

港口水工建筑物预制混凝土构件碳足迹核算方法研究及应用

刘红, 侯代兵, 沈威, 郭栋

(中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

摘要: 针对港口预制混凝土构件碳足迹核算面临的边界不清、方法不统一、数据难获取三大问题, 系统构建了碳足迹核算方法体系。借鉴建筑产品生命周期评价框架, 结合港口工程特殊性, 创新性地将核算边界确定为原材料获取、生产制造、施工3个阶段, 构建了分阶段精细化计算模型, 建立了活动水平数据和碳排放因子的系统获取方法。以某预制厂56 m预应力混凝土管桩为例开展案例验证, 结果表明单根管桩碳足迹为18 785.63 kgCO₂e, 原材料获取阶段占比92.02%, 生产制造阶段占比1.88%, 施工阶段占比6.10%, 验证了方法体系的科学性和可操作性, 为港口行业制定预制混凝土构件碳足迹核算标准提供了理论依据和技术支撑, 对推动交通运输领域碳足迹核算标准化具有重要意义。

关键词: 港口水工建筑物; 预制混凝土构件; 碳足迹; 核算方法

中图分类号: U6; U656; X511

文献标志码: A

文章编号: 2095-7874(2026)08-0035-07

doi: 10.7640/zggwjs202608006

Research and application of carbon footprint accounting method for precast concrete components in port hydraulic structures

Liu Hong, Hou Daibing, Shen Wei, Guo Dong

(CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: To address three major challenges in carbon footprint accounting for precast concrete components in port hydraulic structures, namely unclear boundaries, inconsistent methods, and data acquisition difficulties, this study systematically establishes a comprehensive accounting methodology. Drawing on the building product life cycle assessment framework and considering port engineering characteristics, the accounting boundary is innovatively defined into three stages: raw material acquisition, production and manufacturing, and construction. A phased refined calculation model is developed, and a systematic acquisition method for activity data and carbon emission factors is established. Case validation using a 56 m prestressed concrete pipe pile shows a carbon footprint of 18 785.63 kgCO₂e, with raw material acquisition accounting for 92.02%, production and manufacturing for 1.88%, and construction for 6.10%, validating the methodology's scientific rigor and feasibility. This research provides theoretical foundation and technical support for developing carbon footprint accounting standards in the port industry, and is of great significance for promoting the standardization of carbon footprint calculation in the transportation field.

Key words: port hydraulic structures; precast concrete components; carbon footprint; accounting methodology

0 引言

在全球气候变化背景下, 碳达峰、碳中和目标重要性不断提升。港口作为综合交通运输体系

的重要节点和对外开放的门户, 其建设和运营过程产生大量碳排放^[1]。据统计, 港口工程建设期碳排放占其全生命周期碳排放的30%~40%, 而预制

收稿日期: 2025-12-05 修回日期: 2026-02-12

作者简介: 刘红(1987—), 女, 河北石家庄人, 硕士, 高级工程师, 环境科学与工程专业。E-mail: LiuHong1103@163.com

混凝土构件作为港口基础设施建设的主要材料,其碳排放占建设期总碳排放的60%以上^[2-3]。因此,科学核算港口预制混凝土构件碳足迹,识别碳排放关键环节,对实现港口行业绿色低碳转型具有重要意义。

港口水工建筑物预制混凝土构件(以下简称“预制混凝土构件”)是指在工厂或现场预先生产制作的混凝土构件^[4],根据国家标准 GB/T 51231—2016《装配式混凝土建筑技术标准》定义,这类构件以工业化生产模式实现工厂化预制,相比传统现浇施工方式具有质量可控、施工效率高、环境影响小等优势^[5]。在港口工程中,预制混凝土构件应用场景广泛,码头上部结构所需的各类预应力与非预应力梁、板,下部基础所用的多种桩基及重力式构件,以及消浪设施、道路堆场、护岸护坡、防波堤等工程,均大量采用预制混凝土构件。

