

预制构件对建筑碳排放量的影响研究

——以浙江省某预制装配建筑为例

张玉琢,郭峰,毕天平

(沈阳建筑大学管理学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要:在建筑中使用预制构件是降低建筑碳排放量的有效途径之一,研究对不同的预制构件和现浇构件分别进行了计算,使建筑的碳排放量达到最低。首先对预制构件和现浇构件的碳排放阶段进行了划分,再用碳排放因子法建立了各阶段的碳排放量计算模型,并结合实际案例分析了预制构件相较于现浇构件降低的碳排放量。结果表明:预制梁、预制墙的碳排放量低于现浇梁、现浇墙,在预制率为44%时,案例中预制装配建筑的碳排放量最低。预制构件对于降低建筑碳排放量具有显著效果。

关键词:预制构件;现浇构件;建筑碳排放量;预制率

中图分类号:TU201.5

文献标志码:A

建筑业属于高能耗、污染严重的产业之一,其碳排放量达到了碳排放总量的40%^[1]。《巴黎协定》提出2050年后逐渐实现碳中和,中国承诺将在2030年前使碳排放量达到峰值,争取在2060年前实现碳中和。降低建筑业的碳排放量是实现碳达峰、碳中和的关键措施。随着中国城镇化的快速发展,近10年中国的建筑面积保持每年3%~5%的增速,这增加了建筑的碳排放量。近些年来,随着建造技术的发展,预制装配建筑应运而生。预制装配(Precast Concrete, PC)建筑相比于传统的现场浇筑建筑,对建筑材料、施工机具、人工的利用效率有了大幅的提高,减少了建筑垃圾和材料浪费^[2]。中国在《2030年前碳达峰行动方案》中,明确提出了大力发展低碳建材和绿色建造,大力推广装配式建筑,重点强化绿色设计和绿色施工。

同时,在《“十四五”建筑业发展规划》中提出,2025年中国新建的装配式建筑在建筑产业中的占比将超过30%。

中国的预制装配技术起步较晚,中国对于预制装配建筑降低碳排放量的相关研究还不够充分。孙艳丽等^[3]对预制装配建筑和现浇建筑物化阶段的碳排放量差异进行了分析,指出了预制装配建筑能够降低碳排放量,但效果有限,应加快预制装配技术的发展,才能够大幅降低建筑的碳排放量。Hao J等^[4]利用BIM技术对预制装配建筑的碳排放量进行了计算,结果表明预制装配技术能够降低建筑碳排放量。Ji Y等^[5]利用鲁班软件对预制装配施工技术和现浇施工技术进行了模拟,发现在施工过程中,相比于现浇施工技术,预制装配施工技术对环境更为友好。曹西等^[6]以18层钢筋混凝土剪力墙结构住宅

为例,测算了预制装配建筑在物化阶段的碳排放量,包括生产、运输和施工过程中的碳排放量。预制装配式建筑相较于现浇建筑每平方米降低了 7.67 kg 的碳排放量。宝塔娜^[7]提出预制装配技术的应用在一定程度上能够降低建筑的碳排放量。

以上研究是对不同的建筑进行碳排放量计算,得出预制装配建筑能够降低碳排放量。目前,大部分研究以建筑整体为计算单位计算出预制构件的碳排放量。但由于建筑的不可复制性,不同建筑的结构、标准、施工机械等影响因素都不相同。这些因素导致不同建筑的碳排放量不同。因此,以建筑整体计算预制装配建筑降低的碳排放量会导致计算结果不准确。针对这一问题,笔者提出以结构

构件为计算对象,通过预制构件和现浇构件的碳排放量对比,来分析预制装配建筑降低的碳排放量。

一、碳排放阶段划分及计量方法

1. 碳排放全生命周期阶段划分

生命周期评估 (Life Cycle Assessment, LCA) 是指某产品从生产准备到废弃回收的各个环节相关的全部技术。对于预制构件和现浇构件的 LCA 碳排放评估,可划分为 5 个阶段(原材料生产、材料运输、构件加工及安装、使用及维护、废弃拆除)^[8]。对于现浇构件和预制构件而言,各阶段产生能耗的活动如表 1 所示。

