

马斌,李会平,刘东明,等.窄深河谷库岸滑坡坝前涌浪特性及浪高影响因素[J].南水北调与水利科技(中英文),2023,21(2):362-370.
MA B, LI H P, LIU D M, et al. Surge characteristics and influence factors of wave height of landslide near the dam in a narrow deep valley[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(2): 362-370. (in Chinese)

窄深河谷库岸滑坡坝前涌浪特性及浪高影响因素

马斌¹,李会平¹,刘东明¹,刘永玺¹,王玉孝²,芦永政²

(1. 天津大学水利水电工程仿真与安全国家重点实验室,天津 300072;

2. 青海黄河上游水电开发有限责任公司工程建设分公司,西宁 810007)

摘要:为研究窄深河谷中近坝库区发生整体大方量失稳时次生涌浪在坝前区域的涌浪特性及影响因素,依托 1:100 物理模型开展窄深河谷近坝库区滑坡涌浪模型试验,研究坝前区域有较大越浪风险的坝肩测点的首浪高度和最大浪高,重点对比分析入水方量、入水速度对首浪高度和最大浪高的影响规律;并以量纲分析为基础,通过非线性回归分析得到坝肩位置的浪高预测公式。结果表明:坝前各点涌浪变化趋势相近,坝前区域的最大浪高几乎都出现在右坝肩的位置,具有更大的翻坝风险;在试验工况范围内,首浪高度随入水方量的增加有明显增加;滑块方量比入水速度对浪高的影响更大,且首浪高度比最大浪高对方量变化、入水速度变化的敏感性更高;坝前区域右坝肩的首浪高度、最大浪高对滑块宽度(方量)变化的平均敏感度系数分别为 0.858、0.358,对入水速度变化的平均敏感度系数分别为 0.217、0.115。依据试验成果拟合的浪高预测公式:首浪高度预测一致性较好,其预测误差低于 3%;最大浪高波动随机性较大,预测误差小于 15%。

关键词:库区涌浪;浪高分析;模型试验

中图分类号: TV698 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2023.0037

波高特别是最大波峰是有关灾害预防主要关心的问题,准确测定涌浪发生时的最大高度及其位置则是灾害预测及评估的关键。1963 年意大利瓦伊昂水库失事之后,滑坡涌浪问题逐渐成为研究热点。国内外学者针对库区滑坡涌浪问题进行了广泛研究。潘家铮^[1]建立了岸坡水平和垂直变形情况下次生涌浪首浪高度及衰减的公式;赵兰浩等^[2]对近年来库区滑坡涌浪研究中数值模拟方法的研究进展和发展趋势进行了总结;韩林峰等^[3]从近场涌浪波特性的角度对理论分析、数值模拟和模型试验研究进行了对比;殷坤龙等^[4]对水库滑坡涌浪风险研究现状进行了总结。

Heller 等^[5]在重力相似基础上研究尺度效应对涌浪高度的影响;Panizzo 等^[6]基于三维块体滑坡试验,研究涌浪特征随传播距离与方向的变化规律;Huang 等^[7-8]通过模型试验,研究龚家方碎裂岩体滑坡产生涌浪的过程;刘艺梁^[9]利用白水河滑坡的三维物理模型,提出涉水滑坡失稳后的速度计算模型;肖莉丽等^[10]、殷坤龙等^[11]和袁培银等^[12]利用三峡库

区典型河道的三维简化模型,研究涌浪近场波幅及传播特性;岳书波等^[13]利用高速摄像研究了涌浪初始运动特征及衰减规律;曹婷等^[14]基于模型试验,提出岩质滑坡涌浪爬高估算公式;戴磊等^[15]考虑滑块体积和入水区域水深等因素开展模型试验,得到涌浪波峰和衰减预测公式;McFall 等^[16]在三维散体滑坡试验中观察到非线性振荡和非线性跃迁类型的波。张少强等^[17]通过 FLOW-3D 软件探究滑坡涌浪在不同场域的涌浪水波特性;朱朋等^[18]基于 GEO-SLOPE 分析软件对西南某电站库区堆积体的稳定性进行计算与评价,并分别用能量法和潘家铮法对涌浪高度进行计算;霍志涛等^[19]基于水波动力理论 FAST 模拟软件对三峡库区黑石板滑坡涌浪进行计算分析及预测;邓成进等^[20]、郑莉等^[21]研究了库区滑坡涌浪传播及其与大坝相互作用机理。

由于滑坡体类型与试验条件的差异,不同学者考虑的影响因素有所不同。Fritz 等^[22]分析滑体入水弗劳德数和厚度的影响;Zweifel 等^[23]主要研究滑体入水弗劳德数、厚度和质量影响;马斌等^[24]研究

