・施工・

# 海中筑岛柔性组合围堰结构受力与

# 变形特性\*

张 磊<sup>1,2</sup>,林红星<sup>1,2</sup>,刘建波<sup>1,3</sup>,孙婉静<sup>4</sup>

(1. 中交第二航务工程局有限公司,湖北 武汉 430040; 2. 长大桥梁建设施工技术交通行业重点实验室,湖北 武汉 430040;
3. 交通运输行业交通基础设施智能制造技术研发中心,湖北 武汉 430040;
4. 中交公路长大桥建设国家工程研究中心有限公司,北京 100120)

摘要:为了解决海上地连墙建设中,海上施工平台结构施工周期长、造价高等难题,利用锁扣钢管桩与工字形板桩组 合围堰进行海中筑岛,围堰外侧设置平行钢丝索进行柔性约束,形成海中"锁扣钢管桩+工字形板桩+平行钢丝索"的柔性组 合围堰结构。以传统刚性围箍和无围箍组合围堰结构作为对照,根据现场监测数据,对柔性组合围堰结构受力与变形特性 进行分析。结果表明:与常规刚性围箍结构相比,在同样吹填土压力荷载作用下,柔性围箍结构中桩身最大弯矩减小约 50%;无围箍结构中桩顶最大水平位移过大;在不均匀堆载作用下,刚性围箍自身应力会发生突变,而柔性围箍始终受拉, 应力均匀分布。监测结果表明、柔性组合围堰结构实测应力、变形与计算一致性良好。

关键词:柔性组合围堰;数值分析;海中筑岛;平行钢丝索;现场监测
中图分类号: U445; U65
文献标志码: A
文章编号: 1002-4972(2024)11-0202-07

# Stress and deformation characteristics of flexible composite cofferdam structure for building islands in sea

ZHANG Lei<sup>1,2</sup>, LIN Hongxing<sup>1,2</sup>, LIU Jianbo<sup>1,3</sup>, SUN Wanjing<sup>4</sup>

(1. CCCC Sec<mark>on</mark>d Harbor Engineering Co., Ltd., Wuhan 430040, China;

2. Key Laboratory of Large-span Bridge Construction Technology, Wuhan 430040, China;

3. Research and Development Center of Transport Industry of Intelligent Manufacturing Technologies of

Transport Infrastructure, Wuhan 430040, China;

4. CCCC Highway Bridge National Engineering Research Centre Co., Ltd., Beijing 100120, China)

**Abstract:** The construction of offshore platform structure has long period and high cost in the construction of diaphragm wall in sea. To solve the problem, the combined cofferdam of locking steel pipe pile and I-shaped sheet pile is used to built islands in the sea, and the parallel steel wire cable is set outside the cofferdam for flexible restraint, forming a flexible composite cofferdam structure of "lock steel pipe pile+I-shaped sheet pile+parallel steel wire cable" in the sea. Compared with traditional rigid hoop and the non-hoop composite cofferdam structure, based on field monitoring data, stress and deformation characteristics of the proposed flexible hoop composite cofferdam structure are analyzed. The results show that compared with the conventional rigid hoop structure, the maximum bending moment of the pile in the flexible hoop structure is reduced by about 50% under the same dredger fill pressure load. The maximum horizontal displacement of the pile top is too large without the hoop structure. Under the action of uneven loading, the stress of the rigid hoop will change abruptly, while the flexible hoop is always

作者简介:张磊(1989--),男,硕士,高级工程师,从事水动力学与深水基础施工技术研究。

收稿日期: 2024-02-06

<sup>\*</sup>基金项目:山东省重点研发计划项目(2021ZLGX04)

tensioned and the stress is evenly distributed. The monitoring results show that the measured stress and deformation of the flexible composite cofferdam structure are in good agreement with the calculation.