然而,当前港口预制混凝土构件碳足迹核算面临3个突出问题:1)核算边界不清晰,现有研究多聚焦于单一阶段,缺乏全生命周期视角;2)核算方法不统一,不同研究采用的计算模型、排放因子差异较大,结果可比性差;3)数据获取困难,活动水平数据和排放因子缺乏系统的获取方法和可靠来源。这些问题严重制约了港口预制混凝土构件碳排放管理和减排策略制定。

基于此,本研究以港口工程常用的预制混凝土构件为研究对象,系统构建碳足迹核算方法体系,并通过实际案例验证方法的科学性和适用性,旨在为港口预制混凝土构件碳排放管理提供理论依据和技术支撑,推动港口行业绿色低碳发展。

1 国内外研究现状

1.1 产品碳足迹核算标准与方法

碳足迹概念起源于生态足迹理论,指在特定时间段内,个人、组织、产品或事件直接和间接产生的温室气体排放总量。目前已形成较为完善的国际标准体系,英国标准协会(BSI)发布的 PAS 2050: 2011《商品和服务在生命周期内的温室气体排放评价规范》是全球首个针对产品和服务的碳足迹评价标准,该标准规定了涵盖从原材料获取、生产制造、运输、使用到废弃处置的全生命周期温室气体排放核算方法,目前在英国及部分欧美国家广泛应用于产品碳足迹核算与认证^[6]。国际标准化组织(ISO)发布的 ISO 14067: 2018《温室气体 产品碳足迹 量化要求与指南》^[7],为不同领域

产品碳足迹核算提供了较为通用的指导原则。

我国于2024年发布国家标准 GB/T 24067—2024《温室气体 产品碳足迹 量化要求与指南》^[8],该标准借鉴 ISO 14067 框架,结合我国实际情况,提出了产品碳足迹核算的通用要求。然而,该标准作为通用性规范,尚不能直接为具体产品碳足迹核算提供操作依据,各行业领域需以此为指导,制定适用于本行业的具体产品碳足迹核算标准。特别是在碳边境调节机制(CBAM)等国际碳关税政策背景下^[9],建立符合国际规则且具有中国特色的行业碳足迹核算标准已成为迫切需求。

1.2 建筑领域预制混凝土构件碳足迹研究

建筑领域对预制混凝土构件碳足迹研究起步较早。欧洲标准化委员会(CEN)发布的标准 EN 15978: 2011,对建筑生命周期阶段划分作出了明确定义,具体涵盖材料准备阶段(A1—A3)、施工阶段(A4—A5)、使用与维护阶段(B1—B7)以及拆除与回收阶段(C1—C4)^[10],为建筑产品碳足迹核算提供了系统框架。Zhang 等^[11]基于该框架对我国住宅建筑全生命周期碳排放进行了评估,提出了优化建材生产工艺、推广低碳材料等控制措施。李静等^[12]研究了装配式混凝土建筑物化阶段(A1—A5)的碳足迹评价方法,明确了建材生产、运输及施工阶段的碳排放核算边界;周剑^[13]对预制混凝土空心模剪力墙的应用技术及环境影响进行了系统研究,验证了预制构件在民用建筑中的低碳优势。然而,这些研究主要针对民用建筑领域,与港口水工建筑物在材料规格、生产工艺、施工方式等方面存在显著差异,不能直接应用于港口工程。

2 核算方法体系构建

2.1 核算边界确定

2.1.1 生命周期阶段划分

建筑产品生命周期评价已有成熟的标准框架。欧洲标准化委员会(CEN)发布的标准 EN 15978: 2011 对建筑生命周期阶段划分作出了明确定义,如图1所示,将建筑产品生命周期划分为4个主要模块^[10]:

- 1) 材料准备阶段(A1—A3): 原材料生产、运输、混凝土构件制造;
- 2) 施工阶段(A4—A5): 运输到现场、施工;
- 3) 使用与维护阶段(B1—B7): 使用、维护、修复、材料替换、翻新、能源使用、用水;