表 1 建筑各阶段碳排放活动

阶段划分	现浇构件	预制构件
原材料生产	建筑原材料生产中的碳排放量,包括建筑物主体所需材料,如钢材、混凝土等材料,以及建造建筑主体消耗的模板等材料产生的碳排放量	同现浇构件
材料运输	将各种材料运至施工现场所产生的碳排放量	原材料运至预制构件加工厂的碳排放量; 预制构件运至施工现场产生的碳排放量
构件加工及安装	混凝土工程、钢筋工程、模板工程等分部分项工程产生的碳排放量	构件加工和构件养护产生的碳排放量; 构件安装过程中施工机械所产生的碳排放量
使用及维护	使用、维修和管理的碳排放量	同现浇构件
废弃拆除	回收和拆除所产生的碳排放量	同现浇构件

在建筑全生命周期中,碳排放量可以分为两部分,使用与维护阶段的碳排放统称为运营碳排放量;其他阶段的碳排放量称为“隐含碳排放量”,也可称为“虚拟碳排放量”,是指建筑产品加工、制造、运输等全过程的总能源消耗量所产生的碳排放量,是产业链中直接和间接碳排放量的总和。目前,大多数研究集中在节能技术和政策改进方面。这些研究普遍认为,推广节能技术能够降低运营碳排放量,进而降低建筑整体碳排放量。然而,节能建筑对技术要求更高,会导致隐含碳排放量的增加,特别是在建筑本身的生产阶段,会使得建筑整体的碳排放量增加。因此,有必要降低建筑本体在生产过程中的碳排放量,即原材料生产、材料运输和构件加工及安装阶段的碳排放量,以降低建筑全生命周期的碳排放量。

2. 碳排放计量方法及参数确定

国际主流的碳排放量计算方法包括投入产出法、实测法和碳排放因子法。在建筑碳排放量的计算中,通常使用碳排放因子法,碳排放因子法是通过产品在生产中全部的能源消耗量与能源碳排放因子的乘积来进行计算。其优点是计算简便,精度较高;缺点是需要考虑各种因素对碳排放因子的影响,但通过资料的全面收集可有效降低这种负面影响。因此,笔者采用碳排放因子法来计算结构构件产生的碳排放量。

在原材料生产阶段,使用碳排放因子法计算碳排放量,首先需确定建筑材料的碳排放因子,该系数根据建筑碳排放量的计算标准来确定^[9]。建筑材料的可回收系数根据文献^[4]确定,模板使用次数根据模板的摊销次数确定。

在运输阶段,主要考虑运输工具的能源消耗产生的碳排放量。根据燃料的碳排放因子(见表 2)、主要运输工具的能源消耗量(见表 3)来计算运输阶段的碳排放量。

表 2 主要原材料、燃料碳排放因子

种类	碳排放因子	使用次数	可回收系数
混凝土	295 kg/m ³	—	—
钢	2.593 kg/kg	—	0.4
铝模板	22.67 kg/kg	300	0.75
木模板	146.3 kg/m ³	8	—
柴油	2.63 kg/L	—	—
电能	0.581 kg/(kW·h)	—	—
天然气	2.165 kg/m ³	—	—

表 3 主要运输工具的能源消耗量

机械名称	每台班柴油用量/L
载重汽车	42.5
搅拌运输车	37.8
运输货车	71.5

在构件加工及现场施工阶段,主要考虑施工机械消耗的能源所产生的碳排放量。根据燃料和电能消耗的碳排放因子(见表 2)、主要施工机械的能源消耗量(见表 4)来计算构件加工及现场施工阶段的碳排放量。

表 4 主要施工机械的能源消耗量

机械名称	每台班能源用量/(kW·h)
自升式塔式起重机	164.31
搅拌机	55.04
钢筋切断机	32.1

二、结构构件碳排放量计算模型

1. 原材料生产阶段

构件的原材料可分为可回收材料和不可回收材料。在计算可回收材料的碳排放量时要考虑可回收系数对碳排放量产生的影响。原材料生产阶段所需的原材料包括构件本身所需要的原材料,以及在构件加工过程中所消耗的原材料。原材料生产阶段的碳排放量计算公式为

$$Q_j = \sum_{i=1}^n \frac{p_i \times q_i \times (1 - \alpha_i)}{r_i}$$

(1)

式中: Q_j 为每立方米的第 j 种构件产生的碳排放量; n 为第 j 种构件所需的材料种类; i

为第 j 种构件所需的第 i 种材料; p_i 为第 i 种材料的碳排放因子; q_i 为第 i 种材料消耗量; α_i 为第 i 种材料的回收系数; r_i 为第 i 种材料的周转次数。

