

基于分离式结构设计理念的液压靠船系统

陈建兴,蒲彦如,李垒垒,高郑,徐绩青 (重庆交通大学河海学院,重庆400074)

摘要:通过在靠船桩与叉桩间加入环形液压装置,并将叉桩与主体结构部分分离,提出了一种新型的浮式靠船系统。 结合数值仿真模拟在船舶荷载撞击的情况下对靠船桩、叉桩进行了承载能力分析。与现有高桩码头及浮式靠船系统相比, 该系统具有使用方便、保护码头主体不受撞击、减缓码头承载能力下降速率等优点。从使用安全和航运经济考虑,该新型 靠船系统结构更优、使用更加安全、能提高码头装卸效率、有广阔的应用前景。

关键词:新型靠船系统;部分分离;环形液压装置;码头承载能力

中图分类号: U 653.2 文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)08-0050-05

Hydraulic ship-berthing system based on the concept of separating-type structure design

CHEN Jian-xing, PU Yan-ru, LI Lei-lei, GAO Zheng, XU Ji-qing

(School of River & Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqiing 400074, China)

Abstract: By adding an annular hydraulic device between the ship-berthing pipe and batter pile, and partially separating the batter pile and major structure, a new type of floating ship-berthing system was proposed. The bearing capacities of ship-berthing pile and batter pile were also analyzed under the impact and load of ship by combing with the numerical simulation. Comparing with the existing high-pile wharf and floating ship-berthing system, this system has the advantages such as being convenient to use, protecting the pier body from being impacted, slowing down the descent rate dock carrying ability, etc. From the considerations of safety use and shipping economy, the new type of ship-berthing system is better in structure and safer in use, and can improve the wharf handling efficiency and has a broad application prospect.

Keywords: new-type ship-berthing system; partial separation; annular hydraulic device; wharf bearing capacity

高桩码头以其吞吐量大、装卸效率高等优点 被广泛运用于实际工程当中。目前,高桩码头^[1] 所采用的仍然是直桩加叉桩、下部设置纵横联系 梁的结构形式。为了控制在撞击力和系缆力作用 下的水平变位,必须保证码头结构具有较好的整 体刚度^[2]。但是码头工作环境恶劣、承受的荷载 种类繁多,在使用的过程中码头承载能力下降较 为严重。码头承载能力下降后,实际靠船吨位与 设计吨位相差甚远,安全性能也大幅降低,而码 头是一种长期使用的基础设施,承载能力下降后 的补救措施十分重要。由于码头主体结构与受力 结构为一整体,码头承载能力下降之后,现有技术无法弥补,这也是困扰港口工程界的一大难题。

考虑到高桩码头主体结构直接承受的船舶撞 击力荷载是导致码头承载能力下降的重要因素, 将研究点着重放在如何避免码头直接承受船舶撞 击上,对此,提出了部分分离式设计理念。对于 码头前端船舶直接接触的靠船装置,采用浮式靠 船系统中靠船桩结合趸船的形式,替换传统高桩 码头前端的靠船构件,可避免靠船装置与码头主 体结构直接接触,同时保留了传统浮式靠船系统 适应大水位变动的优点;对于水平力主要承受结

收稿日期: 2016-03-23

作者简介:陈建兴 (1994—),男,本科生,从事水利水电工程研究。

构——叉桩,将叉桩桩帽与码头主体结构横梁分 离,即将码头主体结构与受力结构分离,避免了 码头主体结构直接承受船舶撞击力荷载。同时, 设置在靠船桩与叉桩间的环形液压装置,又能绕 过码头高桩将靠船桩和独立的承力叉桩连接起来, 形成一套完整的靠船系统。

该新型靠船系统实际工作能力主要是由承力 叉桩的承载能力所决定,考虑到承力叉桩承载能 力的下降受各种因素(材料、荷载等)影响且在 设计阶段不能定量分析,而投入使用后,叉桩承 载能力下降程度可通过仪器测定,因此可在叉桩 承载能力下降至一定程度后启用备用设施,等效 降低各个承力叉桩所承受的荷载,保证整个系统 再次满足正常设计吨位的要求。

