



# 三峡库区吊嘴危岩崩塌涌浪生成传播及系泊船舶响应的数值模拟研究\*

李林洋<sup>1</sup>, 钱丽云<sup>2</sup>, 邹韬<sup>3</sup>, 张春泽<sup>1</sup>, 侯极<sup>1</sup>, 张绪进<sup>1</sup>

(1. 重庆交通大学, 重庆西南水运工程科学研究所, 重庆 400074;

2. 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 湖北 武汉 400016;

3. 广西壮族自治区水利电力勘测设计研究院有限责任公司, 广西 南宁 530023)

**摘要:** 针对三峡库区库岸带危岩体崩塌入水后引发的涌浪对航运设施及船舶安全造成的威胁问题, 开展了“危岩入水-涌浪传播-船舶响应”全链条耦合研究。以奉节段吊嘴危岩体及周边趸船码头-系泊长江江轮系统为对象, 利用三维数值模拟方法模拟危岩崩塌入水、涌浪生成与传播过程, 分析涌浪作用下趸船与系泊江轮的运动响应特性, 总结出吊嘴危岩涌浪生成与传播规律和系泊系统运动响应特征以及安全情况。研究发现, 危岩崩塌入水过程仅16 s, 首浪高度达26.4 m, 涌浪核心区因能量扩散、河床阻力等因素衰减显著, 但远端因反射叠加导致最大波高略高于首浪; 涌浪作用下, 趸船与江轮横摇响应最显著, 横荡、纵荡及垂荡运动同步性高, 缆绳受力接近破断风险, 存在碰撞与失稳隐患; 通过提前解缆可使船舶横摇极值大幅降低, 其后依靠自身回复力矩快速恢复稳定, 有效降低灾害风险。

**关键词:** 危岩崩塌; 涌浪; 数值模拟; 系泊船舶; 运动响应; 解缆策略

中图分类号: U656.5; TV139.2+3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)05-0184-08

## Numerical simulation of generation and propagation of surge waves and response of moored ships induced by Diaozui dangerous rock collapse in Three Gorges Reservoir area

LI Linyang<sup>1</sup>, QIAN Liyun<sup>2</sup>, ZOU Tao<sup>3</sup>, ZHANG Chunze<sup>1</sup>, HOU Ji<sup>1</sup>, ZHANG Xujin<sup>1</sup>

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

2. ChangJiang Survey, Planning, Design and Research Co., Ltd., Wuhan 400016, China;

3. Guangxi Water and Power Design Institute Co., Ltd., Nanning 530023, China)

**Abstract:** This study addresses the threat posed by surge waves induced by the collapse of unstable rock masses along the bank zone of the Three Gorges Reservoir to navigation facilities and ship safety. A fully coupled analysis covering the entire chain of “rock mass entering water-surge wave propagation-ship response” is carried out. Taking the Diaozui dangerous rock mass in the Fengjie section and the surrounding pontoon terminal-moored Yangtze River ship system as the research objects, a three-dimensional numerical simulation method is adopted to simulate the processes of dangerous rock collapse into water, surge wave generation and propagation. The motion response characteristics of the pontoon and moored Yangtze River ships under the action of surge waves are analyzed, and the laws of surge wave generation and propagation induced by the Diaozui dangerous rock, the motion response characteristics of the mooring system, and its safety status are summarized. The results show that the rock collapse and water entry process lasted only 16 seconds, with an initial wave height of 26.4 m. The surge

收稿日期: 2025-09-24 录用日期: 2025-10-17

\*基金项目: 重庆市水利科技项目(CQSL-2024021)

作者简介: 李林洋(2001—), 男, 硕士研究生, 研究方向为水力学及河流动力学。

通信作者: 张春泽(1986—), 男, 高级工程师, 研究方向为生态水力学。E-mail:373216627@qq.com

attenuated significantly in the core zone due to energy dispersion, riverbed resistance and other factors, whereas the maximum wave height at the far end was slightly higher than the initial wave as a result of wave reflection and superposition. Under the action of surge, the pontoon and river vessel exhibited the most significant roll response, with highly synchronized sway, surge and heave motions. The mooring ropes were subjected to tension close to the breaking load, posing risks of collision and instability. Preemptive untying of mooring ropes can substantially reduce the maximum roll amplitude of the vessel, enabling it to quickly restore stability via its own restoring moment and effectively mitigate disaster risks.