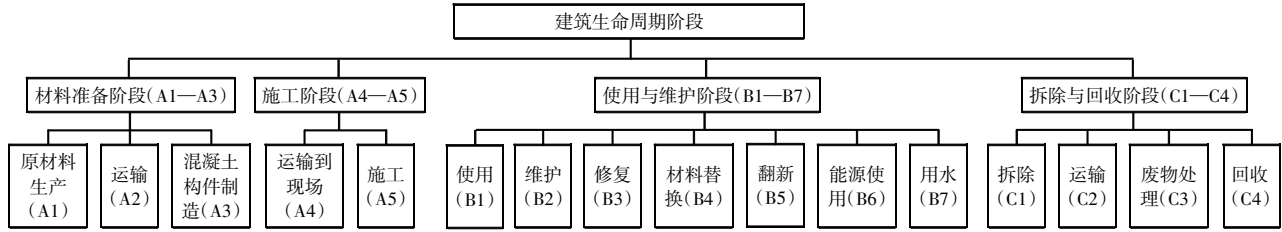


图 1 建筑生命周期阶段划分 (EN 15978: 2011)

Fig. 1 Division of life cycle stages for buildings (EN 15978: 2011)

4) 拆除与回收阶段(C1—C4): 拆除、运输、废物处理、回收。

结合港口水工建筑物实际情况, 本研究对上述框架进行了针对性调整。经调研发现: 1) 港口水工建筑物设计使用年限长达 50~100 a, 目前尚无拆除实例, 拆除与回收阶段(C1—C4)暂不考虑; 2) 使用与维护阶段(B1—B7)碳排放主要源于防腐涂层更新等维护活动, 与预制构件产品本身关联度较低; 3) 港口预制构件规格大、重量重, 原材料生产和运输、施工安装过程是碳排放的主要来源。

因此, 本研究创新性地将预制混凝土构件碳足迹核算边界确定为 3 个关键阶段:

1) 原材料获取阶段(A1—A2): 原材料生产加工与运输;

2) 生产制造阶段(A3): 预制构件工厂化生产;

3) 施工阶段(A4—A5): 产品运输与现场安装。

这一边界划分充分考虑了港口工程特点: 原材料消耗量大、生产过程涉及高能耗蒸汽养护工艺、水上施工和打桩作业等特殊施工方式。3 阶段核算边界既能全面反映预制构件从原材料获取到产品安装全过程的碳足迹, 又具有数据可获取性和方法可操作性。

2.1.2 系统边界

基于上述生命周期阶段划分, 本研究构建的预制混凝土构件产品碳足迹系统边界如图 2 所示。

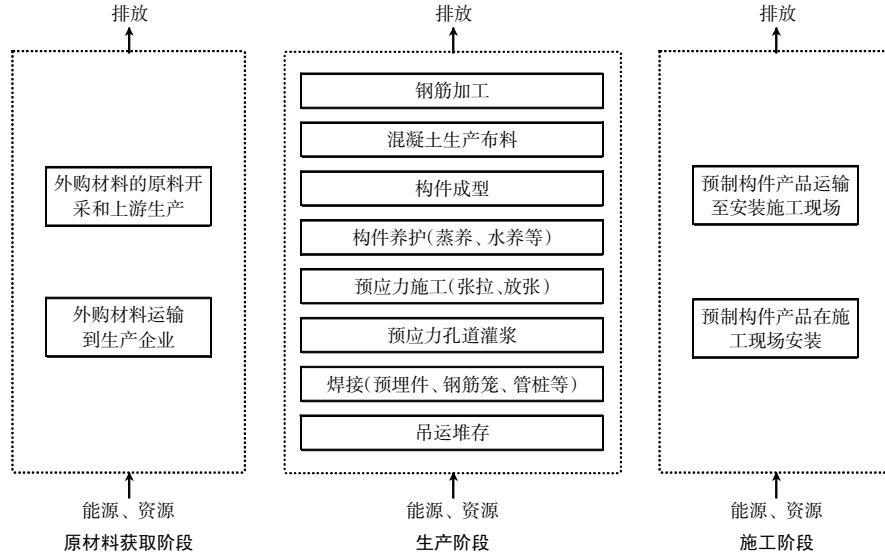


图 2 预制混凝土构件产品碳足迹系统边界

Fig. 2 Boundary of carbon footprint system for precast concrete component products

