



带支腿平板驳作为“喂桩船”的泊稳分析

陈章楷¹, 韦林广², 兰金平², 罗泽², 赵凯³

- 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广东 广州 510230;
- 中交四航局第三工程有限公司, 广东 湛江 524022;
- 中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510290)

摘要: 国内港口和航道工程中, 水上打桩作业通常采用多点锚泊打桩船和平板驳, 打桩前应规划好两船各缆绳的下锚位置, 避免缆绳与周围结构的碰撞、缆绳与缆绳之间的刮蹭, 并确保各缆绳有足够的长度以保证足够的锚力。西非某离岸式油码头锚泊条件较差, 采用带液压支腿的平板驳(下称支腿驳)替代常规平板驳, 成为“喂桩船”的一种新形式。基于支腿驳的应用, 介绍了支腿驳稳定性的分析方法, 采用有限元与静态系泊分析相结合, 解决支腿驳结构的验算问题。支腿驳采用支腿进行锚定, 操作便捷, 尤其适用于水深较浅, 表层土较弱的情况, 可供相关行业在近海施工船舶选择时参考。

关键词: 带支腿平板驳; 打桩; 泊稳分析; 支腿稳定性; OPTIMOOR

中图分类号: U 655.

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)10-0200-04

Mooring analysis to stud barge served as “piles carrier”

CHEN Zhangkai¹, WEI Linguang², LAN Jinping², LUO Ze², ZHAO Kai³

- China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China;
- The Third Engineering Company of CCCC Fourth Harbor Engineering Co., Ltd., Zhanjiang 524022, China;
- CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510290, China)

Abstract: Multi-point anchoring piling vessel and flatbed barge are usually adopted for piling work on water in domestic port and waterway projects. Before driving piles, the anchoring positions of each cable of the two vessels should be planned to avoid collisions between cables and surrounding structures, as well as scratches between cables. It is also necessary to ensure that each cable has sufficient length to ensure sufficient anchoring force. The anchoring conditions of an offshore oil terminal in West Africa are poor. A flatbed barge with hydraulic support studs (hereinafter referred to as the stud barge) is used instead of a conventional flatbed barge, becoming a new form of “piles carrier”. This article introduces the analysis method for the stability of the stud barge based on its application in this project, using a coupling method of finite element analysis and static mooring analysis to verify of the stud barge structure. The stud barge is anchored with studs, which is convenient to operate, especially suitable for shallow water and weak topsoil. This paper can be used as a reference for relevant industries when selecting offshore construction ships.

Keywords: flatbed barge with hydraulic support studs; piling; mooring analysis; studs stability; OPTIMOOR

水运项目水上打桩船舶常采用打桩船+平板驳的组合, 平板驳上堆放待打预制桩, 由打桩船进行取桩、吊桩、立桩、打桩等操作。在水上打桩方面, 多位学者开展了研究。康思伟^[1]介绍了打

桩船的技术现状并论述了其发展趋势; 徐鑫哲^[2]提出水上沉桩的质量保证措施; 孙琦等^[3]研究深水长周期波浪下打桩船的动力响应。打桩船和平板驳常常是通过多点锚泊的方式进行定位和固定,

收稿日期: 2024-01-10

作者简介: 陈章楷 (1991—), 男, 硕士, 工程师, 从事港口海工结构设计工作。

打桩前应规划好两船各缆绳的下锚位置、两船各锚的下锚顺序和施工过程中的移船流程等, 避免移船过程中缆绳与周围结构的碰撞、缆绳与缆绳之间的刮蹭, 并确保各缆绳有足够的长度以保证足够的锚力。王艳妮^[4]、陈晨^[5]对锚泊体系有较为详尽的研究。

西非某离岸式油码头, 由于周围废弃结构、临时结构、永久结构的存在(图 1), 且表层地质较差, 锚泊条件较差。运桩船为自航船只, 其锚泊方式为艏艉抛锚, 难以满足横流、横浪船位下的锚泊要求。当地无法租赁到带锚泊设备的平板驳, 最终选定带液压支腿的平板驳(下称支腿驳)作为“喂桩船”。支腿驳在国内水运行业运用较少, 鲜有相关资料提及。本文介绍了支腿驳的应用与结构, 旨在为相关近海施工船舶选择时参考。

