

文章编号: 1009-6094(2023)07-2523-11

基于 LCA 法的 3D 打印建筑碳排放量及减碳效果分析*

孟庆成¹ 胡 垒¹ 李明健¹ 万 达¹ ,
吴浩杰¹ 齐 欣²

(1 西南石油大学土木工程与测绘学院 成都 610500;

2 西南交通大学土木工程学院 成都 610031)

摘 要: 气候变暖已成为全球生态环境问题,而建筑业占据碳排放总量的近三分之一,建筑建造过程减碳潜力巨大。针对 3D 打印建筑碳排放及减碳效果评价问题,采用全生命周期评价方法定义 3D 打印建筑碳排放计算模型,对比分析 3D 打印建造与传统建造和常规绿色建造方式物化阶段碳排放。量化分析得到以下结果:首先,3D 打印混凝土掺入粉煤灰、硅灰等材料替代部分水泥用量,对比普通混凝土其每立方米碳排放有效降低 10%~30%。其次,3D 打印建造材料运输及施工过程碳排放低于传统和常规绿色建造方式。最后,建筑物化阶段中 3D 打印建造比传统建造和常规绿色建造方式碳排放总量分别降低 15.97% 和 8.78%。3D 打印建造物化阶段碳排放均低于传统建造和常规绿色建造方式,且减碳效果显著。

关键词: 环境科学技术基础学科; 3D 打印; 全生命周期评价; 建筑碳排放; 减碳效果

中图分类号: X22 文献标志码: A
DOI: 10. 13637/j. issn. 1009-6094. 2022. 0650

0 引 言

21 世纪早期,由于世界各国经济快速发展忽视了对环境造成的影响,导致气候变暖已经成为了全球严峻的生态问题。2021 年,由政府间气候变化专门委员会(IPCC)第六次评估报告(AR6)^[1]首次提出,随着对气候变化系统的科学研究,已逐渐认识自工业革命到 21 世纪全球气温增长几乎完全是由人类的生命活动引起。温室气体^[2](Greenhouse Gas, GHG)的排放成为了全球温室效应增长的主要因素, GHG 主要由 6 种气体组成,其中二氧化碳气体

(CO₂)影响占比最大。

随着世界各国逐渐趋向于城市化和智能化,建筑业迅猛发展,建筑建造碳排放已经占据总碳排放的近三分之一^[3],建筑建造过程减碳潜力巨大。传统建筑建造方式已经不能满足对绿色低碳建筑的要求,一种新型建筑制造技术:3D 打印(3 Dimensional Printing)逐渐成为建筑施工行业研究的热点。作为第三次工业革命重要标志的 3D 打印技术已经蔓延到各类科学领域^[4],其中医学、航天航空和机械制造领域的应用趋向于成熟,反观建筑 3D 打印的应用才刚刚起步。3D 打印技术是具有高效、节能、环保、安全等特点的自动化和数字化建造技术,同时 3D 打印建造方式可以有效降低建筑物化过程中产生的碳排放,是一种绿色与经济为一体的新型建筑建造技术。

建筑碳排放计算范围界定方法主要分为投入产出法、全生命周期评价法和混合评价法^[5]。早在 1998 年, Suzuki 等^[6]就首次使用投入产出法对日本建筑物的建造、运营、维护和翻新过程碳排放进行计算,但投入产出法计算碳排放的结果精度有限。2011 年, You 等^[7]首先建立城市建筑系统的生命周期模型(LCCE 模型),针对建筑设计阶段不同结构形式对建筑碳排放的影响和建筑全生命周期不同阶段碳排放足迹进行分析,并通过计算得到的分析结果提出建筑减排措施。混合评价法把产品投入产出法和全生命周期评价法结合起来,用以弥补计算精度不足和计算边界难定义的缺陷,但是计算分析过程复杂且计算结果仍存在误差^[8]。对比分析发现,投入产出法的计算结果精度有限和混合评价法计算分析过程较为复杂,而全生命周期评价法准确性和针对性较好,适用于建筑领域碳排放计算。所以本文使用偏向于建筑碳排放计算的全生命周期评价方法(Life Cycle Assessment, LCA)^[8]对 3D 打印建筑碳排放范围界定。

早在 2005 年,仲平^[9]首次将建筑全生命周期阶段界定为 5 个阶段,分别为建筑材料、建筑建造、建筑使用、建筑拆除和废弃建材处理阶段。随着废弃建筑材料可回收再利用研究的发展,回收再利用建筑材料应该抵消建筑物化阶段计算的部分材料消耗碳排放量。而上述定义的建筑全生命周期 5 个阶段均为碳排放计算,并未考虑到废弃建筑材料回收再利用带来的减碳效果。所以本文根据建筑碳排放和建材回收再利用的减碳过程将建筑全生命周期划分为碳排放阶段和碳补偿阶段,其中碳排放阶段分为建筑设计、建筑物化、建筑运营维护和建筑废弃拆

2523

* 收稿日期: 2022-04-14

作者简介: 孟庆成,讲师,博士,从事桥梁结构健康监测与桥梁全生命周期碳排放研究, 214400395@qq.com。

基金项目: 国家自然科学基金项目(52078442, 51408498); 四川省科技计划项目(2021YJ0038)

除,而碳补偿阶段为废弃建材回收再利用。目前针对建筑全生命周期碳排放主要有 3 种碳足迹计算方法,包括质量平衡法、排放系数法和实测法^[10]。通过 3 种方法的对比分析发现,排放系数法比实测法和质量平衡法应用范围更广,更适用于建筑碳排放计算且通过碳排放因子计算得到的结果准确度高,最接近实际碳排放值。

1 建筑 3D 打印混凝土技术

3D 打印技术是增材制造技术的一种^[4],3D 打印机通过预设程序按设计方案进行材料的逐层堆积打印。有别于传统建造施工,3D 打印是高度精确化的人工智能建造施工方式,全机械化建造模式具有施工建造快、建筑构件精度高和工程成本低等特点。3D 打印技术是传统制造技术与装配式建筑理念的结合,既可以现场进行“原位 3D 打印”,也可以利用装配式理念在工厂进行预制 3D 打印后运输现场安装。装配式建筑的 3D 打印建造流程如图 1 所示。

1.1 建筑 3D 打印混凝土建造技术

建筑领域应用的 3D 打印混凝土建造技术主要分为轮廓工艺、D 型工艺和混凝土打印^[11]。

轮廓工艺(Contour Crafting,CC)^[12]是一种添加制造技术,通过计算机程序控制龙门架在三维空间中机械的移动,精准地将材料送到指定位置完成打印过程。至今,轮廓工艺已经发展趋向成熟,在国内外建筑领域得到广泛的应用。

