

深圳地区模块化学校建筑的全生命周期碳排放研究

Research on Modular School Buildings Carbon Emission based on LCA method in Shenzhen Area

王 玮, 高宝虎, 赵 权, 敬 洁

(中建集成科技有限公司, 广东 深圳 518118)

摘 要: 基于建筑全生命周期理论, 研究装配式模块化钢结构学校建筑的碳排放计算模型, 结合模块化建筑的特点, 将其生命周期划分为7个阶段, 并确定各个阶段碳排放的计算方法, 并采用排放系数法, 计算各阶段的碳排放指标和年单位建筑面积碳排放量。同时为探讨模块化技术在节能减排上的作用, 选取钢筋混凝土和装配式钢结构两种结构的学校建筑进行定量计算并与模块化学校进行对比。研究结果表明: 模块化技术能有效降低建筑物化阶段的碳排放量, 并在循环再利用上具有独特优势。

关键词: 模块化学校建筑; 全生命周期; 碳排放

中图分类号: TK01+1 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2024) 02-0132-05

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.02.024

WANG Wei, GAO Baohu, ZHAO Quan, JING Jie

(China Construction Integrated Science & Technology Co., Ltd., Shenzhen 518118, China)

Abstract: A carbon emission model was developed to study the modular school buildings based on the theory of life cycle assessment (LCA). According to the characteristics of modular buildings, the whole life cycle of the building was divided into seven stages, and the calculation method of carbon emissions in each stage were determined. Then the carbon emission index and annual carbon emission per unit building area at each stage were determined by emission coefficient method. Meanwhile, the carbon emission of concrete structure and fabricated steel structure school building were calculated to compared with modular structure school building, in order to discuss the impact of modular technology on energy conservation and emission reduction. The results shows modular technology can reduce carbon emissions effectively, and has unique advantages in reusing of buildings.

Keywords: modular school buildings; life cycle assessment; carbon emission

0 引言

温室气体排放导致全球气候变暖, 已成为全世界的共识。在低碳减排的背景下, 我国在第75届联合国大会上提出了“2030年碳排放达到峰值, 2060

年实现碳中和”的双碳目标。根据中国建筑节能协会建筑能耗与碳排放数据专委会的统计, 我国建筑全过程碳排放占全国碳排放总量的51.3%^[1], 具有极大的节能减排潜能。

目前国内许多学者纷纷对各种结构建筑的碳排放展开了研究, 如, 王玉等^[2]进行了工业化预制装配住宅建筑全生命周期碳排放模型研究; 王上等^[3]研究了典型住宅建筑全生命周期碳排放计算模型并分析了相关案例; 张诺^[4]以东南大学轻型钢结构房屋为例, 探讨了构件循环利用建筑产品的碳排放计量方法; 李静等^[5]基于全生命周期进行了建筑工程碳排放计算模型的研究; 但已有研究成果缺乏统一的评价标准和计算

作者简介: 王玮 (1985—), 女, 满族, 硕士, 工程师, 主要研究方向: 模块化、装配式、碳排放。

通信作者: 高宝虎 (1987—), 男, 本科, 高级工程师, 主要研究方向: 模块化, 装配式。

收稿日期: 2023-11-16

模型,且多研究住宅建筑,其他建筑类型及全生命周期的碳排放测算数据较为缺乏^[6]。

模块化学校建筑是一种工业化程度更高的预制装配式建筑,部品部件主要在工厂集成生产,并运输到现场进行吊装安装,从而实现快速建造;在建筑生命周期内,可拆卸并运输到新的地点进行组装再利用。与传统结构学校建筑相比,模块学校具有建筑平面更规整、循环利用程度更高、在工厂进行模块集成等特点。通过收集深圳市某模块学校建筑的生产建造过程数据,进行全生命周期碳排放的研究;同时对案例建立不同结构模型,对比模块建筑与传统钢结构和传统混凝土结构建筑的碳排放特点。研究成果对模块学校建筑和其他类型的预制模块化建筑的碳排放研究具有重要的参考意义。

