



装配式混凝土框架结构的构件参数对碳排放量的影响

程小春¹,傅 军²,徐金涛²,陈俊宏²

(1. 浙江广厦建设职业技术大学建工学院,浙江东阳 322100;2. 浙江理工大学建筑工程学院,杭州 310018)

摘 要:为减少建筑碳排放量,装配式混凝土框架结构的构件设计需要通过分析参数变化对碳排放的影响来确定最优方案。应用正交设计法确定试验构件数量,并通过 BIM 建模和工程量统计,分析预制率、混凝土强度、配筋率、梁板柱尺寸等对构件碳排放量的影响;采用层次分析法(Analytic hierarchy process, AHP)方法确定了参数权重,并给出了工程设计优化建议。结果表明:根据各设计参数的敏感性比较结果,参数影响性排序为混凝土强度、板厚、柱高、预制率、配筋率、尺寸。该研究可为双碳时代背景下装配式混凝土框架结构设计提供工程决策参考。

关键词:碳排放;装配式混凝土结构;构件设计;敏感性分析;层次分析法

中图分类号: TU741;X322

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851(2023)05-0404-11

引文格式:程小春,傅军,徐金涛,等. 装配式混凝土框架结构的构件参数对碳排放量的影响[J]. 浙江理工大学学报(自然科学),2023,49(3):404-414.

Reference Format: CHENG Xiaochun, FU Jun, XU jintao, et al. The influence of component parameters of prefabricated concrete frame structural elements on carbon emission[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University, 2023, 49(3):404-414.

The influence of component parameters of prefabricated concrete frame structural elements on carbon emission

CHENG Xiaochun¹, FU Jun², XU Jintao², CHEN Junhong²

(1. School of Construction Engineering, Zhejiang Guangsha Vocational and Technical University of Construction, Dongyang 322100, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: In order to reduce the carbon footprint of buildings, the optimal solution to the component design of prefabricated concrete frame structures needs to be determined by analyzing the effects of parameter variations. The orthogonal design method was applied to determine the number of test elements, and the influence of prefabrication rate, concrete strength, reinforcement rate and beam-slab-column dimensions on the carbon emissions of the elements was analyzed through BIM modelling and volume statistics; the analytic hierarchy process (AHP) was used to determine the parameter weights and give suggestions for engineering design optimization. The results show that, based on the results of the sensitivity comparison of various design parameters, the parameters are ranked in order of influence as concrete strength, slab thickness, column height, prefabrication rate, reinforcement rate and dimensions. The study can provide reference for engineering decisions on the design of assembled concrete frame structures in the context of the dual carbon era.

Key words: carbon emission; prefabricated concrete structure; component design; sensitivity analysis; AHP

收稿日期: 2022-12-30 网络出版日期: 2023-04-10

基金项目: 浙江省基础公益研究计划项目(LGF18E080016);浙江省教育厅科研项目(Y202147759);教育部产学研合作协同育人项目(220603214273531)

作者简介: 程小春(1985—),女,安徽安庆人,工程师,硕士,主要从事工程管理、施工技术方面的研究。

通信作者: 傅 军, E-mail: fujun@zstu.edu.cn

0 引言

装配式建筑可实现建筑工业化生产,减少现场湿作业施工,已成为绿色建筑的典型代表之一。国务院于2021年印发了《2030年前碳达峰行动方案》^[1],明确要推动装配式建筑发展和建筑低碳转型,确保达成有效控制建筑碳排放、全面执行绿色建筑的目标。

装配式建筑碳足迹分布和碳排放相关问题已成为学界研究热点。赵愈等^[2]从影响因素的重要程度和各因素之间的关系出发,采用DEMATEL-ISM方法分析了23个装配式建筑碳排放影响因素的重要程度和各因素的相互关系;李萌萌等^[3]针对装配式建筑物化阶段的碳排放,利用碳排放系数法对结构方程与装配式建筑项目概况、建材消耗、运输与仓储等6个方面的关系进行了研究,得到了各因素对物化阶段碳排放的影响关系;李静等^[4]针对装配率变化对碳足迹的影响问题,建立了建筑物化碳足迹量化评价模型,分析了不同预制率对碳足迹的影响;张俊强^[5]从数学建模的视角出发,采用DEA(Data envelopment analysis)算法模拟了建筑物化阶段的CO₂减排量;高鑫等^[6]利用排放系数法计算装配式建筑各个阶段的碳足迹值,并提出了减排措施;孙少楠等^[7]研究了寒冷地区被动式构造敏感因子对建筑能耗的影响,并采用正交实验设计方法得到了节能最优水平组合;Bonamente等^[8]根据意大利装配式建筑部门的碳排放和能源足迹数据,对建筑生命周期不同阶段的温室气体排放和能源消耗进行了参数估计,并提出了减少建筑行业碳排放的措施。Fortuna等^[9]、Li等^[10]从施工工艺的角度出发,对传统施工工艺和装配式施工工艺进行对比,发现装配式产生的碳排放较低。Atmaca^[11]、Cabeza等^[12]从全生命周期的视角出发,对集装箱和装配式房屋进行碳排放量对比分析,发现全周期的装配式房屋碳排放量较小。相关研究大多集中在装配式建筑全生命周期中各物化阶段相关碳排放影响因素的分析,而有关结构构件参数对碳排放的影响研究较少。

本文基于结构构件设计的参数敏感性分析,对装配式混凝土框架物化阶段的材料消耗量的碳排放进行比较分析,研究预制率、混凝土强度、配筋率、梁板柱尺寸等对构件碳排放量的影响;采用层次分析法(Analytic hierarchy process, AHP)方法确定了参数权重,进而明确各影响参数的极差情况和影响

程度,据此给出工程设计优化策略。本文可为工程设计中参数的多因素分析提供定量分析方法,从而在方案阶段确定合理的建筑材料降碳措施,为双碳时代背景下装配式混凝土框架结构设计提供工程决策参考。

1 技术路线及模型构建

本文从工程设计的视角出发,分析装配式框架物化阶段材料消耗量的碳足迹,统计主要构件设计参数变化导致的材料消耗量和碳排放量,进而对影响参数的敏感性进行分析和排序。

1.1 技术路线

本文采用的技术路线如图1所示。首先采用正交设计法,设计一个关于材料强度、几何尺寸、预制率等参数的框架结构构件简单模型,建立合理的梁板柱构件(上部结构)BIM模型;然后统计相应的工程量,根据碳排放因子得出碳排放量,观察构件设计参数的变化趋势并确定敏感性;最后采用层次分析法确定各个设计参数影响权重。

1.2 装配式混凝土框架结构的构件参数正交设计

在工程实践中,影响建筑碳排放的设计参数很多。通过工程实践和咨询行业工程师总结发现,预制率、混凝土强度、配筋率、梁板柱尺寸、板厚都是影响碳排放的重要参数,因此本文选用上述6个参数作为变化参数,各设计参数的取值选择实际工程中运用较多的数值。

