文章编号:1007-9629(2025)12-1248-09

高强混凝土预制桩生命周期碳排放评价分析

石 偲[1,2], 任 强[1,2], 李 晨[1,2], 张日红[3], 韩 玉[4], 蒋正武[1,2,*]
(1.同济大学 先进土木工程材料教育部重点实验室,上海 201804; 2.同济大学 材料科学与工程学院,上海 201804; 3.宁波中淳高科股份有限公司,浙江 宁波 315100; 4.广西路桥工程集团有限公司,广西 南宁 530200)

摘要:基于生命周期评价(LCA)方法,采用3种评价体系分析了关键配合比参数对预制桩碳排放的影响,并探讨了以预制桩承载力为基础的碳排放评价方法的适用性。结果表明:以单位承载力为功能单位进行评价能够准确揭示预制桩碳排放与关键配合比参数之间的内在联系;在相同单位承载力的条件下,采用高强混凝土可有效降低单根预制桩的碳排放;在建筑桩基工程中,使用高强混凝土可减少所需预制桩的数量,从而显著降低工程总体碳排放。

关键词:预制桩;单位承载力;生命周期评价;碳排放
中图分类号:TU528.5 **文献标志码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1007-9629.2025.12.009

Analysis of Carbon Emissions across the Life Cycle Assessment of High-Strength Precast Concrete Piles

SHI Cai[1,2], *REN Qiang*[1,2], *LI Chen*[1,2], *ZHANG Rihong*[3], *HAN Yu*[4], *JIANG Zhengwu*[1,2,*]
(1. Key Laboratory of Advanced Civil Engineering Materials of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; 3. Ningbo Zhongchun High Tech Co., Ltd., Ningbo 315100, China; 4. Guangxi Road & Bridge Engineering Group Co., Ltd., Nanning 530200, China)

Abstract: Based on the life cycle assessment (LCA) methodology, this study employed three evaluation systems to analyze the impact of key mix design parameters on the carbon emissions of precast piles and explored the applicability of a load capacity-based carbon emission evaluation approach. The research results indicate that using unit load capacity as the functional unit for evaluation can effectively reveal the intrinsic relationship between carbon emissions and key mix design parameters. Under the same load capacity conditions, the use of high-strength concrete can significantly reduce the carbon emissions of a single precast pile. In building pile foundation engineering, the application of high-strength concrete precast piles can reduce the number of precast piles required, thereby substantially lowering the overall carbon emissions of the project.

Key words: precast pile; unit load capacity; life cycle assessment; carbon emission

高强混凝土预制桩作为一种广泛应用于建筑桩基工程的混凝土制品,以其质量可靠、施工便捷、适应性强等显著优势[1],在工程建设中占据重要地位。然而,预制桩在生产加工与施工过程中产生的碳排放不可忽视,其中钢筋和混凝土作为其主要原材料,均属于碳排放密集型产品,在中国提出“双碳”战略

收稿日期:2025-03-16; 修订日期:2025-05-07
基金项目:“十四五”国家重点研发计划项目(2022YFC3803104);国家自然科学基金资助项目(52478275, U22B2076, 52308274);宁波市重大科技攻关暨揭榜挂帅项目(2022Z030);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目
第一作者:石 偲(1999—),男,湖南涟源人,同济大学硕士生。E-mail:2130595@tongji.edu.cn
通讯作者:蒋正武(1974—),男,安徽潜山人,同济大学教授,博士生导师,博士。E-mail:jzhw@tongji.edu.cn

目标的背景下，已成为建筑领域重点减排对象之一[2-3]，亟需通过科学方法进行系统评估与优化。

生命周期评价（LCA）是一种对产品生命周期环境影响进行定量计算的系统方法，可用于评估包括预制桩碳排放在内的各种环境指标。LCA方法包括目标与范围界定、清单分析、影响评价及结果解释这4个步骤[4]。在确定目标与范围时，选取功能单位是LCA的关键，它直接影响到评价的工作体量与最终结果。功能单位是LCA工作中产品功能的基准度量，是各单元过程中相关输入和输出数据的参照，保证了不同系统LCA结果在同一基准上的可比性[5-6]。然而，在各种预制构件全生命周期碳排放模型研究中[7-8]，目前习惯以单位数量构件直接作为评价的功能单位，在功能单位的选取方面缺乏科学依据。这在一定程度上制约了包括桩基工程在内的各类工程对于环境影响评估研究的深入开展。近年来，国内外学者逐渐关注功能单位的选择对LCA结果的影响。Panesar等[9]指出，功能单位的科学选取是确保LCA结果可比性的关键，尤其在结构材料评价中，仅以“单位体积”或“单件产品”为功能单位可能掩盖材料性能对环境效益的贡献。Kourehpaz等[10]提出“单位承载力”可作为混凝土构件的环境效率指标，但尚未在预制桩领域系统应用。

基于此，本文以华东地区某预制桩生产企业的实际情况为基础，选取3种不同的功能单位对预制桩产品进行生命周期评价，对比分析不同评价方法下预制桩碳排放水平的差异，探讨了基于单位承载力的碳排放评价方法在单桩承载力低碳设计和建筑桩基工程低碳优化中的适用性，以期为预制桩的绿色设计和建筑桩基工程的低碳优化提供理论依据和实践指导。