1 碳排放的测算基础

1.1 碳排放因子

采用排放系数法确定模块建筑的碳排放,排放系数法是目前应用最广泛的三种碳排放计算方法之一。碳排放因子是排放系数法的重要参数,用于衡量建筑在不同生命周期里每单位面积产生的温室气体排放量。参考《建筑碳排放计算标准》,整理模块学校建筑中的主要建筑材料,并根据《建筑碳排放计算标准》与广东省《建筑碳排放计算导则》(试行)确定这些建筑材料的碳排放因子。

表 1 碳排放因子

建筑材料		能源 (广东省 2020 年电力) ^[7]		运输		
型钢	镀锌 钢板 热轧 钢筋	混凝土		中型汽油 货车运输 (载重 8t)	轻型汽油 货车运输 (载重 2t)	人工
0.104	14.04	2.208	0.3748	0.115	0.334	3.77

1.2 碳排放指标

不同结构、规模和用途的建筑物,由于原材料、施工器械与使用时长的不同,计算出来的碳排放总量差异较大。模块化学校建筑属于装配式钢结构建筑,为方便与其他建筑进行比较,选用碳排放强度,即建筑面积年平均碳排放量 [kgCO₂/ (m²·a)] 作为碳排放计量指标。

1.3 计算边界与生命阶段划分

模块学校建筑的全生命周期碳排放,是从原材料生产建造到使用结束,并拆除各个阶段产生的碳

排放量总和。以“是否与建筑产品本体直接相关,或是否以满足建筑建造和基本使用功能为目的”^[4]为原则,判断建筑碳排放的计算范围。例如模块建筑的结构、围护、设备和内装四大系统均包含在计算范围内,而建筑建成后增加的附属建构和人员活动碳排放,不属于模块建筑碳排放测算范围。

与一般装配式建筑相比,模块建筑具有在工厂装修集成、主体构件可整体回收再利用等生产施工特点。因此本文将模块建筑的全生命周期分为生产、集成、运输、建造、运行、拆解再利用与拆除回收 6 个阶段。其中运行阶段具有学校建筑的使用特点,主要是照明、空调和教学设备的能耗,且假期期间能耗率较低;运输阶段包括从生产地到工厂集成、从工厂到工地与拆解再利用的三个运输过程,拆除回收阶段存在减碳活动。模块学校建筑的碳排放活动如图 1 所示。

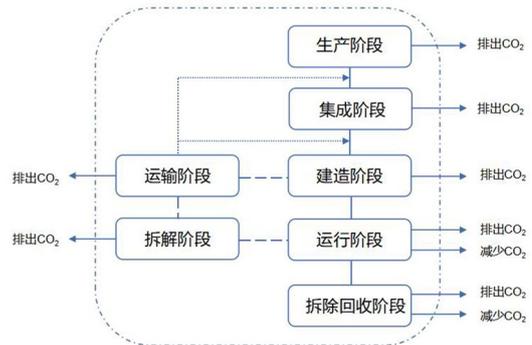


图 1 模块学校建筑的碳排放活动

Fig. 1 Carbon emission activities of modular school buildings

2 碳排放测算模型

模块学校建筑生产、施工和运行,参考 GB/T 51366—2019《建筑碳排放计算标准》的计算方式,划分了模块学校建筑全生命周期的 6 个阶段,并建立各个阶段的计算模型。全生命周期的总碳排放量和单位面积总碳排放量计算公式如下:

$$C = C_{SC} + C_{JC} + C_{LZ} + C_{JZ} + C_{YX}Y + C_{CC} \quad (1)$$

$$ICEB = \frac{C}{A \cdot Y} \quad (2)$$

式中: C 为全生命周期的碳排放总量 (kgCO₂); C_{SC} 、 C_{JC} 、 C_{LZ} 、 C_{JZ} 、 C_{YX} 、 C_{CC} 分别是生产、集成、流转、建造、运行和拆除阶段所产生的碳排放量 (kgCO₂e); $ICEB$ 为年单位建筑面积碳排放量

