

· 港口 ·



涌浪作用下趸船码头与系泊船只 运动响应特征数值模拟研究*

郑旦妮¹, 钱丽云², 胡 杰¹, 周 勤¹, 张春泽¹

(1. 重庆交通大学, 西南水利水运工程科学研究院, 重庆 400074;

2. 长江勘测规划设计研究院, 重庆 400016)

摘要: 涌浪的发生对相应水域内的船只和码头的安全稳定有直接影响。在顺直的数字河道中, 建立码头与船舶的三维数值模型, 模拟滑坡涌浪作用下浮码头以及系泊船舶的运动响应过程, 分析码头分别布置于同岸侧和对岸侧时的船舶运动特征与各缆绳的受力特征, 总结船舶与趸船码头在涌浪作用下的动态响应规律和系泊安全情况。研究表明: 遭遇 0.5 m 高涌浪时, 两种岸别布置情形下, 江轮均发生船体失稳, 带动趸船码头失稳并发生系统缆绳破断, 船舶表现出的稳定特征与自由行驶状态时完全不同。相较于同岸布置, 对岸布置情形下, 江轮-趸船停泊系统迎浪角和岸壁反射强度更显著, 进而使得各运动参数和系统缆力极值也更大。

关键词: 涌浪; 数值模拟; 趸船; 运动特征; 系统缆力

中图分类号: U656; TV147

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)10-0035-07

Numerical simulation study on motion response characteristics of barge docks and moored vessels under surging waves action

ZHENG Danni¹, QIAN Liyun², HU Jie¹, ZHOU Qin¹, ZHANG Chunze¹

(1. Southwestern Research Institute for Hydraulic and Water Transport Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. Changjiang Institute of Survey Planning Design and Research, Chongqing 400016, China)

Abstract: The occurrence of surging waves has a direct impact on the safety and stability of ships and docks in the corresponding waters. This article establishes a three-dimensional numerical model of docks and ships in a straight digital river channel, simulates the motion response process of floating docks and moored ships under the action of landslide surges, analyzes the ship motion characteristics and the force characteristics of each cable when the docks are arranged on the same and opposite sides, and summarizes the dynamic response laws and mooring safety of ships and pontoon docks under the action of surges. The research shows that when encountering waves with a height of 0.5 m, both types of shore arrangements can cause instability in the hull of the river vessel, leading to instability of the barge dock and cable breakage. The stability characteristics exhibited by the vessel are completely different from those in a free sailing state. Compared with the same shore arrangement, the opposite shore arrangement results in a more significant wave angle and shore wall reflection intensity for the river vessel barge berthing system, leading to larger extreme values for various motion parameters and mooring forces.

Keywords: surging waves; numerical simulation; pontoon; movement characteristics; mooring force

收稿日期: 2025-02-06

*基金项目: 重庆市水利科技项目(CQSL-2024021)

作者简介: 郑旦妮(2000—), 女, 硕士研究生, 研究方向为水力学及河流动力学。

通信作者: 周勤(1981—), 女, 正高级工程师, 研究方向为生态水力学。E-mail: 176147813@qq.com

涌浪是一种特殊的水动力现象,具有快速传播、高能量冲击和复杂波浪结构的特点。涌浪的发生不仅对水域环境产生影响,还直接对水域内的船只和码头带来强烈的波浪冲击。这种冲击不仅影响船舶和码头的结构安全,还通过与这些结构物的相互作用改变了水流模式,导致船舶的横摇、纵摇等运动更加剧烈,进而影响船舶和趸船的系缆系统稳定性^[1],更严重的甚至损毁水利、水运、市政等工程设施^[2]。许多学者致力于涌浪作用下船舶与码头的相互作用以及对系缆系统影响的研究。牟萍等^[3]借助万州河段地形资料建立滑坡涌浪三维物理模型试验,对涌浪作用下3类船舶的航行安全阈值进行研究,将承灾体河道分成3个子区域;Zhou等^[4]研究了三峡库区红岩子滑坡涌浪对水体和环境的影响,以及对船舶的安全运行和泊位的设计,为航道和码头的安全管理提供了理论依据和实际指导;徐晓菲等^[5]通过水槽物理模型试验,探讨了三峡库区滑坡涌浪对趸船撞击力的影响,围绕船舶锚链拉力展开研究,发现涌浪导致的锚链拉力变化规律,尤其在不同的波高、周期及水深条件下,可以通过多元回归分析来预测锚链的最大拉力受浪初始波高的影响;胡杰龙等^[6]通过小比尺物理试验,研究了三峡库区滑坡涌浪作用下船舶锚链拉力。