**Keywords:** rock collapse; surge; numerical simulation; moored ship; motion response; unmooring strategy

三峡库区作为国家重点内河航运通道的重要组成部分,是长江“黄金水道”的核心区段,其航运安全与沿岸设施的稳定性直接关系到区域经济发展。由于地质特征和库水位周期性涨落等因素,库岸带存在较多潜在危岩体。作为最具破坏性的地质灾害类型之一,危岩一旦入水,其挤压与撞击将引起水体剧烈变形、位移而形成涌浪,其在传播过程中,对影响范围内建筑物、船舶以及码头等承灾体构成强烈冲击,严重威胁其安全稳定。

诸多学者广泛关注涌浪的生成与传播特性,通常采用物理模型试验或数值模拟等方法开展研究。Mao等<sup>[1]</sup>提出CFD-DEM模型来研究滑坡与涌浪的相互作用过程;李学伟等<sup>[2]</sup>通过模型试验开展对比研究,分析溃坝与非溃坝条件下涌浪传播的波高、波长、周期及衰减规律;李荣辉等<sup>[3]</sup>基于水槽试验,探讨滑块形状、下滑高度、水深和体积等因素对涌浪高度及传播规律的影响;袁培银等<sup>[4]</sup>结合水库模型试验,研究弯曲河道中滑坡涌浪的传播特性,考察滑坡体宽度、厚度等因素对涌浪的影响;陈仁义等<sup>[5]</sup>通过山区库区物理模型与数值模拟的对比验证,研究涌浪的形成、传播及其与大坝的相互作用;彭辉等<sup>[6]</sup>利用数值模拟与物理模型试验,分析弯曲河道滑坡入库诱发的涌浪传播特性及其对大坝的影响;谢海清等<sup>[7]</sup>则针对狭窄型库区,模拟滑坡涌浪过程,并将模拟结果与试验数据对比,以研究涌浪的形成机理;马斌等<sup>[8]</sup>结合水工模型试验和三维数值模拟,探讨滑坡次生涌浪的生成、传播及消散特性;Franco等<sup>[9]</sup>以Lituya为研究对象,分析其传播特性及致灾机理。

船舶作为航道交通运输的主要载体,其安全性与稳定性直接受到水动力环境变化的影响,作为涌浪胁迫下的重要承灾体,涌浪作用下船舶与码头之间的相互作用机制也广泛受到关注。袁培银等<sup>[10]</sup>、徐晓菲<sup>[11]</sup>、张婕<sup>[12]</sup>通过物理模型试验,研究张紧式首尾双锚链与舷侧四锚链两种锚泊方式的稳定性差异及运动周期特性,以及涌浪作用下船舶系缆力、锚链拉力及撞击力的变化规律及主要影响因素,分析了桩上波压力、面板托力、船舶系缆力及撞击力的变化特性。胡杰龙等<sup>[13]</sup>则通过小尺度物理试验,研究三峡库区滑坡涌浪作用下船舶锚链受力特性。薛丁源等<sup>[14]</sup>通过研究长周期涌浪对码头系泊船舶稳定性的影响,探讨波浪周期、波高及浪向对船舶运动和缆绳受力的作用规律,并比较不同缆绳材料的性能差异。结果表明,不同因素对船舶运动响应和系缆受力影响程度各不相同。陈里等<sup>[15]</sup>以一艘3 000吨级内河甲板驳船为对象开展了物理模型试验,分析滑坡涌浪作用下系泊船舶的缆绳张力与碰撞能量的变化规律,提出相应的经验计算公式,明确主要影响因素并给出防控建议。

现有研究多集中于涌浪生成或传播、船舶运动等单一环节,更加缺乏“危岩入水-涌浪-船舶响应”全链条的耦合分析,难以为灾害风险评估与防控决策提供系统支撑。本文以三峡库区奉节段吊嘴危岩及其涌浪影响范围内的趸船码头为研究对象,模拟危岩体崩塌引发的涌浪传播过程,并探讨涌浪作用下趸船码头与所系泊长江江轮的运动响应特性,研究涌浪的生成与传播特性、开展趸船码头及长江江轮的动力响应分析,以期为危岩胁迫下河段水运安全提供理论支撑。

### 1 数学模型及验证

#### 1.1 数值模型

在进行滑坡涌浪数值模型求解时,采用有限差分法进行数值离散,压力求解采用广义极小残量(generalized minimal residual, GMRES)算法,并采用流体体积(volume of fluid, VOF)函数法追踪自由液面,将流体看作一种物质界面,运用流体体积函数的方法求解涌浪波波面,选用在模拟高应变率紊流运动方面较为精准的湍流模型,同时运用分数面积-体积障碍物表征(fractional area and volume obstacle, FAVOR)技术来模拟复杂的边界情况。波浪在 FLOW-3D 软件中视为不可压缩的黏性流体,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,流体运动控制方程见式(1)~(4)。