建筑节能

[kgCO₂/(m²·a)]; A 为建筑面积; Y 为建筑物设计使用年限。

2.1 生产阶段

生产阶段的碳排放量计算公式为

$$C_{sc} = \sum_{i=1}^n M_i EF_i \quad (3)$$

其中 M_i 为第 i 种建材的重量 (t), EF_i 为第 i 种建材的碳排放因子 (kgCO₂/单位)。

2.2 集成阶段

集成阶段指建筑材料在工厂加工成为模块的工程, 其碳排放量计算公式为

$$C_{sc} = \frac{1}{3600} \sum_{i=1}^n P_i t_i EF_i \quad (4)$$

式中: P_i 为第 i 道工序的加工机械的功率(kW); t_i 为第 i 道工序持续的时间; EF_i 为第 i 道工序加工机械消耗的能源碳排放因子 (kgCO₂/kWh)。

2.3 运输阶段

运输阶段包括生产地到工厂集成的原材料运输、从工厂到工地的模块运输和拆解再利用时的运输, 计算公式为

$$C_{ys} = \sum_{i=1}^n M_i D_i EF_i + C_{cj} \quad (5)$$

$$C_{cj} = \sum_{q=1}^n M_q D_q EF_q \quad n=3 \quad (6)$$

式中: D_i 为从生产地到工厂的平均运输距离; EF_i 为该建材采用的运输方式下单位重量运输距离的碳排放因子 [kgCO₂e/(t·km)]; M_q 为第 q 种建材的重量 (t); D_q 为旧项目地点到新项目地点的平均运输距离; EF_q 为该建材采用的运输方式下单位重量运输距离的碳排放因子 [kgCO₂e/(t·km)]。

2.4 建造阶段

模块建筑的建造, 是通过机械设备将模块组合成为建筑, 该阶段碳排放量计算公式为

$$C_{jz} = \sum_{i=1}^n E_i EF_i \quad (7)$$

式中: E_i 为建造阶段使用机械消耗的第 i 种能源消耗量(kWh 或 kg); EF_i 为第 i 类能源的碳排放因子 (kgCO₂/单位)。

2.5 运行阶段

运行阶段的碳排放量计算公式为

$$C_{yx} = \left[\sum_{i=1}^n (E_i EF_i) + C_{\text{维护}} - C_p \right] y \quad (8)$$

式中: $C_{\text{维护}}$ 为建筑维护产生的碳排放量; C_p 为建筑绿地碳汇系统年减碳量 (kgCO₂/a); y 为建筑设计寿命。

2.6 拆解再利用阶段

模块建筑的拆解再利用是指将模块建筑拆解为可整体再利用的建筑模块, 与建造阶段是可逆的, 计算可参考式 (6)。

2.7 拆除阶段

模块建筑的拆除阶段是指将建筑物拆解成为可回收利用的建筑材料和建筑废弃物, 包括建筑物拆除过程中机械设备耗能、建筑废弃物的运输与建筑材料回收产生的碳排放。其中拆除耗能 C_{jx} 的计算参考式 (6), 建筑废弃物的运输 C_{tq} 参考式 (5)。

$$C_{cc} = C_{jx} + C_{tq} + C_{hs} \quad (9)$$

$$C_{hs} = \sum_{i=1}^n M_i (E_i - F_i) \quad (10)$$

式中: F_i 为第 i 种建材的碳排放因子 (kgCO₂/单位建材数量)。

3 模块学校的碳排放计算与分析

3.1 项目概况

案例工程位于深圳, 为夏热冬暖地区的学校改扩建腾挪教学楼, 建筑层高为三层, 建筑面积 6538.5 m², 采用钢结构模块技术, 每个教室模块由两个标准钢结构组成; 采用混凝土条形基础, 建筑防火分类为 xxx, 耐火等级 xx, 抗震设防烈度为七度。

3.2 全生命周期测算

3.2.1 生产阶段

模块建筑生产阶段的碳排放计算范围包括基础、结构系统和主要围护系统, 参与计算的建材量占总量的 95% 以上。通过查找工程量清单计算各部分的碳排放量。

3.2.2 集成阶段

模块建筑集成阶段在工厂里完成, 建筑原材料在工厂经过加工形成结构构件与围护构件, 并通过焊接组成建筑模块。该阶段加工器械消耗电力能源产生碳排放。电力碳排放选取广东省 2020 年电力平均碳排放因子, 碳排放量按公式 (4) 计算, 功率参数为工厂加工器械的额定功率, 加工时间按工程量清单的模块加工时间计算得到。