1　预制桩碳排放的LCA理论与计算

1.1　预制桩碳排放的LCA理论

在LCA研究中，通常采用“从摇篮到坟墓”的方法，并基于功能单位进行分析[11]，针对产品不同生命周期进行评价。预制桩作为混凝土制品，其功能单位的选取具有多样性，例如单方混凝土、单根预制桩制品或单位承载力。不同的功能单位对应不同的系统边界定义，例如：以单方混凝土为功能单位时，系统边界限于“从摇篮到大门”[12]，即从原材料生产到混凝土生产完成；而以单位承载力为功能单位时，系统边界则扩展至现场施工阶段。

关于预制桩碳排放的LCA研究包括以下步骤：明确功能单位和定义系统边界，采集生命周期各阶段数据，进行碳排放环境影响汇总计算[13-16]，分析LCA结果。根据GB/T 24044—2008《环境管理 生命周期评价 要求与指南》，选取不同功能单位，将预制桩碳排放评价方法分为以下3类。(1)预制桩单方混凝土碳排放评价。功能单位为单方混凝土，系统边界为原材料生产至混凝土生产完成，阶段包括原材料生产、运输、混凝土拌和及蒸汽养护。(2)单根预制桩制品碳排放评价。功能单位为单根PHC 500 (100) AB-12预制桩（外径500 mm、壁厚100 mm、长度12 m），系统边界为原材料生产至预制桩出厂，阶段包括原材料生产、运输、预制桩生产加工。(3)预制桩单位承载力碳排放评价。功能单位为预制桩单位承载力（以1 kN承载力为计算单位），系统边界为原材料生产至现场施工完成，阶段包括原材料生产、运输、预制桩生产加工及现场施工。

不同评价方法对应的系统边界见图1。

1.2　预制桩碳排放计算

本文采用联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）气候变化报告中发布的IPCC 2021全球变暖潜值（GWP）作为预制桩碳排放的评价指标，具体见表1。基于清单数据，将各温室气体（GHG）排放转换为CO_2当量。

预制桩碳排放计算方法如式(1)所示。

$$E=\sum_{i=1}^{n}E_i \tag{1}$$

式中：E为总碳排放，kg；E_i为不同阶段碳排放，kg。

下面分别对不同阶段的碳排放进行清单分析与计算。

(1)原材料生产

原材料包括混凝土、钢材，混凝土包括水泥、矿物掺合料、机制砂、碎石、水、外加剂。单位质量水泥、机制砂、碎石、水、外加剂生产的GHG排放数据来源于Ecoinvent数据库[17]，将矿渣粉、粉煤灰、硅灰等矿物掺合料在计算时设定为无碳排放的工业固废[18-20]，钢材生产的GHG排放数据来源于文献调研[19]。单位质量（每千克）原材料生产的GHG排放数据如表2所示。

原材料生产阶段的碳排放可以按式(2)进行计算。

$$E_1=\sum_{i=1}^{n}m_i\times(E_{1i}(CO_2)+29.8\times E_{1i}(CH_4)+273\times E_{1i}(N_2O)) \tag{2}$$