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:  $\rho$  为液体密度;  $V_F$  是可流动的体积分数;  $A_x$ 、 $A_y$  和  $A_z$  分别为  $x$ 、 $y$  和  $z$  三个方向上可流动的面积分数;  $u$ 、 $v$  和  $w$  分别为对应  $x$ 、 $y$  和  $z$  三个方向上的速度分量;  $G_x$ 、 $G_y$  和  $G_z$  分别为物体在  $x$ 、 $y$  和  $z$  三个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  $z$  三个方向上的黏滞力加速度;  $p$  为水的压强。

#### 1.2 方法验证与参数率定

通过复现研究河段下游 35 km 巫山段 2015 年发生的红岩子滑坡涌浪过程验证模型方法的有效

性并率定关键参数。该事件发生时间较近,相关调查与观测资料较为详实可靠。数值模型计算区域长 3.6 km, 宽 2.8 km, 高 400 m, 总计算网格数为 775 万个网格, 河流上下游均设置为对称边界条件(symmetry), 山体为固壁不滑移边界条件(wall), 上部表面为自由表面边界条件(specified pressure)。红岩子滑坡平面呈扇形, 滑坡纵长约 180 m, 横宽约 170 m, 平面分布面积 3 万  $m^2$ , 平均厚度约 20 m, 体积约 23 万  $m^3$ , 主滑方向  $308^\circ$ , 密度设置为  $2\ 700\ kg/m^3$ <sup>[16]</sup>。将红岩子滑坡体与滑床分割开, 初始时刻时, 滑块在重力作用下从静止开始下滑, 斜坡壁面摩擦系数设为 0.2, 初始水位为 145 m。试验中的涌浪爬高测点布置见图 1, 图中测点 1~7 号用来测量涌浪沿岸边的爬高值。

数值模拟与现场调查监测涌浪爬高值见图 2, 两者所得沿岸各点涌浪爬高值偏差不超过 10%, 可以说明所用的数值试验及其参数设置可以满足数值模型研究的要求, 能够较准确模拟滑块入水后涌浪的传播与爬坡过程。

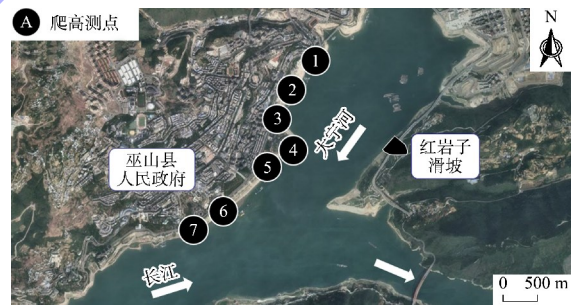


图 1 涌浪爬高测点布置

Fig. 1 Layout of surge run-up measuring points

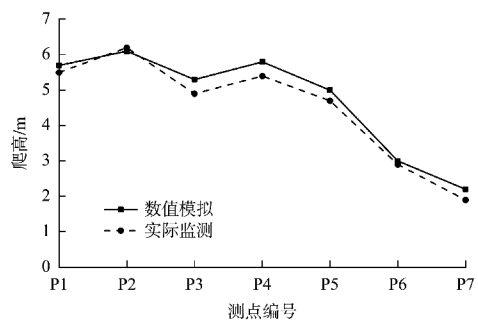


图 2 不同测点涌浪爬高模拟值与监测值对比

Fig. 2 Comparison between simulated values and monitored values of surge run-up at different measuring points

## 2 数值模型设置

吊嘴危岩位于长江右岸距瞿塘峡口约 1 km, 分布于直立陡崖带, 高程 143~401 m, 整体宽约 230 m, 总方量 140.65 万  $m^3$ , 为特大危岩体。该危岩体破坏模式有板状危岩体倾倒、危岩整体滑移、局部危岩单体倾倒、表层破碎体坠落、坡面孤石悬石崩落; 能产生涌浪危害的有 2 处板状危岩、10 处危岩单体。选取编号 B4 与 B5 的吊嘴危岩体进行危岩崩塌涌浪模拟。该危岩体总体积约 52.22 万  $m^3$ , 其中危岩 B4 体积约 45.09 万  $m^3$ , 危岩 B5 体积约为 7.15 万  $m^3$ 。将危岩块体概化为刚体, 忽略其内部破碎变形影响, 主要关注危岩整体入水动能与入水形态对应的流体响应, 初始状态下为危岩块体设定一个倾覆角度, 让其在重力作用下以最大接触面积跌入水中, 危岩体密度设置为 2 700  $kg/m^3$ 。

