

扭王字块体预制安装碳减排措施研究

满伟¹, 李向龙², 陈伟³, 李沛^{4,5,6*}, 李杰^{4,5,6}, 侯晋芳^{4,5}, 刘昊奇^{4,5,6}

(1. 天津市交通运输综合行政执法总队, 天津 300000; 2. 中交一航局第一工程有限公司, 天津 300456; 3. 宁波市水利工程质量安全管理中心, 浙江 宁波 315032; 4. 中交天津港湾工程研究院有限公司, 天津 300222; 5. 中交第一航务工程局有限公司, 天津 300461; 6. 天津市水下隧道建设与运维技术重点实验室, 天津 300222)

摘要: 混凝土施工的碳减排是实现建筑行业碳减排的关键。近年来相继制定、发布的混凝土碳排放计算标准为混凝土施工碳减排研究提供了标准依据。基于扭王字块预制安装碳排放源, 研究采用中国交通建设集团有限公司企业标准 Q/CCCC SY105—2022《水运工程建设期碳排放测算标准(试行)》计算扭王字块预制安装工程碳排放量, 根据计算结果分析主要碳排放源并给出碳减排措施。研究表明, 使用新型胶凝材料、固废混凝土、合理调遣和调配施工队伍及施工机械可从材料、施工耗能 2 个维度有效降低碳排放。

关键词: 扭王字块; 预制; 安装; 碳排放计算; 减碳措施

中图分类号: U6; U655.4 文献标志码: A 文章编号: 2095-7874(2026)05-0030-08

doi: 10.7640/zggwjs202605005

Study on carbon emission reduction methods for prefabrication and installation of Accropode blocks

MAN Wei¹, LI Xiang-long², CHEN Wei³, LI Pei^{4,5,6*}, LI Jie^{4,5,6}, HOU Jin-fang^{4,5}, LIU Hao-qi^{4,5,6}

(1. Tianjin Municipal Transportation Comprehensive Administrative Enforcement Team, Tianjin 300000, China; 2. No.1 Engineering Co., Ltd. of CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Tianjin 300456, China; 3. The Quality and Safety Management Center of Water Conservancy Projects in Ningbo, Ningbo, Zhejiang 315032, China; 4. Tianjin Port Engineering Institute Co., Ltd. of CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Tianjin 300222, China; 5. CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Tianjin 300461, China; 6. Tianjin Key Laboratory of Construction, Operation and Maintenance Technologies for Underwater Tunnels, Tianjin 300222, China)

Abstract: Carbon emission reduction in concrete construction is a key measure to achieve carbon emission reduction goals in the construction industry. In recent years, the carbon emission calculation standards for concrete have been successively formulated and released, providing standard support for carbon emission reduction. Based on the carbon emission sources during the prefabrication and installation of Accropode blocks, this paper calculates the carbon emissions are calculated by using the standard of Q/CCCC SY105—2022 *Standard of Carbon Emission Calculation for Water Transportation Engineering Construction(Trial)* of CCGG. The main carbon emission sources are analyzed according to the calculation results, and corresponding carbon emission reduction suggestions are put forward. It is concluded that the use of new cementitious materials, solid waste concrete, and reasonable deployment and allocation of construction teams and machinery can effectively reduce carbon emissions from two dimensions: materials and construction energy consumption.

Key words: Accropode; prefabrication; installation; carbon emission calculation; carbon reduction measures

收稿日期: 2025-10-11 修回日期: 2025-11-16

基金项目: 国家重点研发计划(2024YFB3714800); 中交一航局科技研发项目(2025-QNCX-09)

作者简介: 满伟(1988—), 男, 天津市人, 硕士, 高级工程师, 建筑与土木工程专业。

*通讯作者: 李沛, E-mail: lipei5@ccccltd.cn

0 引言

在“双碳”深入推进的背景下,建设领域作为能源消耗与碳排放的重点领域,正面临着日益严格的减排约束。《2024中国城乡建设领域碳排放研究报告(2024年版)》指出:2022年全国建筑与建筑业建造碳排放总量达51.3亿t,占全国能源相关碳排放的48.3%,其中水泥生产环节占建材碳排放的90%以上。数据显示^[1],2023年国内混凝土产量达33.5亿m³。混凝土作为应用最广泛的工程材料,其施工环节的碳排放量在土木工程行业总排放中占据着重要比例,是实现行业碳减排的关键。

混凝土碳排放涵盖原材料生产、运输、成型、使用、拆除全生命周期,其中:原材料碳排放主要源于生产材料开采及生产工艺^[2-4];运输碳排放主要受运输距离的影响;成型碳排放聚焦机械设备能耗;使用阶段碳排放取决于建筑服役寿命;拆除阶段碳排放则取决于废弃物资源的再利用。碳减排措施方面,低碳胶凝材料研发^[5-10]、运输距离优化、配合比设计^[11-14]及尾矿废石骨料利用^[15-17]等是研究重点。

