

滑坡涌浪影响下船舶航行限制范围试验研究

路 鼎, 王平义, 喻 涛, 陈 里, 何 庆

(重庆交通大学 国家内河航道整治工程技术研究中心, 水利水电工程教育部重点实验室, 重庆 400074)

摘要: 三峡库区滑坡时有发生, 滑坡产生的涌浪对航道中的船舶航行安全构成巨大威胁。以万州沱口码头河段为原型, 设计岩体滑坡涌浪物理模型试验。试验中测得不同工况下首浪高度和沿程涌浪高度, 运用回归分析方法得到首浪高度和沿程涌浪衰减的经验计算式, 并由此推算得出船舶航行限制范围的计算式。运用船舶模型试验的方法对船舶航行限制范围计算式进行了验证, 同时对波流场中如何计算进行说明。船舶航行限制范围的确定可为船舶避险措施研究提供重要依据, 对减少滑坡涌浪对船舶损坏及人员伤亡具有重要的现实意义。

关 键 词: 滑坡体; 滑坡涌浪; 首浪高度; 衰减; 航行限制范围

中图分类号: TV139.2+3

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2014)04-0070-05

近年来随着三峡工程的运行, 水库的蓄水、放水、正常营运对库区岸坡稳定性产生了巨大影响, 也诱发了大量滑坡。水库库区内发生滑坡时, 由于巨大山体在短时间内高速滑入水中, 必然激起巨大的涌浪, 涌浪打翻船舶, 屡屡发生航行船舶船员伤亡、失踪事件。因此, 研究库区典型的岩体滑坡涌浪特性, 提出船舶航行限制范围计算方法以尽可能地减少滑坡涌浪致灾损失, 已经刻不容缓。

目前国内外对滑坡形成的机理及预防措施研究较多, 对滑坡涌浪的特性也开展了一定的研究。在滑坡涌浪的模型试验方面国内外学者已取得一定的成果, 国外学者 J. W. Kamphuis 和 R. J. Bowering^[1]通过模型试验, 提出了稳定浪高与滑坡单宽体积、弗劳德数之间的无量纲关系式; H. M. Fritz 等^[2]通过三维物理试验考虑了不同特征参数对涌浪的影响, 分析了涌浪引起的流场特点; M. Di Risio 等^[3]采用模型试验研究了滑坡沿着直线型库岸下滑激起的涌浪高度, 结果表明记录的波形通常先出现一个波峰, 然后出现波谷, 随着涌浪的沿程传播, 波峰高度趋向低于波谷高度, 波浪周期变大。赵根等^[4]在三峡枢纽 1:100 的整体模型上进行了围堰倾倒试验, 测量了三峡三期工程上游碾压混凝土围堰倾倒时的涌浪高度, 分析了涌浪特性及传播规律。任坤杰等^[5]通过散体模型试验, 得到首浪高度的经验公式。然而, 目前对三峡库区典型的岩体滑坡涌浪的试验研究仍然较少^[6-7], 对涌浪影响下船舶航行的限制也没有提出明确的解决方法。为此, 通过模型试验研究, 分析库区典型的岩体滑坡涌浪特性, 以确定船舶航行限制范围的计算方法具有重要的现实意义。

1 模型试验

1.1 模型设计

根据依托工程长江万州江南沱口码头河段情况, 模型采用 1:70 的几何比尺, 拟模拟河段范围在航道里程 335—330 km 之间, 实际长约 4 km(见图 1)。该河段处于危岩带附近, 区域内有万州港、江南沱口港等重要港口, 航运发达, 过往船舶较多。该河段是典型的弯曲河段, 如发生滑坡, 船舶不易操作避险, 因此选择该区域作为原型进行研究具有实际意义。

根据三峡库区大量滑坡体特征资料, 库区滑坡体多为泥岩和砂岩, 砂岩天然密度为 $2.2 \sim 2.7 \text{ g/cm}^3$, 泥

收稿日期: 2014-01-15

基金项目: 西部交通建设科技项目(20113288141160); 重庆市科技攻关项目(CSTC2009AC6045)

作者简介: 路 鼎(1989-), 男, 江苏盐城人, 硕士研究生, 主要从事港口、海岸及近海工程研究。

E-mail: 1059191462@qq.com 通信作者: 王平义(E-mail: py-wang@163.com)

岩天然密度为 $2.45 \sim 2.65 \text{ g/cm}^3$, 取其平均密度 2.5 g/cm^3 作为模型滑块的密度指标, 本试验采用散体模拟滑坡体, 用砂浆和石子混合制成大小不同的 5 种矩形块体, 保证密度相似, 并通过块体不同的排列组合堆放方式模拟滑体的离散程度和裂隙发育程度^[8]。