D 型工艺^[13](D-shape)通过喷挤装置将打印材料按照一定的宽度和厚度进行打印,由意大利的工程建造师 Dini 提出。主要应用于中等体量的结构打印,打印材料主要是粉末材料和化学黏结剂混合组成。D 型工艺打印的结构整体性好、强度高、成本较低,但是由于

其打印装置较大,在实际应用中打印尺寸受限。

混凝土打印工艺^[13]最早是由拉夫堡大学建筑工程学院提出这一概念,同样使用喷嘴挤压混凝土按预定轨迹逐层打印,但所要求混凝土打印过程必须更加精确,对于打印复杂结构更具优势,缺点是打印速度较慢。混凝土打印对建设过程中使用材料的凝结固化时间和强度要求较高,通常使用具有良好性能的聚丙烯纤维混凝土作为打印材料。3D 混凝土打印装置如图 2 所示。

3D 打印数字建造技术融合了计算机、机械自动化、建筑设计和土木工程等学科,充分发挥数字化和自动化建造优势,将复杂建筑结构分解分层然后逐层堆积完成打印。

1.2 建筑 3D 打印混凝土材料

建筑 3D 打印混凝土使用一种特殊的“油墨”材料^[15],其中水泥作为主要的胶凝材料,在掺入纤维、外加剂和粗、细骨料。纤维作为增强材料,主要用于增强混凝土抗裂性能。外加剂有效减少混凝土凝结硬化时间,并提高混凝土构件强度。建筑 3D 打印混凝土有别于传统混凝土,必须具有良好的打印性,其



图 2 3D 混凝土打印装置图^[14]

Fig. 2 3D concrete printing device diagram^[14]

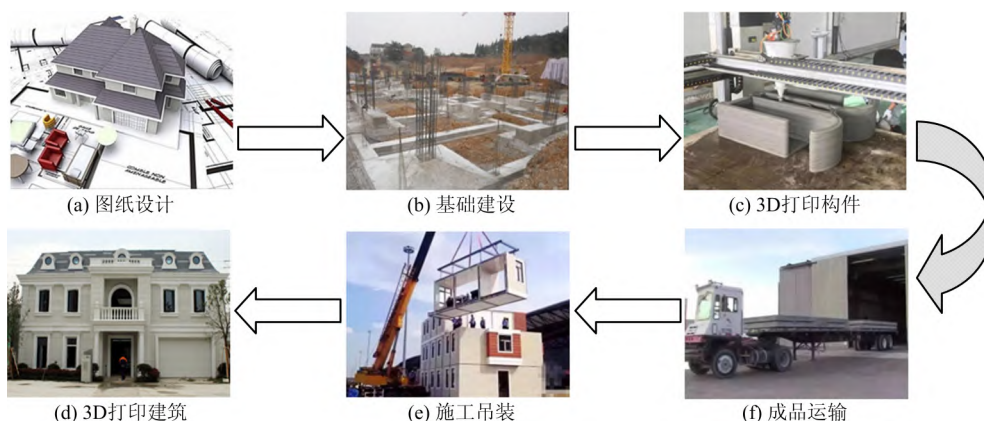


图 1 基于装配式方法的建筑 3D 打印流程图

Fig. 1 Flow chart of building 3D printing based on assembly method

中包括可建造性、可挤出性和可泵送性^[16]。

建筑 3D 打印混凝土材料根据其组成成分可分为普通砂浆、纤维砂浆、再生砂浆和含粗骨料混凝土^[15]。其中纤维砂浆通过不同种类纤维的掺入,可以提高构件的韧性和抗拉强度,减少干燥收缩裂缝。再生砂浆则使用一定比例的建筑垃圾、尾矿和工业垃圾作为再生骨料,提高了混凝土的经济效益和环境效益。含有一定比例粗骨料的 3D 打印混凝土,可以提高 3D 打印速度,减少水泥的用量,生产相同体积的构件物可以节省工程成本和提高打印效率。建筑 3D 打印过程中使用的特殊混凝土,其保证混凝土力学性能时,掺入粉煤灰、硅灰等材料代替部分水泥用量^[17],能有效降低 3D 打印混凝土碳排放。

2 建筑 3D 打印碳排放计算模型

2.1 碳排放范围界定

基于全生命周期评价法将建筑全生命周期划分为建筑碳排放和碳补偿,即“摇篮—摇篮”的过程,包括建筑设计、建筑物化、建筑运营维护、建筑废弃阶段,其中建筑物化阶段分为建材生产、材料运输和施工建造阶段,建筑废弃阶段分为建筑拆除和建材回收利用阶段。3D 打印建筑全生命周期碳排放研究尚未涉及建筑运营维护和废弃拆除回收阶段,所以本节主要针对 3D 打印建筑物化阶段碳排放量化分析,其物化阶段包括:3D 打印材料生产阶段、材料与成品运输阶段和 3D 打印建造施工阶段。建筑全生命周期碳排放及减碳方式如图 3 所示,本文主要量化分析 3D 打印建筑的设计阶段及建筑物化阶段的碳排放及减碳效果。

2.2 碳排放计算模型

本文主要基于 GBT 51366—2019《建筑碳排放

计算标准》^[18]、ISO 14040—1997《环境管理—生命周期评价—原则与框架》和 ISO 14041—1998《环境管理—生命周期评价—目标与范围确定和清单分析》系列全生命周期评价对 3D 打印建筑物化阶段碳排放计算模型进行定义。主要对建筑 3D 打印全生命周期碳排放、3D 打印建筑物化阶段碳排放、3D 打印材料生产及运输碳排放和 3D 打印建造施工碳排放分别建立计算模型。

2.2.1 总碳排放计算模型

根据前述 3D 打印建筑全生命周期碳排放计算边界,采用碳排放因子为媒介的碳排放系数法进行计算,3D 打印建筑全生命周期总碳排放 $C(\text{CO}_2)$ 计算公式为

$$C(\text{CO}_2) = C_{\text{JC}} + C_{\text{JZ}} + C_{\text{OM}} + C_{\text{CC}} - C_{\text{MR}} \quad (1)$$