3.2.3 运输阶段

模块建筑的运输阶段包括三个部分：一是从原材料产地到工厂进行集成的运输，二是形成模块后从工厂到工地的运输，三是在模块建筑需要异地再利用情况下发生的运输。运输一和运输二按公式(5)进行计算，运输三则采用 30 km 的平均运输距离进行估算，同时按模块学校建筑的项目使用时间，估计在 50 a 全生命周期内发生 3 次或以上的重复利用，因此取最低值 $n=3$ 进行计算。

3.2.4 建造阶段

模块建筑的建造为建筑结构和围护系统在工厂集成为模块后，在工地现场组合成完整建筑的过程。主要为吊装器械耗能，无需搭设脚手架。

3.2.5 运行阶段

运行阶段的碳排放主要来源于设备的能耗。通过项目清单统计设备标准额度，运行时间为每日学校工作时间；年工作时间扣除寒暑假，约为一般公共建筑的 75%。按每次周转需要进行更新维护进行计算维护碳排放，周转次数 $n=3$ 。设备能耗采用广东省 2020 年电力平均碳排放因子。同时该阶段校园绿化产生碳汇，为减碳活动。

3.2.6 拆除阶段

拆除阶段碳排放由建筑物拆除过程中机械设备耗能、建筑废弃物的运输与建筑材料回收三部分组成。拆除过程中的设备耗能按拆解再利用阶段进行计算，建筑废弃物的运输按运输阶段公式进行计算，平均运输距离取 30 km。建筑回收部分只考虑结构型钢部分，废弃钢材再加工碳排放系数采用 $578.36 \text{ kgCO}_2/\text{t}$ 。^[8]

3.3 其他结构形式碳排放量测算

根据不同材料结构类型建筑各阶段全生命周期碳排放比例^[2]，测算同样建筑面积的情况下，采用不同结构形式生产施工产生的建筑碳排放。其中运行阶段根据学校建筑的运行特点进行计算，每年有 3 个月的假期不产生碳排放，即运行阶段碳排放乘以 0.75 的系数。测算结果见表 2。

3.4 结果分析

案例模块学校全生命周期碳排放测算结果见表 3。模块学校全生命周期碳排放占比最大的是运行阶段，其次是建材生产阶段。拆除阶段由于钢材的回收再利用，整体碳排放降低了 25.47%。

表 2 案例模块学校建筑不同结构形式的碳排放测算
Table 2 Calculation of carbon emissions in modular schools with different structural forms

结构类型	一般公建碳排放强度 /[$\text{kgCO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$]	学校碳排放总量 / tCO_2e	学校碳排放强度 /[$\text{kgCO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$]
现浇钢筋混凝土结构	85.52	23 353.67	69.83
装配式钢结构	75.62	20 302.44	60.70

表 3 案例模块学校建筑全生命周期碳排放情况汇总
Table 3 Summary of carbon emissions throughout the entire lifecycle of modular school buildings

阶段	组成	碳排放 / kgCO_2e	年均碳排放量 /[$\text{kgCO}_2\text{e}/\text{a}$]	碳排放强度 /[$\text{kgCO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$]	各阶段碳排放占比 /%
建材生产阶段	模块化钢结构	4 054 990	81 099.8	12.40	
	围护结构	608 100	12 162.0	1.86	
	室外楼梯	38 700	774.0	0.12	37.10
	基础	585 420	11 708.4	1.79	
	其他	2 960	59.2	0.01	
	小计	5 290 170	105 803.4	16.18	
部件集成阶段	加工	4 780	95.6	0.01	
	安装	220	4.4		0.04
	小计	5 000	100	0.02	
运输阶段	小计	43 372.4	867.448	0.13	0.30
	安装	16 270	325.4	0.05	
流转阶段	拆除	13 016	260.32	0.04	
	运输	2 215.2	44.304	0.01	0.22
	小计	31 501.2	630.024	0.10	
施工建造阶段	吊装	1 400	28		
	其他	17 660	353.2	0.05	0.13
	小计	19 060	381.2	0.06	
	空调	4 054 000	81 080	12.40	
运行阶段	照明	3 854 190	77 083.8	11.79	
	设备	1 102 470	22 049.4	3.37	
	新风	3 543 320	70 866.4	10.84	87.90
	碳汇	-19 610	-392.2	-0.06	
	小计	1 2534 370	250 687.4	38.34	
拆除回收阶段	拆除	5 290	105.8	0.02	
	运输	12 719.3	254.386	0.04	
	回收	-3 649 491	-72 989.82	-11.16	-25.47
	小计	-3 631 481.7	-72 629.634	-11.11	
合计		14260 490.7	285 209.814	43.62	100.00