2. 运输阶段

预制构件运输阶段的碳排放量是指原材料运至构件加工厂和加工完成的构件运至施工现场的碳排放量;现浇构件运输阶段的碳排放量是指将原材料运至施工现场产生的碳排放量。在计算时需要考虑在运输材料时空车返回原料产地的空载系数,运输阶段的碳排放量计算公式为

$$T_j = \sum_{i=1}^{n_{\text{运}}} \frac{q_{yi}}{M_{yi}} \times p_{yi} \times k$$

(2)

式中: T_j 为第 j 种构件原材料或每立方米的预制构件在运输阶段产生的碳排放量; $n_{\text{运}}$ 为运输工具的数量; q_{yi} 为第 i 种运输工具的能源消耗量; M_{yi} 为第 i 种运输工具在运输第 j 种材料的满载极限; p_{yi} 为第 i 种运输工具消耗能源的碳排放因子; k 为空载系数(空载返回能耗约为满载时的 67%,空载系数取 1.67^[6])。

3. 构件加工及现场施工阶段

现浇构件的加工及施工均在施工阶段完成,主要活动包括支模、钢筋绑扎、焊接、混凝土搅拌及建筑材料的场地运输和建筑材料的垂直运输。预制构件的加工活动包括混凝土搅拌、钢筋绑扎、焊接、支模、构件的养护、构件加工时的运输等,现场施工的活动包括设备的垂直运输、焊接、吊装等。构件加工及现场施工阶段的碳排放量,是由其活动的机具消耗量决定的,各种活动所产生的碳排放量计算公式为

$$A_k = \sum_{i=1}^{n_{\text{机}}} p_{si} \times q_{si} \times e_{si}$$

(3)

式中: A_k 为每立方米的构件中第 k 种生产活动产生的碳排放量; $n_{\text{机}}$ 为活动中需要施工机械的种类; p_{si} 为第 i 种施工机械所消耗能源的碳排放因子; q_{si} 为每立方米的构件在生产中所需的第 i 种机械的台班数量; e_{si} 为第 i 种施工机械单位台班所消耗的能源数量。

三、案例分析

1. 项目概况

项目位于浙江省宁波市,建筑主要功能为集体宿舍,共两层,总建筑面积 1 040 m²,单层建筑面积为 520 m²。设计层高为一层 3.6 m,二层 3.4 m。浙江省对预制率的要求依据住房和城乡建设部发布的《工业化建筑评价标准》,即预制率不低于 20%。该建筑除一层采用部分现浇构件,其余均采用预制构件,预制率达到了 67%,符合浙江省对预制率的要求。

笔者将建筑的主要结构构件进行了划分,结构构件划分为柱、梁、板、墙、楼梯。根据工程量清单计算每种构件的原材料消耗量、运输工具台班消耗量和施工机械台班消耗量。由于各省的工程消耗量定额不同,因此笔者采用住房和城乡建设部 2019 年发布的《房屋建筑与装饰工程消耗量定额》(以下简称《定额》)作为构件的原材料消耗量、运输工具台班消耗量和机械台班消耗量的数据来源。基于传统的二维图纸进行工程量和碳排放量计量,存在效率低下且精确度不足的问题。基于 BIM 技术的工程量和碳排放量计量,比传统的工程量和碳排放量计量方法更为精准^[10]。基于 BIM 技术进行工程量和碳排放量计量,其实质是通过数字可视化技术在计算机中建立一座虚拟建筑,再根据相应的工程量和碳排放量计算标准,结合用户需要导出相应构件的工程量和碳排放量。其主要操作过程是建模者通过二维图纸在 BIM 建模软件上进行建模,生成三维模型,然后根据相应的标准和规范输入工程量和碳排放量计算公式,最后导出各个构件的工程量和碳排放量明细表,案例中的工程量和碳排放量均采用 BIM 技术进行计量。

2. 各阶段结构构件的碳排放量计算

(1) 原材料生产阶段

基于 BIM 三维模型统计各个构件的原材料在生产过程中的消耗量^[11]。根据 BIM 三维模型导出构件工程量明细表以及工程量

消耗定额,主要原材料消耗量如表 5 所示。

表 5 原材料消耗量

构件类型	施工方式	消耗量		
		混凝土 (m ³ /m ²)	钢(kg/m ³)	模(m ² /m ²)
柱	预制	0.13	120	1.08
	现浇	0.12	125	1.00
梁	预制	0.10	150	0.89
	现浇	0.09	167	0.80
板	预制	0.10	110	1.00
	现浇	0.09	111	0.90
墙	预制	0.08	120	0.80
	现浇	0.08	125	0.80
楼梯	预制	0.02	90	0.20
	现浇	0.02	80	0.20