3D 打印建筑物化阶段碳排放 C_{BS} 计算公式为

$$C_{\text{BS}} = C_{\text{JC}} + C_{\text{JZ}} \quad (2)$$

式中 $C(\text{CO}_2)$ 为 3D 打印建筑全生命周期碳排放总量; C_{BS} 为 3D 打印建筑物化阶段碳排放总量; C_{JC} 为 3D 打印建筑材料生产及运输阶段碳排放总量; C_{JZ} 为 3D 打印建筑施工建造阶段碳排放总量; C_{OM} 为 3D 打印建筑运营维护阶段碳排放总量; C_{CC} 为 3D 打印建筑拆除阶段碳排放总量; C_{MR} 为 3D 打印建筑废弃建材回收再利用碳排放补偿总量; 各项碳排放总量的单位均为 kgCO_{2e} 。

2.2.2 材料生产及运输碳排放计算模型

3D 打印建筑材料生产及运输阶段碳排放总量 C_{JC} 主要包含建材生产和运输时所产生的碳排放,其计算公式为

$$C_{\text{JC}} = \sum_i^n M_i F_i + \sum_i^n M_i D_i T_i \quad (3)$$

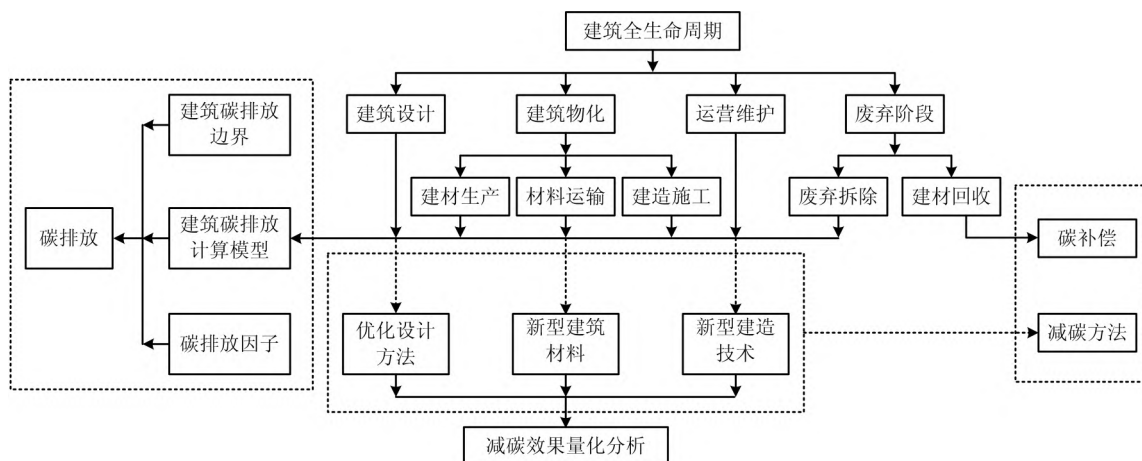


图3 建筑全生命周期碳排放及减碳效果量化分析

Fig.3 Quantitative analysis of carbon emission and carbon reduction effect in the whole life cycle of buildings

式中 M_i 为 3D 打印建筑第 i 种主要建材消耗量;
 F_i 为 3D 打印建筑第 i 种主要建材碳排放因子,
 kgCO_2/t ; D_i 为 3D 打印建筑第 i 种主要建材的平均
 运输距离, km ; T_i 为 3D 打印建筑第 i 种主要建材
 运输单位重量距离产生的碳排放, $\text{kgCO}_2/(\text{t} \cdot \text{km})$ 。

2.2.3 建造施工碳排放计算模型

3D 打印建筑在施工建造过程产生的碳排放主
 要包括人工和施工机械两部分。其中人工碳排放由
 工人数量乘以工作时间, 施工机械碳排放由机械消
 耗能源的碳排放因子乘以台班数量计算所得。 C_{JZ} 碳
 排放计算公式为

$$C_{JZ} = \sum_i^n P_i B_i + xtz \quad (4)$$

式中 P_i 为 3D 打印建造机械第 i 种的台班数量, 台
 班; B_i 为 3D 打印建造机械第 i 种的碳排放因子,
 $\text{kgCO}_2/\text{台班}$; x 为人工数量, 人次; t 为工作总时
 长, 工日(a); z 为技术人员单位工日工作量碳排放
 因子, $\text{kgCO}_2/(\text{人} \cdot \text{a})$ 。

2.3 碳排放因子

碳排放因子, 即单位碳排放系数。建筑 3D 打印
 使用的碳排放因子主要为能源、人工、机械和打印建
 筑材料等。建筑碳排放因子尚未出现统一的标准,
 本文中碳排放因子主要参考 GBT 51366—2019
 《建筑碳排放计算标准》和国内外碳排放因子的文
 献研究。建筑建造过程会排放温室气体, 为使计算
 简便, 本文采用《京都协议书》中对温室气体的定
 义, 把 GHG 气体划分为二氧化碳(CO_2)、氢氟碳化
 合物(HFCs)、六氟化硫(SF_6)、氧化亚氮(N_2O)、全
 氟化合物(PFCs)和甲烷(CH_4)六大类^[2]。温室
 气体碳排放量计算采用基于 IPCC 研究发布的全球
 变暖潜力值(Global Warming Potential, GWP) 换算,
 其中将单位 CH_4 碳排放量作为基准值, 其他温室
 气体依次换算成二氧化碳当量, 温室气体 GWP 折算系
 数见表 1。

2.3.1 能源碳排放因子

建筑 3D 打印物化过程中主要使用能源为化石
 燃料和电力。其中化石燃料消耗主要包括燃料开采
 加工阶段的逸散阶段和使用过程中的燃烧阶段, 将

物化阶段中材料生产、运输和施工机械作业时所燃
 烧和使用的能源作为计算依据。建筑施工过程中主
 要使用电力, 由于电力碳排放因子数值直接由地区
 和发电形式决定, 电力产生的形式主要分为风力、水
 力、火力和太阳能发电等。我国的电网区域分为七
 大体系, 本文选取西南地区电力碳排放因子作为计
 算依据, 其值为 $0.85 \text{ kgCO}_2/\text{kWh}$ ^[19]。

2.3.2 建筑材料碳排放因子

本文中的建筑材料指 3D 打印建造生产过程中
 所使用的建筑材料。诸多研究发现, 建筑建造物化
 过程中, 建材碳排放总量占物化阶段总碳排放的
 90% 左右^[20], 建筑材料种类选择和材料用量直接
 决定建材碳排放。建筑 3D 打印混凝土和粉煤灰混
 凝土的碳排放因子根据其配合比设计计算得出, 其
 余常用建筑材料碳排放因子见表 2。

