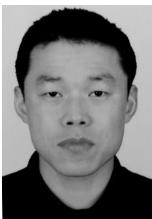


· 港 口 ·



抗风浪浮码头试验研究

夏运强, 王海峰, 李欣

(中国人民解放军91053部队, 北京100070)

摘要: 针对现有传统浮码头抗风浪能力不足的问题, 进行原因分析。提出一种新型抗风浪浮码头方案, 其设计思路是将浮码头存在过程分为正常工作与防御风浪两种工作状态, 采取设置抗风浪滑动槽、工作约束和人字锚系统等关键措施, 既保证其正常工作要求, 又具有较高抵御风浪能力。对设计方案进行了模型试验验证, 并提供确定关键参数的原则和方法。该方案为有效提高浮码头在海洋环境中的生存适应能力、发挥浮码头技术优势提供一种解决方案和技术支持。

关键词: 港口工程; 浮码头; 艇船; 抗风浪; 模型试验

中图分类号: U 653

文件标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)03-0047-05

Experimental study on wind and waves-resistant floating wharf

XIA Yun-qiang, WANG Hai-feng, LI Xin

(No. 91053 Unit of PLA, Beijing 100070, China)

Abstract: For insufficient wind and wave-resistant of the existing traditional floating wharf, the causes are analyzed. This paper puts forward a new type of anti-wind and anti-wave floating wharf scheme. The design idea is to divide the existing process of the floating wharf into two states: normal working stage and wind and waves-resistant stage. The key measures such as the wind and waves-resistant sliding trough, working restriction, and herringbone anchor system are taken to ensure its normal working requirements and high resistance to wind and wave. The model test is carried out to verify the design scheme, and principle and method for determining the key parameters are provided, which provides a solution and technical support for effectively improving the adaptability and viability of the floating wharf in the marine environment and giving full play to the technical advantages of the floating wharf.

Keywords: harbor engineering; floating wharf; barge; wind and waves-resistant; model test

浮码头具有使用方便、水位适应性强、机动性好、造价低等特点, 广泛应用于我国内河和东南沿海潮差较大且风浪掩护条件好的港口内^[1]。浮码头也是军港中一种重要的码头结构形式。

现有常规海港浮码头通常由趸船、锚系系统(锚链及锚体)、支撑系统(引桥、撑杆、撑墩)和连接系统(连桥及连接装置)组成^[2-3], 典型的有撑两趸一桥顺岸式浮码头组成见图1, 各系统刚体组件之间通过不同规格锚链连接。

现有常规浮码头存在抗风浪能力不足的问题, 特别是在台风多发的东南沿海地区, 在伴随台风而来的大浪袭击下, 这种传统形式的浮码头显露出了严重弊端。由于系统各组件之间约束紧密、趸船可变位移量小、不能有效耗散波浪能, 耽船与支撑和连接设施在波浪力的作用下会发生猛烈的刚性碰撞和拽拉, 各组件承受相当大的冲击荷载, 往往会造成浮码头系统的严重破坏, 导致严重损失^[4-5]。虽然现阶段已经采取了加强耳环和耳

环链、使用钢结构趸船及引桥等支撑和连接结构、端部设置吸能块等措施来提高其防台风能力，但由于未改变主体结构形式，改善幅度有限。另外，现场试点了在台风来临之前将撑杆和引桥吊起与趸船脱离，台风过后再将其复原使用的方案^[6]，

但可操作性差且成本高。适用更高海况的抗风浪浮码头应遵循趸船在抗风浪状态允许有较大自由度以便有效缓冲吸能的原则，需要改变现有支撑和连接系统方式，尽可能减少活动组件，同时也应考虑方案实施的简便易行性。