根据实测地形建立三维河道数值模型, 计算区域长 2 800 m, 宽 2 500 m, 高 350 m, 初始水位 150 m。采用笛卡尔正交网格, 河道网格尺寸 6 m, 码头与江轮区域逐级加密, 最小网格度 1 m, 物理模块开启重力模块、通用运动物体 (general moving object, GMO) 模块、黏性流模块。黏性流模型选择重整化群 (renormalized group, RNG) 模型。其他常规参数与边界条件设计与上节验证算例一致。

距离危岩入水点上游约 1 300 m 处为某趸船码头, 设置一个 2 600 吨级钢制趸船, 与岸壁相距约 4 m, 趸船外侧布设 5 000 吨级左右的船舶泊位, 泊位系泊长江江轮 1 艘, 江轮与趸船间距离约为 4 m。趸船码头共设有 4 根缆绳和 2 根锚链, 均采用纤维芯钢缆, 长江江轮通过 4 根缆绳系泊于趸船码头, 缆绳的直径为 96 mm, 破断力为  $5.82 \times 10^3$  kN, 锚链的直径为 192 mm, 破断力为  $1.164 \times 10^4$  kN。江轮靠泊方式为顺靠, 艏缆和艉缆与码头前沿夹角  $20^\circ$  以内, 系缆方式见图 3a), 模拟过程中开启全部 6 个自由度, 以研究涌浪作用下系泊江轮与趸船码头的运动响应过程。

在滑体运动方向和沿河道中心线方向布置 A~F 共 6 个监测点, 用以研究涌浪发生后在库区的传播规律。其中 B 为入水测点, A、C 分别为上下游测点, D、E 为草堂河与长江干流交汇处测点, F 为趸船码头处测点, 测点分布见图 3b)。

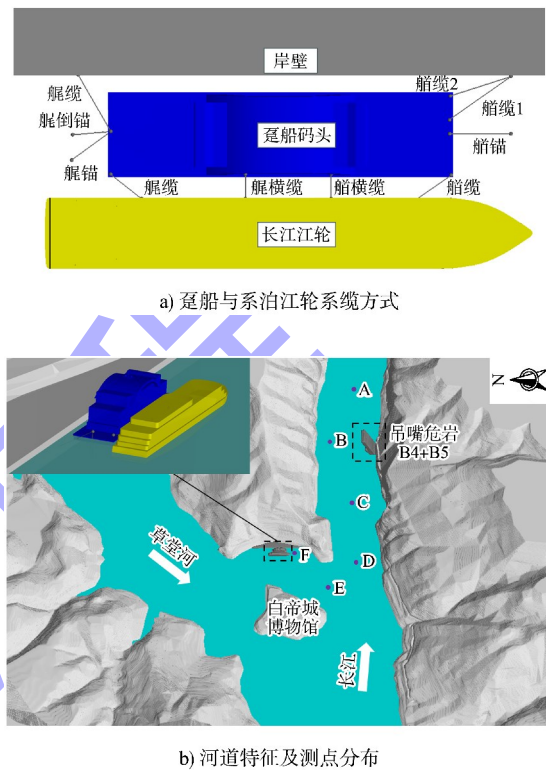


图 3 计算模型

Fig. 3 Calculation model

## 3 结果分析

### 3.1 涌浪生成与传播特征分析

吊嘴危岩体 B4+B5 倾覆后涌浪生成区域的高程云图见图 4。吊嘴危岩体 B4+B5 在初始状态设置一个倾覆角度, 受重力作用向下倾覆, 与水体相互作用产生水面冲击扰动, 以一定的速度挤压和冲击水体后产生涌浪。危岩块体从失稳到崩塌完全入水的整个过程仅在 16 s 完成, 这一快速过程使得巨大的势能瞬间转化为水波能, 激发出高幅度涌浪并迅速传播, 由于河道岸壁限制, 射向对岸的涌浪经直接反射后, 经历爬坡、再入水并形成新的波浪, 跟随首浪持续向河道上下游传播。