为方便与其他结构形式的建筑全生命周期碳排放进行比较，我们参考《建筑碳排放计算标准》，将回收阶段的碳排放归类于建材生产阶段，集成阶段、流转阶段的安装和运输阶段合并为施工阶段，以保持全生命周期阶段划分的一致。计算结果见表 4。在不同结构的学校建筑中，模块化钢结构学校建筑碳排放强度最低，这主要与模块化钢结构的集成技术、

建筑节能

装配式施工和回收材料比例高有关。由于采用的建筑材料回收比例高,生产阶段的碳排放测算结果占比仅占 11.48%。运营阶段的碳排放量基本相同的情况下,模块化建筑的占比最高。在碳排放强度最低的前提下,模块化钢结构学校建筑施工阶段的碳排放比例仅有 0.17%,拆除阶段仅占 0.06%,占比比钢筋混凝土结构和装配式钢结构都低;但按单位时间计算,不同结构类型建筑施工和拆除阶段的碳排放强度都是全生命周期中最高的。钢混结构的施工阶段碳排放占比最高,比模块化钢结构高 5.8 倍;拆除阶段高约 100 倍;装配式钢结构施工阶段碳排放是模块化钢结构的 2.4 倍,拆除阶段高 3.3 倍。

表 4 不同结构模块学校建筑全生命周期碳排放情况^[6]
Table 4 Carbon emissions throughout the entire life cycle of school buildings with different structural modules

结构类型	各阶段碳排放比例/%				学校建筑碳排放强度 /[kgCO ₂ /(m ² ·a)]
	生产	施工	运营	拆除	
现浇钢筋混凝土结构	16.00	3.10	73.40	7.00	69.83
装配式钢结构	20.50	0.40	78.90	0.20	60.70
模块化钢结构	11.48	0.17	87.90	0.06	43.62

4 结语

(1) 模块化技术明显降低了施工和拆除阶段的碳排放集中排放量,对解决建筑施工的环境污染具有积极意义。

(2) 在需要重复利用的情况下,模块化钢结构的拆除和安装产生的碳排放量远低于钢筋混凝土结构,约为装配式钢结构的一半。

(3) 基于建筑全生命周期理论,建立了装配式模块化钢结构建筑的计算模型,并对模块化钢结构学校建筑碳排放进行了核算,对双碳背景下模块建筑的发展具有重要参考意义。

研究表明,模块技术能有效降低建筑物化阶段的碳排放,在低碳发展的政策支持下,选择模块化建筑是一种行之有效的低碳减排方法。

参 考 文 献

- [1] 中国建筑节能协会能耗统计专业委员会. 中国建筑能耗研究报告 [R]. 2018.
- [2] 王玉, 张宏, 董凌. 不同结构类型建筑全生命周期碳排放比较 [J]. 建筑与文化, 2015 (2): 110-111.
- [3] 王王上. 典型住宅建筑全生命周期碳排放计算模型及案例研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
- [4] 王张诺. 构件循环利用建筑产品的碳排放计量方法初探——以东南大学轻型钢结构房屋物化阶段碳排放统计为例 [D]. 南京: 东南大学, 2018.
- [5] 王白路恒. 公共建筑全生命周期碳排放预测模型研究——以天津市办公建筑为例 [D]. 天津: 天津大学, 2019.
- [6] 王鞠颖, 陈易. 全生命周期理论下的建筑碳排放计算方法研究——基于 1997~2013 年间 CNKI 的国内文献统计分析 [J]. 住宅科技, 2014, 34 (5): 32-37.
- [7] 王余鹏, 吴培浩, 杨仕超. 广东省国家机关办公建筑和大型公共建筑能耗统计与分析 [J]. 广东土木与建筑, 2012 (4): 30-32.
- [8] 王尚春静, 储成龙, 张智慧. 不同结构建筑生命周期的碳排放比较 [J]. 建筑科学 2011, 27 (12).