采用正交设计法设计了4因子3水平、2因子5水平共25组试件 $L_{25}(3^4 \times 5^2)$ 的混合正交表,其中:尺寸($L \times B$)分别为3.6 m \times 6.0 m、5.1 m \times 5.1 m、6.6 m \times 6.6 m三档;柱高 H 分别为3.0、4.2、5.1 m三档;板厚 h 分别为80、100、120、150、180 mm五档;配筋率分别为0.3%、1.2%、2.5%三档;强度等级分别为C20、C30、C40三档。考虑三种四档装配式施工方案:方案一采取全预制装配式的施工分案,预制率为100%;方案二采取传统现场浇筑施工方案,预制率为0;方案三采取部分现场浇筑部分预制装配式的施工方案,预制率分别为25%和75%。由此共得到25组模型,构件混合正交见表1。

1.3 BIM模型构建

采用BIM建立简单的混凝土模型,如图2所示。装配式混凝土框架由板、梁、柱构成,其中: L 为模型板长, B 为模型板宽, H 为模型柱高, h 为模型板厚。

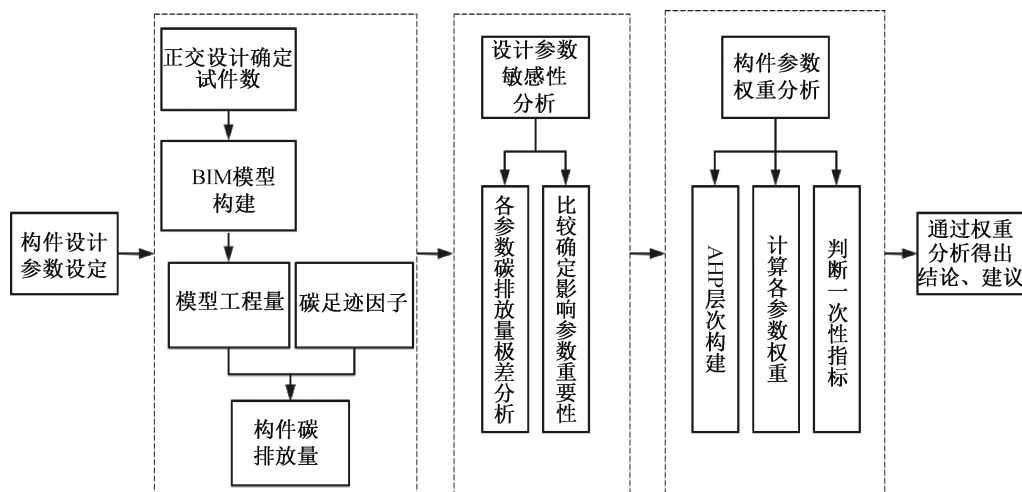


图1 技术路线示意图

表1 构件混合正交表

模型名称	尺寸 ($L \times B$)/m ²	柱高 H /m	板厚 h /mm	配筋率/%	强度等级	预制率/%
KJ1	3.6×6.0	3.0	80	0.3	c20	0
KJ2	3.6×6.0	3.0	100	0.3	c30	50
KJ3	3.6×6.0	3.0	120	1.2	c40	100
KJ4	3.6×6.0	5.1	150	0.3	c20	25
KJ5	3.6×6.0	4.2	180	2.5	c20	75
KJ6	5.1×5.1	5.1	180	1.2	c20	100
KJ7	5.1×5.1	4.2	80	1.2	c30	25
KJ8	5.1×5.1	3.0	100	1.2	c40	75
KJ9	5.1×5.1	4.2	120	2.5	c30	0
KJ10	5.1×5.1	4.2	150	0.3	c30	50
KJ11	6.6×6.6	5.1	150	1.2	c20	75
KJ12	6.6×6.6	5.1	180	2.5	c30	0
KJ13	6.6×6.6	5.1	80	2.5	c40	50
KJ14	6.6×6.6	4.2	100	0.3	c40	100
KJ15	6.6×6.6	3.0	120	2.5	c40	25
KJ16	3.6×6.0	4.2	120	0.3	c20	50
KJ17	5.1×5.1	3.0	150	2.5	c30	100
KJ18	6.6×6.6	3.0	180	0.3	c40	25
KJ19	3.6×6.0	4.2	80	1.2	c20	75
KJ20	5.1×5.1	5.1	100	1.2	c30	0
KJ21	6.6×6.6	5.1	100	2.5	c20	25
KJ22	3.6×6.0	5.1	120	0.3	c30	75
KJ23	5.1×5.1	4.2	150	2.5	c40	0
KJ24	6.6×6.6	3.0	180	1.2	c30	50
KJ25	3.6×6.0	5.1	80	2.5	c30	100

2 碳排放量计算与结果分析

本文根据现有文献统计材料碳足迹因子,确定碳排放量计算模型,采用 PKPM-BIM 软件建模统计各个模型的工程量和相应的碳排放量。

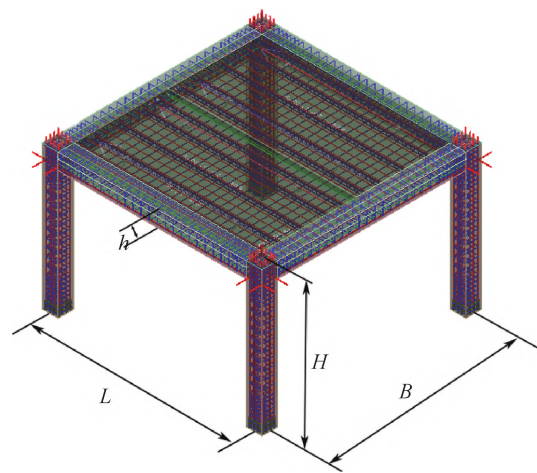


图2 装配式混凝土框架结构模型示意图

2.1 碳足迹分类表

各类材料的碳足迹数据库是碳排放计算的前提条件。本文根据 IPCC 碳足迹数据库、LCA 软件 Ecoinvent v2.0 内置的材料碳足迹因子数据库^[3]以及 GB/T 51366—2019《建筑碳排放计算标准规范》建筑碳排放计算标准中的相关数据,得到各材料的碳足迹因子,如表 2 所示。

表2 碳足迹因子数据

材料名称	碳足迹因子	单位
预制混凝土 C20	230 ^b	kgCO _{2e} /m ³
预制混凝土 C30	270 ^b	kgCO _{2e} /m ³
预制混凝土 C40	310 ^b	kgCO _{2e} /m ³
钢材	1450 ^a	kgCO _{2e} /t
现浇混凝土 C20	258 ^c	kgCO _{2e} /m ³
现浇混凝土 C30	295 ^c	kgCO _{2e} /m ³
现浇混凝土 C40	337 ^c	kgCO _{2e} /m ³