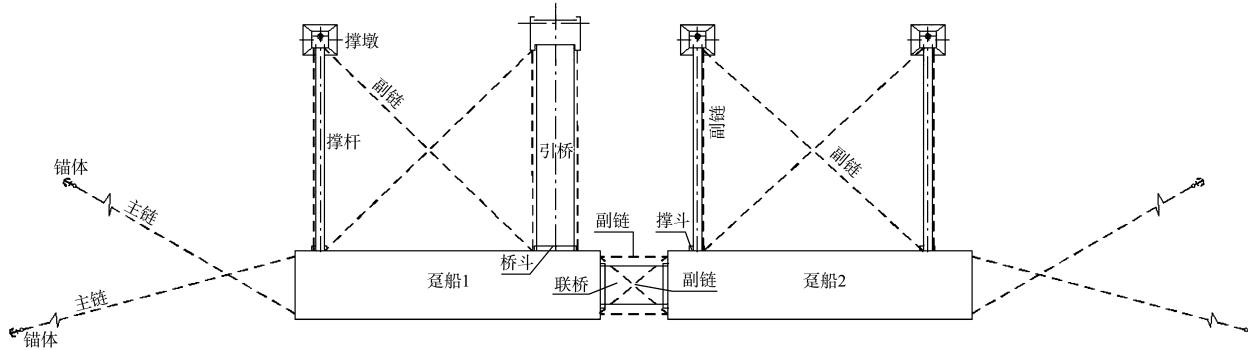


图 1 典型两趸一桥传统浮码头组成

浮码头存在状态包括正常工作状态和防御风浪状态（生存状态）两种，前者适用于船舶靠泊装卸作业的低海况条件，后者适用于单独抗风浪海况条件，通常情况下抗风浪状态是浮码头结构设计的控制状态。国家行业标准并未对其生存海况做出规定，文献 [3] 提到“一般来说，浮码头设计波高不宜大于 1.5~2.0 m，波高取 25 a 或 50 a 的 $H_{5\%}$ ”。军用浮码头标准提高到四至五级海况^[7]。

1 抗风浪浮码头设计方案

1.1 设计思路

针对现有传统浮码头存在的问题，基于运动学与动力学原理，将浮码头主体结构的趸船视为海面上的一个漂浮体，同样将其分为正常工作状态与防御风浪两种状态。

在工作状态下，平静及较为平静的海况（波高 $H_{1/3} \leq 1.5$ m）时，给趸船设置适当的工作状态约束，尽可能减小其可变位移，保证浮码头满足船舶停靠和装卸作业的正常使用要求；在防御风浪状态，要解除部分关键约束，并通过设置抗风浪滑动槽给趸船留有足够的变位富余度，以便趸船在大风浪作用下自由漂浮，最大限度地靠自身漂

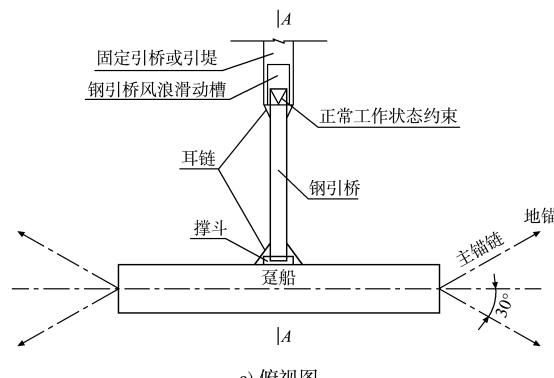
浮消耗风浪作用能量，从而减少系泊设施约束力，提高生存能力。

为了减少浮码头组件数量，并且提高船舶靠泊能力，采用单个大尺寸趸船代替多个中小尺寸趸船方案。另外，传统浮码头主锚链一般采用交叉链布设形式（图 1），可否采用更优的形式，需要开展试验研究。

综合环境条件和使用要求，建议抗风浪浮码头技术指标如下：工作状态，波高 $H_{1/3} \leq 1.5$ m， $T \leq 5$ s；生存状态，波高 $H_{1/3} \leq 3.0$ m， $T \leq 7$ s。

