



钢圆筒岛壁结构施工阶段碳排放测算及分析*

刘丽斌, 谢俊, 张曦, 谢锦波

(中交第三航务工程局有限公司, 上海 200032)

摘要: 随着全球气候问题日益严峻, 社会对低碳发展愈发关注。碳核算是实现碳达峰、碳中和的关键基础, 碳排放测算成为核心环节。围海填陆工程因占地面积广、工程量大, 碳排放量显著; 而钢圆筒作为其核心结构之一, 碳排放测算具有重要意义。运用碳排放因子法, 针对某项目钢圆筒岛壁结构施工阶段碳排放进行测算分析, 并与斜坡式、桶式基础护岸碳排放量对比。结果表明: 钢圆筒施工阶段碳排放主要来源于材料, 占比94%, 钢材是主要碳排放源。材料使用间接排放高于直接排放。运输船和起重船碳排放量在船机设备中居前两位。钢圆筒护岸结构主要材料每延米碳排放量为77 t, 高于斜坡堤的69 t, 低于桶式基础的103.5 t。该研究为工程碳减排策略的制定提供了科学依据, 有助于推动围海填陆工程向低碳化方向发展。

关键词: 钢圆筒; 碳排放; 施工阶段; 碳排放因子

中图分类号: U655.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)01-0257-08

Calculation and analysis of carbon emissions during construction stage of steel cylinder island-wall structure

LIU Libin, XIE Jun, ZHANG Xi, XIE Jinbo

(CCCC Third Harbor Engineering Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: As global climate issues intensify, society is paying more attention to low-carbon development. Carbon accounting is crucial for achieving carbon peaking and neutrality, with carbon emission calculation being a key part. Land reclamation projects, known for their large scale and large engineering volume, have significant carbon emissions. As one of its core structures, the steel cylinder is of great significance for carbon emission measurement. This study uses the carbon emission factor method to calculate and analyze carbon emissions during the construction stage of a steel cylinder island-wall structure in a certain project. It also compares these emissions with those of slope-type and bucket-foundation breakwaters. The results show that carbon emissions during the construction phase of steel cylinders mainly come from materials, accounting for 94%, and steel is the main source of carbon emissions. Indirect emissions from material use are higher than direct emissions. Transport ships and crane ships rank among the top two in terms of carbon emissions in ship machinery equipment. The carbon emissions per meter of the main material for the steel cylinder breakwater structure are 77 t, which is higher than the 69 t of slope-type breakwaters but lower than the 103.5 t of bucket-foundation breakwaters. This study provides a scientific basis for the formulation of engineering carbon reduction strategies and helps promote the development of land reclamation projects towards low-carbon direction.

Keywords: steel cylinder; carbon emissions; construction phase; carbon emission factor

气候变化是全球共同面临的重大挑战, 关系到人类的生存和发展。从我国现阶段发展来看,

能源结构仍旧以煤为主, 经济结构性矛盾仍然突出, 随着能源消耗的不断增长, 控制温室气体排

收稿日期: 2025-04-25 录用日期: 2025-06-04

*基金项目: 国家重点课题项目(2024YFB2605900)

作者简介: 刘丽斌(1993—), 硕士, 工程师, 研究方向为岩土工程。

放面临巨大压力。因此，控制温室气体排放，积极应对气候变化，切实推动绿色低碳发展，已成为我国贯彻新发展理念、实现经济社会高质量发展的重要抓手。工程建设一直以来都是碳排放量较大的领域，据统计^[1]，中国每年工程建设碳排放量占总排放量的35%以上，降低工程建设的碳排放量是实现双碳目标的重要一步。