注:a表示数据来源于 LCI 软件 Ecoinvent v2.0,b表示数据来源于 IPCC 数据库,c表示数据来源于 GB/T 51366—2019《建筑碳排放计算标准规范》。

2.2 碳排放量计算模型

装配式混凝土框架结构相应碳排放量统计 C_M 计算公式为:

$$C_M = \sum_{i=1}^n M_i \times CE_i \quad (1)$$

其中: M_i 为第 i 种材料的用量, CE_i 代表第 i ($i=1, \dots, n$) 种材料的碳足迹因子, n 表示材料总数。

2.3 工程量统计及碳排放量计算

采用 PKPM-BIM 软件建模, 统计各个模型的工程量和相应的碳排放量, 结果见表 3。

表 3 工程量及碳排放量统计

模型	钢筋用量/kg	混凝土用量/m ³	碳排放量/kgCO _{2e}
KJ1	552.63	6.38	2447.14
KJ2	659.15	6.70	2847.39
KJ3	1153.82	7.01	3847.01
KJ4	885.11	10.01	3795.42
KJ5	1091.94	9.40	3812.23
KJ6	1657.91	11.34	5011.75
KJ7	1521.98	8.27	4594.61
KJ8	1345.49	7.23	4240.11
KJ9	2361.43	9.06	6098.19
KJ10	910.04	9.66	4048.93
KJ11	2459.55	14.38	6974.88
KJ12	3565.76	15.45	9728.46
KJ13	3565.76	11.89	9015.87
KJ14	1677.98	11.52	6004.27
KJ15	2933.30	10.79	7817.61
KJ16	799.40	8.45	3221.61
KJ17	2002.06	8.22	5122.79
KJ18	1591.15	12.93	6577.70
KJ19	1330.32	7.82	3782.11
KJ20	1657.91	8.53	4920.02
KJ21	3565.76	12.60	8332.96
KJ22	1077.03	9.53	4195.13
KJ23	2361.43	9.66	6680.00
KJ24	2147.13	12.93	6766.40
KJ25	2400.32	8.90	5883.25

3 设计参数敏感性分析

设计参数敏感性分析是研究装配式混凝土框架结构各构件对其整体碳排放量影响的重要组成部分, 探究各构件设计参数变化对碳排放量的影响情况。本文对构件的预制率、混凝土强度、柱高、配筋率、板厚、构件尺寸等对装配式混凝土框架结构碳排放量的影响逐一进行分析。

3.1 预制率对装配式混凝土框架结构碳排放量的影响

统计不同构件相同混凝土预制率的各个碳排放量极差可以了解不同预制率下构件整体碳排放量的稳定情况, 结果如图 3 所示。从图 3 可以看出: 当预制率为 0% 时, 改变其构件的长宽尺寸、柱高、配筋率、板厚、混凝土强度, 碳排放量极差为 7281.32 kgCO_{2e}。当预制率为 25% 时, 改变其构件的长宽尺寸、柱高、配筋率、板厚、混凝土强度, 碳排放量极差为 4537.54 kgCO_{2e}。当预制率为 50% 时, 改变其构件的长宽尺寸、柱高、配筋率、板厚、混凝土强度, 碳排放量极差为 6168.48 kgCO_{2e}。当预制率为 75% 时, 改变其构件的长宽尺寸、柱高、配筋率、板厚、混凝土强度, 碳排放量极差为 3192.77 kgCO_{2e}。当预制率为 100% 时, 改变其构件的长宽尺寸、柱高、配筋率、板厚、混凝土强度, 碳排放量极差为 2157.26 kgCO_{2e}。当混凝土框架结构预制率达到 100% 时, 其碳排放量极差最小, 能更好地控制整体碳排放量; 当混凝土框架结构预制率为 0% 时, 其碳排放量极差最大, 整体碳排放量较不稳定。

3.2 混凝土强度对装配式混凝土框架结构碳排放量的影响

统计不同构件相同混凝土强度下的各个碳排放量的极差, 结果如图 4 所示。从图 4 可以看出: 当构件使用 C20 强度混凝土时, 改变其构件的长宽尺寸、柱高、配筋率、板厚、预制率, 碳排放量极差为 5885.82 kgCO_{2e}。当构件使用 C30 强度混凝土时, 改变其构件的长宽尺寸、柱高、配筋率、板厚、预制率, 碳排放量极差为 6881.07 kgCO_{2e}。当构件使用 C40 强度混凝土时, 改变其构件的长宽尺寸、柱高、配筋率、板厚、预制率, 碳排放量极差为 5168.86 kgCO_{2e}。由此可以看出, 采用 C40 强度等级混凝土的构件, 其碳排放量极差最小, 碳排放量较为平稳。

3.3 柱高对装配式混凝土框架结构碳排放量的影响

统计不同构件相同柱高下各个碳排放量极差, 结果如图 5 所示。从图 5 可以看出: 当构件柱高为 3.0 m 时, 改变其构件的长宽尺寸、混凝土强度、配筋率、板厚、预制率, 碳排放量极差为 5370.47 kgCO_{2e}。当构件柱高为 4.2 m 时, 改变其构件的长宽尺寸、混凝土强度、配筋率、板厚、预制率, 碳排放量极差为 3458.39 kgCO_{2e}。当构件柱高为 5.1 m 时, 改变其构件的长宽尺寸、混凝土强度、配筋率、板厚、预制率, 碳排放量极差为 5933.04 kgCO_{2e}。由此可以明显看出: 当柱高为 4.2 m 时, 其碳排放量