Keywords: flexible composite cofferdam; numerical analysis; building islands in sea; parallel steel wire cable; field monitoring

锚碇基础施工中,通常设置地下连续墙作为 锚碇基坑排水开挖的支护结构,部分工程还将其 作为永久受力结构<sup>[1]</sup>,因此对锚碇地连墙的施工 精度和质量要求非常严格。国内外大多数悬索桥 锚碇基础位于陆地,对于外海桥梁,锚碇基础地 连墙支护结构施工首先需要搭设施工平台或临时 围堰结构<sup>[2]</sup>,将水上施工环境转化为陆上施工 环境。

国内外类似工程海中地连墙施工的平台方案 主要包括4种:钢平台+钢导墙<sup>[3]</sup>、钢圆筒/格形 钢板桩围堰筑岛<sup>[4]</sup>、锁扣钢管(板)桩围堰筑岛<sup>[5]</sup>、 模袋砂(抛石)围堰筑岛<sup>[6]</sup>等。其中,钢平台+钢导 墙方案采用钢结构透空式平台,无需筑岛,日本 东京湾横断道路工程川崎人工岛<sup>[7]</sup>采用该方案完 成地连墙基础施工:钢圆筒/格形钢板桩围堰、模 袋砂(抛石)围堰均为重力式围堰结构,依靠结构 自身保持结构滑移和倾覆稳定,东京湾横断通道 木更津人工岛<sup>[8]</sup>、港珠澳大桥东/西人工岛<sup>[9]</sup>和深 中通道人工岛<sup>[10]</sup>等均采用该方案进行筑岛;锁扣 钢管(板)桩围堰则是依靠钢管(板)桩入土部分的 侧向土抗力和围堰上部的围箍结构来维持结构整 体稳定, 锁扣钢管(板) 桩围堰在桥梁、港口工程 中均应用广泛:模袋砂(抛石)围堰为重力式围堰 结构,依靠自身重力保持稳定,土耳其伊兹米特 海湾大桥南锚碇基础[11]、伶仃洋大桥西锚碇基础 施工中均采用该方案。

钢平台+钢导墙方案抗台能力弱,格形钢板 桩/钢圆筒围堰筑岛方案造价高、抗台能力弱, 锁扣钢管(板)桩围堰筑岛方案中锁扣和围箍施 工精度要求高、施工周期长,模袋砂(抛石)围 堰筑岛方案岛体变形大、达到稳定周期长。本文 以深中通道伶仃洋大桥东锚碇海中筑岛为背景, 以上4种结构类型难以满足工程需求,因此提出 一种海中筑岛柔性组合围堰新型结构,结合数值 分析和现场监测结果,对其受力与变形性能进行 对比分析,以期为类似海中筑岛工程设计与施工 提供参考。

### 1 工程概况

深中通道是我国继港珠澳大桥之后又一"桥-岛-隧"集群工程,其中伶仃洋大桥是主跨1666 m 的三跨全漂浮体系悬索桥,其东锚碇采用海中地 连墙支护锚碇基础结构,"8"形地连墙直径65 m、 厚1.5 m,嵌入中风化花岗岩层5 m,内衬厚度 1.5/2.5/3.0 m。锚碇基础顶高程3.0 m,底高程 -39.0 m。地连墙底高程-63.0~-44.6 m,见 图1。



图1 锚碇基础结构

桥址位于华南沿海,台风频发,最大风力达 12级。锚碇位于距岸约20km的海中,水深超过 5m,实测最大波高2.86m,最大流速1.7m/s。 锚碇区存在厚度约20m的淤泥及淤泥质土软弱土 层,且呈流塑状,稳定性差。覆盖层厚度约34m, 基岩起伏、强度达80MPa。

### 2 结构设计

#### 2.1 新型结构概况

基于地连墙施工平台方案比选结果,采用锁扣 钢管(板)桩围堰筑岛方案,将地连墙施工由水上转 换为陆上施工。结合工程特点,围堰直径取150 m, 桩顶高程 6.5 m,岛内吹填中粗砂至 3.0 m。

考虑到地连墙施工无止水要求,提出一种锁 扣钢管桩与工字形板桩组合围堰筑岛结构,钢管 桩与工字形板桩通过 C 形锁扣连接,钢管桩为主 要承力结构,锁扣不止水,板桩只挡土,提高施 工容差率。借鉴水桶环箍原理,设置围箍结构, 增强围堰结构的整体性。"锁扣钢管桩+工字形板 桩+平行钢丝索"柔性组合围堰结构见图 2。



