

# 高桩码头系缆墩和钢联桥一体化结构创新设计



郭大维, 符成, 林岳

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510230)

**摘要:** 针对由装卸平台、系缆墩、钢联桥组成的一字形布置高桩墩式码头, 常规的设计思路考虑三者独立受力, 弱化各结构之间的传力效应。从三者协同受力的角度出发, 提出一种适应于特定布置形式的系缆墩和钢联桥一体化结构设计方案, 结合工程案例介绍该结构的形式和受力分析方法, 并从受力和造价方面与传统的高桩墩台方案进行比较。结果表明: 在满足使用功能的前提下, 一体化方案有利于发挥结构的整体受力优势, 减少系缆墩和钢联桥的工程量, 降低工程造价。

**关键词:** 高桩码头; 系缆墩; 钢联桥; 一体化结构

中图分类号: U65

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)03-0064-05

## Innovative design of integrated structure of high-piled mooring dolphin and steel catwalk for high-piled wharf

GUO Dawei, FU Cheng, LIN Yue

(CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

**Abstract:** For a linearly arranged wharf consisting of operation platform, mooring dolphins and steel catwalks, the conventional design approach considers the independent stress of the three structures, weakening the transfer of forces between them. This paper proposes an integrated structural design scheme of mooring dolphin and steel catwalk suitable for a specific layout from the perspective of collaborative force among the three parties. The specified structure and force analysis method are introduced along with engineering example. A comparison is made between the integrated structure and the traditional high-piled dolphin structure in terms of force distribution and engineering costs. The results show that under the premise of meeting the functional requirements, the integrated scheme effectively leverages the overall force advantages of the structure, reduces the quantity of mooring dolphin and steel catwalk, and subsequently lowers the engineering cost.

**Keywords:** high-piled wharf; mooring dolphin; steel catwalk; integrated structure

高桩码头分为连片式码头和墩式码头。其中, 墩式码头为非连续结构, 常见的布置形式有蝶形和一字形布置。

蝶形布置墩式码头由装卸平台(或称工作平台)、靠船墩、系船墩、联系桥(或称人行桥)等组

成(图1), 常见于油气、LNG(液化天然气)、化学品等液体散货泊位; 一字形布置墩式码头则常见于散货泊位或兼靠船型较多的液散泊位, 由装卸平台、系缆墩和联系桥组成(图2)。

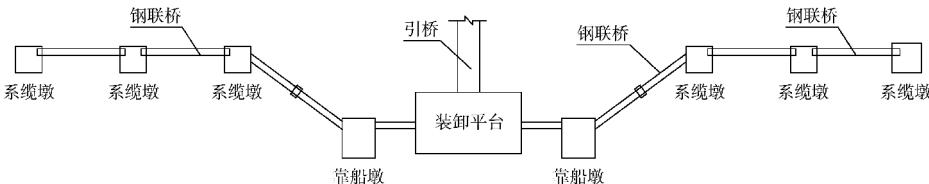


图1 典型蝶形墩式码头布置

收稿日期: 2023-06-29

作者简介: 郭大维 (1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事港口及航道工程设计工作。



图2 典型一字形墩式码头布置

与蝶形布置不同,一字形布置的墩式码头通常有较长的装卸平台,且不设靠船墩,系缆墩位于平台的两侧或一侧,通过联系桥连接各墩和装卸平台。装卸平台的长度一般由装卸工艺的特点或船舶靠泊的需要决定。以散货码头为例,在不移船的情况下,装卸平台的长度需保证移动式装/卸船机的装卸点能覆盖所有设计船型的全部舱口,并留有一定富余<sup>[1]</sup>。此时,装卸平台长度可达到码头泊位长度的90%以上,因此又可视为连片式码头加首尾系缆墩结构。

港口工程中的联系桥多采用钢结构,因此称为钢联桥。钢联桥的使用宽度多为1~2 m,根据桥跨大小选用实腹板结构、轻型三角桁架结构、轻型钢管拱桁式结构等形式<sup>[2]</sup>。

对于装卸平台加首尾系缆墩结构的设计,常规的设计思路为:将装卸平台、系缆墩和钢联桥三者分开考虑,独立进行受力复核,以钢联桥的支座反力作为下部结构设计的输入荷载。其优点是简化了结构的受力机制,各结构受力明确,计算简便,有利于各部分结构的独立设计。但分离