然而,涌浪传播对船舶的作用是一个极其复杂的流固耦合过程,属于强时变非线性问题。能量在水体-船体-岸壁之间相互传递并不断发生形式转换,传递模式包括了直接传递和间接传递等多种形式。这一复杂过程显著放大了物理试验过程中的比尺效应,同样对计算机算力与数值模型稳定性提出严苛的要求^[7]。随着计算机硬件和数学模型的发展,相关数值研究也不断被报道。Nam等^[8]采用数值方法分析了过往船舶船行波对码头系泊船舶的影响;Shahrabi等^[9]模拟多个浮体在水体作用下的相互激荡及稳定特征;Faltinsen^[10]利用CFD(计算流体动力学,computational fluid dynamics)和VOF(体积分数,volume of fluid)技术提升了数值模拟的精度,使得涌浪作用下的趸船码头受力分析更加准确,为优化趸船码头系泊设计和提升安全性提供了理论支持。

本文在顺直的数字河道中,建立码头与船舶的三维数值模型,模拟了滑坡涌浪作用下浮码头以及系泊船舶的运动响应过程,分析了码头分别布置于同岸侧和对岸侧时的船舶运动特征与各缆绳的受力特征,总结了船舶与趸船码头在涌浪作用下的动态响应规律和系泊安全情况。

1 数学模型及验证

1.1 数值模型

采用Flow-3D软件对模型进行计算,Flow-3D将连续性方程和不可压缩黏性流体运动的Navier-Stokes方程作为控制方程,采用模拟在高应变率的紊流运动中较为准确的RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型,该模型主要控制方程有连续方程、动量方程、紊动能 k 方程,紊动耗散率 ε 方程^[11]。此外,采用VOF方法追踪自由液面,并运用FAVOR技术模拟复杂的边界情况。

连续性方程:

$$\frac{\partial}{\partial x}(uA_x) + \frac{\partial}{\partial y}(uA_y) + \frac{\partial}{\partial z}(uA_z) = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(uA_x \frac{\partial v}{\partial x} + vA_y \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + G_y + f_y \quad (3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(uA_x \frac{\partial w}{\partial x} + vA_y \frac{\partial w}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z \quad (4)$$

式中: ρ 为水密度; V_F 是可流动的体积分; A_x 、 A_y 和 A_z 分别为 x 、 y 和 z 方向上可流动的面积分; u 、 v 和 w 分别对应 x 、 y 和 z 方向上的速度分量; G_x 、 G_y 和 G_z 分别为物体在 x 、 y 和 z 方向上的重力加速度; f_x 、 f_y 和 f_z 分别为物体在 x 、 y 和 z 方向上的黏滞力加速度; p 为水的压强。

1.2 模拟方法验证

通过物理试验成果,验证数值方法研究波浪作用下水面浮体运动与停泊系统受力过程的精度。将一个长20 m、高4.8 m的浮箱通过锚链系泊于河底,系泊点距水面2.4 m。锚链链环杆直径 d 为

