



双侧靠泊油码头靠船墩结构的设计优化

陈旭达, 薛丁源, 卢生军

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510290)

摘要: 针对双侧靠泊平面布置形式的离岸式油码头的靠船墩设计, 通过有限元计算软件建立分析模型, 对3个不同设计方案的靠船墩结构受力进行分析, 得到每个方案的桩顶轴力、弯矩和墩台位移等计算结果, 并对其进行对比。结果表明: 船舶撞击力为靠船墩设计的控制性荷载, 双侧泊位的船舶撞击力一般不同时发生且作用方向相反, 共用靠船墩的设计方案能部分分担甚至抵消一侧船舶撞击力, 从而显著改善结构受力, 减小桩基内力和墩台位移, 并节约建设成本。

关键词: 双侧靠泊; 离岸式油码头; 靠船墩; 撞击力

中图分类号: U656.1+32

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)08-0139-05

Design optimization on breasting dolphin structures of double-side berthing oil terminal

CHEN Xuda, XUE Dingyuan, LU Shengjun

(CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510290, China)

Abstract: For the design of breasting dolphins for an offshore oil terminal with a double-side berthing layout, calculation models are established by using finite element analysis software for the structural analysis of three different design schemes of breasting dolphins. The axial forces and bending moments on top of piles, and the displacement of dolphins are obtained and compared. The results show that the ship berthing loads are critical for the design of breasting dolphin, as the berthing loads of the two berths are normally not occurred at the same time and act in opposite directions, a combined breasting dolphin for the two berths can partially share or even offset the ship berthing loads from one side berth, which therefore can significantly improve the structural stress, reduce the pile internal forces and dolphin displacement, and ultimately save costs.

Keywords: double-side berthing; offshore oil terminal; breasting dolphin; berthing load

对于掩护条件较好的离岸墩式油码头, 因受风、波浪、水流等环境荷载作用较小, 在装卸设备和码头宽度允许的情况下, 可考虑采用“一”字形双侧靠泊的码头平面布置, 从而减少工程建设成本、节约码头岸线和水域使用面积。

与常规单侧靠泊布置形式相比, 双侧靠泊的墩式油码头在结构布置、上部油工艺管线布置、结构所受船舶撞击力、挤靠力和系缆力等方面均有其自身的一些特点, 有时结合这些具体特点对码头结构进行合理的设计和优化, 往往能产生较好的应用价值。

本文依托位于掩护良好水域的某在建离岸墩

式油码头工程, 结合水文、地质条件和双侧靠泊的码头平面布置形式, 对该油码头的靠船墩结构的设计优化进行分析研究, 提出多个技术可行的优化方案, 并对这些优化方案的经济性进行比较, 最终选择最优的结构设计方案。相关经验可为类似双侧靠泊油码头的设计提供参考。

1 工程概况

1.1 潮位及设计水位

工程位于东非肯尼亚蒙巴萨的 Reitz 港湾内。根据水文分析报告^[1], 工程水域的潮位信息见表1。

收稿日期: 2024-03-20

作者简介: 陈旭达 (1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事水工建筑物结构设计。

表1 潮位信息

最高天文潮位	平均大潮高潮位	平均小潮高潮位	平均水位	平均小潮低潮位	平均大潮低潮位	最低天文潮位
4.10	3.50	2.40	1.86	1.30	0.30	-0.10

该油码头工程的设计使用年限为 50 a, 在考虑极端潮位、海平面上升及不确定性等因素的影响后, 最终确定用于该码头设计的高水位和低水位分别为 4.3 和 -0.1 m。

1.2 波浪条件

工程位于湾内, 并通过狭长的约 8 km 的天然航道与外海相通, 故工程水域几乎不受外海波浪的影响。根据水文分析报告所提供的波浪信息,

工程水域为小风区风浪, 50 a 一遇波高 H_{m0} 小于 0.5 m, 周期 $T_{m-1,0}$ 小于 3 s。

1.3 工程地质

工程区域地层分布比较均匀, 根据工程地勘报告^[2]对已有钻孔柱状图中地层信息的描述, 再结合现场及室内试验指标, 可将工程区域的地质自上而下划分为 3 层, 见表 2。