全生命周期理论(life cycle theory)是一种描述产品、项目或个体在其整个存在期间所经历的不同阶段的模型。这一理论基于一个简单的概念：任何事物都有其发展过程，经历从起始阶段、成长阶段、成熟阶段到衰退阶段的不同阶段。GB/T 51366—2019《建筑碳排放计算标准》^[2]基于全生命周期理论将建筑碳排放划分为建材生产、建材运输、建造、运行、拆除和回收6个阶段。魏同正等^[3]基于全生命周期评价某木结构建筑碳排放及减碳效果，发现木结构建筑在建材生产阶段的减碳效果显著，在建造阶段、运行阶段和拆除回收阶段减碳效果不明显。梁才广等^[4]基于全生命周期理论测算结果发现，加强对化石类能源的管理、优化土方开挖方案以及采用合理工艺减少钢筋的损耗，是减少水运工程项目施工过程中碳排放的重点措施。马瑜晨^[5]根据GB/T 51366—2019《建筑碳排放计算标准》对装配式住宅全生命周期碳排放进行了测算评估，并提出从设计到施工各阶段的减碳措施和建议。高嵩焱等^[6]基于公路工程部门定额的数据，以土石方路基填筑工程为例，为项目碳排放计算提供了一套方法，在设计阶段全面系统地对施工活动产生的碳排放进行定量计算分析。张涛等^[7]收集、分类、整理国内外常见的建筑碳排放因子，助益了碳排放测算。然而，目前大部分碳排放测算研究主要针对建筑工程，关于水运工程中岛壁结构研究较少。围海成陆作为国家重大战略工程，通常项目占地面积广、工程量大，往往产生较大的碳排量，其碳排放测算亦不能忽视。钢圆筒作为围海填陆的最重要结构之一^[8-12]，其碳排放测算显示十分有必要。

本文通过详尽调研发现，碳排放因子法凭借其系统性、通用性及可操作性，在当前碳排放测算领域应用最为广泛，而定额法本质上也源于碳排放因子法的衍生与发展。研究参考全生命周期理论，并遵循GB/T 51366—2019《建筑碳排放计算标准》中详述的碳排放计算方法，针对某项目中的钢圆筒岛壁结构施工阶段碳排放进行了精准测算。在获取测算数据的基础上，进一步对该阶段碳排放情况展开了深入细致的分析与客观公正的评估，旨在为后续工程设计与施工过程中的碳排放管控提供有力的参考依据与决策支持，助力实现建设工程领域的低碳转型与可持续发展目标。

1 碳排放测算方法

1.1 测算步骤

在钢圆筒施工阶段，碳排放的计算涵盖直接排放与间接排放。其中，直接排放特指项目场地红线范围内的施工活动所产生的碳排放；而间接排放则主要来源于施工材料的生产与运输过程。碳排放的计算时间跨度从钢圆筒的制作工序启动之时起，持续至项目验收合格之日止。具体的碳排放计算流程，见图1。

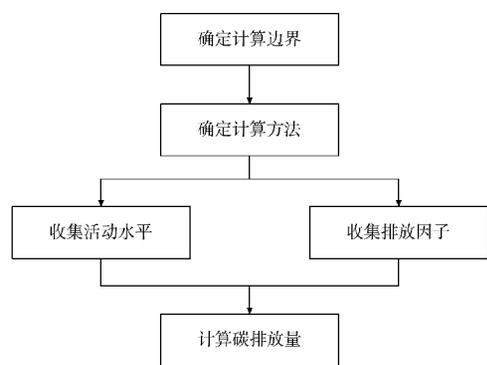


图1 碳排放计算流程

Fig. 1 Carbon emission calculation process

1.2 碳排放来源

钢圆筒施工工艺主要包括：主副格制作、运输、振沉、筒内吹砂、碎石垫层等流程。通过现场耗材分析可知，钢圆筒施工阶段的直接碳排放主要为现场人员碳排放和机械设备的能耗；间接

