

DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640X.2017.01.011

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 Li, YANG Qufeng, YU Tao, et al. Model experimental studies of safety of moored ship under landslide surge action[J]. Hydro-Science and Engineering, 2017(1): 80-86. (in Chinese))

滑坡涌浪作用下系泊船舶安全试验研究

陈里^{1,4}, 杨渠锋², 喻涛^{3,4}, 王平义^{3,4}

(1. 三峡大学 水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 贵州省交通规划勘察设计研究院股份有限公司, 贵州 贵阳 550001; 3. 重庆交通大学 国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074; 4. 重庆交通大学 水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074)

摘要: 随着我国逐步加快在长江中上游山区河流的水利水电和港口航道工程建设, 内河库港在滑坡涌浪作用下, 如何保证船舶系泊安全成为一个极其关键的问题。为了提高滑坡涌浪对内河库港运行安全影响程度的认识, 以江南沱口直立高桩码头为依托, 选择内河 3 000 t 甲板驳船为研究对象进行物理模型试验。深入分析了滑坡涌浪作用下系泊船舶系缆力和撞击能的影响因素, 以及波高、水深等因素影响下系泊船舶系缆力和撞击能的变化规律。结合规范和试验数据, 得出了涌浪作用下船舶系缆力和船舶撞击能的经验计算式, 确定了滑坡涌浪对内河库港船舶系泊安全的影响程度, 并提出了相应的对策和意见。

关键词: 滑坡涌浪; 系缆力; 撞击能

中图分类号: TV139.2⁺3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-640X(2017)01-0080-07

随着我国内河航道和港口建设的发展, 船舶吨位等级不断提高, 港口泊位能力不断增强, 现有研究和设计规范已不能满足要求, 尤其是在库区蓄水后, 滑坡涌浪灾害^[1-2]对于现有码头和船舶存在较大威胁。对波浪作用下船舶运动响应的理论研究^[3-7]和物理模型试验研究^[8-11]考虑的是海浪和风浪对系泊船舶的作用, 在计算分析时主要参考海港部门的研究成果。库岸滑坡涌浪从形成机理而言与风浪、海浪的性质完全不同, 现有理论分析和计算公式是否适用于库区水深条件下滑坡涌浪对系泊船舶作用的计算有待进一步探讨。因此, 结合工程实际, 开展滑坡涌浪作用下船舶系缆力和撞击作用的物理模型试验研究, 对涌浪作用下船舶系泊安全的预估具有较大实际意义。

1 模型设计与量测技术

为了获得原型和模型中的物理现象相似, 首先必须满足 3 个相似条件, 即几何相似、运动相似和动力相似。滑坡下滑是重力作用为主的运动现象, 故模型按重力相似准则设计, 模型几何比尺 λ_l 取 1:70。因此, 波高、波长及水深均按几何比尺 λ_l 计算, 时间比尺 $\lambda_t = \lambda_l^{0.5}$, 船舶系缆力比尺 $\lambda_F = \lambda_l^3$, 波浪周期比尺 $\lambda_T = \lambda_l^{0.5}$, 质量比尺 $\lambda_M = \lambda_l^3$, 船舶撞击能比尺 $\lambda_E = \lambda_l^4$ 。

(1) 河道和码头模型的依托工程为万州江南沱口码头河段, 模型采用断面法制作并对河底地形进行概化。原型码头结构平台长 253 m, 宽 30 m, 将原型码头按比尺制模, 按刚性结构处理, 用塑胶将其连成一体固定在河道模型内, 两个码头分别布设在滑坡入水点正对岸及同岸, 距滑坡入水点 6.37 m, 具体布置见图 1。

(2) 资料统计表明, 库区滑坡的坡度大多分布在 20°~60°, 因此, 模型滑面倾角选取 20°, 40°和 60°, 选择

收稿日期: 2016-01-22

基金项目: 西部交通建设科技项目(20113288141160)

作者简介: 陈里(1982—), 男, 河南信阳人, 讲师, 博士, 主要从事航道整治理论及技术研究。

E-mail: 429683361@qq.com

固定滑坡体模型长度为 1 m, 宽度分别为 0.5, 1.0 和 1.5 m, 厚度为 0.2, 0.4 和 0.6 m 共 9 组块体方案。考虑三峡水库运行的 3 个水位 145, 155 及 175 m, 相应的试验水深分别为 0.74, 0.88 和 1.16 m。综上所述, 试验选用 3 种水深、3 个水平坡度和 9 个水平块体体积, 共计 81 组试验工况。