表2 土层信息

土层	土性描述	厚度/m
SU ₁	软黏土层, 标贯击数 1~3 击	15~18
SU ₂	硬黏土层或中等/密实砂层, 标贯击数 10~25 击	10~13
SU ₃	风化的泥岩层, 其中中风化层、中风化层单轴抗压强度分别约 1.5、4.0 MPa	强风化层厚 1.5~3.0, 以下为中风化层

注: SU₁ 层厚度从港池疏浚底高程起算。

1.4 码头平面布置

该油码头工程共建设 4 个泊位(1#~4#)。业主提供的原设计方案^[3]中, 1#、3#泊位位于工程西侧, 2#、4#泊位位于工程东侧。

西侧的 1#、3#泊位的平面布置见图 2, 其采用“一”字形双侧靠泊的平面布置。码头结构包括

1 座装卸平台、8 个靠船墩、6 个系缆墩以及连接墩台的引桥或人行桥结构。码头设计船型为 5 000~12 万 DWT 油轮, 并兼顾 3 500~6 500 m³ 的液化石油气 (LPG) 船。码头面设计顶高程为 5.4 m, 码头前沿水域疏浚底高程为 -15.1 m。

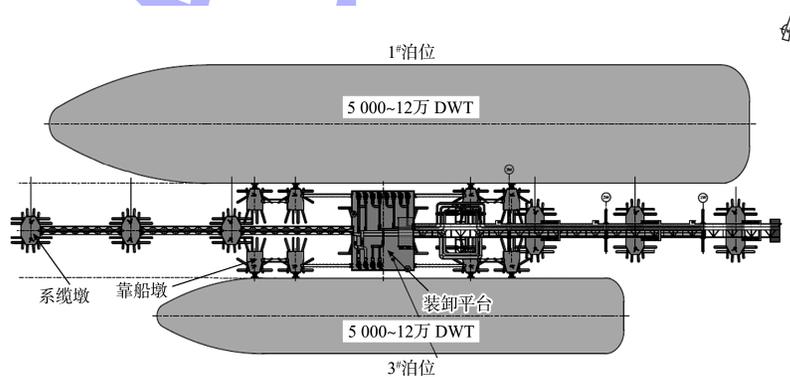


图1 1#和3#泊位平面布置

东侧的 2#、4#泊位的码头平面与西侧 1#、3#泊位沿垂直码头轴线方向呈对称布置, 其设计船型与 1#、3#泊位相同, 但远期需要考虑预留 17 万 DWT 油船。

另外, 根据业主要求^[4], 该工程的码头平面轴线、泊位位置和泊位数量已经固定, 但装卸平台、靠船墩及系缆墩的位置、尺寸和结构形式等

可通过承包商的详细设计优化后报业主批准。

2 原靠船墩方案

原设计方案中, 靠船墩采用分离式布置形式。为兼顾大小船的靠泊, 每个泊位设置了 4 个独立的靠船墩结构, 即位于操作平台每侧各 2 个靠船墩, 故 1#、3#泊位共有 8 个靠船墩。