预制混凝土构件产品碳足迹系统边界明确了原材料获取、生产制造、施工 3 个核算阶段的具体内容和碳排放来源。

1) 原材料获取阶段系统边界

该阶段包括原材料生产碳排放和原材料运输碳排放。

① 原材料生产碳排放(A1): 水泥、砂石骨料、钢筋、钢绞线、钢模板、外加剂等原材料从矿山开采、加工到成品的生产过程碳排放。其中水泥生产涉及石灰石煅烧, 钢材生产涉及炼铁炼钢, 碳排放强度高。

② 原材料运输碳排放(A2): 原材料从生产地

运输至预制厂的公路运输、铁路运输或水路运输碳排放。

2) 生产制造阶段系统边界

该阶段为预制混凝土构件工厂化生产过程(A3), 包括生产工艺碳排放和废弃物处理碳排放。

①生产工艺碳排放: 钢筋加工、混凝土搅拌、构件成型(离心成型或振捣成型)、蒸汽养护或自然养护、预应力张拉、孔道灌浆、焊接、吊运堆存等工序的能源消耗。

②废弃物处理碳排放: 生产过程产生的废料、废水处理的能源消耗。

3) 施工阶段系统边界

该阶段包括产品运输碳排放和施工安装碳排放。

①产品运输碳排放(A4): 预制混凝土构件从工厂运输至施工现场的碳排放, 港口工程运输距离较远时多采用水路运输。

②施工安装碳排放(A5): 预制混凝土构件在施工现场的吊装、打桩等安装作业碳排放。港口工程施工多采用专业打桩船(静压或水冲打桩)、浮吊等设备, 施工机械燃油和电力消耗是主要排放源。

2.1.3 碳排放类型与温室气体类型

除生命周期阶段范围外, 本研究进一步明确了碳排放类型和温室气体类型的核算范围。

1) 碳排放类型划分

按排放发生位置, 碳足迹核算包含直接碳排放和间接碳排放。

①直接碳排放(范围1): 化石燃料现场燃烧产生的碳排放, 如柴油搅拌机、运输车辆、施工船舶的燃油消耗。

②间接碳排放(范围2): 外购能源上游生产过程的碳排放, 如外购电力、蒸汽的生产过程碳排放。

2) 温室气体类型

核算涵盖 IPCC 报告规定的 6 种温室气体^[14-15]: 二氧化碳(CO₂)、甲烷(CH₄)、氧化亚氮(N₂O)、氢氟碳化物(HFCs)、全氟碳化物(PFCs)和六氟化硫(SF₆)。各类温室气体通过全球变暖潜势(GWP)转换为二氧化碳当量(CO₂e)进行统一核算。

2.2 碳足迹计算模型构建

2.2.1 总体计算框架

基于上述核算边界体系, 本研究构建了分阶

段精细化碳足迹计算模型。预制混凝土构件碳足迹由原材料获取阶段、生产制造阶段以及施工阶段 3 部分碳排放量汇总构成, 总体计算框架如式(1)所示:

$$CFP=C_{CL}+C_{SC}+C_{SG} \quad (1)$$

式中: CFP 为预制混凝土构件产品碳足迹, kgCO₂e; C_{CL} 为原材料获取阶段温室气体排放量, kgCO₂e; C_{SC} 为生产制造阶段温室气体排放量, kgCO₂e; C_{SG} 为施工阶段温室气体排放量, kgCO₂e。

2.2.2 原材料获取阶段

根据 2.1.2 节确定的原材料获取阶段系统边界, 该阶段碳排放由原材料生产碳排放和原材料运输碳排放 2 部分组成。预制构件常用到的原材料有水泥、砂石、钢筋、模板、外加剂以及自来水等^[13]。目前原材料运输主要采用公路运输方式, 运输过程的碳排放主要与建材消耗量、车辆运输距离及运输车辆载重有关。该阶段碳足迹计算模型如式(2)所示:

$$C_{CL}=\sum_i(E_iEF_i+E_iD_iT_i) \quad (2)$$

式中: E_i 为获取阶段原材料 i 的消耗量, t 或 m³; EF_i 为原材料 i 的碳排放因子, tCO₂e/t 或 tCO₂e/m³; D_i 为原材料 i 的运输距离, km; T_i 为原材料 i 的运输因子, 即单位重量运输距离的碳排放因子, kgCO₂e/(t·km)。