(3) 试验船型选择 3 000 t 甲板驳船。考虑船模满载下吃水、重量、重心位置、质量惯性矩和自振周期等与原型相似。实船和船模主尺度及有关参数见表 1。系缆布置采用八字缆, 首尾各 1 根, 打缆角度均为 30°, 缆绳长度、系缆位置以及角度与原型相似, 模拟采用 35 mm 尼龙缆。船舶撞击护舷模拟考虑护舷受力变形曲线相似, 其设置高度与原型护舷中心受力点位置相同。模型护舷分别位于船首 1/3 处和船尾 1/4 处, 共 4 个测点分别位于两个码头。船舶系缆力和船舶撞击力采用重庆交通大学自主研制的船舶系缆力传感器和撞击护舷传感器测量, 撞击能值通过撞击护舷传感器的力学性能曲线计算得出。仪器采样精度为 100 Hz, 所有数据利用计算机进行采集处理。

2 涌浪作用下系泊船舶影响因素分析

滑坡涌浪作用下, 系泊船舶运动过程和受力过程^[12]较为复杂, 影响系泊安全的主要是船舶系缆力和对码头的撞击力。滑坡涌浪作用下系泊体系的船舶运动响应规律如下: 当涌浪作用于系泊船舶时, 船舶向码头方向运动, 缆绳处于松弛状态, 对船舶无拉拽作用, 船舶将撞击码头护舷。当护舷变形被压缩至最大值后, 船舶在护舷反力作用和波浪共同作用下开始向反方向运动, 当运动一定距离后, 缆绳迅速拉紧, 船舶系缆力将达到最大值。随后, 在涌浪、缆绳和护舷共同作用下, 系泊船舶将会出现和涌浪周期大致相同的往复运动。

作用于船舶上的波浪荷载, 与波浪特性(波高、周期、波浪入射角度等)有关, 同时也与船舶本身尺度(长度、宽度、吃水深度)、载度(满载、半载、压载)和运动特性(横摇、纵摇、升沉)等有关。根据试验工况, 考虑系泊船舶系缆力和撞击能的影响因素, 分别选取涌浪波高、周期及库区水深影响下的系缆力和撞击能值进行单因素对比统计(见表 2)。

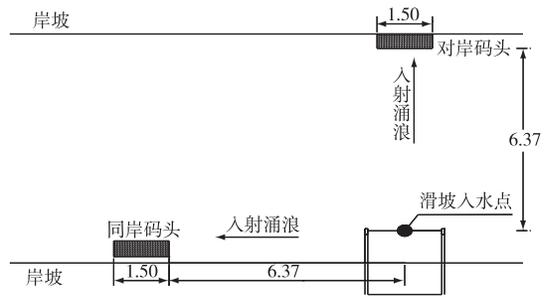


图 1 试验平面布置(单位:m)
Fig. 1 Layout of test model (unit: m)

表 1 船舶主尺度参数

Tab. 1 Parameters of moored ship sizes

船型参数	实船	船模
船长/m	90	1.28
型深/m	4	0.057
型宽/m	16	0.228
设计吃水/m	3.3	0.047
方形系数	0.8	0.8
满载排水量	3 000 t	8 700 g

表 2 典型涌浪参数工况

Tab. 2 Typical parameters of landslide surge

工况	入射波高/cm	对岸船舶系缆力/kN	对岸船舶撞击能/kJ	工况	入射周期/s	对岸船舶系缆力/kN	对岸船舶撞击能/kJ	工况	水深/m	对岸船舶系缆力/kN	对岸船舶撞击能/kJ
7	2.10	184.20	90.50	11	0.70	174.50	75.60	12	0.88	224.60	79.60
2	2.20	183.20	102.30	20	0.80	184.60	58.70	21	1.16	207.80	80.40
4	2.70	198.40	104.80	28	1.10	198.60	74.50	28	0.74	245.60	89.60
3	3.10	209.60	113.60	37	1.20	184.50	60.20	37	0.88	258.70	91.30
8	3.60	246.30	132.50	46	1.00	197.30	76.30	46	1.16	236.50	87.10
5	3.70	267.80	154.50	55	1.30	201.30	81.20	51	0.74	216.90	84.60
6	4.90	387.60	193.40	64	1.50	195.40	78.60	60	0.88	217.30	78.60
9	6.30	779.80	258.70	73	1.40	187.70	72.30	69	1.16	236.10	78.40