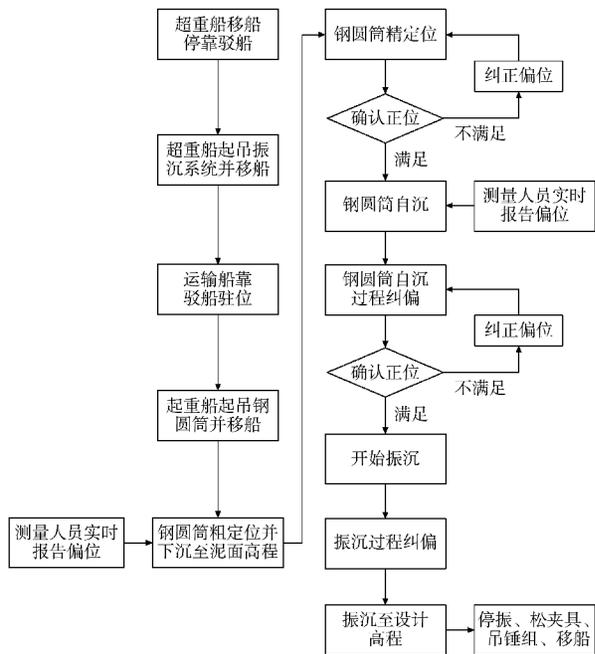


图3 钢圆筒振沉流程

Fig. 3 Process of steel cylinder vibration sinking

2.2 案例测算

围堤工程施工钢圆筒 124 个、副格 248 个，其中钢圆筒直径 22 m，单个质量 513~725 t，副格单价质量 52/45 t。根据现场施工钢圆筒阶段数量和质量统计 124 个钢圆筒共 80 114 t，副格 12 615 t，钢圆筒、副格质量均含制作所用螺栓、扁铁等钢材。石料主要统计筒顶碎石垫层、堤心石、开山石及筒顶平台回填量；砂主要统计主、副格内吹砂量及袋装砂；混凝土主要统计混凝土垫层所用量。

主要材料工程量及碳排放测算结果见表 3，总的材料碳排放量为 231 800 t，其中钢圆筒碳排放

量为 216 985 t，占比最高，为主要碳排放来源。整个护岸长 2 998 m，则每延米材料碳排放量为 77 t/m。本次计算未考虑钢圆筒整体施工工艺中东西堤衔接段、工作段内修路、筒内塑排、现场挖泥、工作船码头建设等项目。

表 3 主要材料碳排放量 (E_m)

Tab. 3 Carbon emissions of main materials (E_m)		
名称	工程量	碳排放量/t
钢圆筒	92 729 t	216 985
混凝土	8 662 m ³	2 555
回填砂	821 319 m ³	3 401
碎石垫层	102 764 m ³	370
碎石倒滤层	111 525 m ³	401
回填片石	51 444 m ³	185
回填开山石	1 476 742 m ³	5 312
碎石桩	720 285 m ³	2 591
小计		231 800

主要机械、设备碳排放计算根据能耗类型分为两种：1) 钢圆筒制作过程电能消耗产生的碳排放；2) 现场施工柴油消耗产生的碳排放。

钢圆筒制作采用钢板拼接工艺，连接方式为焊接，焊接方法为半自动直流电焊，在厂内制作完成，能源类型为电网供电。总的焊缝长度约为 599.925 km，电焊机焊接速度为 0.27~0.33 m/min，电焊机电流为 204~248 A、电压为 24.2~27.8V。切割机、油压机、冷弯机等均按 127 d、每天运行 6 h 计算，得到了钢圆筒制作过程电能消耗产生的碳排放见表 4，由于电网的碳排放因子仅为 0.581 kgCO₂/(kW·h)，因此整体制作过程电能产生的碳排放量较少，为 1 463 t。

表 4 制作过程机械、设备碳排放量 (E_{e1})

Tab. 4 Carbon emissions from machinery and equipment during manufacturing process (E_{e1})					
项目	单位功率/(kW·h ⁻¹)	总功率/(kW·h ⁻¹)	时长/h	耗电/(kW·h)	碳排放量/t
切割机(5台)	33	165	762	125 730	73
油压机(2台)	300	600	762	457 200	266
冷弯机(1台)	36	36	762	27 432	16
矫正机(1台)	30	30	762	22 479	13
铣边机(1台)	10	10	762	7 620	4
钩吊、电磁吊(43台)	50	2 129	762	1 621 917	942
电焊机(46台)	7	317	805	255 316	148
小计				2 517 694	1 462