100 mm, 锚链长 60 m, 水中质量为 230 kg/m。浮箱静止时锚链拖地长度为 20 m。水深 $H = 20$ m,

波高 2.5 m, 采用周期为 5~15 s 的重力波进行模拟。浮箱结构断面尺寸与布置方式见图 1。

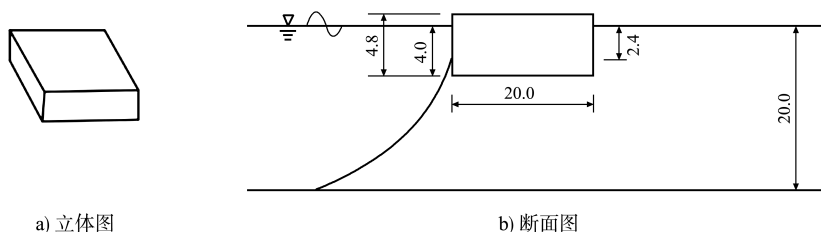
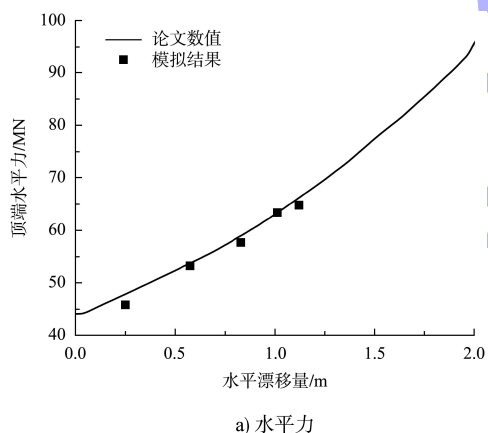


图 1 浮标的单锚系统 (单位: m)

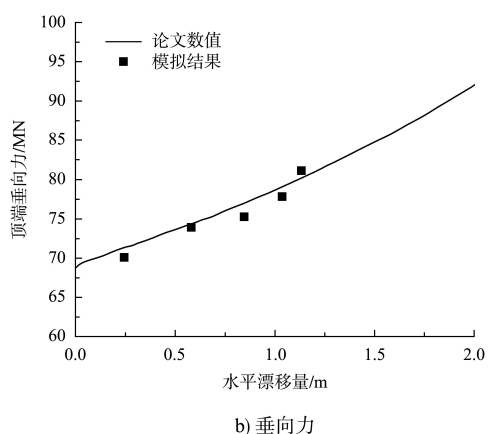
Fig. 1 Single anchor system of the buoy (unit: m)

设置与物理试验相同边界条件。进口采用波浪边界, 定义水深、波高以及周期。出口边界采用自由出流边界, 两侧采用对称边界条件, 底部采用壁面边界条件, 顶部设置压力边界条件, 模型总网格数 350 万个。

模拟结果与试验结果对比见图 2, 两者吻合较好, 误差在可控范围内, 说明所用的数值试验及其参数设置基本可满足数值模型研究的要求。



a) 水平力



b) 垂向力

图 2 箱体顶端作用力与水平漂移量的对应关系
Fig. 2 Corresponding relationship between top force of box and horizontal drift

2 数值模型设计

参照长江三峡库区奉节段河道特征, 建立数字河道模型, 河道长 5 km、河道净宽 450 m、水深 160 m。采用笛卡尔正交网格, 河道网格尺寸 4 m, 码头与船舶区域逐级加密, 最小网格度 1 m。为模拟河岸一侧滑坡或危岩坠江涌浪, 在河道入口下游右岸 1 km 处设置涌浪入口边界。分别在涌浪入口下游 1 km 处左、右岸布置浮码头 (趸船码头)。涌浪入口波浪谱为: 波高 5 m、周期 100 s, 传播到达码头处浪高约 0.5 m。三维模型平面见图 3。

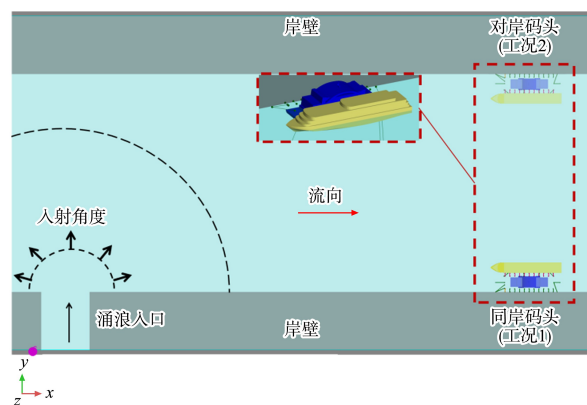
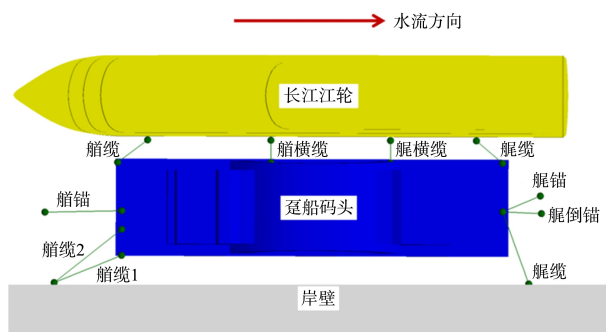