极差最小,碳排放量较为稳定;当柱高为 5.1 m 时, 其碳排放量极差最大,碳排放量较不稳定。

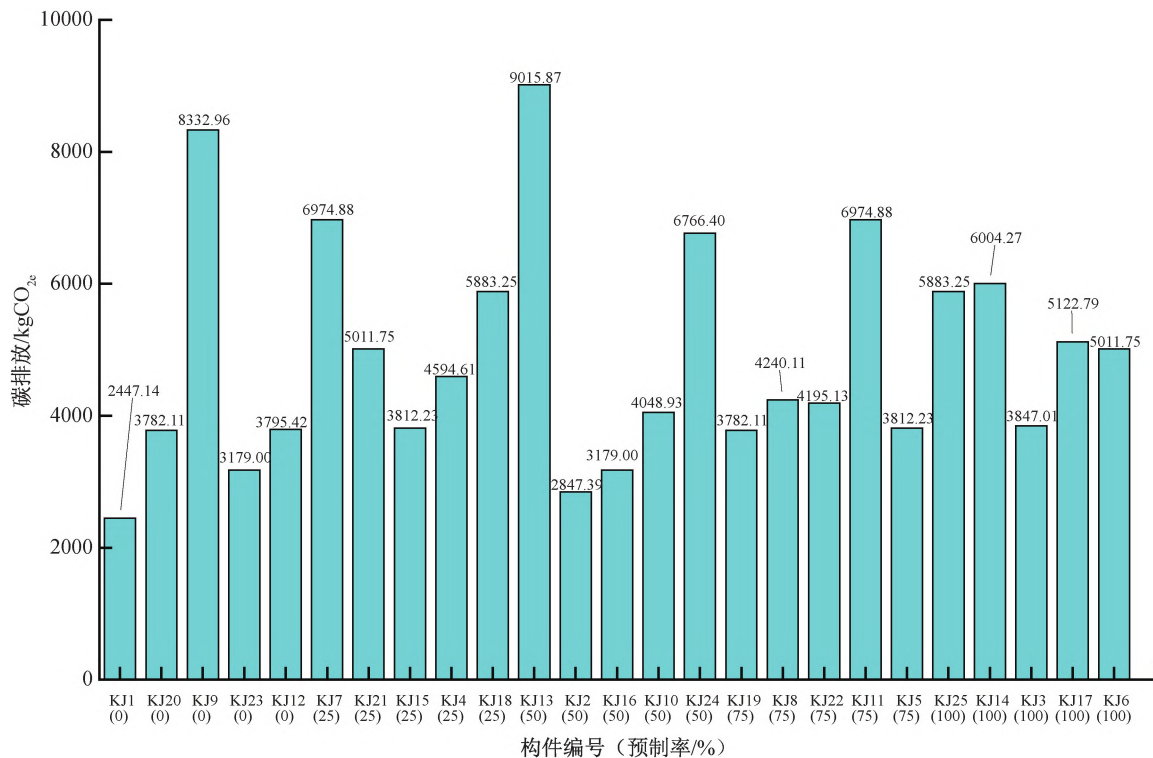


图3 各级预置率下不同构件的碳排放量

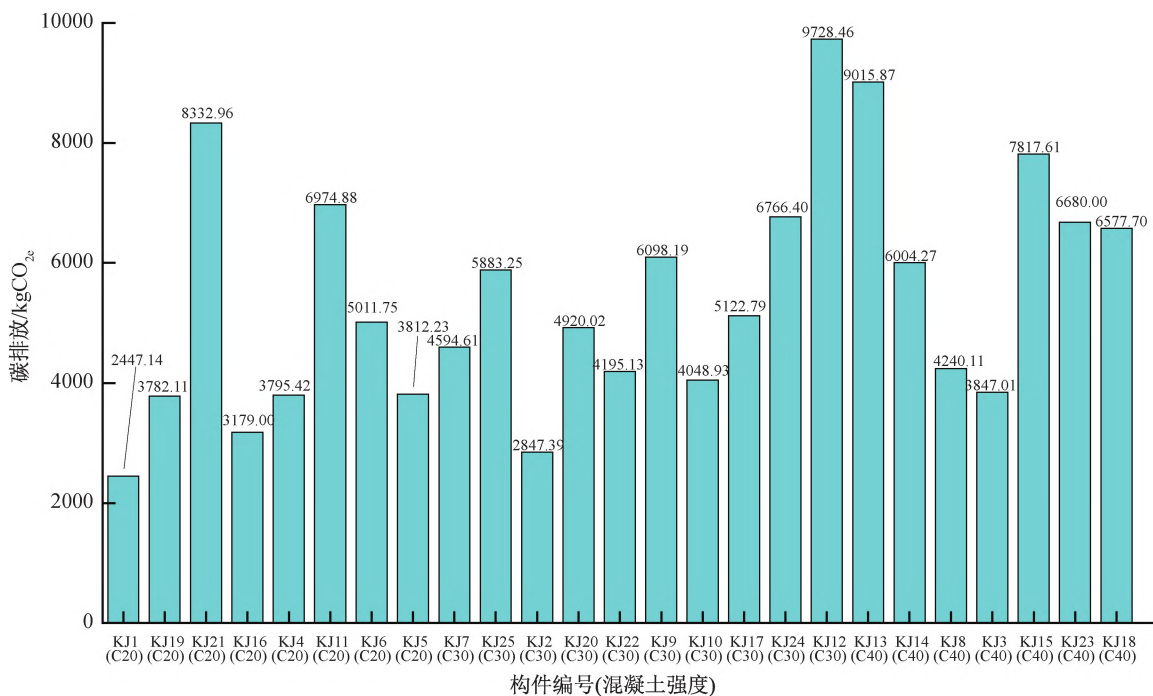


图4 各级混凝土强度下不同构件的碳排放量

3.4 配筋率对装配式混凝土框架结构碳排放量的影响

统计不同构件相同配筋率下各个碳排放量的极差,结果如图6所示。从图6可以看出:当构件配筋率为0.3%时,改变其构件的长宽尺寸、混凝土强度、柱高、板厚、预置率,其碳排放量极差为4130.56

kgCO_{2e}。当构件配筋率为1.2%时,改变其构件的长宽尺寸、混凝土强度、柱高、板厚、预置率,碳排放量极差为3192.77 kgCO_{2e}。当构件配筋率为2.5%时,改变其构件的长宽尺寸、混凝土强度、柱高、板厚、预置率,碳排放量极差为5916.13 kgCO_{2e}。由此可以看出:当构件配筋率为1.2%时,其碳排放量