2.3.3 施工机械碳排放因子

建筑施工中各种类型机械的使用消耗将产生温
 室气体, 本文主要用台班为计量单位换算施工机械
 的碳排放因子。建筑原材料在生产加工中所消耗的
 机械能源换算进材料碳排放因子, 在本节不进行计
 算。3D 打印机碳排放因子具体取值见第 3 节, 其余
 施工机械碳排放因子见表 3。

2.3.4 交通运输碳排放因子

我国建筑材料和施工机械设备的运输方式主要
 分为铁路运输、水路运输和公路运输。其中施工机
 械多采用公路运输, 建筑材料则主要为水路和公路
 运输方式。根据项目的建设情况选择合适的材料生
 产地区, 可降低运输过程的碳排放量。混凝土材料
 按默认运输距离 40 km 计算, 其他建筑材料运输距
 离按 500 km 计算。根据本文中 3D 打印建造过程
 材料及成品运输量, 主要采用中等和重型运输机械,
 详细数据见表 4。

3 3D 打印桥梁碳排放计算分析

本节从 3D 打印建筑设计阶段减碳方式和模拟
 3D 打印建造、传统建筑建造和常规绿色建造过程出
 发, 研究建筑建造阶段的减碳方式及效果, 最后对 3
 种建造方式物化阶段的碳排放进行量化分析。

传统建筑设计不仅需要考虑结构安全性问题,

表 1 主要温室气体 100 年限碳排放当量折算系数^[2]

Table 1 Conversion coefficient of carbon emission equivalent of main greenhouse gases in 100 years

温室气体	CO_2	N_2O	CH_4	PFCs	HFCs	SF_6
GWP/($\text{kgCO}_2 \cdot \text{kg}^{-1}$)	1	25	298	7 390	14 800	22 800

表 2 常用建筑材料他排放因子^[18]Table 2 Other emission factors of common building materials^[18]

建材类型	碳排放因子	建材类型	碳排放因子
普通硅酸盐水泥	735 kgCO _{2e} / t	C30 混凝土	295 kgCO _{2e} / m ³
C40 混凝土	340 kgCO _{2e} / m ³	C50 混凝土	385 kgCO _{2e} / m ³
粉煤灰混凝土	261.62 kgCO _{2e} / m ³	3D 打印混凝土	234.08 kgCO _{2e} / m ³
砂/ $f = 1.6 \sim 3.0$	2.51 kgCO _{2e} / t	碎石/ $d = 10 \sim 30 \text{ mm}$	2.18 kgCO _{2e} / t
自来水	0.168 kgCO _{2e} / t	木材	178 kgCO _{2e} / t
石灰生产	1 190 kgCO _{2e} / t	钢筋	2 138.5 kgCO _{2e} / t

表 3 常用施工机械碳排放因子^[18 21]Table 3 Carbon emission factors of common construction machinery^[18 21]

施工机械	碳排放因子 / (kgCO _{2e} · 台班 ⁻¹)	施工机械	碳排放因子 / (kgCO _{2e} · 台班 ⁻¹)
直流弧焊机 /75 (kV · A)	74.2	钢筋弯曲机 /40 mm	10.6
钢筋调直机 /40 mm	10.1	钢筋切断机 /40 mm	27.3
干混砂浆罐式搅拌机	22.8	混凝土输送泵 / (60 m ³ · h ⁻¹)	296
对焊机 /75 (kV · A)	101.4	混凝土抹平机 /5.5 kW	18.5
木工圆锯机 /500 mm	20.4	载货汽车 /10 t	124

表 4 交通运输碳排放因子^[18]

Table 4 Carbon emission factors of transportation

运输机械类别	碳排放因子 / (kgCO _{2e} · t ⁻¹ · km ⁻¹)	运输机械类别	碳排放因子 / (kgCO _{2e} · t ⁻¹ · km ⁻¹)
中型汽油货车运输 /载重 8 t	0.115	重型汽油货车运输 /载重 18 t	0.104
重型柴油货车运输 /载重 18 t	0.129	内燃机车运输	0.011
电力机车运输	0.010	铁路运输	0.010
集装箱船运输	0.012	干散货船运输	0.015

还要考虑结构的建造可行性及工程成本等问题,所以大多数建筑设计中,并没有考虑异形结构可以减少材料用量和降低碳排放的优势。而 3D 打印建造具有“无模板”施工的优势,在其设计阶段无需考虑结构的可建造性难度及异形构件导致的工程成本增加等问题。所以本节在 3D 打印桥梁设计阶段,使用计算机辅助设计软件(Ansys)对 3D 打印桥梁的初始模型进行结构拓扑优化处理,以得到更加轻量化和美观的桥梁结构形式。

目前应用 3D 打印技术建造的桥梁主要有两种

形式:一是直接“原位打印”荷载较小的人行桥类;二是应用装配式建筑理念方法,通过现场打印桥梁下部结构再将预制的桥梁上部结构运输至现场搭建成型。针对 3D 打印建筑国内外诸多实际案例,选取钢筋混凝土人行天桥作为本文的案例。通过传统钢筋混凝土人行桥和 3D 打印人行天桥的物化阶段各项碳排放量对比分析评价其减碳效果。

3.1 桥梁设计阶段减碳方式

3.1.1 人行天桥初始设计

本节采用钢筋混凝土人行天桥的初始设计作为

结构优化模型,通过建筑信息模型 (Building Information Modeling, BIM) 软件建立桥梁初始模型。3D 打印混凝土人行桥计算跨径为 25 m 的 2 跨结构,两端的桥墩中心线距离桥端 5 m,桥墩高 3 m。该桥梁总跨径为 5 m + 25 m + 25 m + 5 m = 60 m,桥面宽度为 6 m,桥面距离地面总高 8 m。施工形式采用装配式 + 3D 打印结合的模式,桥面板厚 0.5 m,采用工厂预制,将桥面板分为 24 段,单段长 5 m,宽 3 m,高 0.5 m,其材料使用 C30 混凝土。桥梁整体结构采用钢筋混凝土结构,其泊松比 $\nu = 0.2$,杨氏模量 $E = 30 \text{ GPa}$ 。