收稿日期:2022-08-06 修回日期:2023-03-08 网络出版时间:2023-04-12

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20230412.1039.017.html

基金项目:国家自然科学基金项目(51909185);河北省自然科学基金创新研究群体项目(E2020402074)

作者简介:马斌(1979—),男,安徽宿州人,副教授,博士,主要从事高坝泄洪消能安全研究。E-mail: mabin97@tju.edu.cn

通信作者:李会平(1975—),女,河北行唐人,副教授,博士,主要从事高坝泄洪消能安全研究。E-mail: lihui ping@tju.edu.cn

滑块形状和滑块入水方量对涌浪特性的影响; Lindström^[25] 在散体滑坡试验中考虑散体入水弗劳德数、散体体积、散体中值粒径; 张玉洁等^[26] 研究滑坡体材料对涌浪特征的影响。

物理模型试验在滑波涌浪的研究中一直处于十分重要的地位, 在现有的技术条件下, 滑坡涌浪模型的建立往往需要进行不同程度的简化, 尤其是以研究波浪理论为基础的二维或三维涌浪模型, 对滑块、滑道以及地形都进行了较大的简化; 而针对特定工程的涌浪模型试验往往应用于对特定工程的定量分析和研究, 其可靠性较高, 在实际工程或相近工程中的应用具有不可忽视的价值。较大比尺的模型试验往往可以获得更高相似度的模拟结果, 本文基于某实际工程中的潜在滑坡体进行研究, 建立 1 : 100 近坝库区真实地形, 以简化的刚性滑块开

展滑坡涌浪模型试验, 分析窄深河谷中近坝库区发生整体大方量失稳时次生涌浪在坝前区域的涌浪特性及影响因素。

1 模型构建

1.1 模型建立

依托实际工程, 按照重力相似准则、模型几何比尺 1 : 100, 构建窄深河谷库区滑坡涌浪物理模型。模拟范围为坝上游 3.2 km, 地形高程模拟到 2 510 m (正常蓄水位 2 452 m、坝顶高程 2 460 m), 失稳区对岸地形加高, 模型模拟范围见图 1。库区按实际地形模拟, 采用水泥砂浆抹面; 滑坡为花岗岩 (密度为 2 650 kg/m³), 为满足重力相似, 试验所用滑块为铁皮填充混凝土。模型现场照片见图 2。