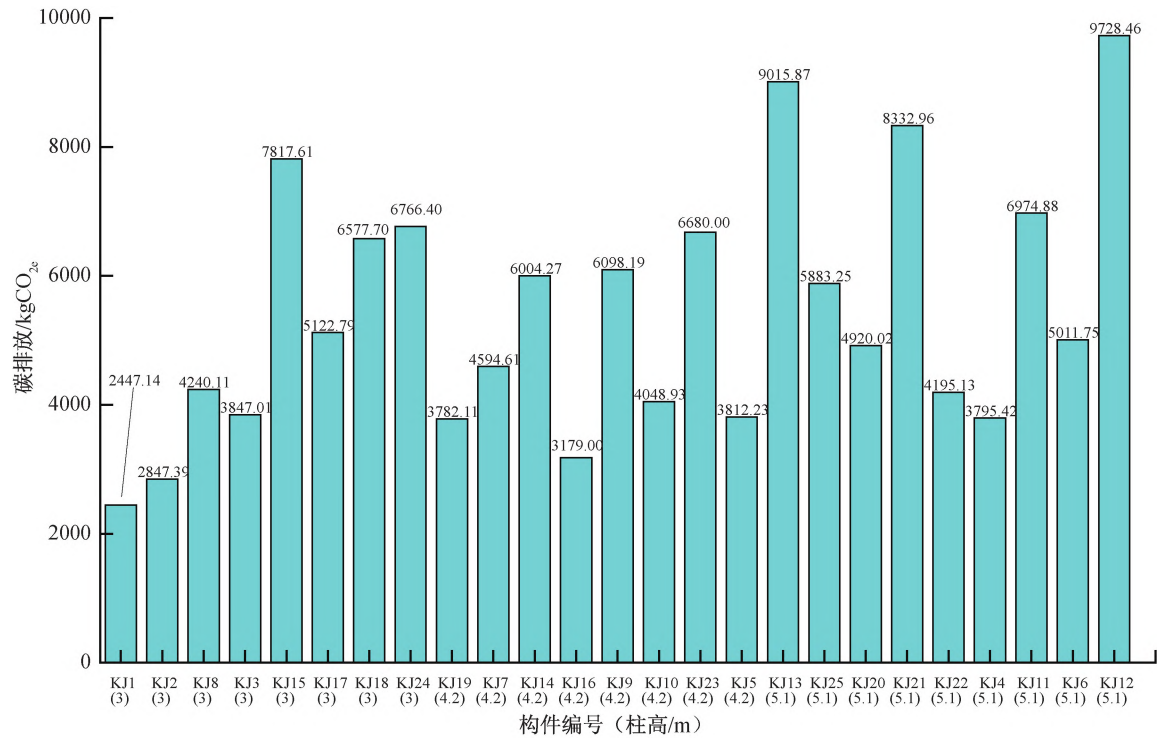


图 5 各级柱高下不同构件的碳排放量

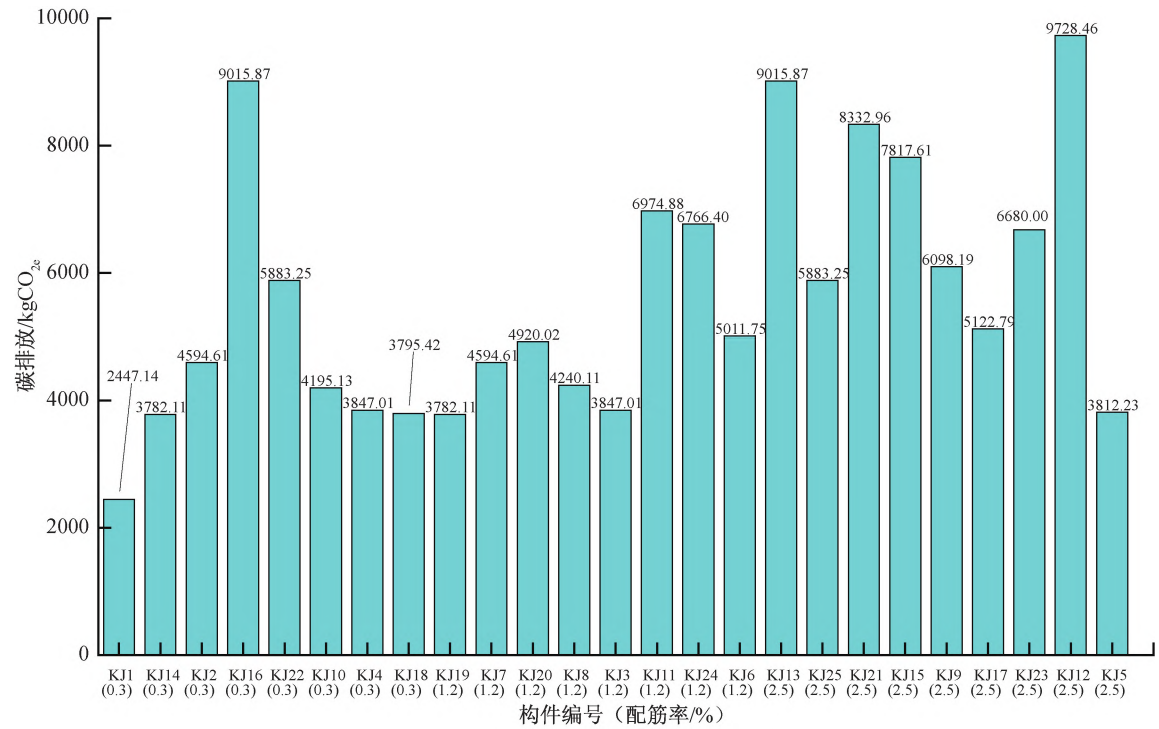


图 6 各级配筋率下不同构件的碳排放量

极差最小,碳排放量较为稳定;当构件配筋率为 2.5%时,其碳排放量极差最大,碳排放量较不稳定。

3.5 板厚对装配式混凝土框架结构碳排放量的影响

统计不同构件相同板厚下各个碳排放量的极差,结果如图 7 所示。从图 7 可以看出:当构件板厚为 80 mm 时,改变其构件的长宽尺寸、混凝土强度、

柱高、配筋率、预制率,碳排放量极差为 6568.73 kgCO_{2e}。当构件板厚为 100 mm 时,改变其构件的长宽尺寸、混凝土强度、柱高、配筋率、预制率,碳排放量极差为 5485.57 kgCO_{2e}。当构件板厚为 120 mm 时,改变其构件的长宽尺寸、混凝土强度、柱高、配筋率、预制率,碳排放量极差为 4596.00 kgCO_{2e}。当构件板厚为 150 mm 时,改变其构件的

长宽尺寸、混凝土强度、柱高、配筋率、预制率,碳排放量极差为 3179.46 kgCO_{2e}。当构件板厚为 180 mm 时,改变其构件的长宽尺寸、混凝土强度、柱高、配筋率、预制率,碳排放量极差为 5916.24

kgCO_{2e}。由此可以看出,当构件板厚为 150 mm 时,其碳排放量极差最小,碳排放量较为稳定;当构件板厚为 80 mm 时,其碳排放量极差最大,碳排放量较不稳定。