本文主要探讨 3D 打印建筑碳排放量,通过 3D 打印桥梁和传统桥梁物化建造阶段碳排放量进行对比分析,故暂时不考虑桥梁基础工程施工部分。

3.1.2 桥梁结构拓扑优化设计方法

拓扑优化是优化算法、物理模型和数学模型为一体的计算机辅助设计方法^[22]。结构设计目标是满足结构安全性的同时尽量减少工程造价和优化建筑物外观。在传统建筑结构设计时,主要受到设计师的经验影响,对建筑结构创新性略有缺乏,而计算机辅助设计正是解决这一问题的重要方法。传统建筑结构设计另一个重要影响因素是异形结构在施工建造时,其定制构件模板将提高工程成本,且大多模板均为一次性使用,其经济效益和环境效益均不足。本文使用的 3D 打印建造技术通过无模板施工建造方式,再结合结构的拓扑优化设计,极大满足了结构设计的要求。结构优化的同时,减少了建筑材料的使用,有效降低桥梁物化阶段的碳排放总量,环境效益和经济效益都得到提高。

本节使用的结构优化方法是基于 Ansys Workbench 平台中的拓扑优化模块。其优化流程为,通过 BIM 软件 (Revit) 进行桥梁结构的初步设计,然后将初步设计模型导入 Ansys Workbench 平台中进行网格划分和结构受力分析 (以总体变形、结构应力状态作为优化的控制指标),Workbench 平台拓扑优化流程见图 4。通过质量响应约束方式进行优



图 4 Workbench 平台拓扑优化流程

Fig. 4 Workbench platform topology optimization process

化迭代,多次组合目标收敛准则迭代后将会计算出最有利的结构形式。本节结构优化的参数主要为:桥梁构件材料为钢筋混凝土。考虑结构受力特点和计算机算力,网格单元尺寸划分为 200 mm。桥墩与地基接触面和桥面板均设置为非设计区域,桥梁主要受惯性自重和 1.8 kPa 均布人行荷载作用。拓扑优化模块使用质量响应约束,由于其存在自重,建议使用范围定义依据更有利于迭代优化,质量范围主要划分为 10% ~ < 20%、20% ~ < 30%、30% ~ < 40% 和 40% ~ < 50%。桥梁 20% ~ < 30% 质量拓扑迭代优化过程如图 5 所示。

3.1.3 拓扑优化设计减碳效果

桥梁模型结构优化质量范围设置越小,优化后的结构形式越轻量化,10% ~ < 20% 和 20% ~ < 30% 质量优化后的模型质量保存率分别为 18.89% 和 22.56%。但考虑到 10% ~ < 20% 质量优化后桥梁构件局部应力过大,容易造成应力集中现象和发生结构局部破坏,所以本节使用 20% ~ < 30% 拓扑优化后的桥梁模型作为计算模型,如图 6 所示。

桥梁模型拓扑优化后下部异形结构体积为 174.78 m³,传统桥梁下部异形结构体积为 194.4 m³,钢筋混凝土体积减小 10.09%,其碳排放有效降低 25.21%。经过 Workbench 结构优化后的桥梁下部结构更加轻量化,外形具有可观赏性,且使用 3D 打印技术建造可避免使用异形模板,提高打印建造速率,降低工程成本并有效降低其碳排放,结构拓扑优化的桥梁下部结构详图如图 7 所示。建筑设计阶

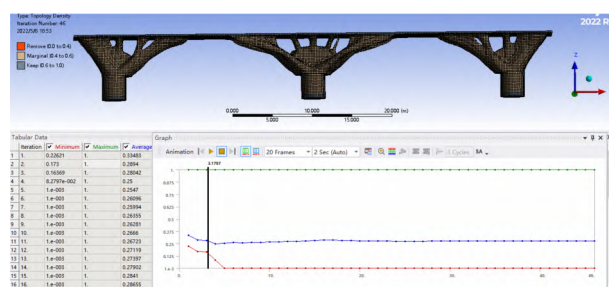


图 5 桥梁 20% ~ < 30% 质量范围拓扑迭代优化过程

Fig. 5 Topology iterative optimization process of bridge with 20% - < 30% mass range

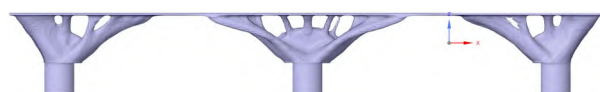


图 6 20% ~ < 30% 质量拓扑优化的桥梁模型

Fig. 6 Bridge model with topological optimization of 20% - < 30% mass

段 3D 打印建造技术与结构拓扑优化设计方法结合,能有效降低材料用量,减碳效果显著。

3.2 桥梁施工建造方案

本节模拟 3D 打印建造、传统建造和常规绿色建造施工方案,其桥梁跨径、上部结构均一致,仅桥梁下部异形结构不同,可最大量度展现三种施工方式物化阶段碳排放及减碳效果。通过工程量清单和碳排放因子计算两者所产生的碳排放总量,量化分析 3D 打印建筑碳排放的优势。模拟施工方案如下。

方案一为 3D 打印建造模式,桥梁下部异形构件使用 3 台 3D 打印机进行现场打印施工,桥墩材料使用 C40 钢筋混凝土,桥面板由工厂预制后运输至现场拼接。本节主要针对 3D 打印施工模式碳排放建模分析,其中 3D 打印机速率和 3D 打印混凝土材料参数(见表 5)均参考国内外 3D 打印建筑已有研究成果。3D 打印机渐变截面打印速度设置为 10 cm/s,打印条宽 3 cm、厚 2 cm,层间间隔为 3 min。3D 打印机采用单位工时消耗能源量(耗电量: 3.9 kWh)作为其计算依据^[17]。拟整体建造完成为 130 d,需要人工 10 人,建造用电 3 652 kWh。

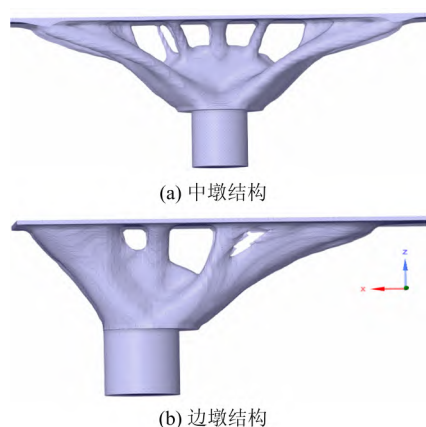


图 7 3D 打印桥梁下部结构详图

Fig. 7 3D printed details of bridge substructure

方案二和方案三是传统现浇施工,其中桥梁下部异形构件施工分为两种方式:方案二采用 C40 钢筋混凝土施工,容重取为 2 400 kg/m³;方案三采用粉煤灰混凝土施工,容重取为 2 324.5 kg/m³,配合比设计见表 5。传统建造方式和常规绿色建造方式仅桥梁下部异形结构浇筑的混凝土不同,其他建筑材料及建造方式均相同。桥梁面板使用 C30 混凝土容重取为 2 370 kg/m³,桥梁下部结构采用钢筋混凝土进行现场浇筑,主筋采用 HRB400 螺纹钢筋,其他则采用 HPB300 光圆钢筋,钢筋加工均在现施工场钢筋加工棚中加工。其混凝土使用商品混凝土,均由车辆泵送运输到施工现场。考虑绿色低碳,施工过程中所用模板支撑采用木模板。拟整体建造完成为 180 d,需要人工 20 人,建造用电 2 760 kWh。