1 工程概况

1.1 基本情况

本项目永久结构共 194 根桩, 除引桥根部 1~14 轴桩基由履带吊在临时钢栈桥上施工外, 其余 164 根桩均由支腿驳作为“喂桩船”, 其中先行施工的安保平台由定位驳进行打桩, 其余桩基由四航桩 7 进行打桩。引桥 15 轴处泥面高程 -5 m, 码头前沿泥面高程 -15 m。桩基为桩径 1 067~1 422 mm 的钢管桩组成, 平均桩长 55 m。

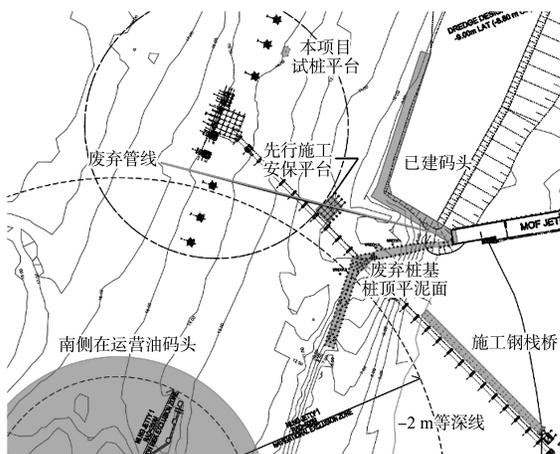


图 1 桩基布置与施工障碍分布

1.2 地质条件

项目所在地表层为软土, 不排水抗剪强度估算为 $S_u = 4 + 0.47\sigma_v$, σ_v 为上覆土重, 软土有效密度为 0.6 t/m^3 , 厚度为 18~24 m。

1.3 水文条件

施工水位考虑 1 a 一遇水位 2.47 m, 由于施打各桩基时, 支腿驳可能存在各种摆向, 在分析计算时, 假定风浪流同向, 与支腿驳的夹角为 $0^\circ \sim 360^\circ$ 。考虑船体的对称性, 只需计算 $0^\circ \sim 90^\circ$ 的风浪流荷载。

1.4 施工船舶

支腿驳主要参数为船长 40 m、宽 12 m、吃水 1.5 m, 2 根支腿为直径 1.067 m、壁厚 16 mm 的钢管, 支腿长度 23.5 m, 支腿驳的平面布置见图 2。支腿驳无自航能力, 由拖轮牵引和辅助定位。支腿驳作为“喂桩船”, 定位精度不作要求。支腿驳完成定位后, 由液压装置将支腿下放并压入泥面, 压入深度由计算确定, 确保支腿驳在风浪流荷载与打桩船系缆力作用下的支腿强度和稳定性, 且支腿长度可满足操作要求。

四航桩 7 取桩时典型布缆形式见图 3, 其右前缆桩与支腿驳缆桩之间由 1 根尼龙绳联系。



图 2 支腿驳平面布置

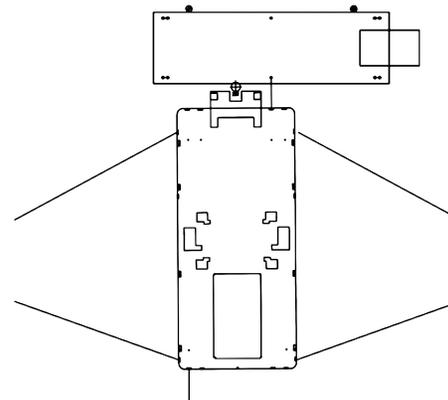


图 3 四航桩 7 在支腿驳取桩时的系缆布置

2 支腿驳泊稳分析

2.1 有限元模型

支腿驳采用 SAP2000 通用有限元软件进行分析。支腿驳船体刚度大，可简化为无限刚度的厚板。船体由浮力支撑，4 个角点约束竖向位移。支腿采用框架单元，应用 p - y 曲线法^[6-7] 模拟短桩桩土作用关系。支腿对船体不产生竖向支撑，释放连接节点的竖向自由度。模型按支腿压入泥面 4 m 进行计算和验算。加载模型见图 4，风浪流荷载作用于船体中心位置，系缆荷载作用于缆桩位置。