2022年8月,中国交通建设集团有限公司发布企业标准Q/CCCC SY105—2022《水运工程建设期碳排放测算标准(试行)》^[18],为研究计算水运工程施工碳排放提供了标准依据。扭王字块是一种常用于斜坡式防波堤和防护工程的护面预制混凝土异形块,其主要材料为混凝土,研究计算扭王字块预制及安装工程的预制、二次倒运及堆放、运输安装3阶段的施工碳排放量,根据计算结果分析各阶段主要碳排放源和排放占比,并给出碳减排措施,以期水运工程混凝土施工碳减排提供参考。

1 现有碳排放计算标准

近些年来,国家、地方、协会、企业相继制定并发布了混凝土碳排放计算标准,使得包括原材料生产、运输、成型、使用、拆除的混凝土全生命周期的碳排放计算有标准可依。

GB/T 51366—2019《建筑碳排放计算标准》^[19]中将建筑全生命周期划分为建筑材料生产及运输、建造及拆除、建筑物运行3个阶段,根据其不同阶段的碳排放量,规定了相应的计算边界和方法;GB/T 32151.38—2024《温室气体排放核算与报告要求第38部分:水泥制品生产企业》^[20]制

定了水泥制品生产企业温室气体排放量的核算步骤、核算边界和排放源、核算要求及排放量计算等相关规定;GB/T 32151.8—2023《碳排放核算与报告要求第8部分:水泥生产企业》^[21]制定了水泥生产企业的企业层级和熟料生产碳排放量的核算边界、计量与监测要求、核算步骤与核算方法等相关规定。

DB 64/T 1954—2023《混凝土碳排放计算方法及评价标准》^[22]制定了包括原材料生产、运输、进厂预拌直至混凝土产品出厂的适用于工业与民用建筑、市政等建设工程的C20—C60强度等级的混凝土碳排放计算和评价方法;DB34/T 4990—2025《公路生命周期碳排放核算标准》^[23]制定了各等级公路建设、运营养护和拆除的公路全生命周期碳排放的基本规定、核算方法和核算要求。

T/CBMF 27—2018《预拌混凝土低碳产品评价方法及要求》^[24]制定了包括原材料生产、运输以及进厂生产直至预拌混凝土产品出厂等整个生产过程的C20—C60普通预拌混凝土低碳产品的评价基本要求及评价价值、单位产品二氧化碳排放量计算、数据统计周期等规定;T/CABEE 108—2025《预拌混凝土碳排放核算标准》^[25]对《建筑碳排放计算标准》^[19]在预拌混凝土碳排放计算方面进行了细化和补充,同时,较《预拌混凝土低碳产品评价方法及要求》^[24]在预拌混凝土产品适用类型、核算边界、直接/间接碳排放核算方法方面做出了更合理的规定。

《水运工程建设期碳排放测算标准(试行)》^[18]是我国首部适用于水运工程基本建设项目的碳排放计算标准,主要参考《2006年IPCC国家温室气体清单指南》^[26]及其2019年修订版中有关碳排放源的分类方法,《建筑碳排放计算标准》^[19]中有关新建、扩建和改建民用建筑建造、建材生产及运输阶段的碳排放计算方法,《陆上交通运输企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行)》(国家发展和改革委员会)中有关温室气体排放的核算方法和JTS/T 116—2019《水运建设工程概算预算编制规定》^[27]中有关水运工程项目各项费用的组成、构成和计算方式,并充分考虑水运工程建设期碳排放来源和特征,采用生命周期思路测算碳排放。其中,《水运工程建设期碳排放测算标准(试行)》^[18]的制定为水运工程基本建设项目碳排放测算和管理提供了标准依据。

2 碳排放计算方法

2.1 扭王字块预制安装各阶段碳排放源

以单件重量 25 t(单件体积 10 m³)扭王字块预制安装工程为例, JTS/T 276-1—2019《沿海港口水工建筑工程定额》^[28]分预制、二次倒运及堆放、运输安装 3 阶段分别制定其施工定额。据此, 各阶段碳排放源如下:

1) 预制阶段(工程内容为预制、堆放): 人工、流动性混凝土、专用模板、模板配件、其他材料、混凝土搅拌站、轮胎式装载机、混凝土输送泵车、混凝土搅拌运输车、履带式起重机和其他船机;

2) 二次倒运及堆放阶段(工程内容为装车、倒运、堆放): 人工、履带式起重机和平板拖车组;

3) 运输安装阶段(工程内容为陆上安装): 人工、潜水组、板枋材、型钢、履带式起重机和平板拖车组。

2.2 计算方法

《水运工程建设期碳排放测算标准(试行)》^[18]采用排放因子法, 规定水运工程建设期碳排放的测算边界应包括工程建设直接碳排放与工程建设间接碳排放。测算边界内: 工程建设直接碳排放源包括工程施工直接碳排放、建设期其他直接碳排放; 工程建设间接碳排放源包括材料(设备)间接碳排放、外购电力发电过程碳排放。其中: 工程施工直接碳排放涵盖施工人员生活耗能碳排放、施工机械耗能碳排放、施工条件影响碳排放; 材料(设备)间接碳排放涵盖材料(设备)工厂生产过程碳排放、材料(设备)场外运输过程碳排放。