1 新型浮式靠船系统结构设计

1.1 液压系统

1) 液压系统的组成。

本系统主要由 3 部分组成: 靠船装置、码头 高桩上的液压装置及受力装置。

靠船装置:由靠船桩和趸船组成,二者通过 滑动套筒连接。见图1。

液压装置:由两个活塞及环形承压钢管组成, 并由高桩上的水泥平台支撑。其中,活塞1前端 与靠船桩接触,后端嵌入环形承压钢管前部,以 便传导靠船撞击力;环形承压钢管环内焊接钢支 撑(可抵御钢管产生的弯矩,避免承压钢管变形 破坏);活塞2前端嵌入环形钢管尾部,后端与承 力叉桩相接触。见图2。

受力装置: 独立的承力叉桩 (叉桩桩帽与横 梁分离)。见图 1。





图 2 液压靠船系统剖面

2) 液压系统的建造安装。

①承力叉桩和靠船桩在建造码头时,随桩基一并完成。并在承力叉桩上预留活塞放入的孔洞;在靠船桩上安装滑动导轨及套筒,随后与趸船完成连接。

②液压装置建造时分为两个半圆环,建造完成后与活塞组合,环绕着码头高桩进行安装,拼接部分用类似于石油管道拼接技术拼接;在圆环内焊接钢支撑;给液压装置注入适量液压油,使活塞分别接触靠船桩的滑动导轨和伸入承力叉桩的预留孔中。见图 3。



a) 安装前环形承压钢管



b) 安装活塞及焊接钢管



c) 焊接钢支撑

图 3 液压装置建造

3) 液压系统的维护保养。

①在液压装置表面喷涂油漆,防止钢材氧化。

②在活塞与环形承压钢管相贯入部分作防渗 处理,避免液压油渗漏。

③在液压装置周围布置防尘网,避免在液压 装置工作过程中将尘土带入内部或堆积在与活塞 相贯入部分。

④定期对环形承压钢管进行检查,检查钢管 是否裂缝、是否漏油。

1.2 备用设施

1) 备用设施的组成。

备用设施包含备用靠船桩、备用液压装置和 备用承力叉桩。在建造码头初期,备用的承力叉 桩随桩基一并完成,备用靠船桩预留打桩位置, 备用液压装置暂不安装。当已用的承力叉桩的承 载能力下降到一定程度时,启用备用设施,即在 预留位置打入备用靠船桩、安装备用液压装置, 与备用的承力叉桩一并投入使用。

2) 备用设施的安装。

本装置为创新构想,无实际工程经验,故安 装过程借鉴类似工程。

①液压装置的安装工艺与1.1中所述相同。

②在预留的打桩位置打入备用靠船桩。

③在备用靠船桩上安装滑动导轨, 趸船与靠 船桩之间安装滑动套筒; 给液压装置注入适量液 压油, 使活塞接触靠船桩和承力叉桩。

2 新型浮式靠船系统的工作原理

1) 液压传动原理。

本系统利用液压传动原理——帕斯卡原理

(在密闭空间内,液体压强向各个方向均匀传递), 将靠船撞击力绕过码头高桩直接传导至独立的承 力叉桩,使码头高桩不受撞击力。

2) 液压平衡原理。

本系统利用液压平衡原理,即环形承压钢管 内部压力大小处处相等,液压装置整体受力平衡, 能保证靠船撞击时承压钢管不因撞击产生位移影 响码头高桩。

3) 分离式设计原理。

本系统采用主体结构与受力结构部分分离的 设计理念,将承力叉桩与码头主体结构分离,靠 船过程中,由承力叉桩承受船舶撞击,保证码头 主体结构不受船舶撞击影响,可以减缓码头承载 能力下降速率。

3 新型浮式靠船系统的结构简化计算

3.1 靠船系统受力分析

3.1.1 计算模型

靠船系统计算模型见图 4。考虑最不利情况, 即高水位时,撞击力作用于靠船桩顶端,此时计 算得的位移最大。设计中液体压缩不计,则靠船 桩桩顶位移与叉桩桩顶位移相同。