1.2 设计方案

抗风浪浮码头设计方案见图 2，浮码头由趸船、支撑系统（引桥及撑斗）、锚系系统（锚链及锚碇体）组成，取消传统浮码头的连接系统。



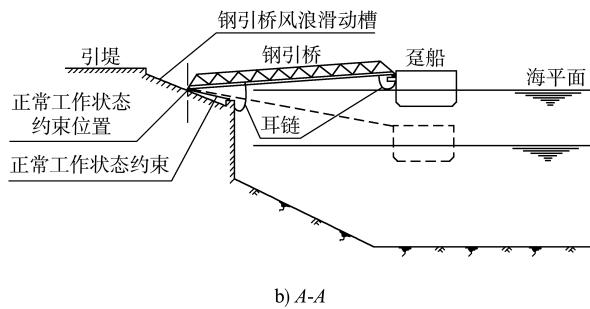


图2 抗风浪浮码头设计方案

各组成部分如下: 1) 趸船。与现行浮码头设计与制造方法类同, 其结构强度要满足抗御风浪要求。2) 引桥。主体结构与现行浮码头之兼撑杆作用的钢引桥类同, 但须在接陆端设置正常工作状态约束。3) 引桥撑斗。焊制在趸船上, 用以搁置钢引桥, 其宽度须满足钢引桥支承宽度的要求并留有富余, 长度须满足引桥支承的要求并可放置橡胶防冲垫。4) 引桥抗风浪滑动槽。设置于固定引桥或引堤端部, 用以搁置钢引桥, 并满足浮码头抗御风浪时钢引桥滑动要求。5) 耳链环。设置于趸船上引桥撑斗两侧及固定引桥或引堤端部之钢引桥抗风浪滑动槽两侧, 用以悬挂耳链, 联系趸船与钢引桥, 以及固定引桥或引堤与钢引桥。6) 耳链。系于趸船、钢引桥及固定引桥或引堤的耳链环上, 用以保护钢引桥不脱离撑斗或滑动槽。耳链和耳链环的强度要保证任何情况下钢引桥均不得脱离撑斗或滑动槽落于海水中。7) 主锚链、锚体。与现行浮码头类同, 但探讨采用人字锚方式, 即水上锚系点在趸船纵向中轴线上, 出链角度取 30° 。

设计方案中, 钢引桥设置在趸船横向中轴线的向岸侧, 一则使用方便, 二则引桥支撑点选在纵摇的中心轴上, 有利于引桥受力和搁置稳定。抗风浪滑动槽是方案的关键点之一, 其长度应满足浮码头建设地点遭受最大台风风浪袭击时, 趸船在风浪作用下的最大横移幅度要求。正常工作状态约束设置于引桥抗风浪滑动槽上, 结构形式可采用支座式、插销式及锚链式, 最简便的是图2中的锚链式, 其锚碇挂钩埋设于抗风浪滑动槽中部, 锚链分两支悬挂于钢引桥端部两侧。在浮码

头正常工作状态时, 工作约束承受趸船在船舶靠泊作业以及正常海况下所受的横向水平力, 以限制趸船的横向位移, 满足浮码头的使用要求。在浮码头抗御大风浪及防台时, 可以人工解除工作约束, 也可以正常毁损, 进入防御风浪状态; 要求防台结束后恢复工作约束简便可行。

防风浮码头另一个设计关键点是采用人字锚方式的锚系系统, 即在趸船纵向中轴线的两端设置两对纵向人字链, 接水下固定锚碇体。这种布置方式是锚系点选择在了趸船横摇的中轴线上, 理论上分析, 在垂直于码头线的横向波浪及斜向波浪的作用下, 与现行浮码头的纵向交叉锚相比, 在锚链长度和链径相同情况下, 趸船的横摇平稳度应趋于改善, 这是因为交叉纵向锚链在静力学分析中对横摇、艏艉摇的稳定有利, 从动力学的观点则不如同样性质的约束施加于中轴线上合理, 这个结论需要通过试验进行验证。

2 模型试验验证

2.1 模型试验设计及制作

为验证抗风浪浮码头设计方案的合理性和可行性, 并提供部分关键参数, 在试验水池中开展浮码头系泊波浪物理模型试验。采用趸船原型尺度 $86\text{ m} \times 13\text{ m} \times 2.5\text{ m}$, 吃水 1.0 m , 钢引桥尺度 $21.4\text{ m} \times 4.2\text{ m}$, 质量 18.39 t , 锚链链径选用 $\phi 62\text{ mm}$, 单位质量 83 kg/m , 撑斗处设置D300护舷, 用于缓冲吸能。模型长度比尺确定为 $1:30$, 模型设计和制作遵循重力相似准则^[8], 对锚链和护舷还考虑弹性相似。

试验水深取 8 、 12 m , 采用规则波进行试验, 试验波高取 1.0 、 1.5 、 2.0 、 3.0 、 4.0 m 共5种波高, 波陡取 $1/18$ 和 $1/15$ 两种, 波向取 45° 、 60° 、 90° 共3个方向。锚系方式考虑人字锚和交叉锚两种, 锚链水平长度按照4倍水深设置, 其布设方向与趸船纵轴线的交角取 30° 。模型布置见图3。