由表2可见,内河3000t甲板驳船满载时,在固定系缆方式和缆绳尺寸情况下,涌浪的入射波高越大,作用于船舶上的波浪荷载越大。系缆力和撞击能值也越大,系缆力、撞击能与波高近似为线性关系,与以往的模型试验研究结果及规范公式相符;在波高相同的工况下,涌浪周期不同,系缆力、撞击能值变化较小。由于波浪周期变化范围与船舶的固有横摇周期相差较大,船舶横摇运动受涌浪周期变化影响较小,系缆力和撞击能值也变化不大。以往的研究表明,若波浪周期与船舶固有横摇周期相差较小,船舶运动量大,将会导致系缆力、撞击能增大。在相同涌浪入射波高和周期的工况下,库区水深的变化对系泊船舶的系缆力和撞击作用影响较小。

3 涌浪作用下船舶系缆安全预估

目前,《港口工程荷载规范》^[13-14]公式中规定靠泊码头的船舶受到的总荷载包括风荷载、水流荷载和波浪荷载,主要考虑风、浪、水流等因素作用下船舶系缆力的大小。公式中一般考虑港口在波浪较小情况下系泊船舶的受力,对于较大波浪船舶系缆力的计算没有涉及,尤其是来自破坏能量较大的滑坡涌浪作用下船舶系缆的安全计算。

3.1 船舶系缆力的计算

规范中规定的波浪荷载船舶系缆力计算式,分别通过水流作用下船舶纵向力和横向力进行计算:

$$N = K/n \left[\sum F_x / (\sin\alpha\cos\beta) + \sum F_y / (\cos\alpha\cos\beta) \right] \quad (1)$$

式中: K 为船柱受力不均匀系数; n 为系船柱数目; α 为船缆的水平投影与码头前沿线的夹角; β 为系船缆与水平面之间的夹角。

当水流与船舶纵轴平行或流向角 $\theta < 15^\circ$, $\theta > 165^\circ$ 时,水流力船首横向分力 F_{x1} , 船尾横向分力 F_{y1} 及船舶纵向分析 F_{y2} 的计算式为:

$$F_{x1} = C_{x1}\rho V^2 B'/2, F_{y1} = C_{y1}\rho V^2 B'/2, F_{y2} = C_{y2}\rho V^2 S/2 \quad (2)$$

式中: C_{x1} , C_{y1} 分别为船舶首、尾横向分力系数; ρ 为水体密度; V 为水流速度; B' 为船舶以下吃水横向投影面积; S 为船舶吃水线以下表面积。

当 $15^\circ \leq \theta \leq 165^\circ$ 时,船首横向分力 F_{x1} , 船尾横向分力 F_{y1} 计算式分别为:

$$F_{x1} = C_{x1}\rho V^2 A_{x1}/2 \quad (3)$$

$$F_{y1} = C_{y1}\rho V^2 A_{y1}/2 \quad (4)$$

式中: A_{x1} , A_{y1} 为船舶水下部分垂直和平行水流方向的投影面积。

通过测点所测入射涌浪的周期 T 和水深 h , 用二分法迭代波浪的弥散方程, 即可求出原始波波长 L 。通过试验涌浪的波长 L 和周期 T 计算涌浪波速 V , 将涌浪波速近似于水流速度代入规范计算式。由于同、对岸码头涌浪入射角度分别为 0° 和 90° , 计算得出波浪荷载对船舶的作用力。选择入射波高值范围为 $0.21 \sim 7.11$ m 的试验工况, 其波长和周期范围分别为 $0.64 \sim 2.13$ s, $0.8 \sim 3.8$ m, 通过计算对不同工况下船舶系缆力的计算值和试验值进行对比分析(见图2)。