2.2.3 生产制造阶段

预制混凝土构件的主要生产工艺流程包括钢筋加工、混凝土生产及布料、构件成型、构件养护、预应力施工、预应力孔道灌浆、焊接及吊运堆存等。该阶段的碳排放主要来源于 2 部分: 1) 生产过程中各工艺环节的设备能源消耗; 2) 生产过程产生的废弃物处理过程的能源消耗。计算模型如式(3)所示。

$$C_{SC}=\sum_j(N_jEF_j+H_jEF_j) \quad (3)$$

式中: EF_j 为第 j 种能源的碳排放因子, kgCO₂e/kg 或 kgCO₂e/(kW·h); N_j 为第 j 种能源的消耗量, t 或 kW·h; H_j 为处理废弃物的第 j 种能源消耗量, t 或 kW·h。

2.2.4 施工阶段

该阶段碳排放由预制构件产品运输至安装施工现场与预制构件产品在施工现场安装过程的碳排放组成。其中, 施工安装过程碳排放主要来源于打桩船、起重船、吊车等施工机械的燃油和电力消耗。港口水工构筑物施工具有明显的专业特

点, 如打桩作业需要专业打桩船, 水上吊装需要浮吊等, 这些施工方式与陆上建筑施工差异显著。该阶段碳足迹计算模型如式(4)所示。

$$C_{SC} = \sum_k (P_k L_k T_k) + \sum_j (N_j EF_j) \quad (4)$$

式中: P_k 为预制构件产品使用第 k 种运输工具的产品重量, t ; L_k 为预制构件产品使用第 k 种运输工具运输至施工现场的运输距离, km ; T_k 为第 k 种运输工具的运输因子, 即单位重量运输距离的碳排放因子, $kgCO_2e/(t \cdot km)$ 。

2.3 数据获取方法

基于预制混凝土构件碳足迹计算方法, 提出活动水平数据和碳排放因子的获取方法, 保障核算结果的可靠性和准确度。

2.3.1 活动水平数据获取

活动水平数据是碳足迹核算的基础, 数据质量直接影响核算结果的准确性和可靠性。本研究建立了基于初级数据优先、次级数据补充的分级数据获取体系。

1) 初级数据获取

初级数据是指通过直接测量、监测或调查获得的第一手数据, 具有最高的数据质量等级。初级数据主要包括: ①生产过程的能源消耗数据, 如电表、水表、气表读数, 燃油加注记录等; ②产品原材料实际使用量, 根据企业 BOM 清单和生产记录确定; ③包装材料和周转材料的使用量及周转次数; ④运输相关数据, 包括上游原材料从生产地到交货点的运输距离、运输工具类型、运输次数及单次运量。数据收集时间范围建议为 1 a, 以消除季节性波动影响。

2) 次级数据获取

当初级数据不可获得时, 应按照数据质量由高到低的顺序选择次级数据: ①原材料供应商提供的、符合生命周期评价标准要求并经第三方独立验证的上游产品生命周期评价报告数据; ②代表国内平均生产水平的公开生命周期评价数据库数据, 优先采用近 5 a 内发布的数据; ③行业协会发布的行业平均数据或典型企业数据; ④国外同类技术数据, 但需进行本地化修正。