式的设计弱化了各结构间的传力效应,实质上要求各结构均要有足够的刚度单独受力,在经济性上不是最优。实际上考虑系缆墩与装卸平台的协同受力,虽在受力机制上稍显复杂,却有利于发挥结构整体的受力优势,降低工程造价。

装卸平台的刚度远大于单个系缆墩,如考虑两者协同受力,大部分作用力将被更“强壮”的装卸平台分担。系缆墩的受力就会大大降低,可采用小直径单桩结构;装卸平台的纵向刚度远大于横向刚度,即便考虑系缆力的传递作用,也不会导致受力情况出现较大变化。

本文结合工程实例,介绍了一种适用于特定情况下的系缆墩和钢联桥一体化结构(简称一体化结构)设计方案,在满足使用功能的前提下,可大大减少系缆墩和钢联桥的工程量,降低工程造价,具有一定的经济优势。

## 1 工程案例

东南亚某7.5万吨级散货泊位采用突堤式布置,原方案码头由装卸平台、西侧系缆墩和钢联桥组成,通过引桥与陆域堆场连接,见图3、4。码头泊位总长280 m,装卸平台长245 m、宽29 m;钢联桥净跨为25 m;码头面高程为4.5 m,前沿底高程为-16.5 m。

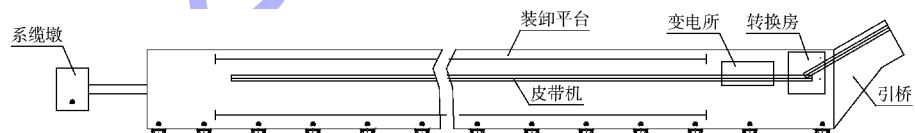
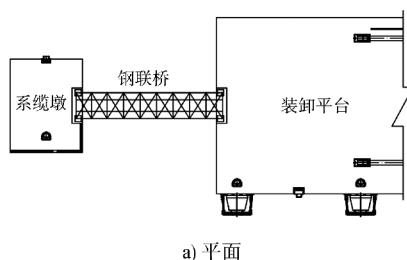
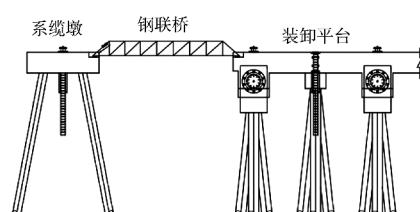


图3 某散货码头平面



a) 平面



b) 剖面

图4 码头原方案系缆墩结构

原方案系缆墩为高桩墩台结构,墩台平面尺寸为7 m×9 m、厚2 m,桩基为6根直径1.0 m

(斜率为5:1)的钢管桩,设置1 000 kN的系船柱(图4)。为节省工程造价,在不改变平面功能的

前提下,将系缆墩设计方案调整为系缆墩和钢联桥一体化结构,达到良好的经济效果。

## 2 系缆墩和钢联桥一体化结构

一体化结构由系缆桩、系缆钢平台、斜撑钢管和钢联桥组成,系缆桩通过两根水平斜撑钢管固定在装卸平台上,形成稳固的三角结构,整体结构见图 5。

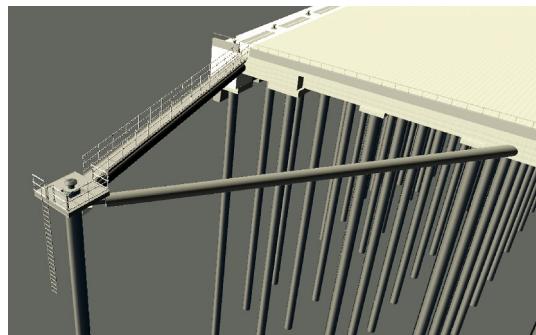


图 5 一体化结构三维结构

与传统的高桩墩台结构相比,一体化结构的优势主要体现在两方面:1) 受益于装卸平台的支撑作用,系缆墩的作用力大大减小,桩基可采用小直径的单桩,桩数量大大减少;2) 斜撑钢管既作为水平力的传力杆件,又作为钢联桥的支撑梁,构件性能得到充分利用。一体化设计的钢联桥结构简单,无复杂的桁架结构,节省钢材用量。