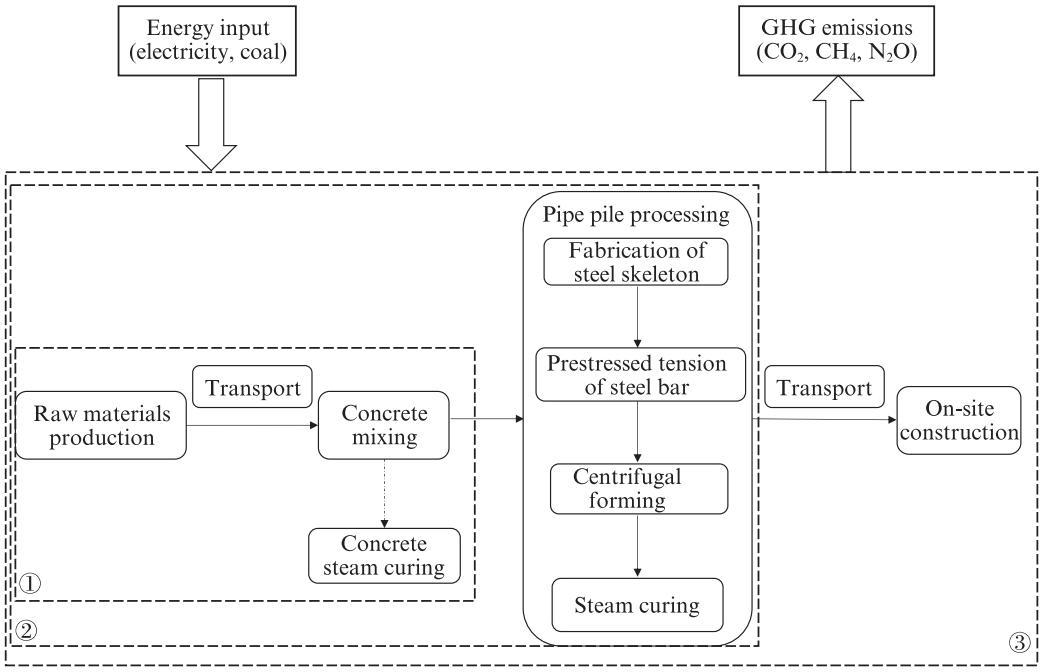


图1 不同评价方法对应的系统边界

Fig. 1 System boundaries corresponding to different assessment methods

表1 各温室气体的全球变暖潜值

Table 1 GWP of greenhouse gases

CO_2	CH_4	N_2O
1.0	29.8	273.0

表2 单位质量原材料生产的GHG排放

Table 2 GHG emission per unit mass of raw materials production

Unit:kg

Raw material	CO_2	CH_4	N_2O
Cement	7.88×10^{-1}	1.75×10^{-3}	3.86×10^{-5}
Manufactured sand	3.77×10^{-3}	8.47×10^{-6}	1.26×10^{-7}
Gravel	7.54×10^{-3}	1.50×10^{-5}	2.94×10^{-7}
Water	5.08×10^{-4}	1.55×10^{-6}	1.62×10^{-8}
Additive	1.06	3.77×10^{-3}	1.75×10^{-5}
Steel	2.13	4.27×10^{-3}	1.04×10^{-5}

式中:E_1为原材料生产阶段的碳排放,kg;m_i为第i种原材料用量,kg;$E_{1i}(CO_2)$、$E_{1i}(CH_4)$、$E_{1i}(N_2O)$分别为生产单位质量第i种原材料的CO_2、CH_4、N_2O排放,kg。

(2)运输

运输阶段包括原材料开采和生产后运输至工厂,以及预制桩制作完成后运输至施工现场。通过对华东某管桩生产企业实际运输情况的调研,得到各原材料和预制桩的运输方式及公路距离数据,如表3所示,其中,砂、石骨料铁路运输的距离来源于国家统计局2021年度矿建材料的平均铁路运输距离。

公路运输和铁路运输的GHG排放数据来源于Ecoinvent数据库,如表4所示。

表3 原材料及预制桩运输情况

Table 3 Transportations of raw materials and precast piles

Material	Cement	Mineral admixture	Additive	Manufactured sand	Gravel	Steel	Precast pile
Transportation	Highway	Highway	Highway	Railway+highway	Railway+highway	Highway	Highway
Distance/km	20	20	20	342+5	342+5	20	50

表4 各运输方式下将每千克原材料运输1 km所产生的GHG排放

Table 4 GHG emission from transporting one kilogram of material per kilometer of distance under different transportations

Unit:kg

Transportation	CO_2	CH_4	N_2O
Highway	2.04×10^{-4}	9.84×10^{-9}	9.41×10^{-9}
Railway	9.24×10^{-6}	2.79×10^{-10}	1.44×10^{-9}

运输阶段的碳排放可以按式(3)进行计算。

$$E_2=\sum_{i=1}^{n} m_i\times d_i\times(E_{2i}(CO_2)+29.8\times E_{2i}(CH_4)+273\times E_{2i}(N_2O)) \quad (3)$$

式中:E_2为运输阶段的碳排放,kg;d_i为第i种原材料对应运输方式的运输距离,km;$E_2(CO_2)$、$E_2(CH_4)$、$E_2(N_2O)$分别为该运输方式下将每千克第i种原材

料运输1 km所产生的CO_2、CH_4、N_2O排放，kg。

(3)预制桩生产加工

生产加工阶段包括混凝土拌和、预制桩钢筋骨架制作及预应力张拉、离心成型、蒸汽养护等，其碳排放来源主要为机械设备产生的能源消耗[21]。通过对华东某管桩企业实际生产情况调研，依据GB 36888—2018《预拌混凝土单位产品能源消耗限额》测算得到单方混凝土拌和所需电力消耗为4.06 kWh，单根预制桩钢筋张拉与离心成型过程的电耗为6.66 kWh，蒸汽养护1 h电耗为1.89 kWh。根据Di等[21]对中国电力生产生命周期清单的研究及Ecoinvent数据库中中国各地区混合电网的温室气体排放数据，确定了生产1 kWh电力的温室气体排放因子。据此计算出单根预制桩生产加工阶段的GHG排放，如表5所示。

预制桩生产加工阶段的碳排放可以按式(4)进行计算。

$$E_3=(E_3(CO_2)+29.8\times E_3(CH_4)+273\times E_3(N_2O)) \quad (4)$$

式中：E_3为预制桩生产加工阶段的碳排放，kg；$E_3(CO_2)$、$E_3(CH_4)$、$E_3(N_2O)$分别为单根预制桩生产加工阶段的CO_2、CH_4、N_2O排放，kg。

(4)预制桩现场施工

现场施工阶段的碳排放来源于大型机械设备对柴油、电力等能源的消耗。以静压法施工为例，该过程使用的机械包括起重机、静力压桩机等，对于12 m以内的预制桩，静压法施工[22]的柴油消耗为0.57 kg，电力消耗为5.42 kWh，经过折算得到单根预制桩现场施工阶段的GHG排放，如表6所示。