图 3 三维模型平面

Fig. 3 Plan of 3D model

趸船码头配备了 6 根钢缆, 每根缆绳直径为 96 mm, 破断力为 5.82 MN; 锚链直径为 192 mm, 破断力为 11.64 MN。系泊船舶选取长江江轮客渡船, 其本身装备有 4 根直径为 96 mm 的钢缆。具体系缆方式见图 4。船舶参数统计数据见表 1, 模拟过程中 6 个自由度全部开启。分别模拟码头布

置于浪源同岸或对岸两种情形时，系泊江轮与趸船码头的运动响应过程。



注：图为同岸码头，相应镜向方案即为对岸布置。

图 4 系统方式
Fig. 4 Cable tying method

表 1 趸船与系泊船只主要参数

Tab. 1 Main parameters of barges and moored vessels

船型参数	垂线间长 L/m	型宽 B/m	型深 D/m	排水量 m^3
长江江轮	150.0	21.5	10.3	5 213
趸船	110.0	21.7	—	2 665

3 结果与分析

3.1 涌浪作用下系泊船舶运动响应过程分析

涌浪生成后，携带大量能量向四周呈扇形传播。由于河道岸壁限制，射向对岸的涌浪经过直接反射及爬坡一再入水一成浪，新生成的浪跟随首浪持续向河道上、下游传播。传至码头处，水体的峰谷运动迫使船体随之作出响应。涌浪作用下，不同布置方案时长江江轮与趸船运动响应过程见图 5。对于码头布置于同岸侧的情况，系泊船只首先向码头方向顺时针摇动，其中横摇响应最为剧烈，仅 10 s 左右，横摇角度就超过 $[-20^\circ, 20^\circ]$ 。随后，在船只自身恢复力矩作用下，开始逆时针摇动。除横摇外，江轮纵摇与艀摇均较弱，但横荡、纵荡与垂荡幅度较大。与此同时，趸船仅横荡与横摇较为显著，在江轮和岸壁拉扯下，趸船横荡值在 $[-0.5 \text{ m}, 0.5 \text{ m}]$ 内持续变化。由于江轮与趸船的系缆位置均高于质心，约 70 s 后，江轮与趸船横摇角度均处于负值范围，船体均向岸壁倾斜。