### 2.1 系缆桩与斜撑钢管

系缆桩为 1 根直径 1.0 m、壁厚 20 mm 的钢管桩,通过 2 根直径 0.8 m、壁厚 19 mm 的水平斜撑钢管与装卸平台结构相连,形成稳固的三角结构。系缆桩长 35 m,入土深度约 14.5 m;2 根斜撑钢管分别长 27.5 m 和 23.7 m。

### 2.2 系缆钢平台及附属设置

系缆平台采用钢结构(图 6),平面尺寸为 3 m×3 m;钢平台以系缆桩顶焊接的牛腿为支撑,设置横纵向的槽钢框架梁,框架梁上铺设 10 mm 厚钢板;系缆桩顶浇筑 4 m 长微膨胀桩芯混凝土,顶部埋设 1 000 kN 系船柱。平台上根据功能需要,依次设置栏杆、钢爬梯和航标信号灯等附属设施。

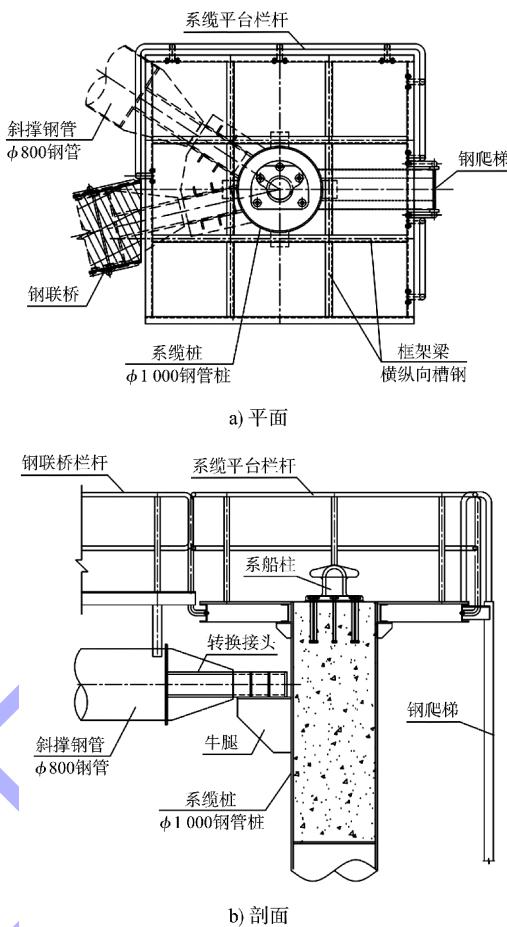


图 6 系缆平台结构 (单位: mm)

### 2.3 钢联桥

钢联桥(图 7)直接焊接在海陆侧斜撑钢管上,先在钢管上间隔焊接槽钢形成水平面,并铺设 25 mm 厚钢板形成走道板,两侧通过焊接角钢连接栏杆扶手,满足通行要求。

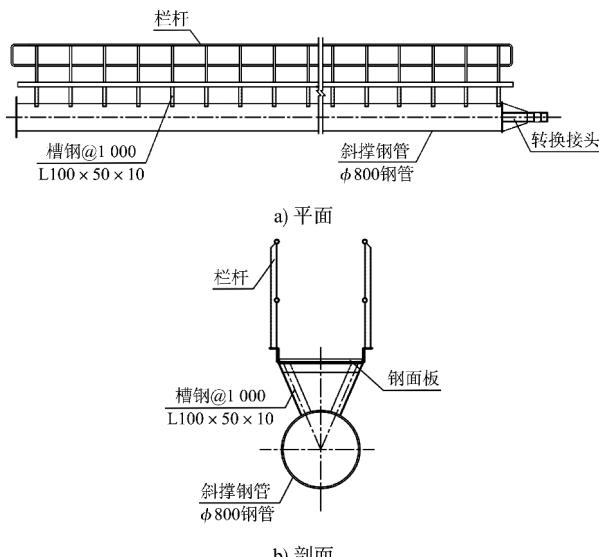


图 7 钢联桥结构 (单位: mm)

## 2.4 局部节点

斜撑钢管两端的连接节点可采用焊接或螺栓连接。本例中斜撑钢管一端通过转换接头变为钢板焊接成的箱形截面, 焊接在系缆桩牛腿上; 另一端设置封底钢板, 与码头边梁的预埋钢板通过螺栓连接。