现场施工柴油消耗产生的碳排放, 根据 GB/T 51366—2019《建筑碳排放计算标准》中柴油的排放因子单位是 tCO_2/TJ , 通过运输装备功率、运输时间、路程计算出总的耗能, 再折算出柴油消耗量, 最后通过柴油的碳排放因子计算得出材料场外运输的碳排放量。该计算过程所涉及计算式如下:

1) 运输过程柴油消耗量 = 路程 ÷ 平均速度 × 功率 × 发动机燃油消耗率;

2) 施工机械、装备柴油消耗量 = 功率 × 时间 × 发动机燃油消耗率;

3) 主要机械、设备碳排放量 = 能耗 × 发动机燃油消耗率 × 柴油单位热值 × 柴油碳排放因子。

综上, 计算得到主要机械、设备能耗, 结果见表 5。其中, 主、副格分别从江苏启东和浙江岱山运输至项目基地, 5 条运输船, 共 44 个航次完成运输量, 每航次装载 1~3 个。吹填砂主要由项目附近徐公岛, 通过运输船运输至项目现场, 单程运输距离 15 km。碎石、块石从衢山开采、加工后, 通过运输船运输至项目现场, 单程运输距离 27 km。根据航运日志, 统计得到运输船总的运输距离为 26 402 km, 平均速度为 10 km/h。陆上转运采用 5 辆平板车, 分 3 种功率型号的平板车 (2 辆功率 169 kW/h、2 辆功率 286 kW/h、1 辆功率 381 kW/h), 总的功率为 1 291 kW/h。同理, 根据机械设备发动机数据和施工日志, 统计得到起重船、定位船、龙门吊、振动锤功率及运行时间见表 5。

表 5 施工过程机械、设备能耗

Tab. 5 Energy consumption of machinery and equipment during construction process

名称	功率/(kW·h ⁻¹)	运行时间/h	能耗/(kW·h)
运输船	2 700	2 640	7 127 000
平板拖车	1 291	700	903 700
起重船 1	8 500	560	4 760 000
起重船 2	2 650	560	1 484 000
定位船	200	560	112 000
龙门吊	904	124	112 080
振动锤 1	10 857	62	673 128
振动锤 2	433	148	63 911
其他车辆	200	560	112 000
小计			15 347 819

基于上述计算得到各机械、设备的能耗和柴油的碳排放因子及单位热值, 可得到主要施工过

程机械、设备碳排放量, 见表 6, 其中, 各设备的燃油消耗率均取大值计算, 柴油单位热值参考国家统计局能源统计司的《中国能源统计年鉴 2023》^[14], 取值为 42 652 kJ/kg。

表 6 施工过程机械、设备碳排放量 (E_{e2})

Tab. 6 Carbon emissions from machinery and equipment during construction process (E_{e2})

名称	能耗/(kW·h)	燃油消耗率/[kg·(kW·h) ⁻¹]	柴油单位热值 kJ/kg	碳排放量/t
运输船	7 127 000	0.20~0.25	42 652	5 516
平板拖车	903 700	0.25~0.30	42 652	839
起重船	6 244 000	0.22~0.25	42 652	4 833
定位船	112 000	0.18~0.22	42 652	76
龙门吊	112 080	0.20~0.25	42 652	87
振动锤	737 039	0.25~0.30	42 652	685
其他车辆	112 000	0.25~0.30	42 652	104
小计	15 347 819	-	-	12 140

施工人员碳排放方面, 测量工、技术人员、起重工、电工、普工等共 41 人; 从开工至结束共 101 d; 故施工人员总的碳排放量 $E_p \approx 7.62 tCO_2$ 。

综上, 钢圆筒施工阶段总的碳排放量 $E = E_p + E_m + E_{e1} + E_{e2} = 245 411.62 tCO_2$ 。

2.3 测算分析

根据上述计算结果可知, 钢圆筒施工阶段碳排放量主要组成为: 主要材料碳排放 E_m 占比 94.4%; 机械、设备碳排放量 E_e 占比 5.5%; 施工人员碳排放 E_p 占比 0.1%。