2.2 钢管桩与板桩结构设计

开展组合结构受力计算分析,在保证结构安 全的前提下,确定钢管桩和钢板桩结构关键设计 参数。围堰钢管桩采用 φ2 000 mm×18 mm(直径× 壁厚)无缝钢管,共计 158 根,桩长 38 m,桩顶高 程 6.5 m、桩底高程-31.5 m,钢管桩中心间距 2.95 m。工字形板桩规格为 H770 mm×80 mm(高× 宽),腹板和翼缘板厚度 14 mm。钢管桩和工字形 板桩通过锁扣连接,锁扣采用 C 形钢管,与钢管 桩焊接,C 形钢管规格为 φ180 mm×14 mm(直径× 壁厚),见图 3、4。



# 2.3 围箍结构设计

围箍结构分层设置数量、高度需综合考虑锁 扣钢管桩连接位置结构应力、平行钢丝拉力、张 拉及锚固系统拉杆受力等<sup>[12]</sup>。经结构计算分析, 最终确定采用7根  $\phi$ 91 mm 平行钢丝索,平行钢丝 索围箍顶高程 5.0 m、底高程 3.5 m、竖向间距 250 mm,平行钢丝设计抗拉强度 1 760 MPa。考虑 到平行钢丝处于海洋环境,采用聚乙烯防护套+镀 锌防腐体系,以保证围箍结构长期使用安全,见 图 5。



# 图 5 平行钢丝索设计

## 3 数值计算

3.1 计算工况

常规钢管桩/钢板桩围堰围箍主要为H形钢或

钢箱梁等刚性围箍,为了研究柔性组合围堰结构 受力与变形特性,建立无围箍、刚性围箍、柔性 围箍3种工况下组合围堰结构的三维数值模型, 对比研究围箍形式对钢管桩结构的影响。

柔性围箍顶部采用 7 根  $\phi$ 91 mm 平行钢丝索作 为围箍结构,单根初张力 200 kN。刚性围箍采用 单层钢箱梁 1.5 m×0.8 m 作为围箍结构,见图 6。



3.2 计算模型

基于有限元软件 Plaxis 3D,建立钢管桩、围箍 结构和土体的有限元模型模拟围堰内砂回填过程中 的不利工况,围堰结构与土的数值计算模型见图 7。





b) 土

图 7 围堰结构与土的数值计算模型

根据钢管桩、钢箱梁与平行钢丝索的受力特 点,采用梁单元模拟钢管桩及钢箱围箍,采用抗 弯刚度极小的梁模拟平行钢丝围箍。地基模型采 用摩尔-库仑本构方程的地层结构法,地质参数见 表1。钢管桩与钢箱之间采用共节点的连接方式, 钢管桩与土之间设置界面单元,界面强度取相邻 土体强度的 50%。

表1 地质参数

| 土层                  | 岩土   | 层厚/   | 密度/                 | 黏聚力/ | 内摩擦角/ | 压缩模量/ |  |  |
|---------------------|------|-------|---------------------|------|-------|-------|--|--|
| 代号                  | 名称   | m     | $(g \cdot cm^{-3})$ | kPa  | (°)   | MPa   |  |  |
| -                   | 吹填砂  | 8.04  | 2.00                | 0.0  | 30.0  | 10.00 |  |  |
| $\textcircled{2}_1$ | 淤泥   | 1.10  | 1.65                | 5.8  | 7.3   | 1.97  |  |  |
| $\textcircled{2}_2$ | 淤泥   | 7.20  | 1.64                | 7.4  | 9.0   | 2.14  |  |  |
| $(2)_{22}$          | 粉质黏土 | 13.30 | 2.00                | 16.5 | 13.4  | 2.93  |  |  |
| $(3)_6$             | 中砂   | 8.80  | 1. 99               | 6.8  | 25.7  | 14.90 |  |  |
|                     |      |       |                     |      |       |       |  |  |