表5　单根预制桩生产加工阶段的GHG排放

Table 5　GHG emission from single precast pile production and processing

Unit：kg

Process	CO_2	CH_4	N_2O
Concrete mixing	3.65	2.24×10^{-2}	6.10×10^{-5}
Prestressed tension of steel bar	1.07×10^{-1}	6.56×10^{-4}	1.79×10^{-6}
Centrifugal forming	3.57×10^{-1}	2.19×10^{-3}	5.97×10^{-6}
Steam curing	12.39	7.56×10^{-2}	2.07×10^{-4}

表6　单根预制桩施工阶段的GHG排放

Table6　GHG emission of single precast pile in construction stage

Unit：kg

CO_2	CH_4	N_2O
3.44	3.14×10^{-2}	5.87×10^{-5}

预制桩现场施工阶段的碳排放按式(5)计算。

$$E_4=E_4(CO_2)+29.8\times E_4(CH_4)+273\times E_4(N_2O) \quad (5)$$

式中：E_4为预制桩现场施工阶段的碳排放，kg；$E_4(CO_2)$、$E_4(CH_4)$、$E_4(N_2O)$分别为单根预制桩现场施工阶段的CO_2、CH_4、N_2O排放，kg。

1.3　预制桩相关试验与计算

预制桩混凝土采用P·Ⅱ 52.5硅酸盐水泥。选用矿渣粉、粉煤灰和硅灰作为矿物掺合料，掺量均为10%(质量分数)。粗骨料、细骨料分别为机制碎石和机制砂，均由石灰岩破碎得到，外加剂为聚羧酸系高性能减水剂。试验用水为自来水。预制桩钢材用量保持为168 kg。不同水胶比m_W/m_B(质量比)和胶凝材料用量B的预制桩混凝土配合比及56 d抗压强度如表7所示。

表7　预制桩混凝土配合比及56 d抗压强度

Table 7　Mix proportion and 56 d compressive strength of precast pile concrete

Group	m_W/m_B	B/(kg·m^{-3})	Sand dosage/(kg·m^{-3})	Gravel dosage/(kg·m^{-3})	Additive dosage/(kg·m^{-3})	56 d compressive strength/MPa
A1	0.20	550	945	945	4.9	124.3
A2	0.16	550	956	956	11.7	135.5
A3	0.24	550	934	934	4.3	114.5
A4	0.20	520	963	963	6.9	120.5
A5	0.20	580	927	927	5.0	131.6

每组混凝土通过添加外加剂来保持工作性能一致，初始坍落度控制在(200±20)mm。

根据GB 50007—2011《建筑地基基础设计规范》，针对以竖向荷载为主的建筑物桩基工程，按桩身混凝土强度计算预制桩承载力，如式(6)所示。

$$Q=Af\varphi \quad (6)$$

式中：Q为单桩竖向承载力，kN；A为桩身的横截面积，m^2；f为混凝土轴心抗压强度，kPa；φ为工作条件

系数,预制桩通常取0.55～0.65,本文取0.6。

在桩基的设计与施工过程中,单桩的承载力是关键的性能指标[23],受预制桩横截面积、混凝土强度等因素综合影响。预设在某桩基工程情景下,单桩竖向承载力设计值分别为4 000、4 500、5 000 kN,将A1～A5组混凝土作为桩身材料,计算桩身外径为500 mm的混凝土预制桩在不同承载力设计值下的尺寸参数及混凝土用量,如表8所示。

表8 不同承载力设计值下预制桩的尺寸参数及混凝土用量

Table 8 Size parameters and concrete dosage of prestressed precast piles under different design values of bearing capacity

Group	Bearing capacity design value/kN	Wall thickness/m	Cross-sectional area/m^2	Concrete dosage/m^3
A1	4 000	0.062	0.085	1.02
	4 500	0.071	0.096	1.15
	5 000	0.081	0.107	1.28
A2	4 000	0.056	0.078	0.94
	4 500	0.064	0.088	1.06
	5 000	0.073	0.098	1.18
A3	4 000	0.068	0.093	1.11
	4 500	0.079	0.104	1.25
	5 000	0.090	0.116	1.39
A4	4 000	0.064	0.088	1.06
	4 500	0.074	0.099	1.19
	5 000	0.084	0.110	1.32
A5	4 000	0.058	0.081	0.97
	4 500	0.067	0.091	1.09
	5 000	0.076	0.101	1.21