施工阶段各材料碳排放对比见图 4a), 占比从高到低依次为钢材 93.6%、块石 (片石、开山石) 2.4%、碎石 (碎石垫层、碎石桩、碎石倒滤层) 1.5%、回填砂 1.5%、混凝土 1.1%, 其中钢材施工间接排放占比远高于其他材料, 主要原因是: 一方面, 钢材使用量较大; 另一方面, 钢材的碳排放因子远大于其他材料。从降碳减排角度, 钢圆筒施工工艺未来降碳优化方向主要是降低材料碳排放, 尤其是钢材的碳排放量。同时, 现场所需碎石和筒内吹砂, 采用疏浚废物或就近取材, 可以降低一定材料和运输碳排放量。

各施工阶段机械、设备碳排放量见图 4b), 钢圆筒振沉施工船机涉及钢圆筒起重船、定位船、运输

船等，其中运输船和起重船碳排放量较大位于前二，分别占比 45.4%、39.8%。施工阶段，各船舶机械、设备能源来源均为柴油，导致机械设备运行产生较大碳排放量。当前钢圆筒振沉工艺在施工船机设备优化方面，降碳空间十分有限，绿色能源升

级是主要方向。在未来应该进行设备能源升级，采取电驱动船机或接岸电，从而大大降低该部分碳排放量。此外，现场施工过程中，合理的施工组织策划，包括材料最优运输路线规划、土方开挖自平衡、工序穿插等都可以减少施工阶段碳排放量。

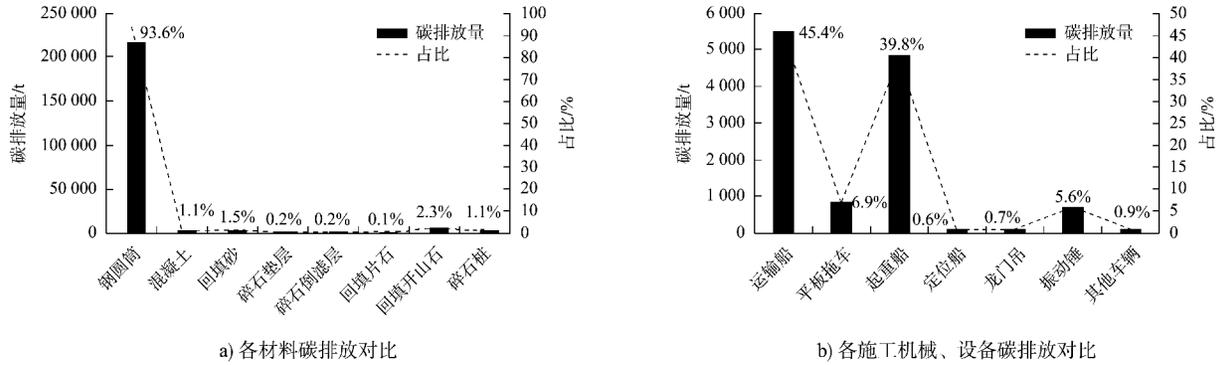


图 4 钢圆筒材料与机械设备碳排放对比

Fig. 4 Comparison of carbon emissions between steel cylinder materials and mechanical equipment