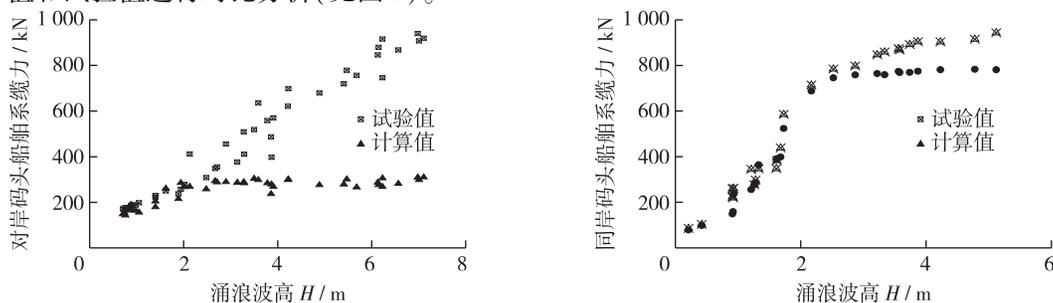


图2 涌浪作用下船舶系缆力试验值和计算值对比

Fig. 2 Comparison between test values and calculation values of ship mooring force by action of surge

通过分析计算发现,由于规范中的计算公式未引入波高参数,涌浪入射波高 $H < 2$ m 时,对岸码头船舶的系缆力计算值和试验值吻合较好,平均相对误差为 10.3%;当船舶涌浪前波高大于 2 m,其偏离程度较大,平均相对误差达 110%;大于 2.5 m 涌浪波高入射同岸系泊船舶时,其计算值与试验值吻合也较差,平均相对误差达 30%。因此,涌浪波高较大时,规范中的计算公式已不适用于滑坡涌浪作用下船舶系缆力的计算。在固定船型参数以及船舶满载情况下,主要考虑入射涌浪波高对系泊船舶的影响。结合本次模型试验并参考以往研究的经验公式,对《港口工程荷载规范》系泊船舶的波浪荷载系缆力计算式进行修正。涌浪作用下船舶系缆力与波高值近似线性关系,引入波高 H 及水深 h 参数,通过无量纲化线性回归确定涌浪作用下船舶系缆力的经验计算式为:

$$N = \frac{K}{n} \left(\frac{H}{h} \right)^\eta \left[\frac{\sum F_x}{\sin\alpha\cos\beta} + \frac{\sum F_y}{\cos\alpha\cos\beta} \right] \quad (5)$$

式中: H 为波高; h 为水深。通过线性回归计算,确定修正系数 η 为 -0.73。

对本次试验的试验值和修正式中的计算值进行比较,对岸码头系泊船撞击能的计算值和试验值具有较好的相关性,相关系数为 $R = 0.91$; 由于船舶系缆力的大小除了受环境荷载如滑坡涌浪等影响外,还与码头系泊布置方式、船舶类型、吨位、缆绳类型和数量、缀绳初张力、护弦类型和数量及布置方式等因素有关。考虑模型试验的局限性,该计算式只对相似船型、满载及双缆系泊时的船舶系缆力计算具有较高准确性,对其他系泊条件下系缆力的计算具有一定的参考价值。

3.2 船舶系缆安全的预估

考虑 3 000 t 甲板驳船满载下的系缆方式,模拟采用 35 mm 尼龙缆,缆绳破断力应按产品规格确定,当缺乏资料时,对于聚丙烯尼龙缆绳其破断力可按下式计算: $N_p = 0.16D^2$, 其中: N_p 为聚丙烯尼龙缆绳的破断力; D 为尾缆绳直径。通过计算 3 000 t 船舶系缆力的标准值为 200 kN。典型涌浪波高下船舶系缆力值见表 3。

表 3 典型涌浪波高下船舶系缆力值

Tab. 3 Typical parameters of ship mooring force by action of landslide surge

工况	初始波高/m	入射波高/m	对岸码头船首系缆力/kN	对岸码头船尾系缆力/kN	同岸码头船首系缆力/kN	同岸码头船尾系缆力/kN
19	0.84	0.21	195.50	171.50	85.70	41.90
10	1.05	0.42	198.20	137.20	102.90	31.10
73	2.45	0.90	200.60	185.20	174.50	54.20
37	3.50	0.93	198.10	188.60	165.30	66.60
56	4.20	1.26	286.80	250.30	179.80	125.30
61	5.25	1.33	306.80	229.80	201.30	114.30
31	8.05	1.68	428.90	408.10	347.30	132.50
41	7.56	1.73	433.40	237.00	347.70	174.50
42	11.62	2.17	670.90	348.00	714.20	198.60
54	14.00	3.22	810.80	456.10	784.20	300.90