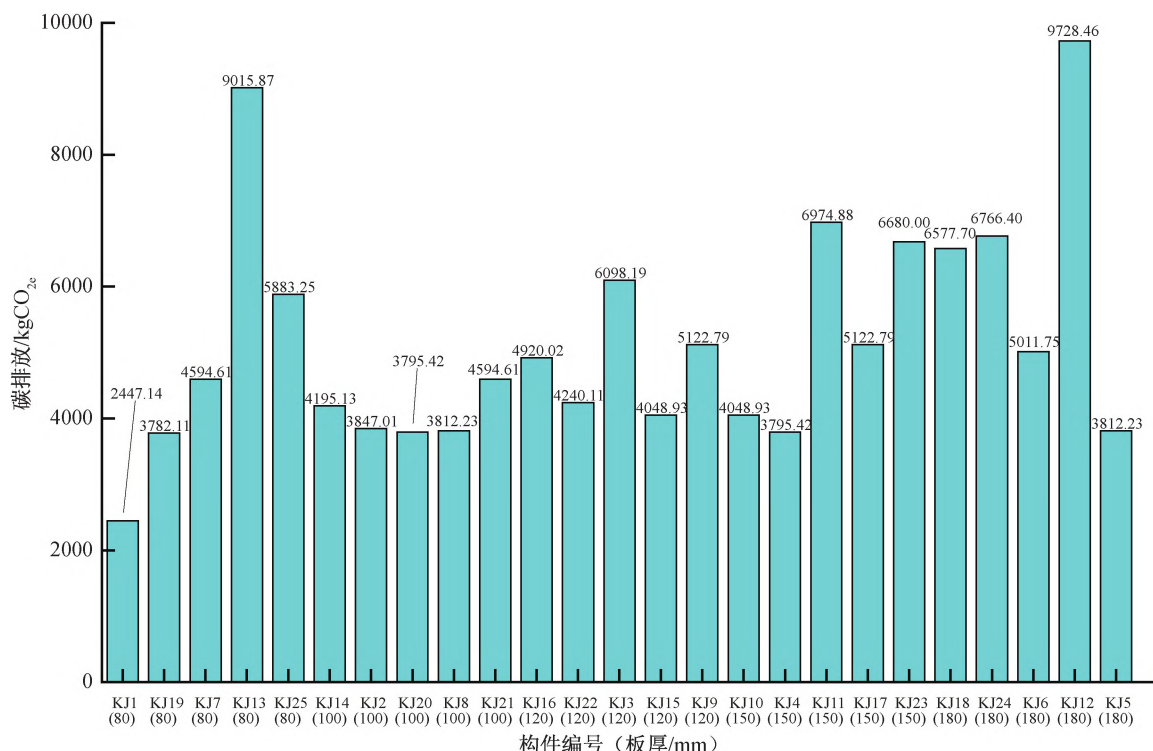


图7 各级板厚/mm下不同构件的碳排放量

3.6 构件尺寸对装配式混凝土框架结构碳排放量的影响

统计不同构件相同尺寸下的各个碳排放量的极差,结果如图8所示。从图8可以看出:当构件长宽尺寸($L \times B$)为 3.6 m × 6.0 m 时,改变其构件的混凝土强度、柱高、配筋率、板厚、预制率,碳排放量极差为 3435.11 kgCO_{2e}。当构件长宽尺寸($L \times B$)为 5.1 m × 5.1 m 时,改变其构件的混凝土强度、柱高、配筋率、板厚、预制率,碳排放量极差为 2631.07 kgCO_{2e}。当构件长宽尺寸($L \times B$)为 6.6 m × 6.6 m 时,改变其构件的混凝土强度、柱高、配筋率、板厚、预制率,碳排放量极差为 3724.19 kgCO_{2e}。由此可以看出:当构件长宽尺寸($L \times B$)为 5.1 m × 5.1 m 时,其碳排放量极差最小,碳排放量较为稳定;当构件长宽尺寸($L \times B$)为 6.6 m × 6.6 m 时,其碳排放量极差最大,碳排放量较不稳定。

3.7 各种设计参数下极差变化幅度及趋势分析

综上所述得到各种参数极差变化幅度及趋势,结果如图9所示。由图9可见,不同柱高影响下的极差最为稳定且呈稳步增长的趋势,随着柱高的不

断增加,其碳排放量极差先降低再增加,选择合适的柱高能有效控制构件的碳排放量;随着混凝土预制率的不断增加,其极差越来越低,预制混凝土可以有效减少碳排放量;随着混凝土强度的不断提高,其极差随之降低,选择适合的混凝土强度能有效控制整体构件的碳排放量;随着板厚的不断增加,其极差呈下降又上升的趋势,且当板厚为 150 mm 时极差最小;随着配筋率的不断增加,其极差呈下降又上升的趋势,且当配筋率为 1.2% 时极差最小,选择合适的板厚和配筋率能有效控制整体构件的碳排放量。根据各构件设计参数在不同水平条件下的碳排放量和极差,由正交试验可知,各构件参数的水平变动对构件碳排放量的影响主次顺序为:混凝土强度、构件板厚、柱高、预制率、配筋率、长宽尺寸。