图 4 靠船系统计算模型

3.1.2 基本计算数据

数值计算所用数据均来源于实际码头工程项 目。设计船型满载排水量为3000t。靠船桩为钢 管桩,直径1m、内径0.964m,计算长度20m; 叉桩同为钢管桩,直径1.20m、内径1.218m, 计算长度18m。钢材的弹性模量210GPa。码头 主体结构基桩为大直径管柱桩。 钢管桩采用 40 号钢,其屈服强度应不小于 350 MPa,抗拉强度不小于 580 MPa;液压钢管采 用超高强度钢,其屈服强度不小于 1 370 MPa,抗 拉强度不小于 1 620 MPa。

3.1.3 数值计算^[3]

船舶撞击力为 P,船舶满载排水量 M,法向 靠岸速度 v_n ,撞击时产生的靠船桩桩顶位移为 Δ , 撞击点处靠船桩位移为 Δ_1 。叉桩桩顶位移与靠船 桩桩顶位移相同为 Δ ,同时提供水平支撑力 N。靠 船时的撞击点距离靠船桩桩顶 x,靠船系统数 量 n。

利用能量原理,得能量方程[4]:

$$\frac{1}{2}P\Delta_1 = \frac{1}{n} \cdot E_0 \tag{1}$$

其中:

$$\Delta_{1} = \frac{P (24.51-x)^{3}}{3EI} - \left[\frac{24.51N}{2EI}(24.51-x)^{2} - \frac{N (24.51-x)^{3}}{6EI}\right]$$
(2)

$$E_0 = \frac{1}{2} M v_n^2 \tag{3}$$

$$\Delta = \frac{P(20-x)^{3}}{3EI} + \frac{P(20-x)^{2}}{2EI}x - \frac{20^{3}N}{3EI}$$
(4)

使用有限元法利用 MATLAB 编程计算叉桩桩 顶水平位移为:

$$\Delta = \frac{NL(\sin^2\alpha_1 + \sin^2\alpha_2)}{EA\sin^2(\alpha_1 - \alpha_2)}$$
(5)

联立方程(1)、(4)、(5), 解非线性方程组可 求得内力及位移。

正常使用时,设计靠船系统数量为3,靠船速 度为0.30 m/s。当船舶撞击力作用在靠船桩桩顶 时, *x*=0。联立方程(1)、(4)、(5),并代入相关 数据解得: *P*=16 655.447 kN, *N*=16 599.95 kN, Δ=0.054 m,满足规范要求^[5]。

长期使用过程中,受力叉桩的承载能力下降, 此时开始启动备用靠船系统,靠船系统数量增加 到 5。不妨设叉桩轴向承载能力折减 30%,即按 0.7E 计算。计算得: P = 10 793.98 kN, N =10 758.00 kN, $\Delta = 0.050$ m。由此可见,靠船系统 数量增加,反力 N减小,叉桩桩顶位移也减小,故 增加靠船系统数量能有效应对码头承载能力下降。

当叉桩轴向承载能力折减 40%,即按 0.6E 计算,靠船系统数量增加到 5。计算得: P = 9 993.287 kN, N=9 995.97 kN, Δ=0.054 m。 计算结果和启用备用设施对比结果见表 1。

表 1 3 万吨级码头备用靠船系统启用前后数值仿真结果对比

满载排水量/t	是否启用备用设施	靠船系统数量	靠船速度/(m/s)	弹性模量	靠船桩(叉桩)顶端位移/m	码头结构安全性
	否	3		不折减(E)	0.054	
3万	是	5	0.30	折减 30%(0.7E)	0.050	安全
	是	5		折减 40%(0.6E)	0.054	

若船舶出现失控情况,以较大速度撞向趸船, 在此情况下,本设计中考虑3倍的撞击能,即靠 船速度为0.520 m/s。靠船系统数量为3。联立方 程(1)、(4)、(5)并代入相关数据解得:*P*= 28 848.13 kN, *N*=28 751.96 kN, Δ=0.094 m。 承力叉桩发生塑性变形,但仍能够保证码头结构 及工作人员的安全。