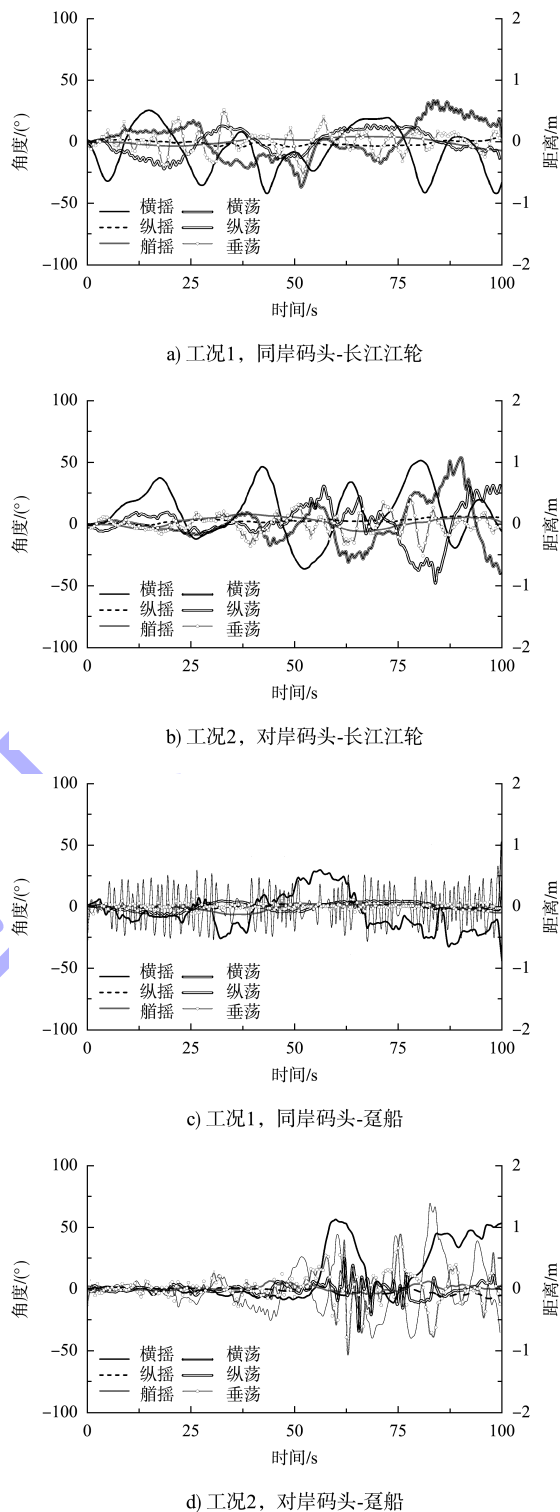


图 5 涌浪作用下，不同布置方案时长江江轮与趸船运动响应过程

Fig. 5 Motion response process of Yangtze River vessels and barges of different arrangement schemes under surging waves action

由于迎浪方向不同，对岸布置的工况 2 迎浪角更大，江轮与趸船呈现出与工况 1 显著的运动差异。在前 50 s 内，涌浪作用主要体现在直接迎

浪的江轮上,发生倾向岸壁的横摇(逆时针),最大角度约为 40° ,横荡、纵荡以及垂荡幅值均较小;由于江轮体型较趸船更大,在其遮蔽作用下,其间趸船自由度运动均不显著。随后,由于江轮大倾角横摇失稳,横荡、纵荡以及垂荡剧烈程度不断增加,受缆绳作用,趸船也突然失稳,横摇倾角接近 60° ,平动参数幅值不断增大。

总体来看,虽然运动响应过程差异较为显著,但两种布置方案条件下,遭遇 0.5 m 浪高涌浪后,江轮-趸船停泊系统中两者最终均发生失稳。同岸布置条件下,江轮与趸船均受到涌浪直接作用,两者在缆绳和水体激励作用下逐渐发生推移。在对岸布置条件下,由于迎浪角度和体型遮蔽,主要由江轮受到涌浪直接作用,又由于江轮排水量远大于趸船,其失稳后迅速导致趸船失稳。对于上述过程,岸壁除了形成停泊系统两侧不对称水动力环境之外,其对涌浪的反射作用也是导致江轮-趸船迅速失稳的重要原因一。涌浪在传播过程中受到岸壁和趸船码头的阻碍后,除去小部分的能量损耗,大部分动能都转换为波浪的重力势能,经岸壁反射后重新作用于停泊系统,加速了系统失稳过程。

3.2 船舶运动特征与系缆安全性

在涌浪作用过程中,江轮与趸船各自的复杂非线性运动通过缆绳构成了复杂非线性系统。当涌浪推动江轮向码头方向移动时,系缆绳处于松弛状态,无法对船舶进行有效约束,江轮与码头之间发生碰撞。而后,船舶在涌浪推力和码头反作用力的共同影响下向背离码头的方向移动,系缆绳迅速拉紧,导致系缆力骤增,达到该时段极大值。该过程持续发展直到缆绳过度受力发生断裂。因此,在涌浪条件下,必须充分考虑系缆绳的动态响应和极限受力,以确保停泊系统的安全性与可靠性。