通过对壁面材料的反复比选, 保证试验的实测数据与原型吻合, 最终选用了涂漆铁质材料作为试验壁面材料, 制作滑槽。滑槽长度为 2 m, 两侧为可变宽度挡板, 可变范围为 $0.5 \sim 1.5 \text{ m}$ 。图 2 为滑槽和块体的照片。

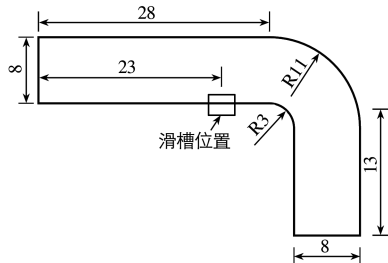


图1 模型概化平面(单位: m)

Fig. 1 Generalized section plan (unit: m)



图2 滑槽和块体

Fig. 2 Chute and block

1.2 试验工况设计

三峡水库的正常蓄水位为 175 m、汛期汛限水位为 145 m、枯水期消落水位为 155 m。概化后河道的底部平均高程为 93.55 m, 再根据模型 1:70 的几何比尺, 最终设计的 3 个特征水位相应的试验水深为: 0.74, 0.88 和 1.16 m。通过对库区滑坡区域滑面坡度的资料统计, 岩体滑坡滑面坡度分布在 $(20 \sim 60)^\circ$ 之间, 平均值为 36° 。因此, 滑面倾角选取 $20^\circ, 40^\circ$ 和 60° 这 3 个水平坡度作为滑坡滑面坡度。通过对库区滑坡体宽度、厚度等尺寸资料的收集分析, 试验选用固定长度 1 m, 宽度 0.5, 1.0 和 1.5 m, 厚度 0.2, 0.4 和 0.6 m 共 9 组块体方案。

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。

1.3 试验量测系统

本试验使用重庆交通大学西南水运工程科学研究所研制的 UBL-2 超声波多点波浪采测系统采集试验数据, 采集频率为 25 Hz。试验中在首浪附近区域和沿程布置若干测点, 对采集到的波面散点数据进行处理, 可计算得出各测点准确的涌浪高度。

2 成果分析

通过采测系统得到波面高程的散点数据。在处理本试验数据时, 将涌浪视作随机波浪, 采用跨零点法通过 VBA 编程实现对初始波高 H 和沿程波高 H_i 等数据的提取。

2.1 首浪高度计算式

通过单因素分析发现水深、坡度、滑坡厚度、宽度及滑块下滑速度为主要影响因素, 首浪高度可表示为:

$$H = f(h, w, b, \beta, v) \quad (1)$$

式中: H 为首浪高度; h 为富裕水深; w 和 b 分别为滑块的厚度和宽度; β 为滑坡入水角度; v 为块体下滑速度。分析可知: $v = (h, w, b, \beta)$, 故通过量纲分析可将式(1)变换为:

$$H/w = f(h/w, b/w, \beta) \quad (2)$$

将试验测得的首浪高度数据回归拟合, 得到了与试验首浪高度相关性较好 ($r^2 = 0.95$) 的经验公式(3):

$$(H/w) = 0.213486(b/w)^{0.87759}(h/w)^{-0.49532}\beta^{0.76568} \quad (3)$$

首浪高度计算值与试验值对比见图 3, 可见计算值与实测值的相关性较好。

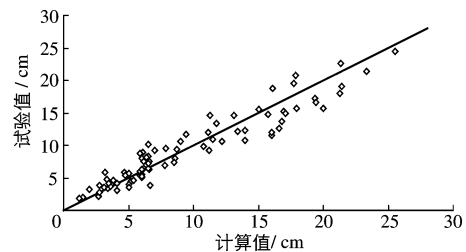


图3 首浪高度计算值与试验值比较

Fig. 3 Calculated and measured values given by primary wave height equation

2.2 波高沿程衰减计算式

潘家铮等认为以滑坡失事点为中心,波高和距离成反比^[9],从试验数据可见岩体滑坡涌浪波高衰减也符合这一规律;另外通过统计分析发现波高的衰减与水深和坡度等因素相关性较小,可以忽略其相关性。最终通过回归分析得到沿程波高与首浪波高和距离的关系见式(4)(相关系数 $r^2 = 0.94$)。图4为沿程涌浪计算值与试验值对比,可见公式拟合较好。

$$H_i/H = 29.925/(l/H) \quad (4)$$

式中: l 为河道中某点与滑坡失事点中心的距离。将式(3)代

入式(4)中得到不同介质滑坡产生的沿程波高与富裕水深、滑块宽度、厚度和角度的关系:

$$H_i = \frac{1.3639w^2(b/w)^{1.75518}(h/w)^{-0.99064}\beta^{1.53136}}{l} \quad (5)$$