3.3 桥梁物化阶段碳排放及减碳效果量化分析

3.3.1 桥梁物化阶段碳排放量计算

3D 打印桥梁所使用的特殊混凝土需要满足其性能要求,本节采用 Amran 等^[23]研究报告中的 3D 打印混凝土材料配合比设计,具体参数见表 5。根据表中数据计算可知,3D 打印桥梁混凝土材料容重为 2 216 kg/m³,其混凝土碳排放量为 234.08 kgCO_{2e}/m³;常规绿色建造方式中使用的粉煤灰混凝土容重为 2 324.5 kg/m³,其混凝土碳排放量为 261.62 kgCO_{2e}/m³。3D 打印桥梁下部异形结构通过 Workbench 平台静力学分析模块查询可知,异形构件体积为 174.78 m³。混凝土碳排放计算时,应去除钢筋所占体积 0.18 m³,混凝土纯体积为 174.6 m³。

本节基于全生命周期碳排放计算方法,通过工程量清单和碳排放因子计算桥梁物化阶段总碳排放,其中常规绿色建造方式指桥梁下部异形结构部位使用低碳粉煤灰混凝土,计算结果见表 6。

表 5 3D 打印混凝土和粉煤灰混凝土配合比设计及碳排放量

Table 5 Mix proportion design and carbon emission of 3D printed concrete and fly ash concrete

主要项目	水泥	粉煤灰	硅灰	砂	石子	水	超增塑剂	减水剂
3D 打印 混凝土	容重/(kg·m ⁻³)	290.0	278.0	145.0	1 211.0	285.0	7.0	
	碳排放因子/(kgCO _{2e} ·t ⁻¹)	735	19.6	14.0	2.51	0.168	1 480	
粉煤灰 混凝土	容重/(kg·m ⁻³)	343	114		749	953	160	5.5
	碳排放因子/(kgCO _{2e} ·t ⁻¹)	735	19.6		2.51	2.18	0.168	600

注:水泥为普通硅酸盐水泥,砂为石英砂。

表6 建筑建造过程主要项目碳排放

Table 6 Carbon emissions of main projects in building construction process

主要项目	工程量	碳排放因子	总碳排放/ kgCO _{2e}	分项占比/ %	总占比/%
C30 混凝土	178.51 m ³	295 kgCO _{2e} /m ³	52 660.45	32.32	
C40 混凝土	63.47 m ³	340 kgCO _{2e} /m ³	21 579.8	13.24	
3D 打印混凝土	174.6 m ³	234.08 kgCO _{2e} /m ³	40 870.45	25.08	89.12
3D 打印 混合建造 方式	钢材 13 512.48 kg	2 138.5 kgCO _{2e} /t	28 896.44	17.73%	
	木模板 6.84 t	178 kgCO _{2e} /t	1 217.52	0.75	
	材料运输 982.673 t	0.104 kgCO _{2e} /(t·km)	5 061.58	3.11	3.11
	施工机械 —	—	7 214	4.43	
	人工 1 120 a	2.09 kgCO _{2e} /(人·a)	2 340.8	1.44	7.77
	电 3 652.37 kWh	0.85 kgCO ₂ /kWh	3 104.51	1.90	
C30 混凝土	178.51 m ³	295 kgCO _{2e} /m ³	52 660.45	27.16	
C40 混凝土	257.61 m ³	340 kgCO _{2e} /m ³	87 587.4	45.17	
传统建造 方式	钢材 12 753.05 kg	2 138.5 kgCO _{2e} /t	27 272.4	14.06	87.31
	木模板 9.96 t	178 kgCO _{2e} /t	1 772.88	0.92	
	材料运输 1 064.053 t	0.104 kgCO _{2e} /(t·km)	5 513.05	2.84	
	施工机械 —	—	10 570	5.45	2.84
	人工 3120 a	2.09 kgCO _{2e} /(人·a)	6 520.8	3.36	
	电 2370 kWh	0.85 kgCO ₂ /kWh	2 014.5	1.04	9.85
C30 混凝土	178.51 m ³	295 kgCO _{2e} /m ³	52 660.45	29.48	
C40 混凝土	63.47 m ³	340 kgCO _{2e} /m ³	21 579.8	12.08	
常规绿色 建造方式	粉煤灰混凝土 194.14 m ³	261.62 kgCO _{2e} /m ³	50 790.91	28.43	86.25
	钢材 12 753.05 kg	2 138.5 kgCO _{2e} /t	27 272.4	15.27	
	木模板 9.96 t	178 kgCO _{2e} /t	1 772.88	0.99	
	材料运输 1 049.39 t	0.104 kgCO _{2e} /(t·km)	5 452.07	3.05	3.05
	施工机械 —	—	10 570	5.92	
	人工 3 120 a	2.09 kgCO _{2e} /(人·a)	6 520.8	3.65	10.7
	电 2 370 kWh	0.85 kgCO ₂ /kWh	2 014.5	1.13	

注: 材料部分列出主要使用的建材; 材料生产及运输碳排放根据式(3)计算; 由于不同种类施工机械的工程量和碳排放因子均不同, 故用“—”表示; 表中直接计算出各类施工机械的总碳排放, 施工机械碳排放根据式(4)计算, 施工机械工程量由施工机械实际使用的台班量构成, 施工机械碳排放因子见表3; 表中直接给出施工机械碳排放总量; 3D 打印混合建造中木模板仅用于现浇桥墩施工中, 3D 打印施工部分并未使用模板; 人工工程量是由工作人员数量乘以工作时间计算。

3.3.2 减碳效果量化分析

通过数据量化分析发现, 建筑材料碳排放中, 混凝土材料碳排放占据主要影响因素, 而混凝土材料中水泥碳排放总量最大。本节中使用的 3D 打印混凝土, 通过掺入粉煤灰和硅灰替代部分水泥用量, 减少单位体积 3D 打印混凝土材料的碳排放量, 从而有