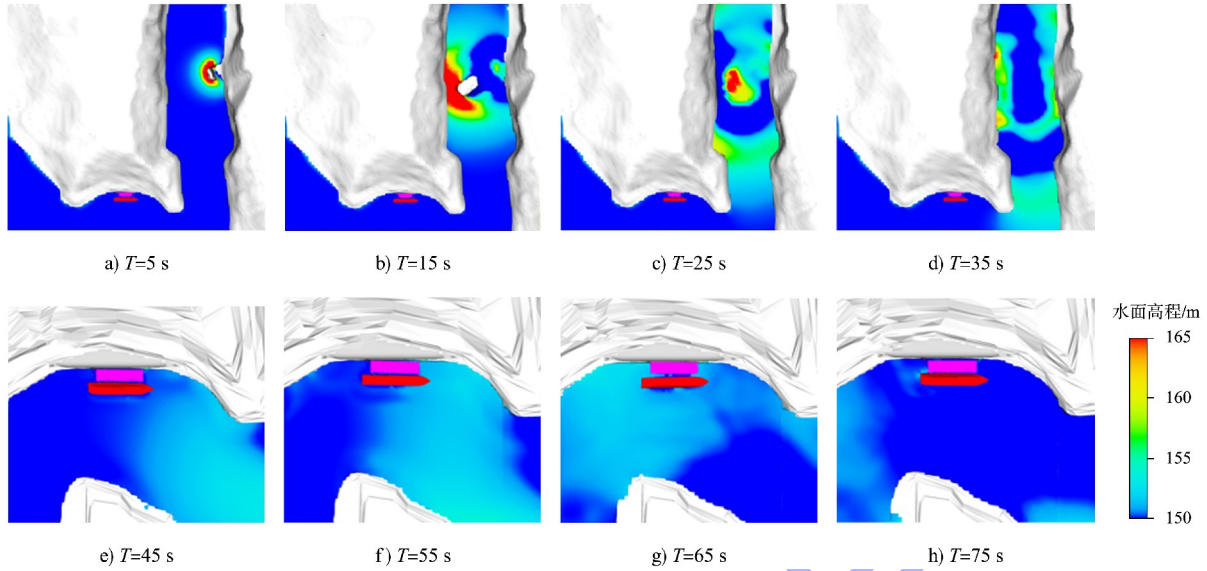
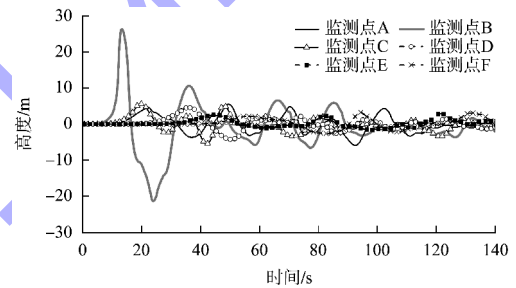


图 4 危岩体倾覆及涌浪生成区域水面高程云图

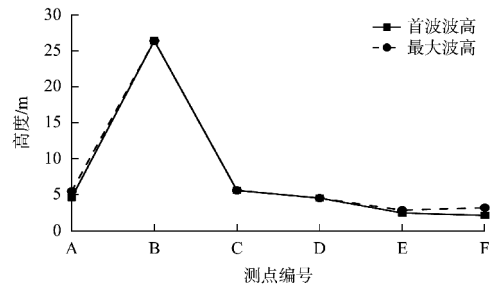
Fig. 4 Water surface elevation contour map of dangerous rock mass overturning and surge generation area

为与传统滑坡涌浪表述方式统一，本文计原水面之上涌浪隆起高度为波高。危岩体入水后生成的首浪高度为 26.4 m，之后形成-21.5 m 的波谷，后续涌浪波呈扇形向四周继续传播，涌浪传播 8 s 后，到达下游 A 点和上游 C 点，产生的首波波高分别衰减为 4.7 和 5.7 m，衰减率分别为 82.2% 和 78.5%；分别在 17、26、38 s 后，涌浪传播至 D、E 与 F 点，首波波高分别衰减为 4.6、2.5、2.2 m，衰减率分别为 82.6%、90.4%、91.7%。在危岩入水位置处，与危岩发生动量交换的水体仅为岩体接触区域周围部分，交换所得动能转换为该部分水体势能后，生成了核心区极高涌浪；随后，涌浪向河道上下游传播过程中，与沿程水体的能量交换更加充分，波动能量被散布于更多水体，加上底部河床阻力和水体自身的内摩擦作用，涌浪的能量和首浪波高均随传播距离的增加而不断减小，衰减速度呈现出显著的“中心快、远端慢”特征。

在涌浪生成区远端，最大波高均略高于首波波高，各测点波高见图 5b)。这种差异主要归因于地形和障碍物的影响，当涌浪遇到岸坡或建筑物后发生反射，反射波与原始波叠加，使得局部波高再次增大，可能加剧对岸边设施的威胁。



a) 水面高程过程线



b) 首波波高与最大波高对比

图 5 各测点涌浪波高

Fig. 5 Surge wave height at each measuring point

### 3.2 涌浪作用下系泊船舶运动响应过程分析

在遭遇涌浪后，长江江轮与趸船码头的运动姿态响应过程见图 6。涌浪发生后，以极快的速度向上下游传播，大约 40 s 内，首浪到达趸船码头。从趸船和长江江轮初始运动开始计时，统计两船六自由度的响应过程，其中横摇是最显著的响应参数见，图 6。约 45 s 前，两船横摇转动方向一