原设计方案中没有提供靠船墩的具体结构方案, 通过对靠船墩结构的受力分析及结构强度复核, 最终确定该分离式布置下的靠船墩结构形式, 其断面及桩位见图 2。

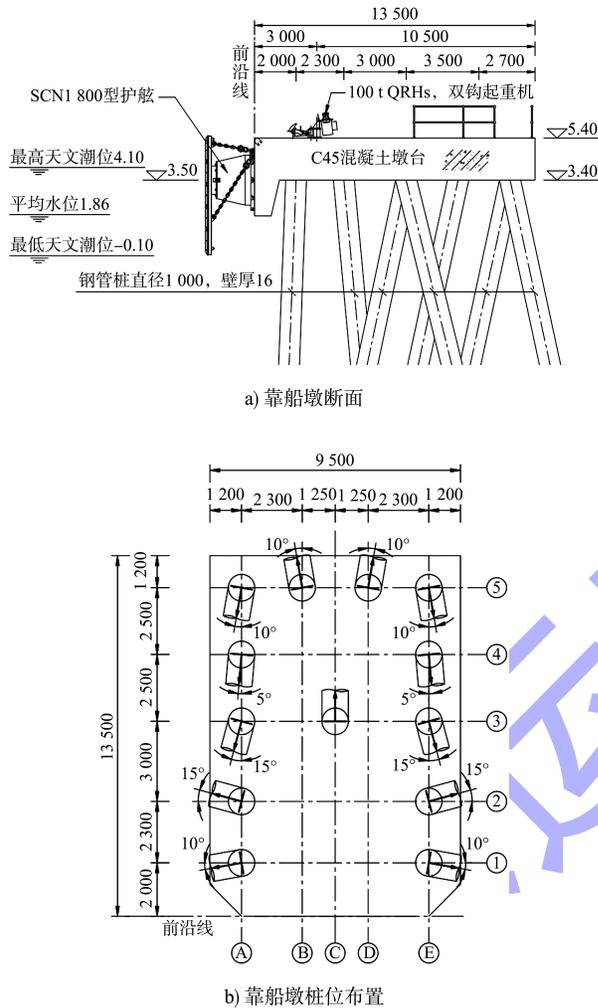


图 2 原设计方案的靠船墩断面和桩位布置
(高程: m; 尺寸: mm)

原设计方案靠船墩结构墩台长 13.5 m、宽 9.5 m、顶面高程 5.4 m、墩台厚 2.0 m。墩台采用桩基础, 每个墩台共设置 13 根直径 1 m、壁厚 16 mm 的钢管桩, 钢管桩斜率采用 4:1。

3 优化方案

3.1 优化思路

该油码头平面为采用“一”字形双侧靠泊布置^[5], 北侧 1[#]泊位靠船墩前沿线与南侧 3[#]泊位靠船墩前沿线的距离为 38 m。原设计方案独立靠

船墩的长度为 13.5 m, 南北侧靠船墩间的净距仅剩 11 m。因此, 存在将南北侧靠船墩合并的可能性。将南北侧靠船墩合并之后, 将具有如下明显优点。

1) 根据 BS 6349-1-2:2016^[6], 靠船墩上的控制性荷载为船舶撞击力。南北侧船舶撞击力方向相反, 故合并后的靠船墩结构最大仍将只受一个船舶撞击力作用, 从而间接减小了靠船墩所受的船舶撞击力。

2) 该码头工程地质上软下硬, 表层存在十几米厚软黏土, 下方持力层为风化的泥岩层, 根据打桩分析^[7], 桩基能够打入泥岩层的深度有限, 故桩基抗拔为设计控制关键因素。合并靠船墩后可大幅增加墩台面积和质量, 从而减小拔桩力, 降低桩基嵌岩风险。

3) 南北侧靠船墩合并之后, 连接系缆墩和装卸平台的人行桥或管架桥可中间支撑在靠船墩上, 从而省去人行桥和管架桥的中间桥墩。

4) 合并后, 人员可通过靠船墩直接往来于南北侧的 2 个泊位, 方便码头操作运营。

3.2 优化方案 1

优化方案 1 考虑将南北侧泊位的靠船墩合并, 但操作楼平台一侧仍保持 2 个靠船墩结构, 故 1[#]和 3[#]泊位靠船墩数量由 8 个减少为 4 个, 其对应平面布置见图 3。

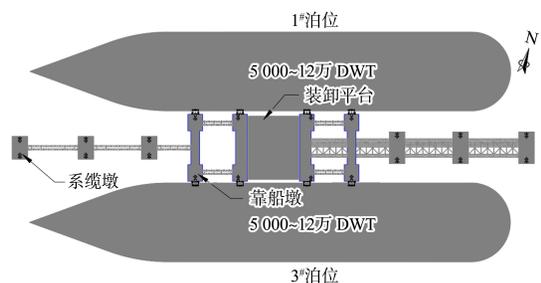


图 3 优化方案 1 的靠船墩平面布置

该靠船墩结构墩台长 38 m、宽 10 m、顶面高程 5.4 m、墩台厚 2.0 m。墩台采用桩基础, 每个墩台共设置 16 根直径 1 m、壁厚 22 mm 的钢管桩, 钢管桩斜率 4:1。靠船墩桩位见图 4。