4 构件影响参数权重分析

本文采用层次分析法,将与权重排序有关的设计参数分解成目标层、准则层、方案层等层次^[13],得出影响参数对决策目标的权重。

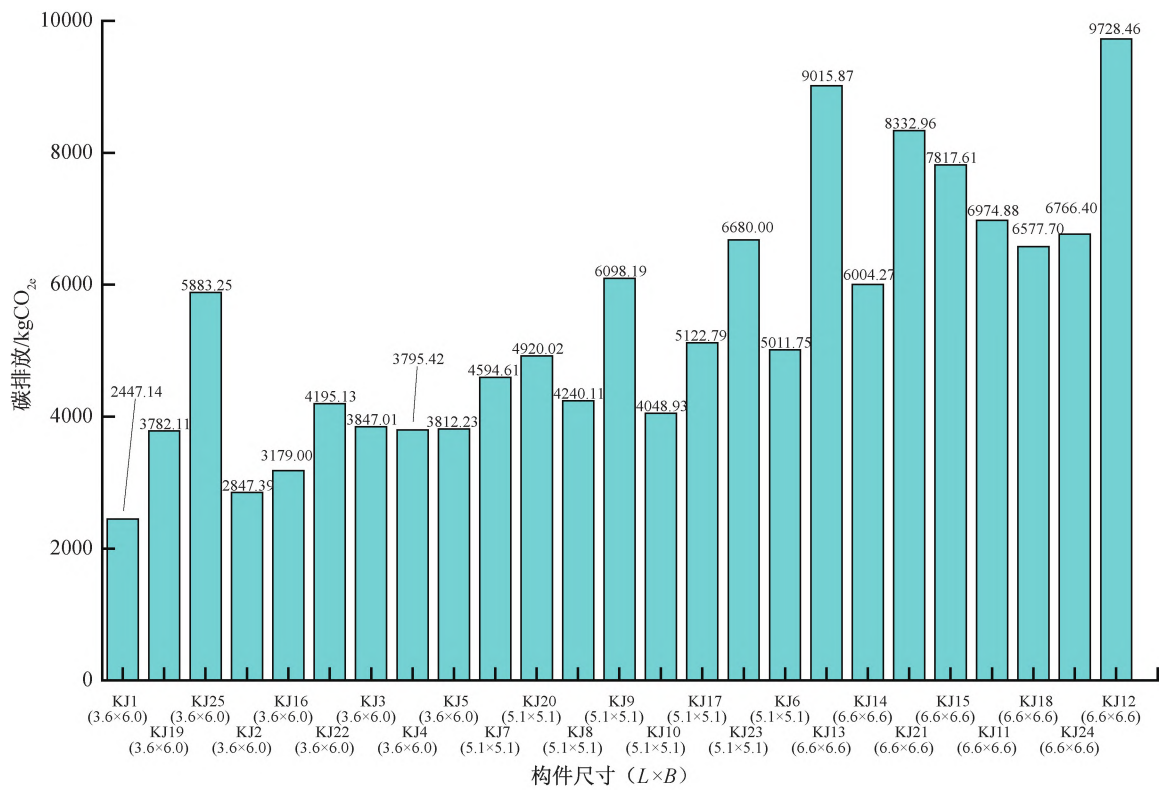


图 8 各级尺寸下不同构件的碳排放量

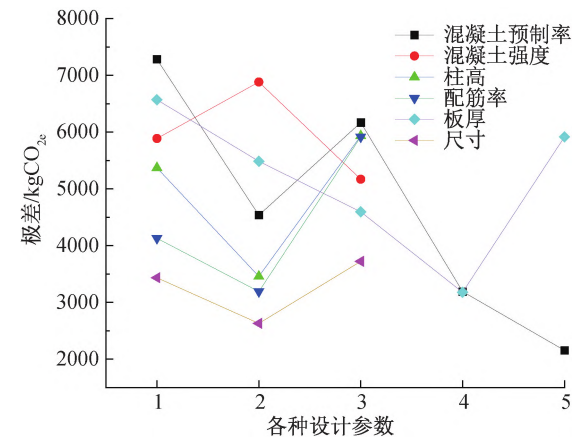


图 9 构件在各种参数下碳排放量极差趋势图

4.1 构建层次

对于层次分析法的运用,本文以碳排放各类设计参数组合为因素 A,作为装配式混凝土框架物化阶段材料消耗量碳足迹目标层,尺寸、柱高、预制率等影响参数 B1~B6 为准则层,各个设计参数下的不同档次数 C1~C22 为方案层,构建的装配式混凝土框架物化阶段的碳排放影响参数层次图如图 10 所示。

4.2 构建判断矩阵

对同层指标的影响因素之间采用 Saaty 提出的 1~9 标度法进行重要性的两两比较^[14-15],形成判断矩阵,其中标度法中量化值对应的影响程度见表 4。

表 4 Saaty 标度对应表

参数 <i>i</i> 对比参数 <i>j</i>	量化值
参数 <i>i</i> 比参数 <i>j</i> 同等重要	1
参数 <i>i</i> 比参数 <i>j</i> 稍微重要	3
参数 <i>i</i> 比参数 <i>j</i> 较强重要	5
参数 <i>i</i> 比参数 <i>j</i> 强烈重要	7
参数 <i>i</i> 比参数 <i>j</i> 极端重要	9
参数 <i>i</i> 比参数 <i>j</i> 各种重要程度的中间值	2,4,6,8
两参数前者比后者标度的倒数	1/ <i>a_{ji}</i>

基于上述正交试验得到的极差趋势表明的参数对碳排放量影响的主次顺序可知,混凝土强度对构件碳排放量影响最大,其次分别是构件的板厚、柱高、预制率、配筋率,影响最小的是构件的长宽尺寸。从各参数的平均极差的数值大小来看,板厚的平均极差与混凝土强度的平均极差相比较,板厚、柱高、预制率这 3 个参数的平均极差相对接近,配筋率和预制率两参数之间的平均极差也比较接近,而构件的长宽尺寸的平均极差比配筋率的平均极差要小很多。由此对目标层的参数两两比较并打分,构建目标层判断矩阵,结果如表 5 所示。

4.3 各层要素权重计算

采用和积法对目标层的判断矩阵进行处理,将每一列分别求和,再将每一列中的数值分别除以得到的和,可以得出一个按列归一化的矩阵^[16-17],再将

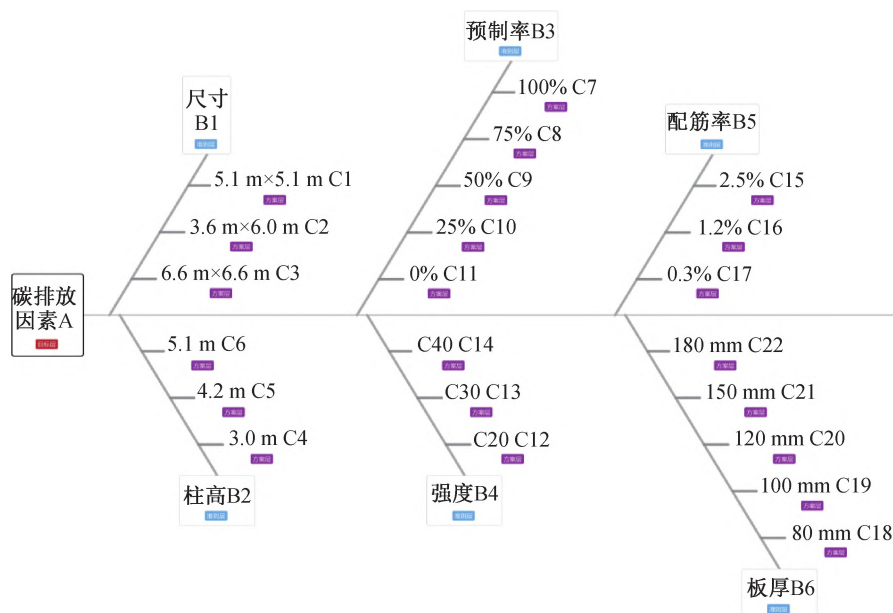


图 10 装配式混凝土框架物化阶段碳排放影响参数层次图

表 5 目标层判断矩阵

碳排放(A)	尺寸(B1)	柱高(B2)	预制率(B3)	强度(B4)	配筋率(B5)	板厚(B6)
尺寸(B1)	1.000	0.200	0.250	0.125	0.400	0.167
柱高(B2)	5.000	1.000	2.000	0.250	8.000	0.500
预制率(B3)	4.000	0.500	1.000	0.200	2.000	0.250
强度(B4)	8.000	4.000	5.000	1.000	6.000	2.000
配筋率(B5)	2.500	0.125	0.500	0.167	1.000	0.333
板厚(B6)	5.988	2.000	4.000	0.500	3.003	1.000

该矩阵每一行的元素 a_{ij} 取平均值,得到每个参数对应的权重 ω_i ,即

$$\omega_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{a_{ij}}{\sum_{k=1}^n a_{kj}} \quad (2)$$

由式(2)计算得到目标层参数的权重,结果见表 6。

表 6 目标层参数权重

目标层参数	权重 ω_i
尺寸(B1)	0.033
柱高(B2)	0.182
预制率(B3)	0.090
强度(B4)	0.403
配筋率(B5)	0.059
板厚(B6)	0.234

4.4 一致性检验

判断矩阵作为计算排序权重向量的依据,其结果要通过一致性检验。一次性检验的计算公式为:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (3)$$

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - N}{N - 1} \quad (4)$$

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(A\Omega)_i}{\omega_i} \quad (5)$$

$$(A\Omega)_i = (a_{i1}, \dots, a_{in}) \begin{pmatrix} \omega_1 \\ \vdots \\ \omega_n \end{pmatrix} \quad (6)$$

其中:CI 指一致性指标^[18],RI 为平均随机一致性指标^[15],N 指矩阵的阶数^[18], λ_{\max} 为最大特征值^[18]。

RI 可以通过表 7 查到。一致性检验应当从上至下逐层进行。只有当 $CR < 0.1$ 时,才认为所对应判断矩阵的一致性可以接受,此时可判断得到的权重是可靠的^[19];若 $CR \geq 0.1$,则可以认为判断矩阵产生了逻辑性错误,需要对判断矩阵进行修正,直到符合一致性检验要求。