致, 见图 6a); 但由于两船转动幅度不同, 在遭遇后续涌浪冲击后, 两船开始对向运动, 达到转动极大值后又开始反向转动; 其后受缆绳弹性约束, 再次对向运动, 横摇极值分别可达 50° 和 45°。在上述过程中, 江轮的排水量远大于趸船码头, 导致在六自由度运动参数中, 江轮与趸船码头的横荡、纵荡及垂荡运动模态呈现高度同步性, 其相位差不超过 15%, 见图 6b)。由于纵向约束最弱且受主河道涌浪直接冲击, 因此纵荡响应最为显著。

由主河道传播而来的涌浪, 除直接冲击趸船和长江江轮诱发动力响应外, 部分涌浪受岸壁阻碍, 在损失少部分能量后, 直接反射至两船停泊系统。在水体作用、缆绳周期性张紧拉力以及两船间的撞击力共同作用下, 会在船体上形成附加转动弯矩, 进而加剧系统失稳风险。

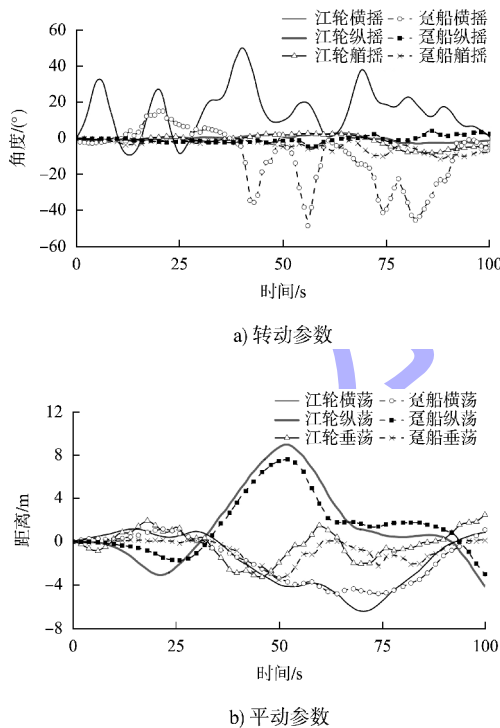


图 6 涌浪作用下长江江轮与趸船码头运动响应过程  
Fig. 6 Motion response process of Yangtze River cargo ship and pontoon wharf under surge action

长江江轮与趸船在遭遇吊嘴危岩涌浪后的系缆力变化过程见图 7。从系缆作用力来看, 长江江轮各缆作用力随涌浪持续而不断增加, 其中尤其

以艏横缆增长最为显著。这是由于横缆在停泊系统中的核心作用在于对抗船体横向平动, 同时耗散波浪载荷的横向分量, 需要承受船舶横摇运动产生的动态载荷, 特别是因流体-结构耦合效应引发的附加惯性力矩。此外, 由于长江江轮的排水量远较趸船更大, 两者之间趸船处于从动状态。在反射浪推动和江轮拖拽作用下, 趸船各锚链受力虽均处于安全范围内, 但各缆绳均达到破断风险。

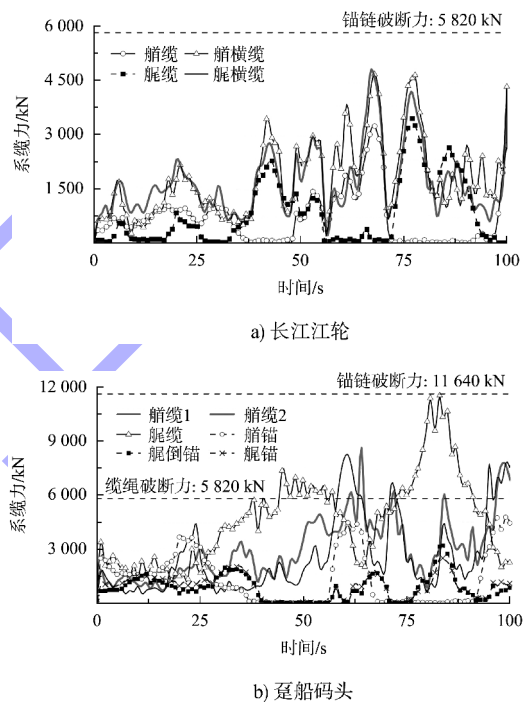


图 7 长江江轮与趸船系缆力变化过程  
Fig. 7 Variation process of mooring force between Yangtze River cargo ship and pontoon