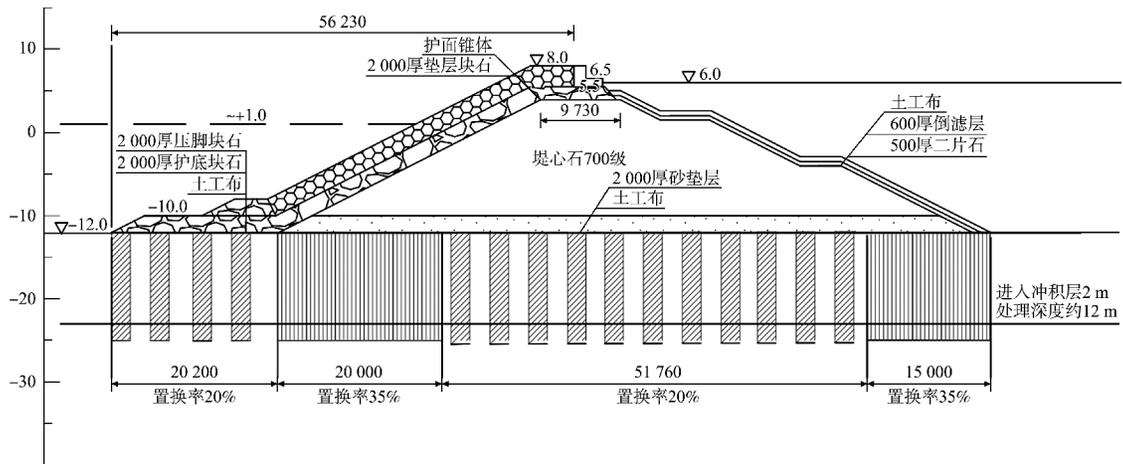
2.4 与其他护岸结构对比

护岸一般采用防波堤结构进行实现，以斜坡式、直立式和混合式结构为主，护面多采用浆砌或干砌块石、现浇混凝土、预制混凝土块体等。同样，采取碳排放因子法对项目斜坡堤、桶式基础护岸对标设计方案进行主要材料的碳排放量对比分析。所对标的斜坡堤、桶式基础设计断面见图 5，碳排放量取每延米工程量进行测算分析。

水泥土搅拌桩的水泥使用，水泥碳排放占比高达 90.5%。进一步，对于斜坡堤结构如果地基处理采用散体桩，如砂桩或碎石桩，其材料使用碳排放量将大大减小。

根据斜坡堤、桶式基础设计断面，进行每延米工程量测算和材料碳排放量计算，计算结果见表 7、8。桶式基础材料每延米碳排放量主要来自混凝土和钢材(包括结构连接构件和混凝土配筋用钢量)的使用，分别占比 46.7%和 52%。斜坡堤结构主要以砂、石为主，每延米碳排放量主要来自

斜坡堤每延米碳排放量为 69 t，较钢圆筒每延米碳排放量的 77 t 下降 10.3%，主要原因是斜坡堤主要使用块石、砂石等碳排因子较低的材料；桶式基础每延米碳排放量为 103.5 t，较钢圆筒每延米碳排放量的 77 t 上升 34.4%，主要原因是桶式基础所需的混凝土量非常大，而混凝土碳排放因子较高，造成了碳排放量的上升。项目基于施工工期、成本、绿色低碳角度考虑，最终选择了施工较快、碳排放量与成本适中的钢圆筒堤坝结构，取得了良好效果。