其中预制桩横截面积通过式(6)计算得到,壁厚计算公式如式(7)所示。

$$T = R - \sqrt{R^2 - \frac{A}{\pi}} \tag{7}$$

式中:T为预制桩壁厚,m;R为预制桩外半径,m。

将A1～A5组混凝土用于某项建筑桩基工程中的预制桩材料。假定该建筑为多层建筑,每层的面积约为1 000 m^2,共15层。根据建筑桩基数量的经验计算公式[24],计算其所需预制桩的数量,预制桩数量与单桩承载力负相关,如式(8)所示。

$$N = \frac{knS}{Q} \tag{8}$$

式中:N为预制桩数量,根;k为比例因子,取值为15.5;n为建筑层数;S为单层建筑面积,m^2。

以预制桩单位承载力为功能单位,碳排放评价指标需考虑预制桩承载力,因此基于预制桩单桩承载力对预制桩碳排放进行归一化处理,得到预制桩碳排放强度指标,用于评价预制桩单位承载力碳排放水平[24],其计算方法如式(9)所示。

$$C = \frac{E}{Q} \tag{9}$$

式中:C为预制桩碳排放强度,kg/kN。

2 预制桩碳排放的结果对比与影响分析

2.1 不同评价方法下的预制桩碳排放结果对比

采用LCA方法对不同混凝土配合比的预制桩碳排放选取不同的功能单位,分析得到不同评价方法下预制桩碳排放变化规律,结果如表9～14所示。

当以单方混凝土作为功能单位对预制桩碳排放进行评价时:如表9所示,随着混凝土水胶比的改变,每组碳排放几乎保持恒定;如表12所示,随着胶凝材料用量的增加,碳排放呈现出显著上升趋势。当以单根预制桩作为功能单位时,如表10和表13所示,其变化规律与以单方混凝土作为功能单位时一致。这表明改变预制桩混凝土的水胶比,对于碳排放无显著影响,而提高胶凝材料用量会直接导致碳排放的增加,这直接体现了水泥等用量对碳排放的重要影响。

当以预制桩单位承载力作为功能单位时,碳排放强度随着水胶比的增加而增加,随着胶凝材料用量的增加而降低。从表11可以看出:当水胶比为0.24时(A3组),碳排放强度最高;A1组(水胶比0.20)次之;当水胶比降至0.16时(A2组),碳排放强度最低。从表14可以看出,胶凝材料用量最少的A4组碳排放强

度最高，A1组次之，胶凝材料用量最多的A5组表现出最低的碳排放强度。表11中碳排放强度C与水胶比m_W/m_B呈显著线性正相关（$C=0.32m_W/m_B+0.11$，$R^2=0.99$），表明降低水胶比可有效减少单位承载力碳排放。类似地，表14显示碳排放强度C与胶凝材料用量B呈负线性关系（$C=-0.000\ 1B+0.22$，$R^2=0.89$），印证了高胶凝材料用量对提升预制桩环境效率的积极作用。

表9　以单方混凝土作为功能单位的不同水胶比预制桩碳排放

Table 9　Carbon emission of precast piles with different water-binder ratios using per cubic meter of concrete as the functional unit

Unit：kg

Stage	m_W/m_B		
	0.16	0.20	0.24
Raw material production	353.190 87	345.033 84	344.203 76
Transportation	10.610 23	10.486 75	10.388 94
Concrete production	17.567 29	17.567 29	17.567 29
Sum	381.368 39	373.087 88	372.159 99

表10　以单根预制桩作为功能单位的不同水胶比预制桩碳排放

Table 10　Carbon emission of precast piles with different water-binder ratios using single precast pile as the functional unit

Unit：kg

Stage	m_W/m_B		
	0.16	0.20	0.24
Raw material production	913.636 23	901.319 11	900.065 69
Transportation	17.071 71	16.885 26	16.737 56
Concrete production	4.334 11	4.334 11	4.334 11
Processing	15.247 90	15.247 90	15.247 90
Sum	950.289 95	937.786 38	936.385 26

表11　以预制桩单位承载力作为功能单位的不同水胶比预制桩碳排放

Table 11　Carbon emission of precast piles with different water-binder ratios using unit precast pile load capacity structure as the functional unit

Unit：kg/kN

Stage	m_W/m_B		
	0.16	0.20	0.24
Raw material production	0.142 41	0.153 14	0.166 01
Transportation	0.008 90	0.009 65	0.010 45
Concrete production	$6.755\ 22\times10^{-4}$	$7.363\ 90\times10^{-4}$	$7.994\ 17\times10^{-4}$
Processing	0.002 38	0.002 59	0.002 81
On-site construction	$6.844\ 03\times10^{-4}$	$7.460\ 70\times10^{-4}$	$8.099\ 26\times10^{-4}$
Sum	0.155 05	0.166 86	0.180 88

表12　以单方混凝土作为功能单位的不同胶凝材料用量预制桩碳排放

Table 12　Carbon emission of precast piles with different amounts of cementitiou materials using per cubic meter of concrete as the functional unit

Unit：kg

Stage	Amount of cementitious material/kg		
	520	550	580
Raw material production	329.735 95	345.033 84	362.813 44
Transportation	10.526 82	10.486 75	10.455 38
Concrete production	17.567 29	17.567 29	17.567 29
Sum	357.830 05	373.087 88	390.836 11

从材料-力学-环境协同机制分析碳排放结果与混凝土配合比参数的内在联系。混凝土水胶比的降低能够有效提升混凝土强度，当水胶比从0.24降至0.16时，混凝土强度提升了18.3%（(135.5-114.5)/

表13 以单根预制桩作为功能单位的不同胶凝材料用量预制桩碳排放

Table 13 Carbon emission of precast piles with different amounts of cementitious material using single precast pile as the functional unit