试验测试参数包括锚链拉力、趸船位移(以横摇为代表)、引桥端部位移(纵移), 模型

试验测点布置见图 3。

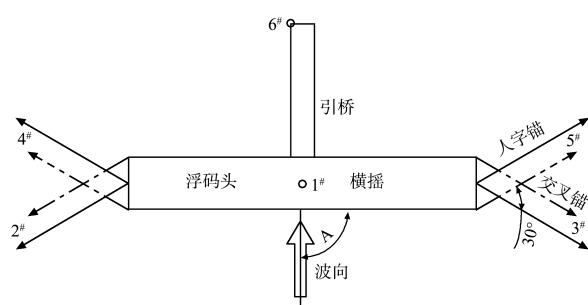


图 3 模型及试验测点布置

2.2 试验结果及分析

在波高 1.5 m 以下工况, 浮码头处于工作状态, 这时趸船的平稳度是浮码头性能的主要指标, 试验主要测试趸船的横摇和位移, 以及引桥工作约束的锚链拉力; 当波高大于 1.5 m 时, 浮码头处于防御风浪状态, 这时趸船的安全性成为浮码头的主要指标, 主要测试主锚链拉力以及引桥在抗风浪滑动槽中的滑移范围。试验测试结果见表 1。

表 1 试验测试结果

编 号	水深/ m	波高/ m	波向/ (°)	波陡	锚系 方式	锚链拉力/kN								引桥 位移/m	1#趸船横摇/(°)				
						2#		3#		4#		5#			前倾		后倾		
						最大	平均	最大	平均	最大	平均	最大	平均		最大	平均	最大	平均	
1	8	1.5	90	1/15	交叉	160	100	140	100	-	-	-	-	-	0.6	-10.0	-8.7	8.2	6.8
2	8	2.0	90	1/15	交叉	2 350	470	1 050	240	-	-	-	-	-	1.2	-13.0	-11.2	12.2	9.9
3	8	3.0	90	1/15	交叉	490	250	1 160	290	-	-	-	-	-	3.0	-	-	-	-
4	8	4.0	90	1/15	交叉	2 750	390	3 190	460	-	-	-	-	-	3.6	-	-	-	-
5	8	1.5	90	1/15	人字	220	60	50	40	270	130	50	40	-	-	-12.1	-9.4	8.6	6.4
6	8	2.0	90	1/15	人字	110	50	50	50	-	-	-	-	-	0.9	-12.2	-10.8	11.5	9.9
7	8	3.0	90	1/15	人字	140	80	50	50	-	-	-	-	-	3.0	-	-	-	-
8	8	3.0	45	1/15	人字	540	240	1 430	580	160	140	80	40	-	-	-	-	-	-
9	8	4.0	90	1/15	人字	860	230	430	110	-	-	-	-	-	3.9	-	-	-	-
10	12	1.5	90	1/15	交叉	650	330	780	220	-	-	-	-	-	0.3 (约束)	-11.0	-9.0	8.3	6.7
11	12	2.0	90	1/15	交叉	4 370	1 160	4 370	940	-	-	-	-	-	1.5	-12.5	-10.6	10.6	8.0
12	12	3.0	90	1/15	交叉	1 810	290	1 970	440	-	-	-	-	-	2.4	-	-	-	-
13	12	3.0	60	1/15	交叉	700	360	2 750	1 510	240	90	140	80	-	-	-	-	-	-
14	12	3.0	45	1/15	交叉	1 240	600	1 650	840	110	80	140	120	-	-	-	-	-	-
15	12	4.0	90	1/15	交叉	3 970	570	3 590	640	-	-	-	-	-	3.3	-	-	-	-
16	12	1.5	90	1/15	人字	320	130	50	40	-	-	-	-	-	0.6	-10.3	-9.0	8.6	7.4
17	12	2.0	90	1/15	人字	780	140	1 050	150	-	-	-	-	-	1.2	-12.0	-10.1	9.9	8.6
18	12	3.0	90	1/15	人字	140	80	140	50	-	-	-	-	-	2.4	-	-	-	-
19	12	3.0	60	1/15	人字	700	280	2 730	920	50	30	30	30	-	-	-	-	-	-
20	12	3.0	45	1/15	人字	1 000	260	1 430	450	50	40	110	70	-	-	-	-	-	-
21	12	4.0	90	1/15	人字	780	500	410	180	-	-	-	-	-	3.0	-	-	-	-
22	8	1.0	90	1/18	人字	30	30	30	30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
23	8	2.0	90	1/18	人字	50	30	30	30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
24	8	3.0	90	1/18	人字	160	90	300	80	30	30	30	30	-	-	-	-	-	-
25	12	1.0	90	1/18	交叉	80	50	80	40	50	40	30	20	-	-	-	-	-	-
26	12	2.0	90	1/18	交叉	220	150	300	160	30	20	30	20	-	-	-	-	-	-
27	12	3.0	90	1/18	交叉	1 620	300	2 620	350	30	20	30	20	-	-	-	-	-	-
28	12	4.0	90	1/18	交叉	9 340	2 840	12 180	3 160	140	110	140	110	-	-	-	-	-	-
29	12	1.0	90	1/18	人字	80	40	30	20	30	20	0	0	-	-	-	-	-	-
30	12	2.0	90	1/18	人字	50	30	50	30	30	30	30	30	-	-	-	-	-	-
31	12	3.0	90	1/18	人字	430	100	590	80	80	60	80	60	-	-	-	-	-	-
32	12	3.0	45	1/18	人字	4 010	3 460	1 790	1 170	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
33	12	4.0	90	1/18	人字	8 960	1 800	8 590	2 070	190	110	140	100	-	-	-	-	-	-