效降低建筑物化阶段碳排放总量。3D 打印建造方式减碳量及减碳效果对比分析见表 7。

据图 8 和表 7 中数据对比分析得出, 3D 打印建造方式的钢材和电力消耗碳排放增多, 而混凝土、人工和模板碳排放显著降低。3D 打印建造方式和常规绿色建造方式都使用低碳混凝土材料, 其异形结

表 7 3D 打印建造与其他建造方式相比的减碳量及减碳效果

Table 7 Carbon reduction amount and effect of 3D printing construction compared with other construction methods

主要项目	传统建造碳排放量/ kgCO _{2e}	常规绿色建造碳排放量/ kgCO _{2e}	3D 打印建造碳排放量/ kgCO _{2e}	3D 打印建造减碳量/kgCO _{2e}		3D 打印建造减碳效果/%	
				传统建造	常规绿色建造	传统建造	常规绿色建造
异形构件	66 007.6	50 790.91	40 870.45	25 137.15	9 920.46	38.08	19.53
混凝土							
钢筋	27 272.4	27 272.4	28 896.44	-1 624.04	-1 624.04	-5.95	-5.95
木模板	1 772.88	1 772.88	1 217.52	555.36	555.36	31.33	31.32
材料运输	5 513.05	5 452.07	5 061.58	451.47	390.49	8.19	7.16
施工机械	10 570	10 570	7 214	3 356	3 356	31.75	31.75
人工	6 520.8	6 520.8	2 340.8	4 180	4 180	64.1	64.1
电	2 014.5	2 014.5	3 104.51	-1 090.01	-1 090.01	-54.11	-54.11
建造过程							
总碳排放	193 911.48	178 633.81	162 945.47	30 966.01	15 688.34	15.97	8.78

注: 传统建造方式异形结构部位使用 C40 混凝土, 常规绿色建造方式异形结构部位使用粉煤灰混凝土, 3D 打印异形构件使用 3D 打印混凝土。

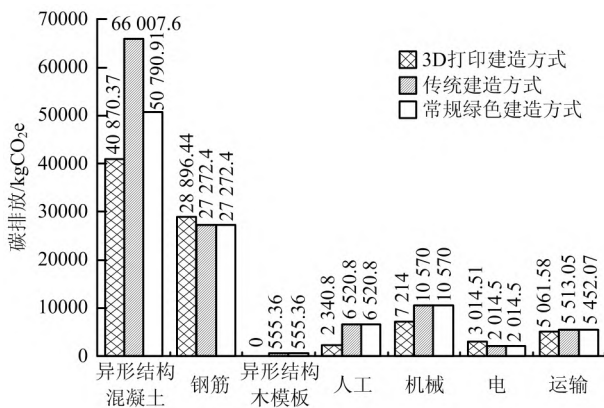


图 8 桥梁物化阶段部分碳排放对比分析图

Fig. 8 Comparative analysis of partial carbon emissions in physical and chemical stages of bridges

构混凝土的碳排放均低于传统建造方式, 具有良好的减碳效果。

研究发现, 采用 3D 打印混合建造模式, 各阶段碳排放量均低于另外两种建造方式所产生的碳排放, 且物化阶段碳排放总量对比传统建造方式和常规绿色建造方式分别降低 15.97% 和 8.78%, 其减碳效果显著。通过量化分析 3D 打印桥梁物化阶段碳排放, 发现运输和施工过程碳排放仅占物化阶段总碳排放的 3.11% 和 7.77%, 而建筑材料碳排放占比为 89.12%, 对建筑物化阶段碳排放起主导作用。本文所使用的 3D 打印混合建造方式为局部 3D 打

印 + 传统建造方式, 随着 3D 打印技术的研究发展, 若建筑整体全部使用 3D 打印建造, 对比传统建造方式其减碳效果会进一步提升, 将会积极地带动全球建筑行业的减碳行动。

4 结 论

本文基于 LCA 方法分析 3D 打印建筑设计阶段和物化阶段的减碳方式及减碳效果, 对 3D 打印桥梁与传统建造和常规绿色建造桥梁物化阶段碳排放量化分析, 得出以下结论。

1) 3D 打印建造和传统及常规绿色建造物化阶段中, 建筑材料碳排放均占总碳排放的 90% 左右。而建筑材料碳排放中, 混凝土碳排放占主导地位, 约为 70% ~ 80%。3D 打印特殊混凝土通过掺入粉煤灰、硅灰等材料代替部分水泥用量, 其特殊混凝土每单位立方米碳排放有效降低 10% ~ 30%, 具有良好的减碳效果。

2) 材料运输和建造过程中, 3D 打印方式的材料运输、施工机械和人工碳排放均低于传统建造和常规绿色建造方式, 仅电力消耗碳排放偏高, 且 3D 打印建造方式的材料运输及建造过程中产生的碳排放总量比传统建造和常规绿色建造方式分别降低 28.02% 和 27.84%, 其减碳效果显著。

3) 对比分析三类建造方式, 发现 3D 打印建造方式的材料、运输和施工阶段碳排放均低于传统建

造方式和常规绿色建造方式产生的碳排放,且物化阶段碳排放总量比传统建造方式和常规绿色建造方式降低 15.97% 和 8.78% 表明 3D 打印建造不仅对传统建造方式具有减碳作用,对使用低碳混凝土的常规绿色建造方式同样具有减碳效果。

通过研究分析 3 种建筑建造方式产生的碳排放,发现建筑行业降碳应该注重于新材料和新型施工技术,而 3D 打印技术的低碳混凝土、“无模板”施工和高度机械化完全符合这一要求,有利于推动建筑行业减碳行动。

参考文献(References):