2.2 荷载作用

2.2.1 风浪流荷载

风浪流荷载可根据 JTS 144-1—2010《港口工程

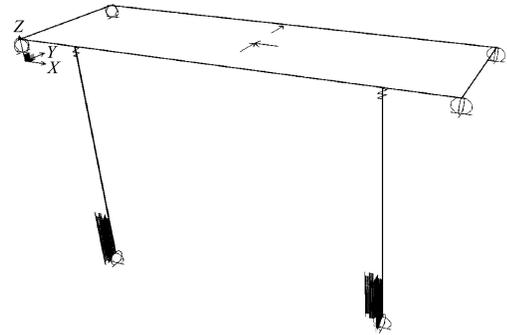


图 4 支腿驳有限元模型

荷载规范》^[8]、Maritime structures. Part I: code of practice for general criteria: BS 6349-1:2000^[9] 进行计算，也可采用 OPTIMOOR^[10] 软件进行静力分析。本次分析采用 OPTIMOOR 进行求解，各方向风浪流荷载见表 1。

表 1 各方向风浪流荷载

荷载与 x 向夹角/ $^{\circ}$	流速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	波高/m	风速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	流荷载/t	波浪荷载/t	风荷载/t	x 向合力/t	y 向合力/t
0				0.3	0.4	0.7	-0.9	1.0
30	0.823	0.78	23.1	0.5	0.8	0.7	-0.8	1.9
60				1.1	0.7	0.8	-0.2	2.6
90				1.2	0.6	0.8	0.2	2.6

注： x 向为船舶纵向， y 向为船舶横向。

2.2.2 系缆荷载

系缆荷载可对打桩船进行系缆分析，得出尼龙绳的缆力。注意支腿驳支腿较长、土层较软、入土深度较浅，打桩船该系缆点不能视为刚性锚点，需求得支腿驳-支腿体系对尼龙绳的等效刚度，并对打桩船系缆分析时尼龙绳进行刚度换算。

对有限元模型中支腿驳缆桩位置处分别施加 50~250 kN 的水平拉力，求得对应拉力下支腿驳甲板处的水平位移，见图 5，得出在支腿失效之前，支腿驳-支腿体系的弹性刚度为 400 kN/m。当力达到 240 kN 时，支腿驳位移剧烈增大，即结构失稳，此时拉力超过承载力。

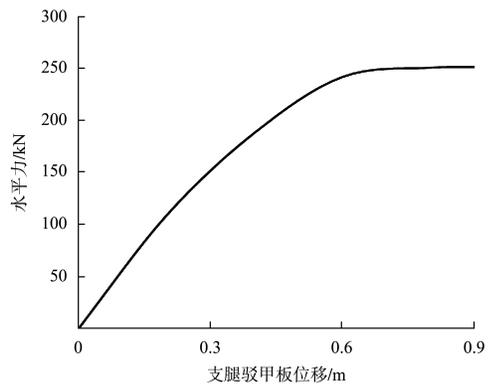


图 5 支腿驳在不同拉力下的位移响应

尼龙绳长度为 15 m，长度较短，忽略尼龙绳本身弹性应变，则尼龙绳-支腿驳-支腿体系弹性刚度为 400 kN/m。OPTIMOOR 中无法修改缆绳刚度，

只能通过缆绳等效直径达到刚度设置的目的。计算式为:

$$\frac{F}{\Delta l} = \frac{EA_{\text{eff}}}{l} \quad (1)$$

式中: F 为作用于支腿驳的水平拉力, kN; Δl 为支腿驳-支腿体系在水平拉力作用下支腿驳甲板处的水平位移, m; l 为尼龙绳长度, m, 取 15 m; E 为缆绳弹性模量, kN/m²; A_{eff} 为缆绳等效断面积, m², 令 $\frac{F}{\Delta l} = 400$ kN/m, 得 $EA_{\text{eff}} = 6\,000$ kN, OPTIMOOR 中尼龙绳弹性模量 $E = 3\,300\,000$ kN/m², 得 $A_{\text{eff}} = \frac{6\,000}{3\,300\,000} = 0.0018$ m², 易得缆绳等效直径为 48 mm, 因此在打桩船系缆分析时前中缆材质选择尼龙绳, 直径设为 48 mm, 即可模拟支腿驳刚度, 进而求解风浪流作用下该尼龙绳的拉力值。

2.3 安全系数

钢强度验算采用 LRFD 法, 分项系数按英标 6349-2:2000 选取, 即风浪流荷载分项系数为 1.4。短桩水平抗力安全系数无规范规定, 保守取 1.5。

2.4 支腿验算结果

风浪流荷载与系缆荷载作用下支腿驳支腿内力见表 2。

表 2 支腿内力计算结果

支腿	最大剪力/kN	最大弯矩/(kN·m)
1	55	988
	60	1 073
	63	1 125
	63	1 135
2	57	1 023
	61	1 099
	63	1 136
	63	1 120

支腿为受弯构件, 根据欧标 EN 1993-1-1 进行验算, 支腿抗弯强度承载力 $M_{c,Rd}$ 为:

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{el,min} \cdot f_y}{\gamma_{M,0}} \quad (2)$$

式中: $W_{el,min}$ 为支腿抗弯截面系数, 为 0.013 7 m³; f_y 为屈服强度, 取 355 MPa; $\gamma_{M,0}$ 为安全系数, 根据欧标 EN 1993-5 取 1.0。则支腿抗弯强度承载力 $M_{c,Rd} = 4\,855$ kN, 大于最大设计弯矩 1 591 kN, 支

腿抗弯强度满足要求。

根据 2.2.2 节, 支腿驳两支腿的最大水平抗力为 240 kN, 根据表 2, 支腿最大剪力为 126 kN, $\frac{240}{126} = 1.9 > 1.5$, 支腿稳定性满足要求。

本项目泥面最深 15 m, 最高水位 2.47 m, 要求支腿压入泥面 4 m, 支腿驳干舷 1 m, 考虑 1 m 的长度富余, 则要求支腿长度 23.47 m, 支腿长度 23.5 m, 满足要求。

3 结语

1) 以西非某离岸式油码头桩基施工为例, 讨论支腿驳泊稳分析过程中的荷载、支腿强度、支腿稳定性等计算方法。经验算, 支腿入泥 4 m 可满足支腿强度要求和支腿稳定性要求, 且设计支腿长度可满足该压入深度。

2) 施工前应在项目所在地进行支腿驳下压支腿试验, 确保支腿可在液压装置的作用下压入泥面至少 4 m。若无法压入 4 m, 应反馈可压入深度, 并重新分析支腿驳的可作业条件, 对允许风浪流条件进一步进行限制。

3) 支腿驳以支腿代替锚泊体系, 定位灵活方便、操作便捷, 在对定位精度要求不大时可作为锚泊平板驳的替代物, 提高施工效率。

4) 支腿由液压装置压入泥面, 地质不同可压入深度不同, 如地质较硬, 压入深度较小, 则支腿嵌固作用较差, 水平抗力难以满足支腿稳定; 如水深较大, 荷载对桩底的力臂较大, 支腿的水平抗力同样难以满足支腿稳定。因此支腿驳适用于水深较浅、表层地质较弱的情况。

参考文献:

- [1] 康思伟. 海洋工程基础打桩船的技术现状与发展动态[J]. 船舶工程, 2021, 43(2): 1-7, 47.
- [2] 徐鑫哲. 高桩码头水上沉桩技术应用[J]. 居业, 2020(3): 106-107.
- [3] 孙琦, 陈迪郁, 骆钊. 深水中长周期波浪下打桩船动力响应研究及系泊系统优化[J]. 中国港湾建设, 2023, 43(5): 25-29, 56.