根据各材料的碳排放因子、使用次数、可回收系数和原材料消耗量,结合式(1)可以得出原材料生产阶段各构件产生的碳排放量(见图 1)。

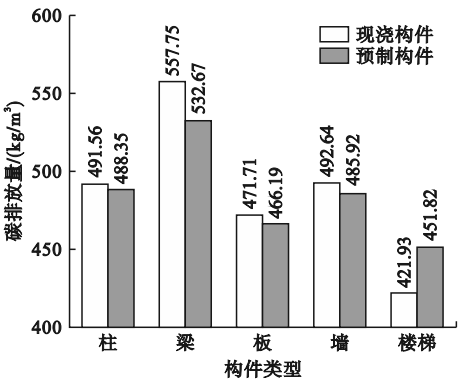


图 1 原材料生产阶段的碳排放量

(2) 运输阶段

根据工程实际情况,混凝土运输工具采用 12 m³ 搅拌运输车,其他原材料采用 10 t 柴油车,预制构件采用 20 t 货车。原材料运距为 20 km,预制构件的运距为 50 km。20 t 运输货车运输预制构件的满载运量为 9 m³。

根据燃料的碳排放因子、运输工具满载能耗、原材料消耗量和预制构件满载运量,结合式(2)可计算出构件在运输阶段的碳排放量(见图 2)。

(3) 构件加工及现场施工阶段

依据《建筑碳排放计算标准》确定各种活动的施工机械能耗,依据《定额》确定各构件的施工机械消耗量。根据燃料和电能的碳排

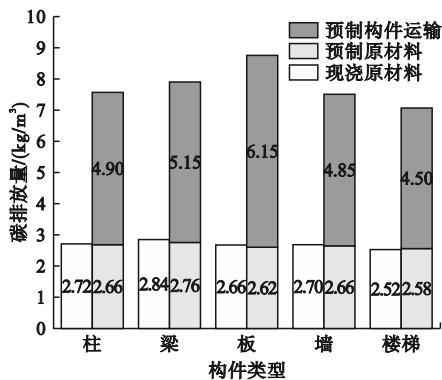


图2 运输阶段的碳排放量

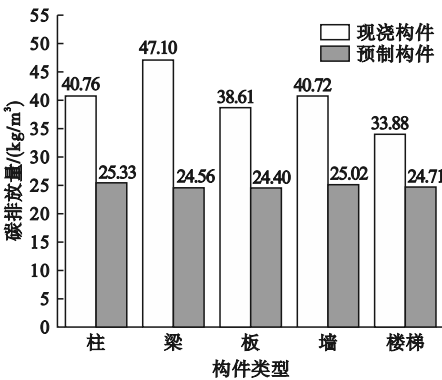


图3 构件加工及现场施工阶段的碳排放量

放因子、施工机械能源消耗量和原材料消耗量,结合式(3)可以得出构件在加工及现场施工阶段的碳排放量(见图3)。

3. 计算结果对比分析

将原材料生产阶段、运输阶段、构件加工及现场施工阶段的碳排放量相加,计算出每立方米各个构件的碳排放量。同时,根据表5的数据可以计算出每平方米各个构件的碳排放量(见表6)。

表6 各构件的碳排放量

施工方式	计算单位	碳排放量				
		柱	梁	板	墙	楼梯
预制	m³/kg	521.24	565.14	499.36	518.45	483.61
现浇	m³/kg	535.04	607.69	512.98	536.06	458.33
预制	m²/kg	67.76	50.86	49.94	41.48	9.67
现浇	m²/kg	64.20	54.69	46.17	42.88	9.17

根据表6可知,除楼梯外,预制构件的碳排放量均小于现浇构件的碳排放量。但从建筑整体考虑,由于生产工艺和结构设计的不同,建筑所需要的预制构件体积通常高于现浇构件体积,导致某些每平方米预制构件的

碳排放量高于现浇构件。因此,要降低建筑整体的碳排放量,则必须考虑每平方米预制构件碳排放量与现浇构件碳排放量的差异。

每平方米预制构件的柱、楼梯、板的碳排放量高于现浇构件的碳排放量。因此,虽然随着预制率增加,整个建筑的碳排放量降低,但在达到碳排放量最低的预制率时继续增加预制率,则会增加建筑的碳排放量。若只考虑整个建筑的碳排放量最低,预制顺序为梁、墙、楼梯、板、柱,碳排放量在预制率为44%时达到最低(见图4)。