表 7 平均随机一致性指标 RI

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0.52	0.89	1.12	1.26	1.36	1.41	1.46	1.49

通过式(3)—(6)求得目标层的 $\lambda_{\max} = 6.401$, $CI = 0.064 < 0.1$,此时目标层的一次性检验通过。通过同样的方法计算得到准则层的权重,结果见表

8;准则层一次性检验结果见表9。

表8 准则层权重

准则层	参数标识	权重 ω
尺寸(B1)	5.1 m×5.1 m C1	0.187
	3.6 m×6.0 m C2	0.098
	6.6 m×6.6 m C3	0.715
柱高(B2)	3.0 m C4	0.143
	4.2 m C5	0.286
	5.1 m C6	0.571
预制率(B3)	100% C7	0.465
	75% C8	0.247
	50% C9	0.140
	25% C10	0.089
	0% C11	0.055
强度(B4)	C20 C12	0.110
	C30 C13	0.309
	C40 C14	0.581
配筋率(B5)	2.5% C15	0.648
	1.2% C16	0.230
	0.3% C17	0.122
板厚(B6)	80 mm C18	0.052
	100 mm C19	0.106
	120 mm C20	0.167
	150 mm C21	0.266

表9 准则层一次性检验结果

准则层	最大特征值 λ_{\max}	CI	结论
尺寸(B1)	3.002	0.002	$CI < 0.1$, 通过
柱高(B2)	3.000	0.000	$CI < 0.1$, 通过
预制率(B3)	5.048	0.011	$CI < 0.1$, 通过
强度(B4)	3.004	0.004	$CI < 0.1$, 通过
配筋率(B5)	3.004	0.004	$CI < 0.1$, 通过
板厚(B6)	5.133	0.030	$CI < 0.1$, 通过

5 结论及建议

本文提出了一种装配式混凝土框架结构的构件参数对碳排放影响的比较分析方法。首先通过正交设计法确定试验构件数量,并用BIM建立的模型以及碳排放因子得到碳排放量,然后根据结构构件设计的参数敏感性分析得到影响参数主次顺序,最后采用层次分析法分析确定设计参数的权重排序。所得主要结论如下:

a)混凝土强度这个设计参数在整个构件碳排放量所占的权重最大,使用强度合适的混凝土可以有效减少构件碳排放量。

b)除预制率外,其他设计参数的碳排放量会随着影响参数的档次增加而增加,而预制率相反,预制率越高其碳排放量越小;

c)选择合适的板厚、配筋率、混凝土强度可以在一定程度上减少构件的碳排放量。

本文采用正交设计法和层次分析法两者结合的思路来研究装配式建筑物化阶段构件设计参数对碳排放量的影响,为方案阶段确定合理的建筑材料降碳措施提供思路,从而推动装配式建筑的低碳化。本文提出如下工程实践建议:

a)在根据安全、适用、经济等设计原则前提下,应综合考虑各类碳足迹因子影响参数的优化分析。

b)基于生命周期全过程的碳排放的研究还有诸多参数影响着碳排放量,应选取影响较大的参数结合工程实际进行优化。

c)进一步可以采用数据采样和蒙特卡洛模拟等方法得到足够多的分析样本,通过概率统计后确定参数的合理取值区间。

参考文献:

- [1] 国务院. 国务院关于印发2030年前碳达峰行动方案的通知: 国发〔2021〕23号[R/OL]. (2021-10-26)[2022-12-30]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2021-10/26/content_5644984.htm.
- [2] 赵愈,孙思园,刘陆. 装配式建筑碳减排驱动因素与路径研究[J]. 建筑经济,2022,43(10):90-95.
- [3] 李萌萌,陈为公,李龙. 装配式建筑物化阶段碳排放计算及影响因素研究[J/OL]. 安全与环境学报:1-10(2022-07-15)[2022-12-23]. <https://doi.org/10.13637/j.issn.1009-6094.2022.1045>.
- [4] 李静,刘胜男. 装配式混凝土建筑物化阶段碳足迹评价研究[J]. 建筑经济,2021,42(1):101-105.
- [5] 张俊强. 建筑物化阶段CO₂减排量DEA数学建模研究[J]. 环境科学与管理,2021,46(12):15-18.
- [6] 高鑫,朱建君,陈敏,等. 装配式混凝土建筑物化阶段碳足迹测算模型研究[J]. 建筑节能,2019,47(2):97-101.
- [7] 孙少楠,吴家伟. 基于BIM技术的被动式建筑敏感因子模拟与分析[J]. 计算机仿真,2022,39(6):298-303.
- [8] Bonamente E, Merico M C, Rinaldi S, et al. Environmental impact of industrial prefabricated buildings: Carbon and energy footprint analysis based on an LCA approach[J]. Energy Procedia, 2014, 61: 2841-2844.
- [9] Fortuna S, Dalla Mora T, Peron F, et al. Environmental performances of a timber-concrete prefabricated composite wall system[J]. Energy Procedia, 2017, 113: 90-97.
- [10] Li L, Li Z F, Li X D, et al. A new framework of industrialized construction in China: towards on-site industrialization[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 244: 118469.

- [11] Atmaca N. Life-cycle assessment of post-disaster temporary housing [J]. Building Research & Information, 2017, 45(5): 524-538.
- [12] Cabeza L F, Rincón L, Vilarinho V, et al. Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: a review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 29: 394-416.
- [13] 朱菲菲, 严小丽. 基于 ISM-AHP 的建筑企业数字化转型影响因素研究[J]. 建筑经济, 2022, 43(10): 66-73.
- [14] 于海鹏, 陈文帅. 应用 AHP 评价建筑装饰材料的微环境学特性[J]. 建筑材料学报, 2009, 12(5): 568-574.
- [15] 张凯, 冯光, 徐铭铭, 等. 基于 AHP-模糊综合评价法的配电开关一二次融合关键因素分析[J]. 电气工程学报, 2022, 17(2): 187-193.
- [16] 帖卉霞. 基于 AHP 法的公路工程定额人工单价影响因素比较分析[J]. 建筑经济, 2022, 43(S1): 180-184.
- [17] 杜嘉宾, 陈英杰, 罗成. 基于 AHP-熵权法的建筑幕墙成本分析及对策研究[J]. 建筑经济, 2022, 43(S1): 228-234.
- [18] 孟凡兴, 杨明, 王浩, 等. 基于 AHP-FCE 的辐射事故应急演练评估研究[J]. 核技术, 2022, 45(11): 70-79.
- [19] 贾宏俊, 许云萍. 基于 AHP 的装配式建筑成本管理研究[J]. 建筑经济, 2018, 39(7): 79-83.

(责任编辑: 康 锋)