2.3 静水船舶航行限制范围确定

目前对滑坡涌浪影响下船舶航行限制范围没有专门的研究,只能通过相关规定选取船舶航行的极限波高,再通过式(5)反推船舶航行限制范围。根据《内河船舶法定检验技术规则》的相关规定^[10],内河A级航区的波高范围为1.5~2.5 m,B级航区的波高范围为0.5~1.5 m,C级航区波高在0.5 m以下。从偏安全角度考虑,分别选取1.5和0.5 m作为A区和B,C区船舶航行的极限波高。另外航道中船闸泄水波高限定标准为0.5~0.6 m,当航道中有船闸时,取0.5 m作为极限波高。将1.5和0.5 m作为沿程波高代入式(5),求得船舶航行限制距离:

$$l_{\text{限制}} = \lambda w^2(b/w)^{1.75518}(h/w)^{-0.99064}\beta^{1.53136} \quad (6)$$

式中: λ 为将1.5和0.5 m的原型波高对应的模型波高代入式(5)后得到的系数,A区 λ 取63.6487,B,C区以及滑坡附近有船闸的区域 λ 取190.946。式中的 $l_{\text{限制}}$ 包含 $l_{\text{上游限制}}$ 和 $l_{\text{下游限制}}$,在静水中 $l_{\text{限制}} = l_{\text{上游限制}} = l_{\text{下游限制}}$ 。若计算的原型 l 为2 km,则限制范围为从滑坡处起向上游2 km,向下游2 km的范围。

由于缺少实测资料,采用试验方法来验证计算式的准确性。试验中将船舶模型放于河道模型中,通过摄像机摄影,读取涌浪时船舶横摇。将一次工况中读取的最大横摇角度与船舶允许横摇比较,若最大横摇角度小于船舶允许横摇,则船舶可以安全行驶,反之则不能安全行驶。船舶放置于距离首浪4 m位置(试验前通过预估,船舶在4 m处位置,可以保证不同试验工况中,一部分工况船舶是安全的,一部分工况船舶是不安全的;另外,由于试验模型尺寸和其他测量仪器安置的影响,选择4 m位置方便试验操作)。根据式(6)计算船舶航行限制距离 $l_{\text{限制}}$, $l_{\text{限制}} < 4$ m时,船舶可以安全航行,反之不可以安全航行。试验中船舶的允许最大横摇为 15° ^[11]。

图5为横摇与限制距离的比较,可以看出:当船舶航行限制距离 $l_{\text{限制}} > 4$ m时,最大横摇角度基本大于 15° ,从限制距离和横摇角度两方面都说明船舶不可以安全航行;反之,限制距离 $l_{\text{限制}} < 4$ m时,最大横摇角度基本小于 15° ,同样也是从限制距离和横摇角度两方面说明船舶可以安全航行。也就是说,用最大横摇角度与船舶允许横摇比较、判断船舶是否可以安全航行的方法,与通过限制距离计算、判断船舶是否可以安全航行的方法得到的结论基本一致。因此用船舶横摇试验的方法验证了船舶航行限制距离公式的可靠性。