Unit: kg

Stage	Amount of cementitious material/kg		
	520	550	580
Raw material production	878.219 29	901.319 11	928.166 31
Transportation	16.945 76	16.885 26	16.837 89
Concrete production	4.334 11	4.334 11	4.334 11
Processing	15.247 90	15.247 90	15.247 90
Sum	914.747 06	937.786 38	964.586 21

表14 以预制桩单位承载力作为功能单位的不同胶凝材料用量预制桩碳排放

Table 14 Carbon emission of precast piles with different amounts of cementitious material using unit precast pile load capacity structure as the functional unit

Unit: kg/kN

Stage	Amount of cementitious material/kg		
	520	550	580
Raw material production	0.153 93	0.153 14	0.148 95
Transportation	0.009 97	0.009 65	0.009 11
Concrete production	$7.596\,12\times10^{-4}$	$7.363\,90\times10^{-4}$	$6.955\,42\times10^{-4}$
Processing	0.002 67	0.002 59	0.002 45
On-site construction	$7.695\,98\times10^{-4}$	$7.460\,70\times10^{-4}$	$7.046\,85\times10^{-4}$
Sum	0.168 10	0.166 86	0.161 91

114.5=18.3%)。这一强度提升通过式(6)所示的力学关系直接转化为预制桩承载力的提高。而改变预制桩混凝土的水胶比,对碳排放无显著影响,因此在总体碳排放保持相同的条件下,预制桩承载力的提升使得碳排放强度得以降低。预制桩混凝土强度与胶凝材料用量同样呈正相关关系。当胶凝材料用量从520 kg/m^{3}增加至580 kg/m^{3}时,混凝土强度提升了9.2%((131.6−120.5)/120.5=9.2%),从而增强了预制桩的承载力。虽然原材料生产阶段的碳排放占总体碳排放的90%以上,但随着胶凝材料用量的变化,总体碳排放只增长了5.2%。显然胶凝材料用量增加对预制桩强度的增强效应更为显著,最终表现为单位承载力碳排放的降低。这体现了以预制桩单位承载力作为功能单位来评价预制桩产品碳排放的优势,可以将预制桩碳排放与混凝土配合比参数之间构建起联系,这对优化预制桩材料配合比、实现预制桩全生命周期低碳发展具有指导意义。

2.2 单桩承载力对预制桩碳排放的影响分析

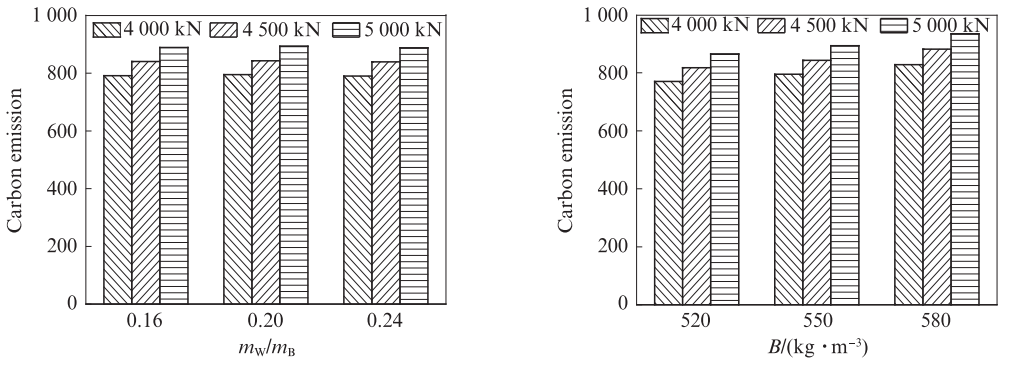
基于不同承载力设计值的预制桩尺寸参数及其混凝土用量的差异,量化分析了不同承载力设计值对单根预制桩碳排放的影响,结果如图2所示。

随着预制桩承载力设计值的提升,为满足结构承载要求,预制桩横截面积需相应扩大。这直接导致混凝土用量显著增加。鉴于生产过程在碳排放构成中占比最大,致使碳排放呈现上升趋势。这揭示了预制桩碳排放与结构设计之间的内在关联,凸显了结构设计参数调整对环境影响的直接作用。具体而言,当单桩承载力设计值从4 000 kN提升至5 000 kN时,A1、A2、A3组的碳排放分别增长了12.4%、9.3%、15.9%,而A4、A5组则分别增长了13.4%和10.3%。这一差异表明,在不同混凝土配合比条件下,碳排放随承载力设计值的增长呈现不同的变化特征,其中A2和A5组的碳排放增长幅度相对较小。另外,在4 000、4 500、5 000 kN承载力水平下,A2组的碳排放分别比A3组降低了7.5%、7.8%、8.1%。这说明高强度混凝土在降低碳排放方面的显著优势和在预制桩承载力设计中的关键作用。使用高强混凝土作为预制桩桩身材料在设计达到相同承载力要求时,可以通过减少混凝土用量来实现预制桩碳排放的有效控制,从而达到结构性能与环境效益的协同优化。