除断缆失漂风险外, 江轮与趸船码头对向运动时可能发生持续性碰撞, 造成船身机械性损伤。对上述船舶运动过程进行分析发现, 江轮与趸船之间缆绳作用力并非指向各自形心, 因而缆绳紧绷后拉力、两船撞击力与涌浪作用力之间形成的转矩是上述停泊系统失稳的主要原因。为此, 本文尝试将提前解缆作为减缓灾害的避险措施。断开江轮与趸船之间缆绳后, 两船各自的摇动响应过程见图 8, 解缆后, 长江江轮纵摇和艏摇略有增大, 但横摇极值较系缆状态减小约 50%, 失稳风险大幅降低。而且, 摇动 1~2 个周期后, 江轮在

离岸水流与码头撞击力作用下远离码头，没有周期性的撞击作用，江轮逐渐靠回复力矩恢复稳定。对于趸船而言，解缆作业完成后，其不再受到江轮的撞击作用及牵拉作用，在自身锚泊系统的约束与作用下，趸船可迅速恢复至稳定状态。因此，可以认为，在涌浪到达前，解开系缆令系泊船只与码头保持一定距离的措施，可以利用船只的自稳性抵抗涌浪作用。

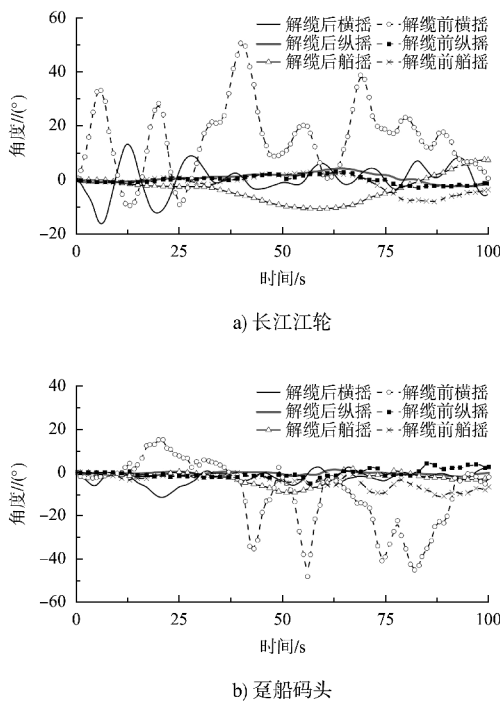


图8 解缆后长江江轮与趸船码头运动响应过程

Fig.8 Motion response process of Yangtze River cargo ship and pontoon wharf after mooring lines are released

#### 4 结论

1) 吊嘴危岩 B4+B5 崩塌后，16 s 内完成入水过程，巨大势能快速转化为水波能，生成首浪高 26.4 m 的强涌浪；涌浪核心区因能量向更多水体扩散，河床阻力及内摩擦作用衰减迅速，远端衰减速度较缓，呈现“中心衰减快、远端衰减慢”的特征；但受地形与岸壁反射影响，远端最大波高略高于首浪，可能加剧对岸边设施的威胁。

2) 涌浪作用下，趸船与系泊江轮的横摇响应最为显著，横荡、纵荡及垂荡运动具有高度同步性，水体冲击、缆绳拉力与船舶撞击力形成的转

动弯矩加剧了系统失稳风险，趸船缆绳受力随涌浪持续增大并接近破断力。

3) 提前解缆可能是潜在的有效避险措施，解缆后江轮横摇极值降低约 50%，经 1~2 个周期晃动后借助自稳性恢复稳定；趸船在自身锚泊系统作用下快速稳定，避免了周期性碰撞与牵拉，显著降低了灾害损失。