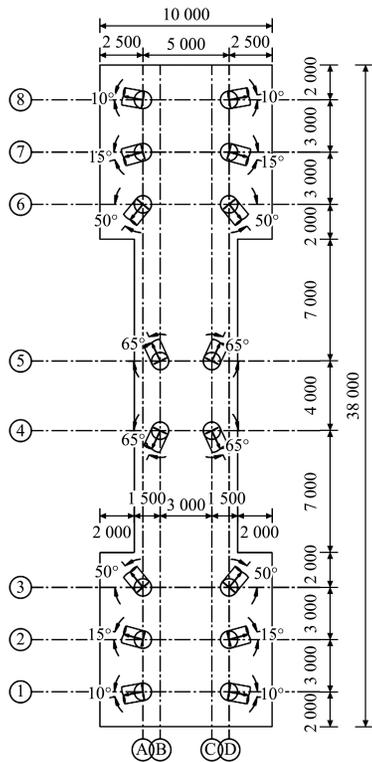


图4 优化方案1的靠船墩桩位 (单位: mm)

3.3 优化方案2

优化方案2考虑将操作平台一侧1#和3#泊位的共4个靠船墩合并为一个大的靠船平台,故1#和3#泊位靠船墩数量由8个减少为2个,其对应平面布置见图5。

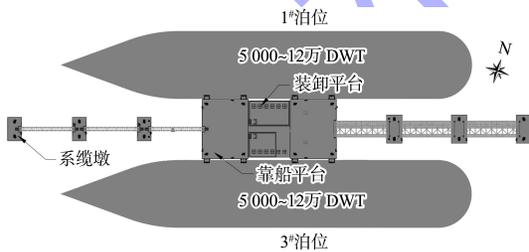


图5 优化方案2的靠船墩平面布置

该靠船平台结构墩台长38 m、宽30 m、顶面高程5.4 m、墩台厚1.5 m。墩台采用桩基础,每个墩台共设置34根直径1 m、壁厚16 mm的钢管桩,钢管桩斜率4:1。靠船墩桩位见图6。

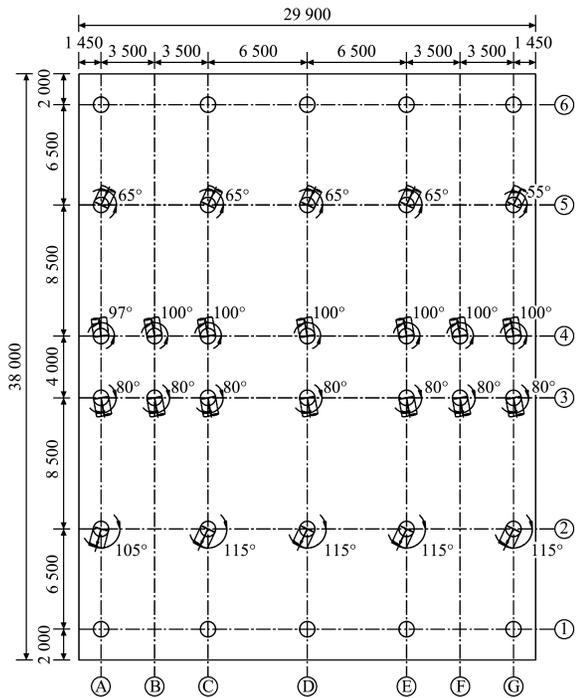


图6 优化方案2的靠船墩桩位 (单位: mm)

4 优化方案分析

4.1 结构受力

为进一步验证上述3个靠船墩方案的可行性及合理性,通过有限元计算软件对其结构受力进行分析^[8]。

在有限元模型中,上部混凝土墩台采用薄壳单元进行模拟,钢管桩采用梁单元进行模拟。钢管桩顶端与墩台连接处考虑刚性连接,桩土间相互作用根据JTS 167—2018《码头结构设计规范》^[9]中的 $p-y$ (土体水平反力-桩挠度)曲线法采用非线性弹簧单元进行模拟。有限元分析模型见图7(仅列出优化方案2)。