艏缆主要用于限制船首的横向和纵向位移,防止船首在外力作用下发生过大摆动;艉缆则用于限制船尾的位移,保持船舶在码头的稳定位置。艏缆和艉缆的有效配合能够显著提高系泊船舶的稳定性,减小涌浪和水流激荡对船舶运动的影响。而横缆的主要作用是抵抗船舶的横向运动,同时传递涌浪的横向分量力,因此,横缆不仅需要维

持船舶的横向位置,还必须承受船舶横摇时的额外负荷。涌浪作用下,不同布置方案时长江江轮与趸船船舶系缆力变化过程见图6。

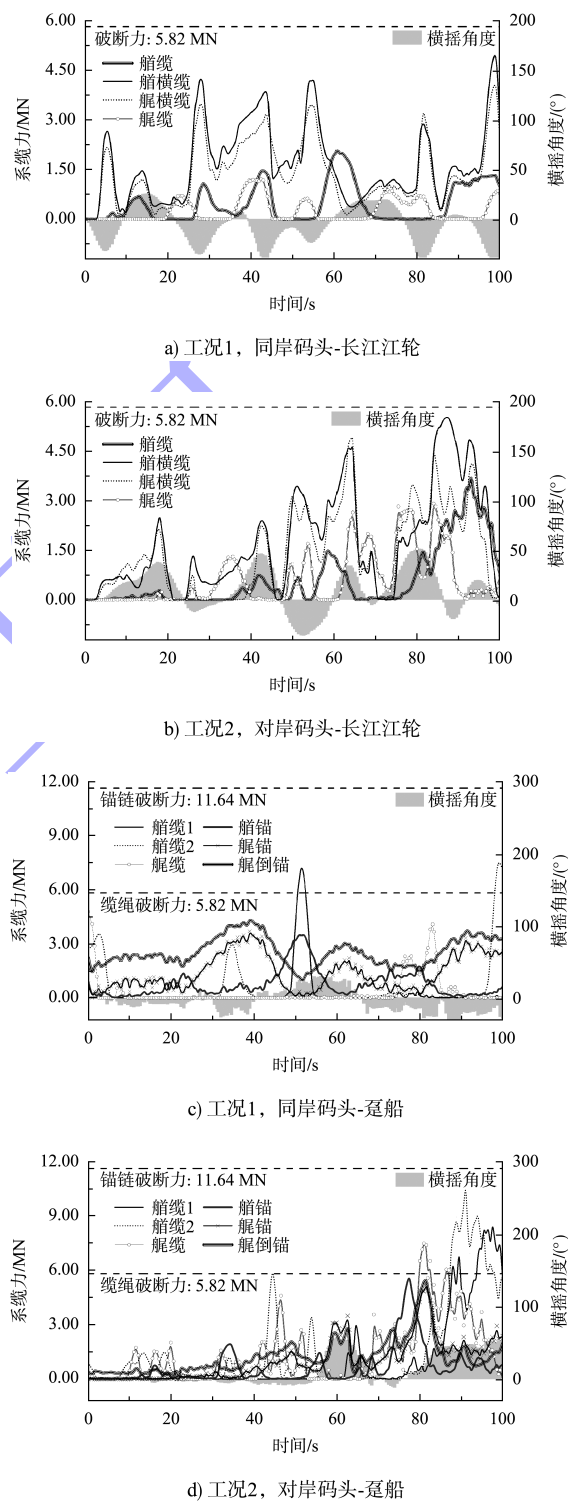


图6 涌浪作用下,不同布置方案时长江江轮与趸船船舶系缆力变化过程

Fig. 6 Variation process of mooring force between Yangtze River vessels and barges of different arrangement schemes under surging waves action

由图 6 可知,大部分时段,两种布置方案下,江轮的各缆受力变化与横摇角度呈清晰的正相关性,而对于趸船则不尽然。由此可以推断,在江轮-趸船系统中,由于江轮排水量显著高于趸船,趸船始终处于从动者,其稳定性以及系缆力变化均由江轮运动主导。