表 3 表明,初始波高 3.3 m 以上,涌浪入射波高大于 0.9 m 时,对岸码头船舶首缆系缆力均大于标准值;对于船舶尾缆,初始波高 3.5 m 以上,涌浪入射波高大于 1.1 m 时,其系缆力均大于标准值;同岸码头船舶首缆系缆力只有 1/3 工况下满足船舶系缆力的标准值,而尾缆系缆力有一半以上工况满足船舶系缆力的标准值;同岸码头首缆系缆力的初始波高和入射波高额定值分别为 2.4 和 0.9 m;尾缆系缆力的初始波高和入射波高额定值分别为 2.8 和 1.3 m。因此,将 0.9 m 的入射波高值作为本次试验工况下系泊船舶系缆力的安全极限(警戒)波高值。

4 涌浪作用下船舶撞击安全预估

4.1 船舶撞击能计算

《港口工程荷载规范》中规定在横浪作用下,系泊船舶的有效撞击能量计算式为:

$$E = \alpha C_m M g H (H/L) (L/B) (d/D)^{2.5} \tanh(2\pi/(Ld)) \quad (6)$$

式中: E 为横浪作用下系泊船舶有效撞击能量(kJ); α 为系数, 采用橡胶护舷时为 0.004; C_m 为船舶附加水体质量系数; M 为船舶满载排水质量; H 为浪高; B 为船舶型宽; D 为船舶吃水深; d 为码头前沿水深; L 为波长。

试验包括高、中、低 3 个水位, 发现当波高 H 一定时, 水深 d 的变化并不会引起撞击力和撞击力能的变化, 且系泊船舶型深远小于水深 d 。通过理论及试验数据分析表明, 当初始涌浪传播至系泊船舶处, 入射波高对系泊船舶撞击力和撞击能起着决定性的作用。因此, 在固定船型参数以及船舶满载的情况下, 主要考虑涌浪入射波高对船舶撞击能的影响。结合模型试验资料分析, 参考以往研究的经验公式, 对规范中系泊船舶的有效撞击能量的经验公式进行修正, 确定滑坡涌浪作用下船舶撞击能的经验计算式为:

$$E = K \alpha C_m M g H (H/B) (D_0/D)^{2.5} \quad (7)$$

式中: K 为修正系数; D_0 为船舶型深。

对滑坡涌浪作用下的试验数据进行整理分析, 运用线性回归法确定参数 K , 得到涌浪作用下船舶最大撞击能量的经验计算式为:

$$E = 0.023 2 \alpha C_m M g H (H/B) (D_0/D)^{2.5} \quad (8)$$

比较所有工况的试验值和公式中的计算值, 对岸码头系泊船舶撞击能的计算值和试验值具有较好相关性, 相关系数为 $R=0.93$ 。式(8)适用于相似船型及系泊条件的船舶撞击能的计算, 对其他船型或不同装载情况下船舶撞击能的计算有一定参考价值。

4.2 船舶撞击安全预估

《港口工程荷载规范》中船舶有效撞击能的计算式为: $E_0 = \rho M V_n^2 / 2$, 其中, E_0 为船舶有效撞击能(kJ); ρ 为有效动能系数(取 0.7~0.8); V_n 为船舶法向撞击速度(m/s)。根据规范中河船方向靠岸速度的统计表, 取 $V_n = 0.3$ m/s。通过计算, 码头原型橡胶护舷设计标准值 $E_n = 108$ kJ。

撞击能经验式计算及试验数据统计分析见表 4。由表 4 可见, 初始波高大于 3.3 m, 入射波高大于 0.9 m 时, 对岸码头船首撞击能均大于橡胶护舷设计标准值; 对于船尾撞击能, 在初始波高大于 3.5 m, 入射波高大于 1.1 m 时, 其撞击能均大于标准值。同岸码头船首撞击能值只有 1/3 工况下满足橡胶护舷设计要求, 船尾撞击能值 2/3 工况下满足橡胶护舷设计标准值。同岸码头船首撞击能在初始波高和入射浪高分别小于 2.4 和 0.9 m 时, 满足橡胶护舷的设计要求; 船尾撞击能的初始波高和入射波高额定值分别为 11.0 和 2.8 m。因此, 将 0.9 m 的入射波高值, 作为本次试验工况下船舶撞击能的安全极限(警戒)波高值。

