ZHENG Xiyue. Discussion on the advantages of construction technology for concrete prefabricated residential buildings[J]. Jushe, 2020(21): 23-24.
- [5] 李文, 王中有, 唐璠, 等. 基于工业化生产的装配式建筑应用与发展对策[J]. 江西建材, 2021(4): 4-7.
LI Wen, WANG Zhongyou, TANG Fan, et al. Countermeasure on application & development of prefabricated building based on industrialized production[J]. Jiangxi Building Materials, 2021(4): 4-7.
- [6] 张艳敏. 装配式建筑全生命周期碳足迹与碳汇固碳评估研究[D]. 西安: 长安大学, 2023.
ZHANG Yanmin. Research on carbon footprint and carbon sequestration assessment of prefabricated buildings throughout their life cycle[D]. Xi'an: Chang'an University, 2023.
- [7] BIAN J, LIU C G, ZUO C Y, et al. Reducing carbon emissions from prefabricated decoration: A case study of residential buildings in China[J]. Buildings, 2024, 14(2): 550.
- [8] ZHOU F, NING Y B, GUO X R, et al. Analyze differences in carbon emissions from traditional and prefabricated buildings combining the life cycle[J]. Buildings, 2023, 13(4): 874.
- [9] HONG J, SHEN G Q, MAO C, et al. Life-cycle energy analysis of prefabricated building components: An input-output-based hybrid model[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 112: 2198-2207.
- [10] 丁晓欣, 徐熙震, 王群. 基于 SEM 的装配式建筑预制构件碳减排的影响因素研究[J]. 建筑节能(中英文), 2023, 51(8): 123-128.
DING Xiaoxin, XU Xizhen, WANG Qun. Factors influencing the carbon emission reductions of prefabricated building components based on SEM model[J]. Building Energy Efficiency, 2023, 51(8): 123-128.
- [11] YANG X I, HU M M, WU J B, et al. Building-information-modeling enabled life cycle assessment: A case study on carbon footprint accounting for a residential building in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 183: 729-743.
- [12] ELEFThERiADiS S, MUMOVIC D, GREENING P. Life cycle energy efficiency in building structures: A review of current developments and future outlooks based on BIM capabilities[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 67: 811-825.
- [13] 刘琳钰. 高层住宅设计阶段基于建筑碳排放测算的优化策略[D]. 汕头: 汕头大学, 2020.
LIU Linyu. The optimization strategy for the design stage of a high-rise residence based on the measurement of building carbon emission[D]. Shantou: Shantou University, 2020.
- [14] 曹静, 沈志明, 王晓玉, 等. 混凝土装配式与现浇住宅建筑碳排放分析与研究[J]. 建设科技, 2020(Z1): 69-73.
CAO Jing, SHENG Zhiming, WANG Xiaoyu, et al. Research on carbon emission of concrete prefabricated and cast-in-place residential buildings[J]. Construction Science and Technology, 2020(Z1): 69-73.
- [15] 卢辉. 装配式建筑预制构件生产阶段碳排放评价指标分析[J]. 陶瓷, 2022(8): 152-154.
LU Hui. Carbon emission evaluation index analysis of prefabricated building components during production stage[J]. Ceramics, 2022(8): 152-154.
- [16] LIU G, YANG H, FU Y, et al. Cyber-physical system-based real-time monitoring and visualization of greenhouse gas emissions of prefabricated construction[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 246: 119059.
- [17] GUO Z, WANG Q, ZHAO N, et al. Carbon emissions from buildings based on a life cycle analysis: Carbon reduction measures and effects of green building standards in China[J]. Low-Carbon Materials and Green Construction, 2023, 1(1): 9.
- [18] 赵冰丽. 材料价格波动对建筑工程造价的影响及控制措施[J]. 建材发展导向, 2024, 22(21): 55-57.
ZHAO Bingli. The impact of material price fluctuation on the cost of construction projects and its control measures[J]. Development Guide to Building Materials, 2024, 22(21): 55-57.

(责任编辑 张晓靖; 英文校审 蒋金明)