2.3 建筑桩基工程情景碳排放的模拟分析

在建筑桩基工程情景模拟研究中,该项建筑在采用A1~A5组混凝土用于桩基工程后产生的碳排放如图3所示。

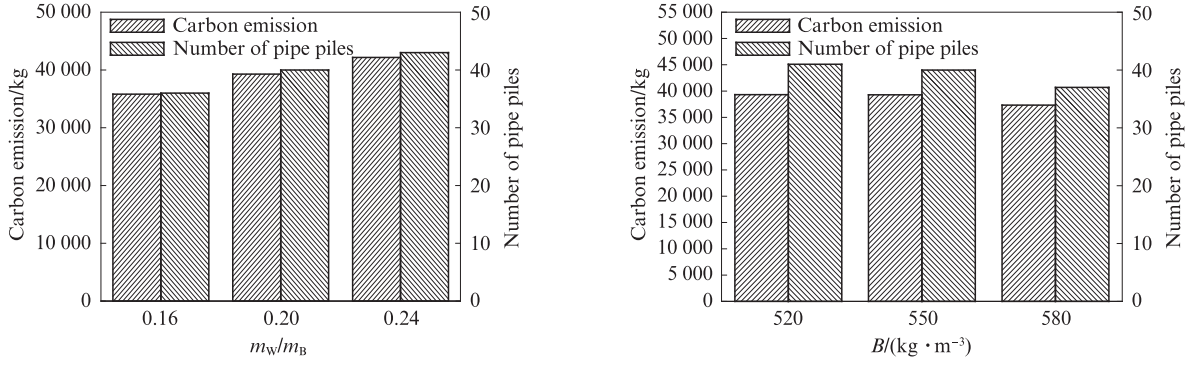
降低预制桩混凝土水胶比或增加胶凝材料用量可以显著提升预制桩强度。这种强度提升使得在满足相同建筑桩基承载需求的情况下,工程所需预制桩数量大



(a) Different water-binder ratios　　(b) Different amounts of cementitious materials

图2　不同承载力设计值下单根预制桩碳排放变化

Fig. 2　Changes in carbon emissions of single precast pile under different design values of load capacity



(a) Different water-binder ratios　　(b) Different amounts of cementitious materials

图3　不同配合比预制桩在预定建筑情景下产生的碳排放

Fig. 3　Carbon emissions generated by precast piles with different mix proportions under a predetermined building scenario

幅减少。鉴于预制桩生产与施工过程是碳排放的主要来源，预制桩数量的减少直接带来了桩基工程总体碳排放的显著下降。这一发现凸显了预制桩混凝土配合比优化在建筑碳排放控制中的重要作用，揭示了材料性能与建筑环境效益之间的内在联系。从具体数据来看，以水胶比0.24的A3组为基准，水胶比0.16的A2组预制桩的使用数量较A3组明显减少，桩基工程碳排放显著降低，降幅达17.8%。这说明在建筑桩基工程中采用高强混凝土预制桩，能够实现材料用量和工程碳排放的双重优化：不仅提高了材料使用效率，减少了资源消耗，还有效降低了工程碳排放强度，契合绿色建筑的发展理念。

3　结论

（1）当以单方混凝土和单根预制桩作为功能单位进行评价时，水胶比对预制桩碳排放的影响较小，而胶凝材料用量的影响较为显著；当以预制桩单位承载力为功能单位进行评价时，预制桩碳排放与水胶比呈正相关，与胶凝材料用量则呈负相关。

（2）采用以预制桩单位承载力为功能单位的评价方法，能更准确地反映配合比参数对预制桩碳排放的实际影响。

（3）随着单桩承载力设计值的提高，单根预制桩的碳排放相应增加。但当单桩承载力设计值恒定时，通过提高混凝土强度可减少混凝土用量，从而降低单桩碳排放。

（4）在建筑桩基工程中，采用高强混凝土可以减少预制桩使用数量，从而降低桩基工程的总体碳排放。

（5）本研究为高强混凝土预制桩低碳设计提供了静态LCA框架，未来工作可从以下方向进行深化：①动态LCA模型，结合环境暴露试验（如冻融、盐雾等），量化耐久性对碳排放的时变影响；②工程因素耦合，将土层类型、施工工艺等纳入承载力-碳排放关联模型；③多目标优化，协同考虑成本、碳排放与结构安全性，开发预制桩低碳设计决策工具。

参考文献：

[1] WANG P G, FU H, ZUO WQ, et al. Effect of n-C-S-H-PCE and slag powder on the autogenous shrinkage of high-strength steam-free pipe pile concrete[J]. Construction and Building Materials, 2022, 325:126815.

[2] 蒋正武，尹军. 可持续混凝土发展的技术原则与途经[J]. 建筑材料学报，2016，19(6)：957-963.
JIANG Zhengwu，YIN Jun. Technical principles and approaches for development of sustainable concrete[J]. Journal of Building Materials，2016，19(6)：957-963.(in Chinese)

[3] 蒋正武，高文斌，杨巧，等. 低碳混凝土的技术理念与途径思考[J]. 建筑材料学报，2023，26(11)：1143-1150.
JIANG Zhengwu，GAO Wenbin，YANG Qiao，et al. Technical principles and approaches for low carbon concrete[J]. Journal of Building Materials，2023，26(11)：1143-1150.(in Chinese)

[4] GUO X L，LI Y X，SHI H S，et al. Carbon reduction in cement industry - An indigenized questionnaire on environmental impacts and key parameters of life cycle assessment(LCA) in China[J]. Journal of Cleaner Production，2023，426：139022.