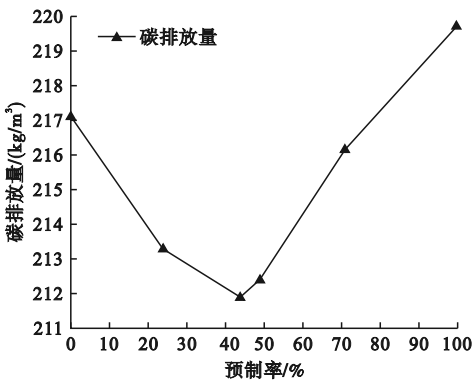


图4 预制构件的碳排放量趋势

四、结 语

笔者对预制构件和现浇构件的全生命周期各个阶段的活动进行了分析,确定了各个阶段的活动边界。根据相关标准确定了碳排放量计算的相关参数,并应用碳排放因子法建立了碳排放计算模型。从工程案例来看,预制构件在构件加工及现场施工阶段的碳排放量低于传统的现浇构件,但在原材料生产阶段和运输阶段的碳排放量高于传统的现浇构件。从案例的构件类型来看,梁、墙构件降低碳排放量的效果最好。当工程案例的预制率在44%时,案例中的预制装配式建筑碳排放量最低。因此,并不是预制率越高,预制装配式建筑的碳排放量就越低,要结合工程实例进行具体分析,才能使建筑的碳排放量达到最低。

参考文献:

[1] AGI M A N, NISHANT R. Understanding

influential factors on implementing green supply chain management practices: an interpretive structural modelling analysis [J]. Journal of environmental management, 2017, 188 (6): 351 – 363.

[2] 谢婉君,李晓娟,杨婷,等.装配式建筑施工阶段碳排放测算研究[J].工程管理学报,2022,36(3):52 – 57.

[3] 孙艳丽,刘娟,夏宝晖,等.预制装配式建筑物化阶段碳排放评价研究[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2018,34(5):881 – 888.

[4] HAO J, CHENG B, LU W, et al. Carbon emission reduction in prefabrication construction during materialization stage: a BIM-based life-cycle assessment approach [J]. Science of the total environment,2020,723(6):137870.

[5] JI Y, QI K, QI Y, et al. BIM-based life-cycle environmental assessment of prefabricated buildings [J]. Engineering, construction and architectural management,2020,27(8):1703 – 1725.

[6] 曹西,缪昌铅,潘海涛.基于碳排放模型的装配式混凝土与现浇建筑碳排放比较分析与研究[J].建筑结构,2021,51(S2):1233 – 1237.

[7] 宝塔娜.装配式技术对建筑物化阶段碳排放的影响研究[D].西安:长安大学,2020.

[8] ARAÚJO J P C, OLIVEIRA J R M, SILVA H M R D. The importance of the use phase on the LCA of environmentally friendly solutions for asphalt road pavements [J]. Transportation research part D: transport and environment, 2014,32(4):97 – 110.

[9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T 51366—2019 建筑碳排放计算标准[S].北京:中国建筑工业出版社,2019.

[10] 郭峰,周志健,张玉琢.基于 Revit 二次开发的电缆自动算量研究[J].建筑经济,2022,43(S1):172 – 175.

[11] 张玉琢,郭峰,张赫,等. BIM 信息化集成在建筑设备管理中的应用[J].沈阳建筑大学学报(社会科学版),2022,24(3):265 – 269.

Study on the Impact of Prefabricated Components on Carbon Emissions of Buildings: Taking One Prefabricated Assembly Building in Zhejiang Province as an Example

ZHANG Yuzhuo, GUO Feng, BI Tianping
(School of Management, Shenyang JianZhu University, Shenyang 110168, China)

Abstract: Using prefabricated components in buildings is one of effective ways to reduce the carbon emissions of buildings. This study calculates different prefabricated components and cast-in-place components separately to minimize the carbon emissions of buildings. Firstly, the carbon emission stages of prefabricated and cast-in-place components are divided, and then the carbon emission calculation model of each stage is established by the carbon emission factor method, and the carbon emission reduction of prefabricated components compared with cast-in-place components is analyzed with actual cases. The results show that the carbon emissions of prefabricated beams and prefabricated walls are lower than those of cast-in-place beams and cast-in-place walls, and the carbon emissions of prefabricated assembled buildings in the case are the lowest when the prefabrication rate is 44%. It is significantly effective for prefabricated components to reduce carbon emissions of buildings.

Key words: prefabricated components; cast-in-place components; building carbon emissions; prefabrication rate