## 3 一体化结构的计算与分析

### 3.1 模型建立

一体化结构需整体建模进行有限元分析, 建模过程与常规高桩梁板码头基本一致。采用 SAP2000 通用有限元软件进行整体建模计算, 通过框架单元模拟桩和梁等杆件, 薄壳单元模拟面板, 弹簧单元模拟桩土相互作用, 弹簧刚度采用  $P-Y$  曲线法或者  $m$  法进行计算<sup>[3]</sup>。框架单元采用三维的梁-柱理论计算双轴弯曲、扭转、轴向拉压及双轴剪切力效应。薄壳单元基于 Mindlin/Reissner 理论, 考虑横向剪切变形影响<sup>[4]</sup>。斜撑钢管两端节点均考虑为刚性连接。

### 3.2 设计荷载

荷载考虑恒载和可变荷载, 可变荷载包括人群均载、系缆力/环境荷载(风荷载、波浪力)和温度荷载。

人群均载包括系缆平台和钢联桥上的均载, 取 5 kPa; 系缆力为 1 000 kN, 根据不同系缆角度考虑最不利组合; 作用在结构上的风荷载考虑操作风速和极端风速两种工况。操作风速定义为满足船舶靠泊作业的最大风速, 一般考虑 9 级风, 风速取 22 m/s。极端风速考虑本地区出现的最大风速, 取 35 m/s; 波浪力以线荷载形式施加到系缆桩上; 温度荷载考虑  $\pm 17^{\circ}\text{C}$  的整体温差作用。

### 3.3 荷载组合

承载能力极限状态持久组合:

- 1) 恒载+系缆力+人群均载+风荷载(操作风速)+温度荷载;
- 2) 恒载+系缆力+作用在桩上的波浪力+风荷载(操作风速)+温度荷载;
- 3) 恒载+系缆力+人群均载+作用在桩上的波浪力+风荷载(操作风速)+温度荷载;
- 4) 恒载+作用在桩上的波浪力+风荷载(极端风速)。

正常使用极限状态标准组合:

- 1) 恒载+系缆力+人群均载+风荷载(操作风速)+温度荷载;
- 2) 恒载+系缆力+作用在桩上的波浪力+风荷载(操作风速)+温度荷载;
- 3) 恒载+系缆力+人群均载+作用在桩上的波浪力+风荷载(操作风速)+温度荷载。

### 3.4 方案对比

将一体化结构方案与传统的高桩墩台结构方案进行对比, 见表 1, 桩基内力计算结果见表 2。对系缆桩来说, 由于钢平台自重力较小且桩顶存在支撑, 受力相对容易满足, 研究的重点在于通过斜撑传递的系缆力对装卸平台桩基的影响。

表 1 一体化方案和高桩墩台方案结构对比

方案	上部结构	桩基结构	钢联桥
一体化 结构	钢结构系缆平台 平面尺寸 3 m×3 m	系缆桩: 1 根, 直径 1.0 m, 壁厚 20 mm 斜撑钢管: 2 根, 直径 0.8 m, 壁厚 19 mm	简易钢 联桥
系缆墩 结构	混凝土墩台 平面尺寸 7 m×9 m、 厚 2 m	6 根, 直径 1.0 m 的钢管桩 壁厚 20 mm, 斜率 5:1	三角桁 架式钢 联桥

表 2 系缆墩和钢联桥一体化结构有限元计算

方案	构件	压桩力/kN	拔桩力/kN	桩弯矩/(kN·m)	桩应力/MPa
一体化结构	系缆平台	1.0 m 钢管桩(单桩)	921	92	1 131
	斜撑钢管	0.8 m 钢管桩(2 根)	1 709	546	137.29
高桩墩台	装卸平台	1.0 m 钢管桩(排架)	6 178	1 444	211.31
	系缆墩	1.0 m 钢管桩(6 根)	2 361	659	177.34
	装卸平台	1.0 m 钢管桩(排架)	5 890	1 513	207.30