[5] 潘志强，李晨，蒋正武. 矿渣-硫铝酸盐水泥的环境影响及碳减排效应分析[J]. 硅酸盐通报，2023，42(11)：3955-3963.
PAN Zhiqiang，LI Chen，JIANG Zhengwu. Environmental impact of slag-calcium sulphoaluminate cement and analysis on its CO_2 mitigation effect[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society，2023，42(11)：3955-3963.(in Chinese)

[6] PRADHA S，CHANG BOON POH A，QIAN S. Impact of service life and system boundaries on life cycle assessment of sustainable concrete mixes[J]. Journal of Cleaner Production，2022，342：130847.

[7] SU X，ZHANG X，GAO J. Inventory analysis of LCA on steel- and concrete-construction office buildings [J]. Energy and Buildings，2008，40(7)：1188-1193.

[8] MARINKOVIC S，CAREVI V，DRAGAS J. The role of service life in life cycle assessment of concrete structures[J]. Journal of Cleaner Production，2021，290：125610.

[9] PANESAR D K，SETO K E，CHURCHILL C J. Impact of the selection of functional unit on the life cycle assessment of green concrete[J]. International Journal of Life Cycle Assessment，2017，22(12)：1987-1988.

[10] KOUREHPAZ P，MILLER S A. Eco-efficient design indices for reinforced concrete members[J]. Materials and Structures，2019，52(5)：96.

[11] JOSA A，AGUADO A，CARDIM A，et al. Comparative analysis of the life cycle impact assessment of available cement inventories in the EU[J]. Cement and Concrete Research，2007，37(5)：781-788.

[12] YANG D，FAN L，SHI F，et al. Comparative study of cement manufacturing with different strength grades using the coupled LCA and partial LCC methods—A case study in China[J]. Resources，Conservation and Recycling，2017，119：60-68.

[13] BACATELO M，CAPUCHA F，FERRÃO P，et al. Selection of a CO_2 capture technology for the cement industry：An integrated TEA and LCA methodological framework[J]. Journal of CO_2 Utilization，2023，68：102375.

[14] WANG S Y，JIN L，FENG Y，et al. A low carbon embedded low water/binder cement-based composites(LW/BCC) based on steel slag powder and microwave pre-curing：Experiments and life cycle assessment(LCA)[J]. Construction and Building Materials，2023，400：132778.

[15] GURSEL A P，MARYMAN H，OSTERTAG C. A life-cycle approach to environmental，mechanical，and durability properties of "green" concrete mixes with rice husk ash[J]. Journal of Cleaner Production，2016，112：823-836.

[16] 中国国家标准化管理委员会. 环境管理 生命周期评价 要求与指南：GB/T 24044—2008[S]. 北京：中国标准出版社，2008.
Standardization Administration of the People's Republic of China. Environmental management—Life cycle assessment—Requirements and guidelines：GB/T 24044—2008[S]. Beijing：Standards Press of China，2008.(in Chinese)

[17] LI C，CUI S P，NIE Z R，et al. The LCA of Portland cement production in China[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment，2015，20(1)：117-127.

[18] VIEIRA D R，CALMON J L，COELHO F Z，et al. Life cycle assessment(LCA) applied to the manufacturing of common and ecological concrete：A review[J]. Construction and Building Materials，2016，124：656-666.

[19] CHEN C，HABERT G，BOUZIDI Y，et al. LCA allocation procedure used as an incitative method for waste recycling：An application to mineral additions in concrete[J]. Resources，Conservation and Recycling，2010，54(12)：1231-1240.

[20] 汪保印，张洁，熊金伟，等. 废弃石粉对混凝土的性能影响及碳排放分析[J]. 建筑材料学报，2023，26(11)：1151-1157，1206.
WANG Baoyin，ZHANG Jie，XIONG Jinwei，et al. Influence of waste stone powder on properties and carbon emissions of concrete[J]. Journal of Building Materials，2023，26(11)：1151-1157，1206.(in Chinese)

[21] DI X H，NIE Z R，YUAN B R，et al. Life cycle inventory for electricity generation in China[J]. International Journal of Life Cycle Assessment，2007，12(4)：217-224.

[22] 中国国家标准化管理委员会. 建筑碳排放计算标准：GB/T 51366—2019[S]. 北京：中国标准出版社，2019.
Standardization Administration of the People's Republic of China. Standards for building carbon emission calculation：GB/T 51366—2019[S]. Beijing：Standards Press of China，2019.(in Chinese)

[23] 方正中. 大直径桩竖向承载特性分析[D]. 合肥：安徽建筑大学，2021.
FANG Zhengzhong. Analysis on axial bearing behavior of large diameter piles[D]. Hefei：Anhui Jianzhu University，2021.(in Chinese)

[24] 李文平. 建筑结构优化设计方法及案例分析[M]. 北京：中国建筑工业出版社，2016.
LI Wenping. Optimization design method for building structure and case analysis[M]. Beijing：China Architecture and Building Press，2016.(in Chinese)