分类梳理 2.1 节所述扭王字块预制安装各阶段碳排放源, 扭王字块预制安装碳排放可按施工人员生活耗能碳排放、材料(设备)生产过程碳排放、施工机械耗能碳排放和施工条件影响碳排放分别计算, 以下为《水运工程建设期碳排放测算标准(试行)》^[18]制定的计算公式。

施工人员生活耗能碳排放按式(1)计算:

$$E_p = \sum_{i=1}^n (A_i \times N_{p,i} \times EF_p) \quad (1)$$

式中: E_p 为施工人员生活耗能碳排放量, kgCO₂; A_i 为第 i 项工程内容的数量; i 为测算项目序号, $i=1, 2, 3, \dots, n$; $N_{p,i}$ 为第 i 项工程内容的定额人消耗量, 工日; EF_p 为施工人员生活耗能碳排放因子, 应优先采用经验数据, 当缺少经验时, 取 1.84 kgCO₂/工日。

材料(设备)生产过程碳排放按式(2)计算:

$$E_m = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m (A_i \times N_{m,i,k} \times EF_{m,k}) \quad (2)$$

式中: E_m 为材料(设备)生产过程碳排放, kgCO₂; $N_{m,i,k}$ 为第 i 项工程内容中第 k 种材料的定额消耗量, kg 或 m³; k 为材料序号, $k=1, 2, 3, \dots, m$; $EF_{m,k}$ 为第 k 种材料(设备)生产过程碳排放因子, kgCO₂/kg 或 kgCO₂/m³。

施工机械耗能碳排放按式(3)计算:

$$E_e = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^v (A_i \times N_{e,i,j} \times EF_{e,j}) \quad (3)$$

式中: E_e 为施工机械耗能碳排放量, kgCO₂; $N_{e,i,j}$ 为第 i 项工程内容中第 j 种施工机械的定额台班消耗量, 台班; j 为施工机械序号, $j=1, 2, 3, \dots, v$; $EF_{e,j}$ 为第 j 种施工机械的台班耗能碳排放因子, kgCO₂/台班。

施工条件影响碳排放按式(4)计算:

$$E_c = (E_p + E_e) \times \sum_{q=1}^6 \alpha_q \quad (4)$$

式中: E_c 为施工条件影响碳排放量, kgCO₂; α_q 为第 q 项施工条件影响碳排放测算系数, 主要包括临时设施、冬季雨季及夜间施工、材料二次倒运、施工辅助、施工队伍进退场、海外工程拖船。

3 碳排放计算

1) 工程定额及碳排放因子

碳排放定额依据《沿海港口水工建筑工程定额》^[28]取值, 碳排放因子依据 Q/CCCG SY106—2022《水运工程碳排放测算定额 第一分册 沿海港口工程(试行)》^[29]取值。其中, 施工人员生活耗能碳排放包括施工工人住宿、餐饮炊事、取暖降温、照明、电器使用和通勤等活动产生的碳排放; 施工机械耗能碳排放包括施工机械正常运转、安拆、维修保养等过程燃用化石燃料所产生的碳排放; 材料(设备)生产过程碳排放包括外购的构成工程实体的原材料、辅助材料、构配件、零件, 半成品或成品, 以及使用的周转性的材料、模板等, 如表 1 所示。

2) 建设期碳排放测算

采用《水运工程建设期碳排放测算标准(试行)》^[18]制定的碳排放测算程序(防波堤工程不计算建设期其他直接碳排放)及扭王字块预制安装工程定额及对应碳排放因子, 计算得到 25 t 扭王字块工程预制安装碳排放量如表 2 所示。

表 1 扭王字块工程定额及对应碳排放因子

Table 1 Engineering quota and corresponding carbon emission factors for Accropode blocks

阶段	项目		定额	碳排放因子
预制阶段	施工人员生活耗能碳排放	人工	8.36 工日	1.84
		流动性混凝土(碎石最大粒径 40 mm C35)	10.15 m ³	318
	材料(设备)生产过程碳排放	专用钢模	41.84 kg	2.4
		模板配件	20.83 kg	2.4
	施工机械耗能碳排放	混凝土搅拌站 120 m ³ /h	0.014 台班	16.56
		混凝土搅拌运输车 8 m ³	0.136 台班	194.16
		混凝土输送泵车 70 m ³ /h	0.068 台班	239.8
履带式起重机 30 t		0.149 台班	132.5	
二次倒运及堆放阶段	施工人员生活耗能碳排放	人工	2.67 工日	1.84
	施工机械耗能碳排放	履带式起重机 50 t	0.667 台班	139.99
		平板拖车组 40 t	0.667 台班	181.29
运输安装阶段	施工人员生活耗能碳排放	人工	0.545 工日	1.84
		潜水组	0.005 组日	9.2
	材料(设备)生产过程碳排放	板枋材	0.005 m ³	200
		型钢	0.15 kg	2.35
	施工机械耗能碳排放	履带式起重机 140 t	0.061 台班	227.61
		平板拖车组 40 t	0.121 台班	181.29