2.4 波流场中航行限制范围确定

由于试验中不计水库水体流速,只研究静水中涌浪特征和衰减规律。如果流速较大,用式(6)计算船舶

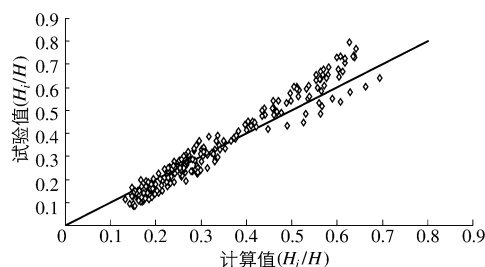


图4 沿程涌浪计算值与试验值比较

Fig. 4 Calculated and measured values given by wave decay equation

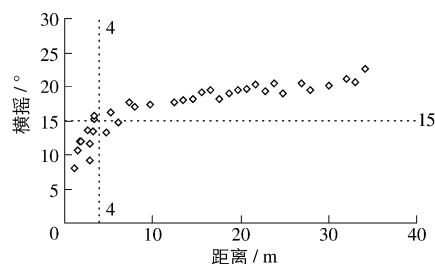


图5 横摇与限制距离的比较

Fig. 5 Comparison between rolling and limit distance

航行限制距离有一定误差。波、流相互作用后流场和波浪要素都会发生变化,波浪作用流场后,垂线平均流速变得均匀,波流场中垂线流速分布可以近似表达为 $U_{wc}(z)/U_{wc}(0) \approx 1.0$, 其中 $U_{wc}(z)$ 为波流场中垂线 z 坐标点处的水流速度; $U_{wc}(0)$ 为波流场中表面流速。再根据式 $U_{wc}(z)/U_0 \approx 7/8$ 可知波流场中表面流速比水流场中表面流速小, 其中 U_0 为纯水流的表面流速。所以不考虑波流作用后流速变化对船舶航行限制范围的影响。波流相互作用后波高变化可以用式(7)和(8)近似计算^[12]。

$$\text{波浪传播方向与水流流向相同或者相反时: } \frac{H'}{H_i} = \left(1 - \frac{U_c}{c}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{L_s}{L}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{A_s}{A}\right)^{\frac{1}{2}} \left(1 + \frac{U_c}{c} \frac{2 - A_s}{A}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

$$\text{波浪传播方向与水流斜交时: } \frac{H'}{H_i} = \left(\frac{A_s}{A}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{L_s}{L}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{\cos\alpha_s}{\cos\alpha}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

式中: H' 为波流共存时的波高; H_i 为无流时的沿程波高; U_c 为水流平均速度, c 为波浪的视速度, $c = U_c + c_r$, c_r 为波浪相对水流的传播速度, $c_r = ((g/k) \tanh(kh))^{\frac{1}{2}}$; L 为波流共存中的波长, L_s 为无流时波长, 且 $L/L_s = c/c_s = \frac{\tanh(kh)}{(1 - U_c/c)^2 \tanh(k_s h)}$, c_s 为无流时的波速, k_s 为无流时的波数, $A_s = 1 + \frac{2k_s h}{\sinh(2k_s h)}$, $A = 1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)}$, α 为波流共存时波峰线与水流动向之间的夹角, α_s 为无流时波峰线与水流动向之间的夹角。

具体计算中波浪周期可采用下式进行:

$$T = 9P^{\frac{1}{2}}(h/g)^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

$$P = FS^{\frac{1}{2}} M^{\frac{1}{4}} [\cos[(6\beta/7)]]^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

式中: P 为波浪冲击参数^[9], 是涌浪产生和传播中的重要参数; F 为滑动相似系数, $F = u/(gh)^{1/2}$; S 为滑体相对厚度, $S = w/h$; M 为相对质量, $M = \rho v/(\rho_w b h^2)$ 。深水波时无流波长可采用 $L_s = gT^2/(2\pi)$ 近似计算, 浅水波时无流波长可采用 $L_s = T\sqrt{gh}$ 近似计算。

根据上述分析, 波流场中船舶航行限制距离计算式可表示为:

$$l_{\text{限制}} = \lambda \varphi w^2 (b/w)^{1.755\ 18} (h/w)^{-0.990\ 64} \beta^{1.531\ 36} \quad (11)$$

式中: 波浪传播方向与水流流向相同或相反时, $\varphi = (1 - (U_c/c)^{\frac{1}{2}} (L_s/L)^{\frac{1}{2}} (A_s/A)^{\frac{1}{2}} (1 + (U_c/c) ((2 - A_s)/A))^{\frac{1}{2}})$; 波浪传播方向与水流斜交时, $\varphi = (A_s/A)^{\frac{1}{2}} (L_s/L)^{\frac{1}{2}} (\cos\alpha_s/\cos\alpha)^{\frac{1}{2}}$ 。波流场中计算限制距离 l 需考虑上下游不同情况分别计算。

3 结 语

本文通过三峡库区万州沱口码头河段物理模型试验, 模拟岩体滑坡涌浪特性及其对船舶航行的影响, 运用回归分析得到岩体滑坡涌浪首浪高度计算式; 运用回归分析得到涌浪沿程衰减计算式, 并推导得出滑坡涌浪影响下船舶航行限制范围的计算式, 同时还简化了考虑波流作用下安全航行范围公式的计算方法; 在原型实测资料缺乏的情况下, 采用船舶横摇试验结果较好地验证了船舶航行限制范围的计算式。