# 3.3 计算结果

在筑岛吹砂填筑完成时,钢管桩桩身弯矩分 布见图 8,桩顶水平位移分布见图 9,围堰结构轴 力分布见图 10,计算结果见表 2。

根据图 8~10 和表 2, 无围箍结构桩顶最大水 平位移过大,柔性围箍和刚性围箍应力和变形均 满足要求。相比无围箍工况,刚性围箍结构刚度 大,钢管桩桩顶变形小,但刚性围箍结构不能充 分发挥土体侧向支撑作用,桩身弯矩较大。对比 刚性围箍约束作用下,桩身最大弯矩 4 178 kN·m、 最大应力 76 MPa,柔性围箍约束作用下,桩身最大 弯矩仅 2 178 kN·m、最大应力 40 MPa,减小约 50%。 这是因为柔性围箍允许钢管桩发生一定的变形,能充 分发挥土体侧向支撑作用,从而减小桩身最大弯矩。





根据模型计算得到的钢丝索轴力为 13.340 MN, 面积为 342.2 cm<sup>2</sup>,最大变形 220 mm,轴力产生 的应力增量为 390 MPa。

岛体填筑过程中,不均衡吹填堆载可能对围 堰结构受力产生较大影响,考虑围堰内1/4 区域存 在3m不均匀堆载荷载,对比分析不均衡堆载作 用下刚性围箍和柔性围箍受力,见图11,计算结 果见表3。

| 表 3  | 不均衡堆载作用下围堰结构计算结果 |
|------|------------------|
| 1K ) | 小时限堆软作用下回吃知何时异知术 |

| 围箍形式 | 桩身最大弯矩/<br>(kN·m) | 桩顶最大<br>水平位移/mm | 围箍最大<br>应力/MPa |
|------|-------------------|-----------------|----------------|
| 柔性围箍 | 1 843             | 80              | 481            |
| 刚性围箍 | 3 618             | 40              | 216            |

# 图 11 不平衡堆载作用下围箍结构受力

c) 柔性围箍

由图 11 和表 3 可知, 筑岛过程中, 在不均匀堆载作用下, 刚性围箍自身应力会发生突变, 而柔性围箍始终受拉, 应力均匀分布, 更能适应不平衡填筑。

#### 4 现场监测

### 4.1 锁扣钢管桩结构应力与变形

围堰锁扣钢管桩作为筑岛结构主要承力结构, 兼顾挡土、挡水,筑岛结构施工阶段,应确保结 构应力与变形在设计允许范围内。对围堰筑岛阶

18日吹砂填筑施工完成时,对比桩身最大应力实测值与计算值,见图 14。







图 14 吹填完成时钢管桩应力计算值与实测值对比

由图 12、13 可知, 在施工过程(吹砂填筑施工、外围防护施工、场地内整平及硬化、三轴搅拌

桩加固、地连墙施工等)中,钢管桩应力与桩顶位移 均呈缓慢增大状态。由图 14 可以看出, 吹砂填筑施 工完成时,桩身最大应力 41 MPa(计算值 40 MPa); 对比图 9、13 可以看出, 吹砂填筑施工完成时, 桩顶最大水平位移 100 mm(计算值 90 mm), 计算 值与实测值一致性良好。

后续地连墙施工过程中,最大桩身应力 63 MPa, 桩顶最大位移 130 mm,钢管桩始终处于安全可控 状态。

4.2 平行钢丝索围箍结构应力

有别于传统的刚性围箍结构,平行钢丝索围 箍结构作为一种柔性约束,主要用于平衡围堰筑 岛吹填土体荷载。筑岛围堰施工阶段,土体吹填 次数、单次吹填厚度、固结时间等吹填筑岛关键 施工参数的选取,将直接决定平行钢丝索围箍结 构应力是否在设计允许范围内。基于信息化监控 平台,对围堰筑岛阶段平行钢丝索围箍结构拉力 进行动态安全评估,实测围箍结构拉力分布见 图 15。