注: 1) 预制时未考虑其他材料、轮胎式装载机和其他船机; 2) 倒运距离以 1 km 内为准; 3) C35 混凝土碳排放因子由 C30 混凝土和 C50 混凝土碳排放因子线性差分计算得到; 4) 专用钢模和模板配件碳排放因子取钢板碳排放因子; 5) 每一潜水班组按 5 人计, 碳排放因子取 1.84×5=9.20。

表 2 扭王字块预制安装碳排放测算结果

Table 2 Calculation results of carbon emissions for prefabrication and installation of Accropode blocks

序号	测算项目	测算方法	碳排放量/kgCO ₂		
			预制阶段	二次倒运及堆放阶段	运输安装阶段
(一)	施工人员生活耗能碳排放	式(1)	15.38	4.91	1.05
(二)	施工机械耗能碳排放	式(3)	62.69	214.29	35.82
(三)	施工条件影响碳排放	式(4)	662.03	1 858.82	312.66
(四)	工程建设直接碳排放	(一)+(二)+(三)	740.10	2 078.02	349.53
(五)	材料(设备)生产过程碳排放	式(2)	3 378.11	0	1.35
(六)	工程建设间接碳排放	(五)	3 378.11	0	1.35
(七)	水运工程建设期碳排放	(四)+(六)	4 118.21	2 078.02	350.88
(八)	总碳排放	(七)	6 547.11		

注: 1) 施工条件影响碳排放系数按一类工程取值, 考虑临时设施施工(取值 1.33)、冬季雨季及夜间施工(华北地区, 取值 1.41)、材料二次倒运(取值 0.26)、施工辅助(取值 1.11)、施工队伍进退场(施工队伍基地距工程所在地 1~1.5 km, 取值 4.37); 2) 混凝土为自建搅拌站生产, 不计算场外运输过程碳排放。

4 碳排放分析

4.1 主要碳排放源

预制、二次倒运及堆放、运输安装的 3 阶段碳排放量(表 2)依次为 4 118.21 kgCO₂、2 078.02 kgCO₂ 和 350.88 kgCO₂, 碳排放占比(图 1)依次为 63%、32%和 5%, 即预制阶段是扭王字块预制及安装工程的主要碳排放源。分析预制阶段碳排放组成, 材料(设备)生产过程碳排放、施工条件影响碳排放、施工机械耗能碳排放、施工人员生活耗能碳排放(表 2)依次为 3 378.11 kgCO₂、662.03 kgCO₂、62.69 kgCO₂ 和 15.38 kgCO₂, 碳排放占比(图 2)依

次为 82%、16%、2%和 0%(修约到个位), 即扭王字块预制是预制阶段的主要碳排放源。进一步分析扭王字块预制碳排放组成, 流动性混凝土制备(碎石最大粒径 40 mm C35)、专用钢模和模板配件碳排放量(表 2)依次为 3 227.7 kgCO₂ 和 150.41 kgCO₂, 碳排放占比(图 3)依次为 96%和 4%, 即流动性混凝土制备是扭王字块预制的主要碳排放源。最后, 计算得到流动性混凝土制备碳排放占整个扭王字块预制及安装工程碳排放(6 547.11 kgCO₂)比重达 51%(图 4), 即流动性混凝土制备是扭王字块预制安装工程的最主要碳排放源。

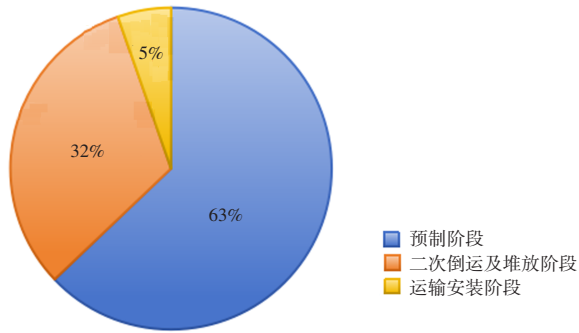


图 1 各施工阶段碳排放源占比分析

Fig. 1 Analysis of the proportion of carbon emission sources in each construction stage

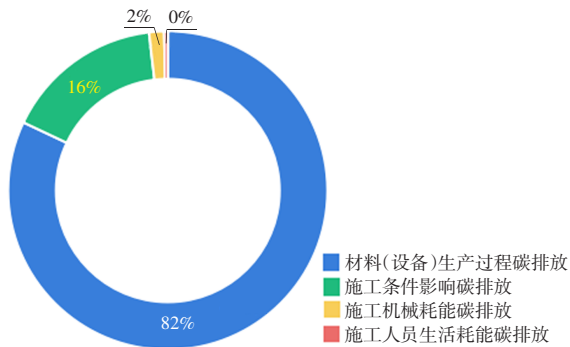


图 2 预制阶段碳排放源占比分析

Fig. 2 Analysis of the proportion of carbon emission sources in the prefabrication stage

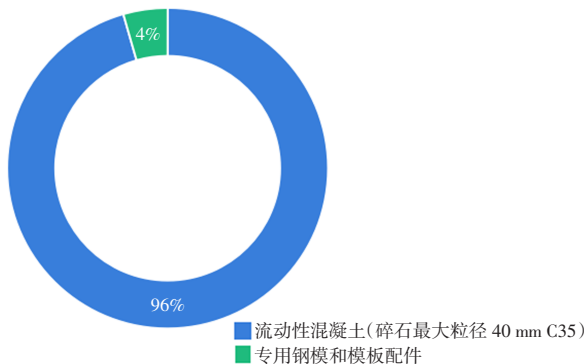


图 3 扭王字块预制碳排放源占比分析(预制阶段)