此情况的计算结果与正常靠船时的计算结果 见表 2。

表 2 3 万吨级船舶失控撞击数值仿真结果

满载排 水量/t	靠船系统 数量	靠船速度/ (m/s)	靠船桩(叉桩) 顶端位移/m	承力叉桩轴向 应力/MPa	承压钢管环向 应力/MPa	承压钢管径向 应力/MPa	码头结构 安全性				
3万	3	0.30	0.054	199. 48	463.86	228.39	安全				
		0. 52	0.094	345.70	802.47	395.88	安全				

3.2 液压钢管的校核^[6]

液压钢管采用内径 2*a*=0.2 m、外径 2*b*=0.28 m 的钢管。材料为超高强度钢,屈服强度不小于 1 370 MPa,抗拉强度不小于 1 620 MPa。船舶在 失控状态的撞击力最大,反力也最大,为 28 751.96 kN(图 5)。





a) 钢管内外压强

b) 液压作用下的钢管环 c) 大气压作用下的钢管环 向应力与径向应力分布 向应力与径向应力分布

图 5 活塞与液压钢管连接处钢管应力分布^[7]

径向压应力:

$$\sigma_r = 2C + \frac{A}{r^2} \tag{6}$$

环向拉应力:

$$\sigma_{\theta} = 2C - \frac{A}{r^2} \tag{7}$$

切应力:

$$\tau_{r\theta} = 0 \tag{8}$$

在内表面 r=a 处受内压 $P_i = \frac{N}{S}$,其中 N 为靠 船时靠船系统提供的最大水支撑力,S 为活塞处截 面积。在外表面 r=b 处受外压 $P_0 = 0$ (大气压),

面积。在外表面 r = b 处受外压 $P_0 = 0$ (人气压), 相应的边界条件为:

$$r = a; \sigma_r = -p_i; \tau_{r\theta} = 0 \tag{9}$$

$$r=b; \sigma_r=-p_0; \tau_{r\theta}=0 \tag{10}$$

联立式(6)~(10)可以解得:

$$A = \frac{a^2 b^2}{b^2 - a^2} (p_0 - p_i)$$
(11)

$$2C = \frac{1}{b^2 - a^2} (a^2 p_i - b^2 p_0)$$
(12)

将式(12)代入式(6)、(7)可求得最大应力值。 计算结果见表 2。故采用超高强度钢能够满足强度 要求。 3.3 钢管桩的校核

对于靠船桩,由表1、2计算结果可以分析得 出,其承受的水平力极小,一般钢材能够满足其 强度要求。

对于承力叉桩,计算得船舶正常靠船时轴向 应力为 199.48 MPa,船舶失控状态下其轴向应力 为 345.70 MPa。故采用 40 号钢便能够满足其强度 要求。

4 国内外浮式靠船系统对比

与常用的浮式靠船系统相比,本系统保留了 其适应水位差大的优点。但常用浮式靠船系统由 靠船桩承受靠船撞击,靠船吨位在当前发展趋势 下略显不足,并且靠船时靠船桩摇晃程度大,工作 环境恶劣,而本系统利用液压装置将靠船撞击传导 至叉桩,靠船吨位能大幅提高,同时在液压装置的 加入下,将原先悬臂梁式的靠船桩转变为简支梁形 式,减小靠船摇晃程度,改善码头工作环境。

与现有高桩码头设置护舷的靠船方式相比, 本系统可更好地保护码头安全。靠船时,高桩码 头由连接于横梁的叉桩承受主要横向荷载,剩余 结构承受部分横向荷载,同时,码头还承受面板 传递的竖向荷载,在两种荷载共同作用下,码头 承载能力下降较单向荷载作用时快。本系统为避 免码头直接承受船舶撞击,提出了部分分离式设 计理念:将叉桩与码头主体结构分离,由叉桩直 接承受全部横向荷载,而码头主体结构不受撞击 力影响,仅承受竖向荷载,即使出现船舶失控撞 击的情况,遭受破坏的只是叉桩,码头主体结构 和人员的安全能得到保证。

5 结语

1)根据数值仿真计算,液压装置须采用超高强度钢材制造,而超高强钢材价格高于普通钢材。
但应用液压装置后,各个承力叉桩受力均匀,对承力叉桩的要求降低,可适当减小叉桩桩径,节省成本。该新型码头结构形式普遍适用于河港、海港,大规模投入使用后,成本也会相应降低。