由图 15 可知,实际施工过程中,平行钢丝索 围箍整体处于受拉状态,受前期锚碇岛体内吹砂 填筑施工,岛体内部土压力荷载增加,引起部分 位置受拉较为明显。实际施工过程中,单根平行

这是由于在筑岛施工过程中, 围堰外侧存在回填

钢丝索围箍所受最大拉力为 800 kN,产生的最大 应力增量约为 164 MPa, 小于计算值的 390 MPa,

> > 400

350 300

2019-03-

2019-03-22 2019-04-01 2019-04-21 2019-05-01

2019-04-

防护.柔性围箍拉力并未完全发挥。



2019-05-21 2019-05-3

2019-06-2019-06-3 2019-06-2019-07-2019-07-

2019-05-1

#### 5 结论

1) 在同样吹填土压力荷载作用下,对比传统 的刚性围箍组合围堰结构,柔性组合围堰桩身应 力更小, 桩身变形也在可控范围内。

2) 在不平衡吹填土压力作用下,柔性组合围 堰结构中平行钢丝索始终受拉,较刚性围箍更能 适应不平衡填筑。

3) 背景工程的围堰施工过程中,钢管桩应力 与桩顶位移均呈缓慢增大状态,实测最大桩顶位 移 130 mm、实测最大桩身应力 63 MPa、平行钢丝 最大拉力 800 kN,结构始终处于安全可控状态。

4) 柔性组合围堰作为一种筑岛围堰新型结构形 式,具有一定的优越性,有望推广应用于其他类似海 上施工中。在后续研究中,可进一步研究柔性组合围 堰在不同水文地质条件下的承载特性,并对其耐久性 进行测试分析、研究应用于永久结构的可行性。

#### 参考文献:

- [1] 张太科, 尹敬泽, 张鑫敏. 悬索桥地下连续墙锚碇基础 技术新进展[J]. 公路, 2020, 65(8): 162-167.
- [2] 陈若强. 悬索桥锚碇基础地下连续墙施工工艺及质量 控制措施[J].水运工程, 2011(4): 159-165.
- [3] 谢江松,王政平,湛杰,海上悬索桥锚碇地下连续墙钢导 墙三维数值分析[J]. 人民长江, 2019, 50(10): 143-149.

黄明华,汤小明,刘世松,填海造岛超大直径薄壁钢圆 [4] 简制作技术[J],钢结构,2018,33(6):80-84.

第1层 第5层

第7层

2019-07-30 2019-08-09 6

2019-08-

- 赵秀绍,庄锦彬,褚东升,等.某大桥水下筑岛深基坑钢 [5] 板桩支护不对称体系研究[J].施工技术,2017,46(2): 84-87, 119.
- [6] 祝阿龙,侯禹辰,罗风权,等.邻近既有桥梁的海域大面 积筑岛填砂施工技术[J].水运工程, 2023 (12): 165-170, 197.
- [7] KOGO M, SHIMADA M, SUZUKI K, et al. Rapid Construction of Mass Concrete for the Inside structures at Kawasaki Man-Made Island on Trans-Tokyo Bay Highway [J]. Concrete journal, 1995, 33(12): 51-62.
- [8] 日经建筑.东京湾横断道路[M].东京:花上光治, 1997: 70-74.
- [9] 林鸣,林巍,王汝凯,等.人工岛快速成岛技术:深插大 直径钢圆筒与副格[J].水道港口, 2018, 39(S2): 32-42.
- [10] 刘健,夏丰勇,唐一夫.深中通道西人工岛总体设计及大 直径钢圆筒快速成岛技术[J].水运工程,2021(6):13-19.
- [11] FOGED B, STEENFELT J, AUGUSTESEN A H. Geotechnical Design of the Izmit Bay Suspension Bridge[C]//2015 IABSE Nara Spring Conference on Elegant Structures, Nara: [s: n], 2015: 1-8.
- [12] 权鑫鑫. 平行钢丝束的弯曲性能研究[D]. 天津: 天津 大学, 2019.

(本文编辑 赵娟)