本文主要对三峡库区万州沱口码头河段滑坡涌浪进行研究, 可为该河段船舶避险措施的研究提供重要依据, 但对其他区域河段是否适用还有待进一步研究验证。

参 考 文 献:

- [1] KAMPIS J W, BOWERING R J. Impulse waves generated by landslides [C] // American Society of Civil Engineers. Proceedings of the 12th Coastal Engineering Conference, Washington D C: ASCE, 1970, 575-588.
- [2] FRITZ H M, HAGER W H, MINOR H E. Near field characteristics of landslide generated impulse waves [J]. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 2004, 130(6): 287-302.
- [3] DI RISIO M, BELLOTTI G, PANIZZO A, et al. Three-dimensional experiments on landslide generated waves at a sloping coast

- [J]. Coastal Engineering, 2009(56): 659-671.
- [4] 赵根, 李学海, 吴新霞, 等. 三峡三期 RCC 围堰倾倒法拆除涌浪测试模型试验[J]. 爆破, 2006, 23(3): 1-4. (ZHAO Gen, LI Xue-hai, WU Xin-xia, et al. Swell test on model for upstream roller compactions concrete cofferdam demolition blasting in the third issue of Three Gorges of Yangtze River Hydro-junction[J]. Blasting, 2006, 23(3): 1-4. (in Chinese))
- [5] 任坤杰, 韩继斌. 散体滑坡体首浪高度模型试验研究[J]. 人民长江, 2011, 42(24): 69-75. (REN Kun-jie, HAN Ji-bin. Experimental research on primary wave height generated by loose earth landslide[J]. Yangtze River, 2011, 42(24): 69-75. (in Chinese))
- [6] HUANG Bo-lin, YIN Yue-ping, CHEN Xiao-ting, 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.
- [7] ATAIE-ASHTIANI B, MALEK-MOHAMMADI S. Near field amplitude of subaerial landslide generated waves in dam reservoirs [J]. Dam Engineering, 2007, 17(4): 197-222.
- [8] DL/T 5246-2010, 水利水电工程滑坡涌浪模拟技术规程[S]. (DL/T 5246-2010, Code for landslide-generated waves simulation for hydropower & water resources[S]. (in Chinese))
- [9] 黄波林, 陈小婷, 殷跃平, 等. 滑坡崩塌涌浪计算方法研究[J]. 工程地质学报, 2012, 20(6): 909-915. (HUANG Bo-lin, CHEN Xiao-ting, YIN Yue-ping, et al. Computing system for impulse wave in reservoir generated by landslide & rockfall. Journal of Engineering Geology, 2012, 20(6): 909-915. (in Chinese))
- [10] 张敏. 内河船舶临时从事海上施工建设的准入标准研究[J]. 中国水运, 2012(6): 42-43. (ZHANG Min. The standard research for inland river ships used for offshore construction casually[J]. China Port & Waterway, 2012(6): 42-43. (in Chinese))
- [11] 门永强. 山区河道型水库陡岩滑坡涌浪特性及对航道通航条件影响研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2012. (MEN Yong-qiang. Experimental research on dangerous rock-type landslide swell characteristics and impact for navigable conditions of the river-channel type reservoir in mountainous area[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2012. (in Chinese))
- [12] 吴宋仁, 严以新. 海岸动力学[M]. 北京: 人民交通出版社, 2000. (WU Song-ren, YAN Yi-xin. Coastal dynamics[M]. Beijing: China Communication Press, 2000. (in Chinese))

Experimental studies of restricted waterway for ships during landslide generated waves

LU Ding, WANG Ping-yi, YU Tao, CHEN Li, HE Qing

(National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering of the Ministry of Education, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: Landslides often occur in the Three Gorges Reservoir area. Landslide generated waves often mark threats against vessels in the waterways. Based on this, a physical model for simulating the rock landslide generated waves is designed, taking the river reach near the Tuokou port in Wanzhou harbor as the prototype. Primary wave height and the wave height in different working conditions are obtained from the special instruments placed in the model. A regression analysis method is used to get the empirical formula for the primary wave height and attenuation of wave height. And the formula for navigation limits of ships in the inland waterways is given by the empirical formula. The formula is checked and verified by the ship model tests. Then we explain the formula for the waterway during the wave flow field. The determination of scope of restricted waterway for vessel can provide an important basis for the research on measures for vessel safety. It is of practical significance to reducing the damage of the vessel and casualties caused by landslide generated waves.

Key words: landslide mass; landslide generated waves; primary wave height; decay of waves; restricted waterway for ships