根据计算结果, 一体化结构在大幅减少桩数量的同时, 桩的受力仍优于高桩墩台结构(6 根

1.0 m 钢管桩, 5:1 斜桩)。两者相比, 一体化结构基桩的压桩力和拔桩力值减少超过 50%, 桩身

弯矩、桩身的应力设计值减少约 40%。

由表 2 可见, 两个方案中装卸平台桩基内力计算值(以邻近系缆墩的两个排架桩基为研究对象)相当接近, 偏差在 5% 以内。其中, 一体化方案导致邻近的装卸平台桩基压桩力略微增加, 弯矩略微减小, 桩身的应力设计值基本无变化。由此可知, 系缆桩传递的系缆力对装卸平台桩基影响很小, 未显著增加装卸平台的桩基受力, 也不会导致额外的工程量增加。

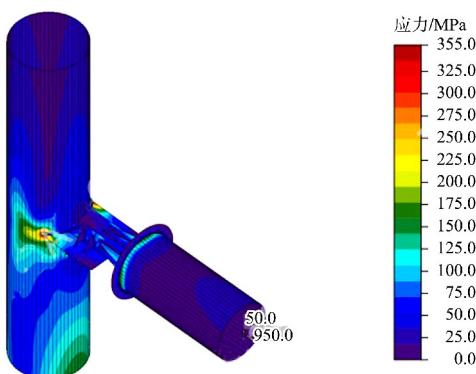
综上, 一体化结构的经济性并未降低结构的受力标准, 而是通过减少结构自重力以及合理利用装卸平台的结构受力“盈余”而得。

### 3.5 节点应力分析

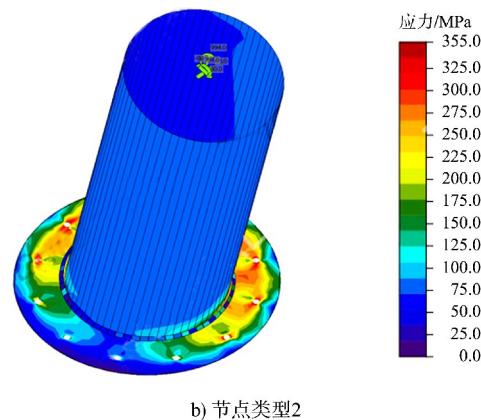
节点是指斜撑钢管两端的连接节点, 其中斜撑钢管与装卸平台之间的连接节点采用螺栓锚固, 通过 12 个 M30 螺栓将端板与混凝土结构锚固; 斜撑钢管与系缆桩的连接节点则相对复杂, 钢管通过转换为矩形截面与系缆桩牛腿结构焊接, 局部设置加强肋板。

整体模型的一维杆系结构不满足节点分析的需要, 本例中建立局部节点模型对各节点应力进行复核; 建立节点细部模型, 对节点区的杆件端部施加适当的支座约束, 再从整体模型中取出节点区各杆件端点相应的内力值, 并作为荷载施加到节点细部模型中进行分析<sup>[5]</sup>。节点模型由钢结构节点分析软件建立, 采用壳单元模拟, 进行弹塑性分析。

计算得到的节点应力云图(图 8)。计算的最大应力为 274.3 MPa, 小于容许应力值 355.0 MPa。



a) 节点类型1



b) 节点类型2

图 8 节点 Von Mises 应力云图

### 4 方案工程量对比

一体化结构方案和高桩墩台结构方案的主要工程量对比见表 3。

表 3 不同方案主要工程量对比

项目	钢材用量/t		混凝土用量/m <sup>3</sup>	
	一体化 结构方案	墩台 结构方案	一体化 结构方案	墩台 结构方案
桩基(含斜撑钢管)	38.03	115.08	-	-
墩台上部结构	1.50	0	-	126
钢联桥	4.60	8.00	-	-
节省工程量	78.95		126	

对比可知, 一体化结构方案相比于高桩墩台方案工程量明显减少。单个系缆墩减少 5 根桩, 钢联桥用钢量也较省, 总计节省钢材 78.95 t, 混凝土 126 m<sup>3</sup>。估算单个系缆墩可减少材料费和直接施工费约 110 万元, 相当于减少系缆墩整体造价的 30%, 经济优势明显。

另外, 一体化结构方案为全钢结构设计, 可根据需要设计为全装配式, 以缩减工期, 进一步节省施工费用。

### 5 结论

1) 系缆墩和钢联桥一体化结构设计方案与传统的高桩墩台系缆墩方案相比, 通过减少结构自重力, 充分利用结构整体受力优势, 可有效减少工程量, 降低工程造价, 具有一定的推广价值, 可为高桩码头的结构设计提供新的思路。

(下转第 73 页)