Fig. 3 Analysis of the proportion of carbon emission sources of Accropode prefabrication (in the prefabrication stage)

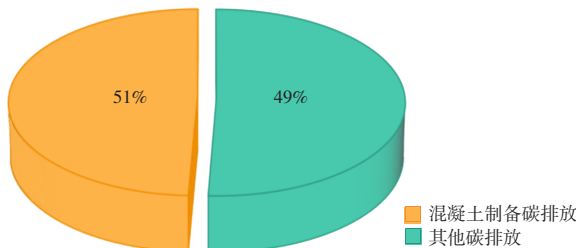


图 4 混凝土制备碳排放占比

Fig. 4 Proportion of carbon emissions from concrete preparation

4.2 施工条件影响

施工条件影响碳排放通过在施工人员生活耗能和施工船舶及机械耗能碳排放测算基础上乘以相应施工条件累加得到(式(4))。分析二次倒运及堆放阶段碳排放组成,施工条件影响碳排放、施工机械耗能碳排放、施工人员生活耗能碳排放量(表 2)依次为 1 858.82 kgCO₂、214.29 kgCO₂和 4.91 kgCO₂,碳排放占比(图 5)依次为 90%、10%和 0%(修约到个位),即施工条件影响是二次倒运及堆放阶段的主要碳排放源。同样,分析运输安装阶段碳排放组成,材料(设备)生产过程碳排放、施工条件影响碳排放、施工机械耗能碳排放、施工人员生活耗能碳排放量(表 2)依次为 1.35 kgCO₂、312.66 kgCO₂、35.82 kgCO₂和 1.05 kgCO₂,碳排放占比(图 6)依次为 1%、89%、10%和 0%(修约到个位),即施工条件影响亦是运输安装阶段的主要碳排放源。

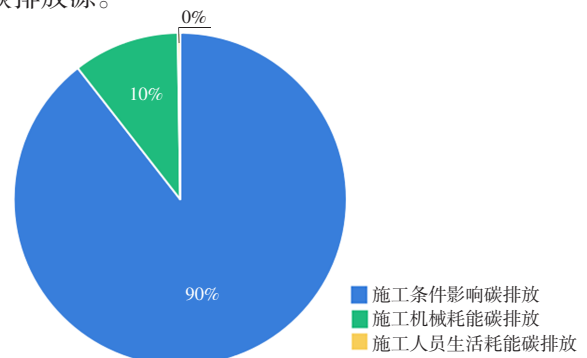


图 5 二次倒运及堆放碳排放源占比分析

Fig. 5 Analysis of the proportion of carbon emission sources from secondary transportation and stacking

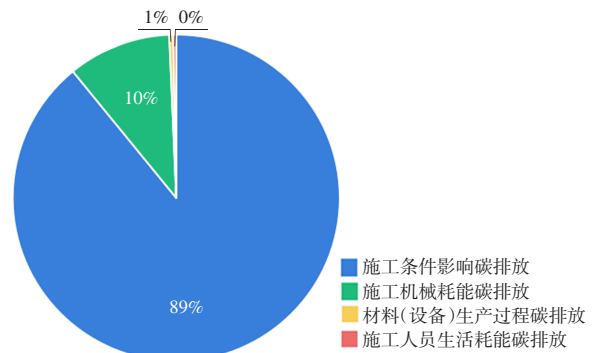


图 6 运输安装碳排放源占比分析

Fig. 6 Analysis of the proportion of carbon emission sources in transportation and installation

5 碳减排措施

1) 低碳建材产品研发及应用

如上所述,流动性混凝土制备碳排放占扭王

字块预制安装工程碳排放的51%,控制混凝土制备碳排放将有效降低工程碳排放,是首要的减排约束目标。在“双碳”背景下,可研究采用固废基胶凝材料作为新型胶凝材料,采用尾矿砂、尾矿废石、建筑垃圾作为骨料配制固废混凝土。《水运工程建设期碳排放测算标准(试行)》^[18]第5.2.3条规定:使用工业废料和建筑垃圾替代常规材料时,可忽略其材料生产过程的碳排放。公开的数据显示:混凝土原材料生产碳排放占混凝土制备碳排放的比重为80%~90%。根据本文计算方法,扭王字块预制安装工程碳排放量由6 547.11 kgCO₂降低至3 642.18~3 964.95 kgCO₂,降低幅度可达44%~39%。同时,需要强调的是,由于对固废粉体和固废砂石料性能的合格判定还是简单套用水泥混凝土标准衡量指标,缺乏基于材料反应过程精细化控制的大数据基础及质量保障的数据追踪体系^[30],新型胶凝材料、固废混凝土等低碳建材产品的耐久性受到了极大关注,是目前急需解决的问题。同时,T/CECS 689—2020《固废基胶凝材料应用技术规程》、T/CECS 1254—2023《全固废海工高性能混凝土应用技术规程》、DB13(J)/T 307—2019《低碳胶凝材料高性能混凝土结构工程施工质量验收规程》、DB13(J)/T 8385—2020《全固废高性能混凝土应用技术标准》等协会和地方标准的相继发布实施,将不断推动低碳建材产品的广泛应用。