两种布设方式遭遇涌浪过程中江轮与趸船运动参数与系泊力极值统计见表 2,发现对岸布设情况时全部参数均高于同岸布设情况。这主要是因为对岸布设时,船舶的迎浪角较大,江轮-趸船系统直接

吸收的能量较大,同时壁面反射强度更大,而反射的涌浪又进一步作用上述停泊系统。根据统计结果,趸船的艏缆最大系缆力在两种布置方案时最大系缆力均已超过破断值,而艉缆的最大系缆力在对岸布置工况下的最大系缆力也超过了破断值。表 2 中趸船 3 根锚链(艏锚、艉锚、艉倒锚)的最大系缆力均未达到 8.00 MN,远小于锚链设计的破断力 11.64 MN。因此,各锚链的最大系缆力均处于安全范围内。在一定有限运动范围内,趸船缆绳主要控制其平面运动,而锚链主要控制其垂向运动。

表 2 船舶响应特征参数和最大系缆力
Tab. 2 Ship response characteristic parameters and maximum mooring force

船型	工况	最大横	最大纵	最大艏	最大横	最大纵	最大垂	艏缆最大	艏横缆最	艉横缆最	艉缆最大	艏锚最大	艉锚最大	艉倒锚最
		摇角度/ (°)	摇角度/ (°)	摇角度/ (°)	荡幅值/ m	荡幅值/ m	荡幅值/ m	系缆力/ MN	大系缆力/ MN	大系缆力/ MN	系缆力/ MN	系缆力/ MN	系缆力/ MN	大系缆力/ MN
趸船	1	45.25	4.01	6.53	1.33	0.92	1.02	7.47	—	—	4.77	3.52	3.69	4.36
	2	57.37	7.55	6.93	1.53	1.18	1.92	9.96	—	—	7.49	4.55	5.03	5.71
江轮	1	42.15	4.20	7.07	0.78	1.04	0.55	2.09	4.55	4.09	1.20	—	—	—
	2	51.72	6.46	8.00	1.18	1.11	0.56	3.97	5.23	5.06	1.87	—	—	—

注:趸船的艏缆最大系缆力此处取艏缆 1 和艏缆 2 的平均值。

本研究中涌浪主浪高度相对较小,仅为 0.5 m,因而引起的趸船码头上下波动有限,所以锚链系统受力较小,保持了较高的稳定性。然而,在涌浪尤其是江轮的牵动下,趸船码头逐渐发生较为剧烈的横摇与平动参数变化,艏缆和艉缆承受较大的力,从而发生破断。

4 结论

- 1) 虽然涌浪传播至码头时主浪高度仅 0.5 m,但两种岸别布置情形下,江轮-趸船停泊系统均发生船体失稳,并且趸船系缆力均超过断缆限值。江轮表现出的稳定特征与自由行驶状态时完全不同。
- 2) 由于江轮排水量相对于趸船更高,在江轮-趸船停泊系统遭遇涌浪后的运动响应过程中,江轮的运动特征占主导地位。
- 3) 对岸布置情形下,江轮-趸船停泊系统迎浪角和岸壁反射强度较同岸布置更显著,进而使得各运动参数和系缆力极值也更大。

参考文献:

[1] HUANG B L, YIN Y P, CHEN X T, et al. Experimental modeling of tsunamis generated by subaerial landslides: two case studies of the Three Gorges Reservoir, China[J]. Environmental earth sciences, 2014, 71(9): 3813-3825.

[2] 王梅力,田野,杨胜发,等. 水流动力条件下滑坡涌浪初始波浪特征研究[J]. 水运工程, 2022(8): 129-134, 171. WANG M L, TIAN Y, YANG S F, et al. Initial wave characteristics of landslide surges under current condition[J]. Port & waterway engineering, 2022(8): 129-134, 171.

[3] 牟萍,王平义,韩林峰,等. 滑坡涌浪灾害下三峡库区船舶航行安全阈值[J]. 水运工程, 2020(3): 74-80. MU P, WANG P Y, HAN L F, et al. Navigation safety thresholds of ships exposed under impulse waves induced by landslides in Three Gorges Reservoir areas[J]. Port & waterway engineering, 2020(3): 74-80.