分析表中数据发现: 1) 测试参数数值与水深、波高、波陡和波向均有关; 2) 在其它条件相同时, 斜向浪($45^\circ \sim 60^\circ$)产生的最大锚链拉力较正向(90°)浪产生的最大锚链拉力大, 这是由于斜向浪对趸船会产生较大力矩所致; 3) 交叉锚与人字锚相比, 在正向浪的作用下, 交叉锚最大锚链拉力是人字锚最大锚链拉力的4~5倍; 在斜向浪的作用下, 交叉锚最大锚链拉力是人字锚最大锚链拉力的1.1~1.2倍, 两者相差不多。

2.3 试验结论

在风浪作用情况下, 对比运动状态, 对于限制水平位移, 人字锚与交叉锚作用基本相同; 对于限制摇摆(横摇), 人字锚优于交叉锚。对比锚链拉力, 人字锚主锚链拉力明显小于交叉锚主锚链拉力。充分说明了人字锚系泊方式明显优于交叉锚。

3 抗风浪浮码头设计关键参数确定原则

抗风浪浮码头设计结构计算内容基本同传统浮码头, 包括趸船整体及局部强度计算、趸船浮游稳定性及横倾计算、锚系设施计算、支撑系统构造与计算等, 特殊之处在于工作约束链的计算和抗风浪滑动槽设计。

工作约束链主要考虑设计拉力, 可取趸船所受的船舶撞击力、挤靠力、系统力以及作用于趸船上的波高 $H \leq 1.5\text{ m}$ 时波浪力等诸横向水平力中的数值最大者; 在构造上, 工作约束链的长度不宜过长, 以保证趸船横向水平位移不能过大(根据经验一般不大于0.3m), 满足船舶靠泊使用要求; 当工作约束链所受的拉力超过设计拉力时会自行拉断, 顺利进入抗风浪状态。为此, 工作约束链在设计时要采用较低的安全系数, 一般可取 $k = 1.05 \sim 1.10$ 。

抗风浪滑动槽的设计主要包括宽度、长度和倾斜角共3个参数, 其中宽度应大于撑杆及钢引桥的宽度, 并有一定的富余; 抗风浪滑动槽的长

度要满足高潮位时趸船在波浪作用下的漂浮范围, 而且还要考虑到平均潮位时发生大波浪的可能性, 此时主锚链较松, 芬船漂移的幅度可能大于高潮位时的幅度, 因此抗风浪滑动槽的长度是由波浪的水平振幅、潮位的高低、码头前沿水深以及主锚链的长度综合确定; 滑动槽倾斜角可取 $20^\circ \sim 45^\circ$, 其与滑动槽长度有一定关系, 通常情况下, 滑动槽长度大时倾斜角度取小值。

4 结语

- 1) 传统浮码头存在约束过紧、趸船可变位移小等特点, 适用于风浪掩护条件好的港口; 但在较大风浪作用下, 构件因所受冲击荷载大而易损, 整体抗风浪能力差。
- 2) 试验表明, 浮码头锚系结构采用人字锚方式较传统交叉锚方式在抗风浪能力方面有明显优势。
- 3) 浮码头存在过程分为正常工作与防御风浪两种状态, 采用设置抗风浪滑动槽、工作约束和人字锚系统等关键措施, 既保证正常工作状态限制位移要求, 又保证通过解除工作约束使趸船在抗风浪状态能在一定限度自由飘浮而耗散波能, 从而提高抗风浪能力。
- 4) 模型试验证明了抗风浪浮码头方案的有效性。

参考文献:

- [1] 高承德.斜坡码头及浮码头设计与施工规范修编简况: 兼谈规范送审稿中有关浮码头的几个问题[J]. 水运工程, 1998(10): 3-5.
- [2] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 码头结构设计规范: JTS 167—2018[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.
- [3] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 海港工程设计手册(中册)[M]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.