2.3.2 碳排放因子选取

碳排放因子是连接活动水平数据与碳排放量的关键参数, 其准确性对核算结果影响显著。本研究建立了基于供应商数据优先、官方数据库补充的碳排放因子选取体系。

1) 原材料碳排放因子

原材料碳排放因子优先采用供应商提供的产品碳足迹核算结论或经第三方验证的环境产品声明(EPD)数据。当供应商无法提供时, 按以下优先级选择: ①国家标准 GB/T 51366—2019《建筑碳排放计算标准》提供的排放因子; ②生态环境部发布的《中国产品全生命周期温室气体排放系数库》(CPCD)数据; ③国际权威数据库如 Ecoinvent、ELCO 等提供的排放因子; ④同类产品 EPD 报告中的排放因子。

2) 能源碳排放因子

电力碳排放因子应采用生态环境部、国家统计局、国家能源局联合发布的最新年度全国及区域电网平均碳排放因子。化石燃料碳排放因子优先采用《中国产品全生命周期温室气体排放系数库》数据。

3) 运输碳排放因子

运输碳排放因子应根据运输工具类型(公路、铁路、水路、航空)和载重吨位确定, 优先采用《建筑碳排放计算标准》提供的排放因子数据。

3 案例计算与分析

3.1 研究对象与工艺流程

本研究选取某预制厂的预应力混凝土大直径管桩(简称“大管桩”)为研究对象, 开展碳足迹核算研究与分析。大管桩每节标准长度为 4 m, 共 14 节, 总长 56 m, 管桩外径 1 200 mm, 主要应用于大型水工构筑物基础工程中。

大管桩生产工艺流程复杂, 主要涉及搅拌区、钢筋笼滚焊成型区、管节离心成型区、装拆模区、蒸养区、管节水养区、管节堆放区及管节拼接区等区域, 大管桩产品的主要生产工艺流程为: 钢筋笼加工→混凝土布料→管节成型→管节蒸养→管节水养→预应力张拉→灌浆→放张→吊运堆存, 整个生产过程约需 20~30 d。

3.2 数据采集

3.2.1 原材料获取阶段数据

大管桩原材料获取阶段包含原材料生产和原材料运输 2 个阶段。大管桩产品原材料构成主要包括水泥、河砂、碎石、外加剂、钢筋、钢绞线等。根据企业调研, 获得各原材料供应商的运输方式和运输里程, 运输方式主要采用 40 t 货车和 18 t 货车运输, 直接运输至预制厂仓库。原材料获取阶段活动水平数据见表 1。

表1 原材料获取阶段活动水平数据

Table 1 Activity level data in the raw material acquisition stage

原材料类别	清单名称	消耗量/kg	运输方式(含厂外运输和厂内运输)	运输距离/km
直接原料	水泥	12 929.28	40 t 货车	14
直接原料	河砂	15 886.08	40 t 货车	83
直接原料	碎石	34 272.00	40 t 货车	80
直接原料	外加剂	129.29	18 t 货车	280
直接原料	钢筋/钢材	1 071.00	40 t 货车	200
直接原料	钢绞线	1 972.99	40 t 货车	643
周转辅料	钢模板 (周转分摊)	17.50	40 t 货车	200

3.2.2 生产制造阶段

大管桩生产过程消耗的主要能源类型为电力、柴油、蒸汽与水,其中电能是各环节主要消耗的能源,柴油消耗主要来源于混凝土拌合过程,蒸汽消耗主要来源于管节蒸养环节。根据企业调研,各生产环节的能源消耗量见表2。

表2 各生产环节能源消耗清单

Table 2 List of energy consumption in each production link

生产环节	电力消耗/(kW·h)	柴油消耗/t	蒸汽消耗/t	水消耗/t
混凝土拌和	108.64	0.011		2.06
钢筋笼滚焊成型、入模	65.31			
管节成型	217.28			0.52
管节蒸养	27.16		1.962	
堆场存放、运输	54.32			
预应力张拉、放松	65.18			
其他环节(厂房日常、管节灌浆)	5.30			8.77

注:表中数据来源于企业内部计量记录、生产台账及配套凭证。

3.2.3 施工阶段

大管桩施工阶段的碳排放包含预制构件产品运输至安装施工现场的碳排放,以及预制构件产品在施工现场安装过程的碳排放。运输阶段的碳排放主要来自运输机械,本项目采用水路运输,根据企业调研,预制构件平均运输距离为145 km,预制构件运输至施工现场的碳排放数据见表3。