表 4 典型涌浪波高下船舶撞击能值

Tab. 4 Typical parameters of impact energy by action of landslide surge

工况	初始波高/m	入射波高/m	对岸码头船首撞击能/kJ	对岸码头船尾撞击能/kJ	同岸码头船首撞击能/kJ	同岸码头船尾撞击能/kJ
19	0.84	0.21	56.40	41.50	16.20	21.10
10	1.05	0.42	90.56	75.20	27.80	14.80
73	2.45	0.92	102.36	89.82	27.50	21.00
37	3.50	0.93	157.50	143.00	117.20	101.30
56	4.20	1.26	193.40	162.50	134.30	122.40
61	5.25	1.33	258.70	349.40	215.40	181.20
31	8.05	1.68	522.50	343.90	280.50	289.60
41	7.56	1.73	898.40	842.30	328.10	273.20
42	11.62	2.17	867.20	823.20	410.60	370.80
54	14.00	3.22	985.20	927.00	673.90	612.10

5 结 语

模型试验研究建立了滑坡涌浪作用下系缆力和撞击能经验计算式, 其中系缆力的计算引入了波高参数, 计算结果提高了对滑坡涌浪作用下库区船舶及港口影响程度的认识。另外, 当初始波高达到一定高度时, 如

工况 62, 69 和 81(初始波高分别为 15.3, 15.6 和 16.0 m, 入射波高分别为 7.3, 7.6 和 7.8 m)等,波浪荷载对系泊船舶的作用力极大。系泊船舶因为横摇的剧烈运动而导致缆绳崩断,从而引发船舶撞坏码头或者倾覆。试验结果表明,初始波高达到 15 m 以上,入射涌浪在 7 m 左右时,船舶发生严重横摇和倾覆,此时,系缆力和撞击能的数值已经不是真实数据。

因此,滑坡涌浪作用下现有库区港口运行和设计规范已不能满足实际要求,实际运行中,为减小滑坡涌浪对库区港口的危害程度,可采取以下相应有效措施:

(1) 提高系泊船舶系缆绳强度等级。根据本次系泊船舶系缆力试验数据的研究,可针对类似船舶类型提高船舶系缆绳强度 30% 左右。其他类型船舶的系缆绳强度的提高,可作相应参考。

(2) 减小系泊船舶系缆力。为减小涌浪作用下系泊船舶系缆力,在实际运行过程中,可增大系缆绳的预张力。在条件允许情况下,可改变布缆方式,采取多缆系统方式,增加首缆、腰缆和尾缆。通过多缆方式,将较大系泊船舶系缆力分散在不同位置缆绳上。

(3) 提高库区港口码头橡胶护舷设计标准。根据本次系泊船舶撞击能的试验数据,建议提高库区港口码头橡胶护舷设计标准 30% 左右。

(4) 改变库区港口码头橡胶护舷的布置方式。港口码头橡胶护舷的基本形式主要有连续布置和间断布置。在间断布置情况下,可考虑加大间断布置橡胶护舷的密度。

(5) 当出现极具破坏性的滑坡涌浪波高时,应停止系泊船舶的作业,驶离码头,转移到安全区域。

参 考 文 献:

- [1] 陈里, 喻涛, 王平义, 等. 库区滑坡涌浪试验研究综述[J]. 人民长江, 2015, 46(7): 84-87. (CHEN Li, YU Tao, WANG Pingyi, et al. Summary of experimental study on landslide-induced surge in reservoir area[J]. Yangtze River, 2015, 46(7): 84-87. (in Chinese))
- [2] 路鼎, 王平义, 喻涛, 等. 滑坡涌浪影响下船舶航行限制范围试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2014(4): 70-74. (LU Ding, WANG Pingyi, YU Tao, et al. Experimental studies of restricted waterway for ships during landslide generated waves[J]. Hydro-Science and Engineering, 2014(4): 70-74. (in Chinese))
- [3] SCHELLIN T E, OSTERGAARD C. The vessel in port: mooring problems[J]. Marine Structures, 1995(8): 451-497.
- [4] MILLER M, CHARYPAR D, GROSS M. Particle-based fluid simulation for interactive applications[C] // Proceedings of the 2003 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation. 2003: 154-159.
- [5] SAKAKIBARA S, KUBO M. Characteristics of low-frequency motions of ships moored inside ports and harbors on the basis of field observations[J]. Marine Structures, 2008, 21: 196-223.
- [6] SAKAKIBARA S, TAKEDA S, IWAMOTO Y, et al. A hybrid potential theory for predicting the motions of a moored ship induced by large-scaled tsunami[J]. Ocean Engineering, 2010, 37(17): 1564-1575.
- [7] 孟祥玮, 高学平, 张文忠, 等. 波浪作用下船舶系缆力的计算方法[J]. 天津大学学报, 2011, 44(7): 593-596. (MENG Xiangwei, GAO Xueping, ZHANG Wenzhong, et al. A calculation method of mooring force induced by waves[J]. Journal of Tianjin University, 2011, 44(7): 593-596. (in Chinese))
- [8] BLENDERMANN W. Estimation of wind loads on ships in wind with a strong gradient[J]. 14th Intl Conf on Offshore Mechanics & Arctic Engng, 1995.
- [9] 张日向, 刘忠波, 张宁川. 系泊船在风浪流作用下系缆力和撞击力的试验研究[J]. 中国海洋平台, 2003, 18(1): 28-32. (ZHANG Rixiang, LIU Zhongbo, ZHANG Ningchuan. An experimental study on the mooring line forces and impact forces of a moored ship under the combined action of wind, wave and current[J]. China Offshore Platform, 2003, 18(1): 28-32. (in Chinese))
- [10] 李焱, 郑宝友, 高峰, 等. 浪流作用下系泊船舶撞击力和系缆力试验研究[J]. 海洋工程, 2007, 25(2): 57-63. (LI Yan, ZHENG Baoyou, GAO Feng, et al. Model test study on the impact forces and mooring line forces of a moored ship under the combined action of wave and current[J]. The Ocean Engineering, 2007, 25(2): 57-63. (in Chinese))
- [11] 陈里. 山区河道型水库岩体滑坡涌浪特性及对航道的影响试验研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2014. (CHEN Li. Experimental study on characteristics of rock-type landslide surge and impact for navigable conditions of the river-channel type

- reservoir in mountainous area[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2014. (in Chinese))
- [12] 吴秀恒. 船舶操纵性与耐波性[M]. 北京: 人民交通出版社, 1999. (WU Xiuheng. Ship maneuverability and seakeeping [M]. Beijing: China Communications Press, 1999. (in Chinese))
- [13] JTJ 215—1998 港口工程荷载规范[S]. (JTJ 215—1998 Load code for harbor engineering[S]. (in Chinese))
- [14] JTS 144-1—2010 港口工程荷载规范[S]. (JTS 144-1—2010 Load code for harbor engineering[S]. (in Chinese))

Model experimental studies of safety of moored ship under landslide surge action

CHEN Li¹, YANG Qufeng², YU Tao^{3,4}, WANG Pingyi^{3,4}

(1. China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Guizhou Transportation Planning Survey and Design Academy Co., Ltd., Guiyang 550001, China; 3. National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 4. Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering of Ministry of Education, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: With a fast development of hydraulic engineering, the hydropower engineering and port waterway engineering in the middle-upper reaches of the Yangtze River, how to ensure the safety of the moored ships in the inland navigation ports under the action of landslide surge is an extremely important issue. In order to well understand the influence degrees of the landslide surge impacting the inland navigation ports, model test researches were carried out by taking 3 000 t deck barges moored in the Jiannan Tuokou port as a research object. On the basis of analyses and studies of the impact factors of the mooring force and the impact energy by the action of the landslide surge, the change law of the mooring force and the impact energy was found out from the surge wave height and water depth. According to the specifications and test data, the empirical formula for the mooring force and impact energy was given by a regression analysis. Ascertain the influence degrees of the landslide surge impacting the inland navigation port, some countermeasures and suggestions were put forward for the port operation and management. The research results show that the findings have a high practical value and can be applied to the forecast and prevention of the landslide surge impacts on the navigation ports located at mountain rivers.

Key words: landslide surge; mooring line force; impact energy