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate change 2021: the physical science basis [R]. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2021.
- [2] 汪涛. 建筑生命周期温室气体减排政策分析方法及应用 [D]. 北京: 清华大学, 2012.
WANG T. Analysis method and application of greenhouse gas emission reduction policy in building life cycle [D]. Beijing: Tsinghua University, 2012.
- [3] 张天辰. 基于全生命周期的低碳桥梁评价体系研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018.
ZHANG T C. Research on evaluation system of low-carbon bridges based on life cycle [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018.
- [4] 葛杰, 马荣全, 苗冬梅, 等. 3D 打印建筑材料层间粘结性能试验研究 [J]. 建筑结构, 2017, 47 (4): 49–52.
Ge J, MA R Q, MIAO D M, et al. Experimental study on interlayer bonding performance of 3D printed building materials [J]. Building Structure, 2017, 47 (4): 49–52.
- [5] 申立银, 陈进道, 严行, 等. 建筑生命周期物化碳排放计算方法比较分析 [J]. 建筑科学, 2015, 31 (4): 89–95.
SHEN L Y, CHEN J D, YAN X, et al. Comparative analysis of physical and chemical carbon calculation methods in building life cycle [J]. Building Science, 2015, 31 (4): 89–95.
- [6] SUZUKI M, OKA T, Estimation of life cycle energy consumption and CO₂ emission of office buildings in Japan [J]. Energy and Buildings, 1998, 28 (1): 33–41.
- [7] YOU F, HU D, ZHANG H, et al. Carbon emissions in the life cycle of urban building system in China—a case study of residential buildings [J]. Ecological Complexity, 2011, 8 (2): 201–212.
- [8] 陈冲. 基于 LCA 的建筑碳排放控制与预测研究 [D]. 2532
武汉: 华中科技大学, 2013.
CHEN C. Research on building carbon emission control and prediction based on LCA [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013.
- [9] 仲平. 建筑生命周期能源消耗及其环境影响研究 [D]. 成都: 四川大学, 2005.
ZHONG P. Research on energy consumption and environmental impact of building life cycle [D]. Chengdu: Sichuan University, 2005.
- [10] 李小冬, 朱辰. 我国建筑碳排放核算及影响因素研究综述 [J]. 安全与环境学报, 2020, 20 (1): 317–327.
LI X D, ZHU C. Review of China's building carbon emission accounting and influencing factors [J]. Journal of Safety and Environment, 2020, 20 (1): 317–327.
- [11] KHAN S A, KOC M, AL-GHAMDI S G. Sustainability assessment, potentials and challenges of 3D printed concrete structures: a systematic review for built environmental applications [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 303: 127027.
- [12] KAZEMIAN A, KHOSHNEVIS B. Real-time extrusion quality monitoring techniques for construction 3D printing [J]. Constr Build Mater, 2021, 303: 124520.
- [13] CESARETTI G, DINI E, KESTELIER X D, et al. Building components for an outpost on the Lunar soil by means of a novel 3D printing technology [J]. Acta Astronaut, 2014, 93: 430–450.
- [14] WANG L, MA G W, LIU T H, et al. Interlayer reinforcement of 3D printed concrete by the in-process deposition of U-nails [J]. Cement Concrete Res, 2021, 148: 106535.
- [15] 肖建庄, 柏美岩, 唐宇翔, 等. 中国 3D 打印混凝土技术应用历程与趋势 [J]. 建筑科学与工程学报, 2021, 38 (05): 1–14.
XIAO J Z, BAI M Y, TANG Y X, et al. Application history and trend of 3D printed concrete technology in China [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2021, 38 (5): 1–14.
- [16] 朱彬荣, 潘金龙, 周震鑫, 等. 3D 打印技术应用于大尺度建筑的研究进展 [J]. 材料导报, 2018, 32 (23): 4150–4159.
ZHU B R, PAN J L, ZHOU Z X, et al. Research progress of 3D printing technology applied to large-scale buildings [J]. Materials Reports, 2018, 32 (23): 4150–4159.
- [17] ALHUMAYANI H, GOMAA M, SOEBARTO V, et al. Environmental assessment of large-scale 3D printing in construction: a comparative study between cob and concrete [J]. Journal of Cleaner Production, 2020,

270: 122463.

- [18] 建筑碳排放计算标准: GB/T 51366—2019 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
Calculation standard of building carbon emission: GB/T 51366—2019 [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2019.
- [19] 袁荣丽. 基于 BIM 的建筑物化碳足迹计算模型研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2019.
YUAN R L. Research on BIM-based carbon footprint calculation model of buildings [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019.
- [20] 李静, 包昀培. 建筑物物化阶段碳足迹快速计算模型研究 [J]. 建筑经济, 2016, 37(8): 87–91.
LI J, BAO Y P. Research on the fast calculation model of carbon footprint in the physicochemical stage of buildings [J]. Construction Economy, 2016, 37(8): 87–91.
- [21] 贾铨修. 基于生命周期评价的 3D 打印建筑结构碳排放量化分析 [D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
JIA C X. Analysis of carbon emission of 3D printed building structure based on life cycle assessment [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021.
- [22] 陈艾荣, 常成, 马如进, 等. 结构拓扑优化理论及其在桥梁结构找型中的应用 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016, 44(5): 657–663.
CHEN A R, CHANG C, MA R J, et al. Structural topology optimization theory and its application in bridge structure form finding [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2016, 44(5): 657–663.
- [23] AMRAN M, ABDELGADER H S, ONAIZI A M, et al. 3D-printable alkali-activated concretes for building applications: a critical review [J]. Constr Build Mater, 2022, 319: 126126.

Analysis of carbon emissions and carbon reduction effect of 3D printing buildings based on LCA method

MENG Qingcheng¹, HU Lei¹, LI Mingjian¹, WAN Da¹,
WU Haojie¹, QI Xin²

(1 School of Civil Engineering and Geomatics, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 2 School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Aiming at the evaluation of carbon emission and carbon reduction effect of 3D printed buildings, the life cycle evaluation method is adopted to define the calculation boundary

and calculation model of carbon emission of 3D printing buildings. The carbon emission of 3D-printed buildings in the materialization stage is compared with that of traditional buildings and general green buildings. The quantitative analysis shows the following results: First, in the materialization stages of 3D printing construction and traditional construction, and general green construction, the carbon emissions of building materials account for about 90% of the total carbon emissions. Among the carbon emissions of building materials, the carbon emissions of concrete are dominant, accounting for about 70%–80%. 3D printing of special concrete can effectively reduce the carbon emission per cubic meter of concrete by 10%–30% by adding fly ash, silica fume, and other materials instead of some cement, which has a good carbon reduction effect. Secondly, the total amount of carbon emissions generated during the material transportation and construction of the 3D printing construction mode is reduced by 28.02% and 27.84% respectively compared with the traditional construction mode and the general green construction mode. Finally, in the building materialization stage, the total carbon emissions of 3D printing construction are reduced by 15.97% and 8.78% compared with those of traditional construction and general green construction, respectively, which indicates that 3D printing construction can not only reduce the carbon of traditional construction but also reduce the carbon of general green construction using low-carbon concrete. It is concluded that the way of carbon reduction in the construction industry should focus on new building materials and new construction technologies, while the characteristics of low-carbon concrete, “template-free” construction, and high mechanization of building 3D printing technology meet this requirement, and the carbon reduction effect is remarkable, which is conducive to promoting the carbon reduction action in the construction industry.

Key words: basic disciplines of environmental science and technology; 3D printing; life cycle assessment; carbon emission from buildings; carbon reduction effect