表3 运输阶段碳排放数据

Table 3 Carbon emission data in the product transportation stage

运输类别	运输距离/km	单位产品质量/t	碳排放因子/($\text{kgCO}_2\text{e}\cdot(\text{t}\cdot\text{km})^{-1}$)	碳排放量/(kgCO_2e)
船舶运输	145	70	0.015	152.25

预制构件产品在施工现场安装产生的碳排放量,采用定额计算法进行测算。本研究中,大管桩施工碳排放计算参照企业标准 Q/CCCG SY105—2022《水运工程建设期碳排放测算标准》。由于 Q/CCCG SY106—2022《水运工程碳排放测算定额》中仅提供了28 m、32 m及36 m三种桩长的管桩施工碳排放定额数据(见表4)。因此,本研究构建了施工阶段桩长与碳排放相关性模型计算56 m桩长管桩施工产生的碳排放(图3),相关拟合曲线计算公式为:

$$Y=146.07X+1\,756.5 \quad (5)$$

式中:Y为施工阶段碳排放量, kgCO_2e ;X为管桩桩长,m。

表4 施工安装阶段碳排放定额数据

Table 4 Carbon emission data in the installation stage

序号	定额编号	桩长/m	定额数量/根	碳排放基准值/(kgCO_2e)
238	20370	28	10	5 905.48
239	20371	32	10	6 313.65
240	20372	36	10	7 074.04

注:表中桩长指打桩船水冲打钢筋混凝土管桩的桩长,桩径 $\phi 120\text{ cm}$ 。

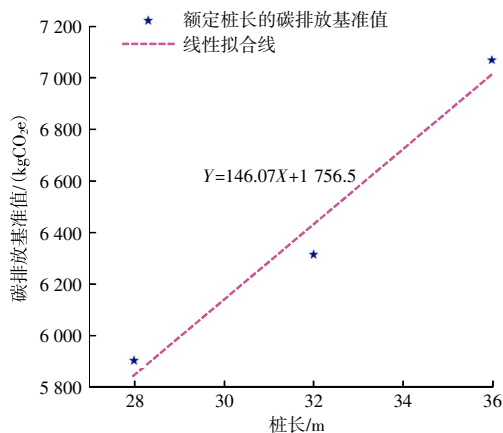


图3 施工安装阶段桩长与碳排放相关性

Fig. 3 Correlation between pile length and carbon emission in the installation stage

根据该模型以及拟合曲线计算可得,当桩长为56 m时,10根定额数量管桩施工所对应的碳排放为9 936.4 kgCO_2e ,单根管桩施工所相应的碳排放量为993.64 kgCO_2e 。因此,大管桩施工阶段碳排放总量为1 145.89 kgCO_2e 。

3.3 碳排放因子取值及来源

碳排放因子数据是指单位活动水平数据排放的温室气体数量。本次核算主要使用的碳排放因

子主要包括各原材料生产过程排放因子、柴油排放因子、外购蒸汽排放因子、外购电力排放因子和交通运输排放因子, 原材料、能源以及运输设备碳排放因子取值及来源分别如表 5、表 6 及表 7 所示。

表 5 原材料碳排放因子
Table 5 Carbon emission data of raw materials

名称	因子数据	因子数据来源
水泥	735	《建筑碳排放计算标准》
河砂	2.51	
碎石	2.18	
外加剂	800	中国生命周期基础数据库 (CLCD)
钢筋/钢材	2 340	《建筑碳排放计算标准》
钢绞线	2 375	
钢模板(周转)	2 400	

表 6 能源碳排放因子
Table 6 Carbon emission data of energy

名称	因子数据	因子数据来源
柴油/($\text{kgCO}_2\text{e}\cdot\text{kg}^{-1}$)	3.15	中国产品全生命周期温室气体排放系数库
外购电力/ ($\text{kgCO}_2\text{e}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1}$)	0.577 7	生态环境部、国家统计局、国家能源局联合发布《关于发布 2024 年电力碳足迹因子数据的公告》
0.8~1.0 MPa 蒸汽/ ($\text{kgCO}_2\text{e}\cdot\text{t}^{-1}$)	320	Ecoinvent 数据库
自来水/($\text{kgCO}_2\text{e}\cdot\text{t}^{-1}$)	0.168	《建筑碳排放计算标准》