[4] ZHOU J W, XU F G, YANG X G, et al. Comprehensive analyses of the initiation and landslide-generated wave processes of the 24 June 2015 Hongyanzi landslide at the Three Gorges Reservoir, China[J]. Landslides, 2016, 13(3): 589-601.

- [5] 徐晓菲, 王平义. 三峡库区滑坡涌浪对趸船撞击力的影响[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(17): 7093-7100.
XU X F, WANG P Y. Effects of landslide surge on impact force of pontoon in the Three Gorges Reservoir area [J]. Science technology and engineering, 2020, 20 (17): 7093-7100.
- [6] 胡杰龙, 王平义, 任晶轩, 等. 三峡库区滑坡涌浪作用下船舶锚链拉力试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2017(6): 14-21.
HU J L, WANG P Y, REN J X, et al. Experimental study of ship mooring force under action of landslide in Three Gorges Reservoir area [J]. Hydro-science and engineering, 2017(6): 14-21.
- [7] 汤小霞. 波浪作用下锚泊系统动力响应的数值模拟[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.
TANG X X. Numerical simulation on hydrodynamic response of wave action on mooring system [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006.
- [8] NAM B W, PARK J Y. Numerical simulation for a passing ship and a moored barge alongside quay [J]. International journal of naval architecture and ocean engineering, 2018, 10(5): 566-582.
- [9] SHAHRABI M, BARGI K. Numerical simulation of multi-body floating piers to investigate pontoon stability [J]. Frontiers of structural and civil engineering, 2013, 7(3): 325-331.
- [10] FALTINSEN O M. Hydrodynamics of high-speed marine vehicles [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2006.
- [11] 侯仲荃, 李锐, 李晓舟, 等. 基于 Flow-3D 的新型半圆形构件水动力特性研究 [J]. 水运工程, 2023 (4): 20-25, 128.
HOU Z Q, LI R, LI X Z, et al. Hydrodynamic characteristics of new semi-circular member based on Flow-3D [J]. Port & waterway engineering, 2023 (4): 20-25, 128.

(本文编辑 赵娟)

(上接第 34 页)

- [7] 宋红红. 波折钢板-钢覆复合材料防撞设施抗撞性能[J]. 中国科技论文, 2023, 18(2): 144-151, 165.
SONG H H. Crashworthiness performance of corrugated steel plate-steel clad composite anti-collision facilities [J]. China sciencepaper, 2023, 18(2): 144-151, 165.
- [8] 高世阳, 方海, 葛益玮, 等. 桥梁隔离式复合材料防船舶管桩受弯性能试验与设计[J]. 复合材料科学与工程, 2023(3): 39-43, 94.
GAO S Y, FANG H, GE Y W, et al. Test and design of flexural behavior of bridge isolation composite anti-ship collision pipe pile [J]. Composites science and engineering, 2023(3): 39-43, 94.
- [9] 李磊, 张兆德. 船舶与桥墩碰撞的数值模拟[J]. 船海工程, 2011, 40(5): 133-136.
- LI L, ZHANG Z D. Dynamic simulation of collision of ship and bridge pier [J]. Ship & ocean engineering, 2011, 40(5): 133-136.
- [10] 邓雅思, 耿波, 李嵩林, 等. 桥梁上部结构防船撞装置刚度分配研究[J]. 公路交通技术, 2024, 40(6): 42-50.
DENG Y S, GENG B, LI S L, et al. Stiffness distribution study on anti-ship collision device for bridge superstructure [J]. Technology of highway and transport, 2024, 40(6): 42-50.
- [11] 张贵平, 蔡雪尧, 邓斌, 等. 跨越航道桥梁主动防碰撞预警系统研究[J]. 水上安全, 2022(3): 44-50.
ZHANG G P, CAI X Y, DENG B, et al. Research on active anti-collision early warning system for bridge crossing waterway [J]. Maritime safety, 2022(3): 44-50.

(本文编辑 王传瑜)