#### 参考文献:

- [1] MAO J, ZHAO L H, DI Y T, et al. A resolved CFD-DEM approach for the simulation of landslides and impulse waves[J]. Computer methods in applied mechanics and engineering, 2020, 359: 112750.
- [2] 李学伟, 丁庆武, 朱丹. 滑坡涌浪在渐溃水库中传播过程试验研究[J]. 水利科技与经济, 2023, 29(4): 90-93.  
LI X W, DING Q W, ZHU D. Experimental study on the propagation process of landslide surge in collapsing reservoir[J]. Water conservancy science and technology and economy, 2023, 29(4): 90-93.
- [3] 李荣辉, 蒋昌波, 邓斌, 等. 近坝库区狭窄河道滑坡涌浪高度及其传播规律[J]. 交通科学与工程, 2016, 32(2): 79-84.  
LI R H, JIANG C B, DENG B, et al. Experimental research on landslide surge wave height and propagation rule of the narrow-river type reservoir in the near-dam area[J]. Journal of transport science and engineering, 2016, 32(2): 79-84.
- [4] 袁培银, 王平义, 赵宇, 等. 三峡库区滑坡沿程涌浪传播特性模型试验研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2020, 39(10): 100-104.  
YUAN P Y, WANG P Y, ZHAO Y, et al. Model test study on propagation characteristics of landslide-generated surge along river in Three Gorges Reservoir area [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (natural science), 2020, 39(10): 100-104.
- [5] 陈仁义, 彭辉. 山区库岸滑坡涌浪的物理模型与数值模型试验研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2023, 45(2): 17-22.  
CHEN R Y, PENG H. Experimental research on physical

- model and numerical model of reservoir bank landslide swell in mountainous areas [J]. Journal of China Three Gorges University ( natural sciences ), 2023, 45 ( 2 ): 17-22.
- [6] 彭辉, 吴凡, 金科, 等. 库岸滑坡涌浪首浪高度试验研究[J]. 水利水电技术, 2017, 48(12): 95-100.
- PENG H, WU F, JIN K, et al. Experimental study on head wave height of surge caused by landslide of reservoir bank [J]. Water resources and hydropower engineering, 2017, 48(12): 95-100.
- [7] 谢海清, 蒋昌波, 邓斌, 等. 狭窄型库区河道滑坡涌浪的形成及其传播规律[J]. 交通科学与工程, 2017, 33(4): 45-50, 76.
- XIE H Q, JIANG C B, DENG B, et al. Formation and propagation regulation of water waves caused by the landslides in narrow reservoir's river channel [J]. Journal of transport science and engineering, 2017, 33(4): 45-50, 76.
- [8] 马斌, 刘永玺, 李会平, 等. 窄深河谷近坝库岸滑坡涌浪特性及传播规律[J]. 水利水运工程学报, 2021(5): 120-128.
- MA B, LIU Y X, LI H P, et al. Surge characteristics and propagation of landslide near the dam in narrow river valley [J]. Hydro-science and engineering, 2021 ( 5 ): 120-128.
- [9] FRANCO A, MOERNAUT J, SCHNEIDER-MUNTAU B, et al. The 1958 Lituya Bay tsunami - pre-event bathymetry reconstruction and 3D numerical modelling utilising the computational fluid dynamics software Flow-3D[J]. Natural hazards and earth system sciences, 2020, 20(8): 2255-2279.
- [10] 袁培银, 李渝锋. 滑坡涌浪对锚泊船舶运动响应的试验研究[J]. 舰船科学技术, 2022, 44(12): 33-38.
- YUAN P Y, LI Y F. Experimental study on response of bulk landslide-induced wave to motion of anchor ship river[J]. Ship science and technology, 2022, 44 ( 12 ): 33-38.
- [11] 徐晓菲. 山区河道型水库滑坡涌浪对斜坡式码头-趸船-船舶体系作用的试验研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2020.
- XU X F. Experimental study on the effect of landslide surge on sloping wharf-pontoon-ship system in watercourse reservoir in mountainous area [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2020.
- [12] 张婕. 山区弯曲河道型水库滑坡涌浪对直立式码头作用的试验研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2016.
- ZHANG J. Experimental investigation of the landslide surge's effect on the vertical wharf in hill bend channel type reservoir [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2016.
- [13] 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.
- [14] 薛丁源, 邵昌浩, 杨婷. 长周期涌浪作用下码头船舶系缆稳定性研究[J]. 水运工程, 2017(3): 80-83.
- XUE D Y, SHAO C H, YANG T. Movement and mooring force of mooring system in long period wave[J]. Port & waterway engineering, 2017(3): 80-83.
- [15] 陈里, 杨渠锋, 喻涛, 等. 滑坡涌浪作用下系泊船舶安全试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2017(1): 80-86.
- CHEN L, YANG Q F, YU T, et al. Model experimental studies of safety of moored ship under landslide surge action [J]. Hydro-science and engineering, 2017 ( 1 ): 80-86.
- [16] 李忠文, 李俊峰, 张小琼, 等. 大渡河瀑布沟水库红岩子滑坡变形特征与机理分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34(4): 1-10.
- LI Z W, LI J F, ZHANG X Q, et al. Deformation characteristics and reactivation mechanism of Hongyanzi landslide in Pubugou reservoir area of the Dadu River[J]. The Chinese journal of geological hazard and control, 2023, 34(4): 1-10.