2) 施工队伍及施工机械的合理调遣和调配

施工条件影响所导致的碳排放量分别占预制阶段、二次倒运及堆放阶段、运输安装阶段碳排放总量的16%、90%和89%,是二次倒运及堆放阶段与运输安装阶段的主要碳排放源,对这两阶段的碳减排具有显著影响。施工条件影响碳排放量采用式(4)进行计算,即当某项施工条件碳排放测算系数取值越高时,其对应的施工条件碳排放量亦随之升高。如表2所示,临时设施施工、冬雨季及夜间施工、材料二次倒运、施工辅助措施的碳排放测算系数合计取值为4.11,仍低于施工队伍进退场碳排放测算系数4.37。施工队伍进退场碳排放指施工单位承担工程施工使用的施工船舶机械进入和退出施工现场及派出部分施工力量一次往返调遣所需产生的碳排放,主要包括调遣期间涉及的人工、船舶机械、施工器具、周转材料以及生产管理用具的调遣产生的碳排放。因此,

在临建设施必不可少、冬雨季及夜间施工难以避免、施工场地条件受限需二次倒运施工材料、试验检验和工程定位点复测等辅助施工同步开展的条件下,施工队伍及施工机械的合理调遣和调配对于施工减排影响显著。

6 结语

“双碳”背景下,建设领域的碳减排已是大势所趋。近年来相继制定发布的国家、地方、协会、企业混凝土碳排放计算标准为混凝土施工碳减排研究提供了标准依据。以单件重量25 t(单件体积10 m³)扭王字块预制安装工程碳排放为计算对象,采用《水运工程建设期碳排放测算标准(试行)》相关计算公式和计算程序,分别计算预制、二次倒运及堆放和运输安装3阶段的碳排放,基于计算结果,分析并给出碳减排措施如下:

1) 混凝土制备是扭王字块预制安装工程的最主要碳排放源,基于混凝土原材料生产碳排放占混凝土制备碳排放的比重达80%~90%,使用新型胶凝材料、固废混凝土等低碳建材产品可减少44%~39%的碳排放量。随着低碳建材产品相关标准的不断制定,低碳建材产品的应用将更加广泛,更好助力混凝土施工碳减排。

2) 由临时设施施工、冬雨季及夜间施工、材料二次倒运、施工辅助和施工队伍进退场组成的施工条件影响碳排放是扭王字块预制安装工程二次倒运及堆放阶段和运输安装阶段的主要碳排放源。优化施工组织,合理调遣和调配施工队伍及施工机械是重要的施工碳减排措施。

3) 《水运工程建设期碳排放测算标准(试行)》和《水运工程碳排放测算定额 第一分册 沿海港口工程(试行)》目前均为试行版本,其碳排放计算方法和碳排放因子的合理性仍有待进一步验证,以便更准确计算碳排放量和实施碳减排措施。

参考文献:

- [1] 华经产业研究院. 2024—2030年中国预拌混凝土行业发展前景预测及投资战略咨询报告[R/OL]. 华经情报网, 2024[2025-10-11]. <https://www.huaon.com/channel/building/968276.html>.
Huajing Industry Research Institute. 2024-2030 China ready-mixed concrete industry development prospects forecast and investment strategy consulting report[R/OL]. huaon.com, 2024[2025-10-11]. <https://www.huaon.com/channel/building/968276.html>.
- [2] 於林锋,方倩倩,王琼,等. 上海市预拌混凝土行业生产及耗能现状[J]. 粉煤灰, 2014, 26(2): 33-35, 39.
YU Lin-feng, FANG Qian-qian, WANG Qiong, et al. Current situation on Shanghai pre-mixed concrete industry's production and