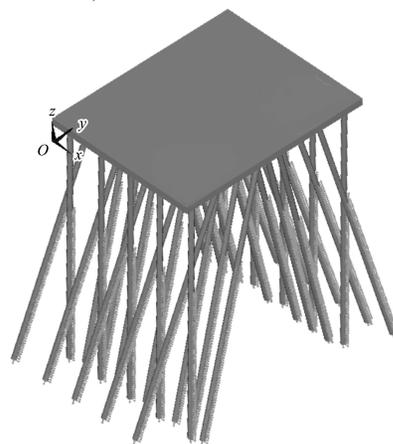


图7 优化方案2的靠船墩有限元模型

靠船墩结构受力分析时考虑的主要荷载有: 结构重力, 10 kPa 均布使用荷载, 钢栈桥支座荷载, 作用在桩基上的波浪力、水流力, 船舶撞击力, 船舶系缆力。其中撞击力荷载为靠船墩设计的控制性荷载, 单个护舷反力为 2 194 kN, 摩擦系数为 0.3。

根据 BS 6349-1-2:2016 确定荷载分项系数、组合系数及荷载组合后, 分析得到不同方案的墩台位移和桩力见表 3。

表 3 不同方案的墩台位移和桩力比较

方案	墩台位移/mm	压桩力/kN	拔桩力/kN	桩顶弯矩/(kN·m)
原设计方案	24	3 599	1 833	890
优化方案 1	49	5 372	2 304	1 509
优化方案 2	58	3 940	1 069	1 085

考虑上部油工艺管线及设备使用要求, 根据合同要求, 正常使用极限状态下的墩台位移应不超过 100 mm。由表 3 可知, 3 个靠船墩方案的墩台位移均较小, 远小于 100 mm 的位移标准, 故均满足合同要求。

由表 3 的桩力结果可知, 优化方案 1 的压、拔桩力和桩顶弯矩均是最大的, 这是由于其靠船墩桩基沿南北向长条形布置, 结构较为细长, 限制了桩位的布置, 使得结构受力情况不良, 各桩内力不均。原设计方案的压桩力和桩顶弯矩与优化方案 2 相差不大, 但优化方案 2 的拔桩力远小于原设计方案, 这是因为优化方案 2 中, 整体钢管桩共同受力, 各桩内力分布均匀, 且由于上部墩台结构重力较大, 抵消了部分拔桩力。

结合本工程地质条件, 靠船墩设计时桩的抗拔承载力为关键, 较小的拔桩力意味着桩基将不需要进行嵌岩施工, 从而大幅节约工期和施工成本, 故优化方案 2 可认为是 3 个方案中受力最为合理的结构方案。

4.2 造价分析

根据结构受力分析及钢管桩强度及承载力验算, 最终确定原设计方案、优化方案 1 及优化方

案 2 的靠船墩具体结构及钢管桩尺寸, 其分别对应的主要工程量见表 4。

表 4 1#和 3#泊位靠船墩主要工程量

方案	靠船墩数量/个	墩台混凝土/m ³	墩台钢筋/t	钢管桩
原设计方案	8	1 026	123	52 根(1 010 t)
优化方案 1	4	1 232	148	32 根(849 t)
优化方案 2	2	1 710	205	34 根(660 t)

由表 4 可看出, 虽然优化方案 2 的墩台混凝土和钢筋比原设计方案有所增加, 但其减少了大量的钢管桩和钢材。另外, 优化方案 2 同时也省去了管线的钢栈桥和桥墩。因此, 优化方案 2 节省了较多的工程费用。

相比原设计方案及优化方案 1, 优化方案 2 受力合理, 且总的工程费用较原设计方案和优化方案 1 大为节省, 故最终该工程的靠船墩结构采用优化方案 2。

5 结语

1) 双侧靠泊的墩式油码头有其自身的一些特点, 结合这些具体特点对码头结构进行合理的设计和 optimization, 可带来较好的应用价值。

2) 通过将双侧靠泊油码头一侧的靠船墩合并为靠船平台, 从而优化靠船墩结构的受力、提高码头使用性能和降低码头的建设成本。

参考文献:

- [1] Aktis Hydraulics BV. New kipevu oil terminal: wave and wind conditions [R]. Amsterdam: Aktis Hydraulics BV, 2019.
- [2] 中交第四航务工程勘察设计院有限公司. 中交蒙巴萨港新建 KOT 工程地质勘察分析报告[R]. 广州: 中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 2019.
- [3] NIRAS A/S. Reference design report [R]. Copenhagen: NIRAS A/S, 2016.
- [4] NIRAS A/S. Employer's requirements project No. 212139[R]. Copenhagen: NIRAS A/S, 2016.