表 7 运输设备碳排放因子
Table 7 Carbon emission data of transportation equipment

名称	因子数据	因子数据来源
40 t 货车	0.057	《建筑碳排放计算标准》
18 t 货车	0.129	

3.4 计算结果及分析

基于以上各阶段活动水平数据和碳排放因子取值, 采用排放因子法计算得到, 每根大管桩产品($\phi 1\ 200\ \text{mm}$)碳足迹核算结果为 $18\ 785.63\ \text{kgCO}_2\text{e}$ 。原材料获取阶段碳排放为 $17\ 286.18\ \text{kgCO}_2\text{e}$, 占比 92.02%, 具体为原材料生产加工占比 90.26%, 原材料运输占比 1.76%, 其中, 水泥、钢绞线、钢筋碳排放量占据前 3 位, 3 项碳排放合计占原材料获取阶段的 98.47%。生产制造阶段碳排放为 $353.56\ \text{kgCO}_2\text{e}$, 占比较小, 为 1.88%, 从生产工序方面分析, 管节成型、混凝土拌合工序碳排放

量居于前列, 分别占 35.53%和 27.65%。施工阶段碳排放为 $1\ 145.89\ \text{kgCO}_2\text{e}$, 占比 6.10%, 包含产品运输碳排放和施工安装碳排放。

4 结语

本研究系统构建了港口水工建筑物预制混凝土构件碳足迹核算方法体系, 并通过实际案例验证了方法的科学性和适用性。主要结论如下:

1) 基于港口水工建筑物预制混凝土构件生产作业实际, 确定了涵盖原材料获取、生产制造和施工 3 个阶段的核算边界, 构建了分阶段精细化碳足迹计算模型, 提出了完整的数据获取方法论框架。

2) 以 $\phi 1\ 200\ \text{mm}$ 大管桩为研究对象的实证研究表明, 单根大管桩碳足迹为 $18\ 785.63\ \text{kgCO}_2\text{e}$, 原材料获取阶段占比 92.02%, 其中水泥、钢绞线、钢筋合计贡献 98.47%, 是减排关键环节。

本研究为港口预制混凝土构件碳排放管理提供了科学依据和技术支撑, 对推动港口行业绿色低碳转型具有重要意义。

参考文献:

[1] 蒋跃楠. 基于 LCA 的扭王字块物化阶段碳排放核算及减排措施[J]. 水运工程, 2024(4): 42–48.
Jiang Y N. Carbon emission accounting and reduction measures of twist-king block in materialization stage based on LCA[J]. Port & Waterway Engineering, 2024(4): 42–48.

[2] 任建林, 秦宇, 欧阳常悦, 等. 基于 LCA 的长江上游某内河港口工程碳排放估算与分析[J]. 水运工程, 2024(2): 53–59.
Ren J L, Qin Y, Ouyang C Y, et al. Estimation and analysis of carbon emissions from inland river port project in upper Yangtze River based on LCA[J]. Port & Waterway Engineering, 2024(2): 53–59.

[3] 任建林. 基于生命周期的内河港口工程碳排放分析研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2024.
Ren J L. Research on carbon emission analysis of inland port engineering based on life cycle[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2024.

[4] GB/T 51231—2016 装配式混凝土建筑技术标准[S].
GB/T 51231—2016 Technical standard for assembled buildings with concrete structure[S].

[5] 李静, 刘胜男. 装配式混凝土建筑物物化阶段碳足迹评价研究[J]. 建筑经济, 2021, 42(1): 101–105.
Li J, Liu S N. Research on carbon footprint assessment of prefabricated concrete in building stage[J]. Construction Economy, 2021, 42(1): 101–105.

[6] PAS 2050: 2011 Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services[S].

(下转第 57 页)