- energy consumption[J]. *Coal Ash*, 2014, 26(2): 33-35, 39.
- [3] 钱耀丽, 韩云婷, 杨光, 等. 上海地区预拌混凝土行业碳排放计算与减碳潜力分析[J]. *混凝土与水泥制品*, 2025(8): 100-105.
QIAN Yao-li, HAN Yun-ting, YANG Guang, et al. Carbon emission calculation and carbon reduction potential analysis of ready-mixed concrete industry in Shanghai[J]. *China Concrete and Cement Products*, 2025(8): 100-105.
- [4] 易莉, 李玉云, 彭波, 等. 预拌混凝土能源消耗现状及节能潜力分析[J]. *混凝土*, 2012(11): 87-93.
YI Li, LI Yu-yun, PENG Bo, et al. Analysis of energy consumption present situation and energy saving potential of the commercial concrete[J]. *Concrete*, 2012(11): 87-93.
- [5] 杨志强, 赛音巴特尔, 时朝昆, 等. 多固废耦合水泥制备 C30 混凝土性能研究[J]. *环境工程*, 2023, 41(3): 143-147.
YANG Zhi-qing, SAIYIN Bateer, SHI Zhao-kun, et al. Study on the properties of C30 concrete prepared by multi-solid waste coupled cement[J]. *Environment Engineering*, 2023, 41(3): 143-147.
- [6] 栗东平, 平浩岩, 张凯帆, 等. 钢渣-矿渣-脱硫石膏复合胶凝材料的制备及水化机理[J]. *科学技术与工程*, 2023, 23(6): 58-66.
LI Dong-ping, PING Hao-yan, ZHANG Kai-fan, et al. Preparation and hydration mechanism of composite cementitious materials containing steel slag, slag and desulfurization gypsum[J]. *Science Technology and Engineering*, 2023, 23(6): 58-66.
- [7] HUO B, LI B, CHEN C, et al. Surface etching and early age hydration mechanisms of steel slag powder with formic acid[J]. *Construction & Building Materials*, 2021, 280: 122500.
- [8] XU C, NI W, LI K, et al. Activation mechanisms of three types of industrial by-product gypsums on steel slag-granulated blast furnace slag-based binders[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 288: 123111.
- [9] 崔孝炜, 倪文, 任超. 钢渣矿渣基全固废胶凝材料的水化反应机理[J]. *材料研究学报*, 2017, 31(9): 687-694.
CUI Xiao-wei, NI Wen, REN Chao. Hydration mechanism of all solid waste cementitious materials based on steel slag and blast furnace slag[J]. *Chinese Journal of Materials Research*, 2017, 31(9): 687-694.
- [10] 张金, 曹中兴, 姚军平. 干法下出料振冲碎石桩技术的应用及其环境效应[J]. *中国港湾建设*, 2019, 39(2): 22-25.
ZHANG Jin, CAO Zhong-xing, YAO Jun-ping. Application and environmental effect of dry bottom feeding vibro-replacement stone column technique[J]. *China Harbour Engineering*, 2019, 39(2): 22-25.
- [11] 于洋. 酸侵蚀下大掺量铁尾矿混凝土耐久性研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2022.
YU Yang. Study on durability of concrete with large amount of iron tailings under acid attack[D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2022.
- [12] 胡雷. 钢渣粉-磷渣粉-矿粉复合掺合料海工混凝土的制备及性能研究[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2020.
HU Lei. Study on preparation and performance of steel slag powder-phosphorus slag powder-slag powder composite admixture marine concrete[D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2020.
- [13] 杨道魁, 张延年, 顾晓薇, 等. 铁尾矿-磷渣-脱硫灰三元固废混凝土抗压性能研究[J]. *金属矿山*, 2022(1): 83-88.
YANG Dao-kui, ZHANG Yan-nian, GU Xiao-wei, et al. Study on compressive strength of concrete in iron tailings-phosphate slag-desulfurization ash ternary solid waste system[J]. *Metal Mine*, 2022(1): 83-88.
- [14] SOLOMON A A, SELVARATHI M, ANAND N. Influence of supplementary cementitious materials on stress-strain behavior and toughness characteristics of concrete subjected to higher temperature exposure[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2023.
- [15] 康迎杰, 郭自利, 潘鹏. 不同掺量铁尾矿废石骨料混凝土抗压强度和抗氯离子渗透性能研究[J]. *混凝土*, 2022(3): 83-85.
KANG Ying-jie, GUO Zi-li, PAN Peng. Compression test and chloride ion permeability test of concrete with different content of iron ore tailings waste rock aggregate[J]. *Concrete*, 2022(3): 83-85.
- [16] 程和平, 陆璐. 铁尾矿砂掺量对混凝土力学性能、耐久性及其水化特性的影响研究[J]. *金属矿山*, 2021(11): 215-220.
CHENG He-ping, LU Lu. Research on mechanical, impermeability and hydration characteristics of iron tailings concrete[J]. *Metal Mine*, 2021(11): 215-220.
- [17] LYU X D, LIN Y Q, CHEN X, et al. Environmental impact, durability performance, and interfacial transition zone of iron ore tailings utilized as dam concrete aggregates[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 292: 126068.
- [18] Q/CCCG SY105—2022, 水运工程建设期碳排放测算标准(试行)[S]. 北京: 中国交通建设集团有限公司, 2022.
Q/CCCG SY105—2022, Standard of carbon emission calculation for water transportation engineering construction of CCCG[S]. Beijing: China Communications Construction Co., Ltd., 2022.
- [19] GB/T 51366—2019, 建筑碳排放计算标准[S].
GB/T 51366—2019, Standard for building carbon emission calculation[S].
- [20] GB/T 32151.38—2024, 温室气体排放核算与报告要求 第 38 部分: 水泥制品生产企业[S].
GB/T 32151.38—2024, Requirements of the greenhouse gas emissions accounting and reporting—Part 38: Cement-based products enterprise[S].
- [21] GB/T 32151.8—2023, 碳排放核算与报告要求 第 8 部分: 水泥生产企业[S].
GB/T 32151.8—2023, Requirements of the carbon emissions accounting and reporting—Part 8: Cement enterprise[S].
- [22] DB 64/T 1954—2023, 混凝土碳排放计算方法及评价标准[S].
DB 64/T 1954—2023, Calculation method and evaluation standard of carbon emission from concrete[S].
- [23] DB34/T 4990—2025, 公路生命周期碳排放核算标准[S].
DB34/T 4990—2025, Calculation standard on life cycle carbon emission of highway[S].
- [24] T/CBMF 27—2018, 预拌混凝土 低碳产品评价方法及要求[S].
T/CBMF 27—2018, Evaluation method and requirements for ready-mixed concrete low-carbon products[S].