a) 斜坡堤

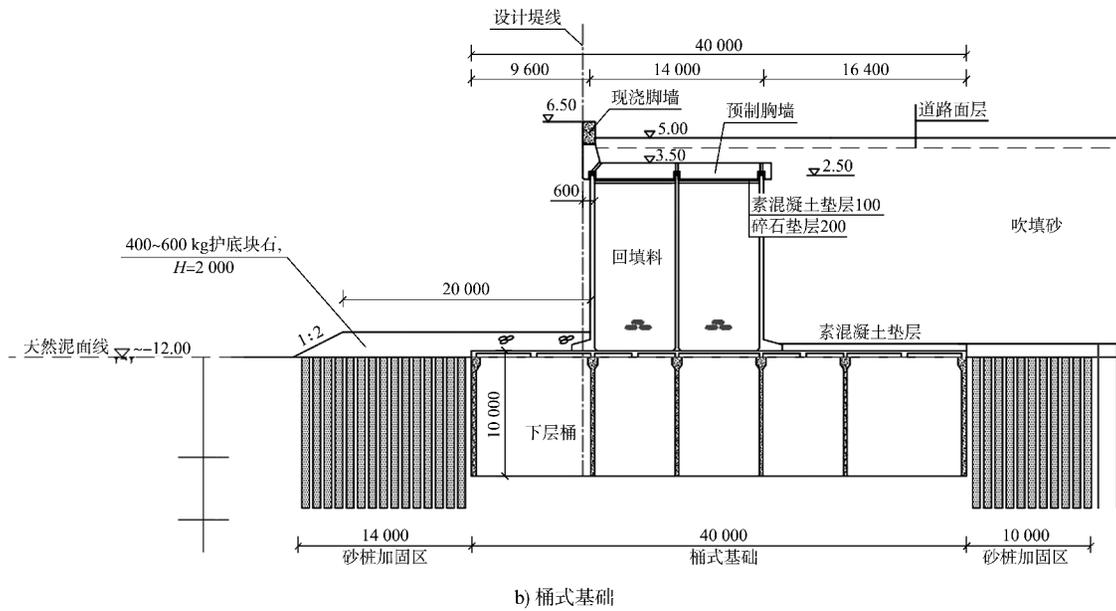


图 5 断面设计图(尺寸:mm;高程:m)

Fig. 5 Cross-sectional design drawing(dimension ;mm ;elevation ;m)

表 7 桶式基础主要材料碳排放量(E_m)

Tab. 7 Carbon emissions of main materials for bucket foundation (E_m)

项目	材料	每延米工程量	每延米碳排放量/kg
预制桶式基础	C45	92 m ³	35 530
预制胸墙 1	C45	6 m ³	2 257
预制胸墙 2	C45	14 m ³	5 425
现浇胸墙及节点	C40	3 m ³	1 327
素混凝土垫层	C25	13 m ³	3 924
钢	热轧	23t	53 987
级配碎石	-	11 m ³	39
上桶式回填砂	-	182 m ³	755
护底块石	-	45 m ³	161
砂	-	24 m ³	99
合计			103 504

表 8 斜坡堤主要材料碳排放量(E_m)

Tab. 8 Carbon emissions of main materials for sloping embankment (E_m)

项目	材料	每延米工程量	每延米碳排放量/kg
垫层块石	块石	84 m ³	302
护底块石	块石	36 m ³	129
压脚块石	块石	13 m ³	47
砂垫层	砂	160 m ³	662
堤心石	块石	622 m ³	2 236
现浇胸墙	C30	10 m ³	2 950
二片石	块石	24 m ³	86
倒滤层	砂	29 m ³	121
水泥	普通硅酸盐水泥	85 t	62 501
合计			69 034

3 结论

1) 研究结果显示, 在钢圆筒施工阶段, 碳排放量的主要来源是材料消耗所引发的碳排放。其中, 钢材的碳排放占比尤为突出, 成为最主要的碳排放源。与施工直接排放相比, 材料使用所产生的施工间接排放明显更高。因此, 在同等条件下, 优先选用碳排放因子较低的材料, 可从源头上有效降低工程碳排放量, 这一策略对于减少碳排放具有关键性作用。

2) 钢圆筒各施工阶段机械、设备碳排量差异显著。其中, 运输船和起重船碳排放量较大, 在船机设备碳排放量占比中位于前二。针对这一现象, 建议采用绿色能源, 如接岸电、LNG(液化天然气, liquefied natural gas) 运输船舶等。实践证明, 这些绿色能源的应用有望在未来显著降低项目现场的直接碳排放量, 为实现低碳施工提供切实可行的路径。

3) 具体到每延米碳排放量, 钢圆筒护岸结构主要材料碳排放量为 77 t/m, 高于斜坡堤的 69 t/m, 低于桶式基础的 103.5 t/m。对于斜坡堤结构如果地基处理采用散体桩, 如砂桩或碎石桩, 其材料使用碳排放量将大大减小。桶式基础由于采用预制结构, 可大幅降低项目现场的直接碳排放量。

参考文献:

- [1] 李兵, 李云霞, 吴斌, 等. 建筑施工碳排放测算模型研究[J]. 土木建筑工程信息技术, 2011, 3(2): 5-10.
LI B, LI Y X, WU B, et al. Research on low-carbon calculation model in building construction stage [J]. Journal of information technology in civil engineering and architecture, 2011, 3(2): 5-10.
- [2] 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.
Standard for building carbon emission calculation: GB/T 51366-2019 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019.
- [3] 魏同正, 王志毅, 杨银琛, 等. 基于全生命周期评价某木结构建筑碳排放及减碳效果[J]. 水利规划与设计, 2024(4): 128-132.
WEI T Z, WANG Z Y, YANG Y C, et al. Carbon emission and reduction effect of a timber structure building based on life cycle assessment [J]. Water resources planning and design, 2024(4): 128-132.
- [4] 梁才广, 齐岳. 水运工程项目施工阶段碳排放测算[J]. 技术与市场, 2016, 23(7): 65-67.
LIANG C G, QI Y. Calculation of carbon emission in construction stage of waterway engineering project [J]. Technology and market, 2016, 23(7): 65-67.
- [5] 马瑜晨. 装配式住宅建筑物化阶段碳排放测算及减碳潜力评估[D]. 西安: 西安理工大学, 2024.
MA Y C. Research on carbon emission calculation and carbon reduction strategies during the construction stage of prefabricated residential buildings [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2024.
- [6] 高嵩焱, 杨柳, 衷平, 等. 基于定额法的公路工程碳排放计算方法研究[J]. 公路, 2024, 69(11): 352-357.
GAO S Y, YANG L, ZHONG P, et al. Carbon emission calculation method study of highway project based on a quota analysis [J]. Highway, 2024, 69(11): 352-357.
- [7] 张涛, 姜裕华, 黄有亮, 等. 建筑中常用的能源与材料的碳排放因子[J]. 中国建设信息, 2010(23): 58-59.
ZHANG T, JIANG Y H, HUANG Y L, et al. Carbon emission factors of energy and materials commonly used in construction [J]. Information of China construction, 2010(23): 58-59.
- [8] 李靖, 李森, 滕燕华. 混凝土桶式基础结构沉贯控制技术研究与应[J]. 中国港湾建设, 2025, 45(3): 97-102.
LI J, LI S, TENG Y H. Research and application of penetration control technology for concrete bucket foundation structure [J]. China harbour engineering, 2025, 45(3): 97-102.
- [9] 逯新星. 耙吸挖泥船艏吹钢圆筒及装驳工艺应用[J]. 水运工程, 2024(11): 221-226.
LU X X. Application of blow filling technology at steel cylinder and barge loading of TSHD [J]. Port & waterway engineering, 2024(11): 221-226.
- [10] 谢锦波. 格型板桩圆筒内部土体破坏面的稳定性分析[J]. 水运工程, 2022(6): 190-194.
XIE J B. Stability analysis of rupture surface of soil inside sheet pile cellular [J]. Port & waterway engineering, 2022(6): 190-194.
- [11] 姚伟雯, 陈丽琴. 复杂条件下防波堤结构设计方案比选[J]. 水运工程, 2024(8): 192-197.
YAO Y W, CHEN L Q. Comparison and selection of breakwater structure design schemes in complex conditions [J]. Port & waterway engineering, 2024(8): 192-197.
- [12] 陆晶晶, 徐传超. 桶式基础防波堤结构设计与施工 BIM 应用[J]. 水运工程, 2022(7): 223-229.
LU J J, XU C C. Application of BIM technology in structure design and construction of bucket foundation breakwater [J]. Port & waterway engineering, 2022(7): 223-229.
- [13] 水运工程建设期碳排放测算标准: Q/CCCG SY 105—2022[S]. 北京: 中国交通建设集团有限公司, 2022.
Standard of carbon emission calculation for water transportation engineering construction: Q/CCCG SY 105-2022 [S]. Beijing: China Communications Construction Group Co., Ltd., 2022.
- [14] 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴 2023[M]. 北京: 中国统计出版社, 2024.
Department of Energy Statistics, National Bureau of Statistics. China energy statistical yearbook 2023 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2024.

(本文编辑 赵娟)