- [25] T/CABEE 108—2025, 预拌混凝土碳排放核算标准[S].
T/CABEE 108—2025, Standard for carbon emission accounting of ready-mixed concrete[S].
- [26] IPCC2006. 2006年IPCC国家温室气体清单指南[Z]. 日本:日本全球环境战略研究所, 2006.
IPCC2006. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventory[Z]. Japan: Institute for Global Environmental Strategies, Japan, 2006.
- [27] JTS/T 116—2019, 水运建设工程概算预算编制规定[S].
JTS/T 116—2019, Stipulations on compiling estimate and budget for water transportation construction engineering[S].
- [28] JTS/T 276—1—2019, 沿海港口水运建筑工程定额[S].
JTS/T 276—1—2019, Quota for maritime works in seaport[S].
- [29] Q/CCCG SY106—2022, 水运工程碳排放测算定额 第一分册 沿海港口工程(试行)[S]. 北京:中国交通建设集团有限公司, 2022.
Q/CCCG SY106—2022, Quota for carbon emission estimation in waterway engineering Volume 1: Seaport[S]. Beijing: China Communications Construction Co., Ltd., 2022.
- [30] 吴跃, 乔君慧. 混凝土的耐久性谁来守护[M]. 北京:中国建材工业出版社, 2023.
WU Yue, QIAO Jun-hui. Who guards the durability of concrete[M]. Beijing: China Construction Science and Technology Press, 2023.

(上接第29页)

5 结语

本文以连云港某工程为例, 通过现场试验、监测、检测及室内土工试验, 验证了经新型配比处理后的含透水透气层的软土地基进行真空预压加固的可行性, 主要结论为:

1) 当真空预压处理的软土地基存在深厚砂层等透水透气层时, 通常采用黏土密封墙工艺进行加固区内外透水透气层隔离。对于缺乏软黏土的工程, 可通过在砂层中掺入一定比例的膨润土、偶联剂等材料, 替代软黏土, 形成密封墙, 取得了较好的密封效果, 满足真空预压的需要。

2) 掺入量膨润土 10%+偶联剂 0.2%、泥浆比重 1.45 的新型密封墙配比结合双排搅拌桩工艺在连云港某工程中取得了与传统密封墙同样的加固效果。

参考文献:

- [1] 梁爱华, 刘爱民, 朱耀庭, 等. 黏土密封墙施工质量指标控制[J]. 中国港湾建设, 2010, 40(1): 28-31.
LIANG Ai-hua, LIU Ai-min, ZHU Yao-ting, et al. Research on construction quality control of vacuum preloading sealing wall[J]. China Harbour Engineering, 2010, 40(1): 28-31.
- [2] 冯刚, 牛飞. 砂土地基密封墙室内配合比试验研究[J]. 水运工程, 2021(6): 233-237.
FENG Gang, NIU Fei. Experimental study on indoor mix proportion of sand soil foundation sealing wall[J]. Port & Waterway Engineering, 2021(6): 233-237.
- [3] 李军, 胡继业, 邓元广. 大面积吹填陆域真空预压密封墙处理技术的应用[J]. 水运工程, 2004(2): 44-48.
LI Jun, HU Ji-ye, DENG Yuan-guang. Application of vacuum preloading sealing wall technique for large-area reclaimed land[J]. Port & Waterway Engineering, 2004(2): 44-48.
- [4] 王振文, 卢志伟, 王锋. 吹砂造地真空联合堆载预压密封墙处理经验[J]. 中小企业管理与科技(中旬刊), 2017(10): 153-154.
WANG Zhen-wen, LU Zhi-wei, WANG Feng. Treatment experience of vacuum combined mound-load preload envelope wall in making land by blowing sands engineering[J]. Management & Technology of SME, 2017(10): 153-154.
- [5] 张哲, 张力, 左志刚, 等. 滨州港大面积真空预压软基处理密封工艺[J]. 水运工程, 2021(9): 178-181, 200.
ZHANG Zhe, ZHANG Li, ZUO Zhi-gang, et al. Large-area vacuum preloading soft foundation treatment and sealing technology in Binzhou Port[J]. Port & Waterway Engineering, 2021(9): 178-181, 200.
- [6] 高志义. 真空预压法的理论与实践[M]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
GAO Zhi-yi. Theory and practice of vacuum preloading method[M]. Beijing: China Communications Press, 2015.
- [7] JTS 147—2017, 水运工程地基设计规范[S].
JTS 147—2017, Code for foundation design on port and waterway engineering[S].
- [8] JTS 147—2—2009, 真空预压加固软土地基技术规程[S].
JTS 147—2—2009, Technical specification for vacuum preloading technique to improve soft soils[S].