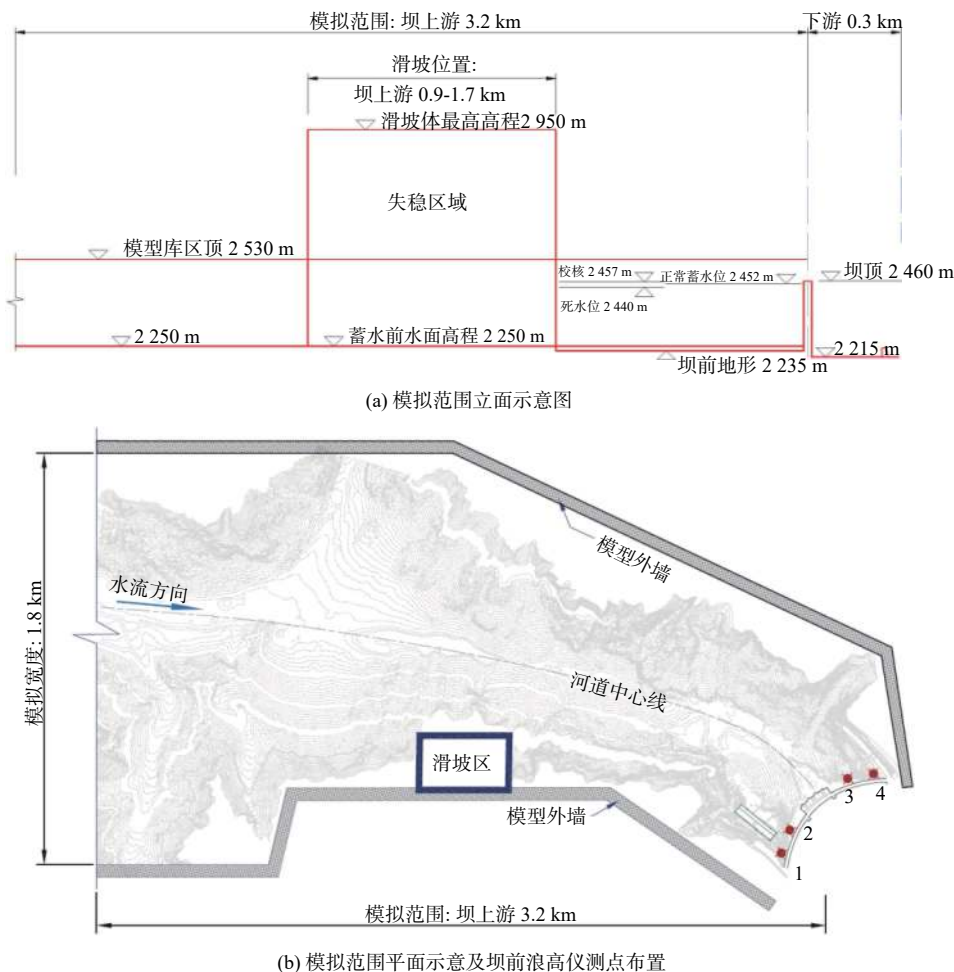


图 1 物理模型模拟范围及坝前浪高仪测点布置

Fig. 1 Scope of the physical model and measuring points arrangement of wave altimeter

1.2 数据采集

1.2.1 浪高仪测点布置

涌浪时程变化数据用 ULD200 数字浪高仪及配

套采集系统进行采集, 坝前测点布置见图 1(b), 图中只标注文中提到的测点。为采集到连续的波高数据, 浪高仪布置在坝体上游侧距离坝体表面 5 cm 的

位置。

1.2.2 滑块入水速度控制

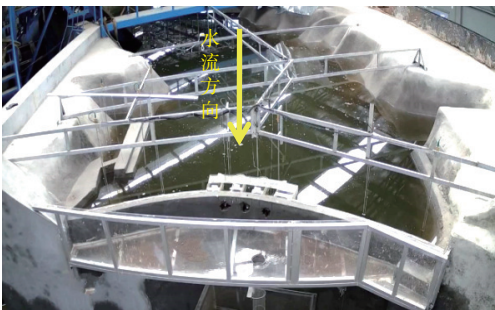
模型试验中通过视频处理得到滑块的“时间-位移”关系曲线,通过改变滑块的初始位置来改变滑块的入水速度,滑块入水速度控制见图 3。每次试验都进行视频拍摄对入水速度进行校核。事先在滑动面和滑块上放置标记点,测量滑动面上 4 个固定标记点的相对坐标并建立空间坐标系;利用自编程序处理高帧率入水画面,通过分析滑块上标记点的坐标变化得到滑块“时间-位移”曲线及“时间-速度”关系,从而确定每次试验滑块的入水速度。

保守, 所得成果用于指导实际工程进行涌浪防护偏于安全。

模型试验选用等腰梯形滑块整体下滑, 入水过程及入水后一直保持整体状态; 入水角度为 45° ; 对 8 个不同方量 ($25 \text{ 万} \sim 200 \text{ 万 m}^3$)、7 个不同入水速度 ($20 \sim 55 \text{ m/s}$) 进行了滑坡涌浪模型试验。滑块入水方式及拼装见图 4, 图中只列出了 25 万 m^3 、 100 万 m^3 的拼装示意, 其他方量的滑块类似。 25 万 m^3 的等腰梯形滑块由 8 个块体拼装而成, 其他方量的滑坡体再由多个 25 万 m^3 的等腰梯形断面滑块拼装而成。



(a) 库区滑坡区域



(b) 库区坝前区域

图 2 模型现场照片

Fig. 2 Photo of the physical model

1.3 试验工况

由于实际滑坡体的复杂性, 模型试验条件下不能完全模拟真实的滑坡体形状, 本文采用规则的等腰梯形断面的滑块, 试验工况与真实情况相比更加

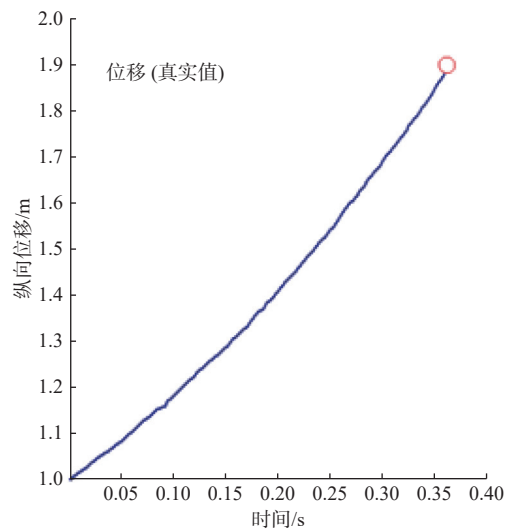
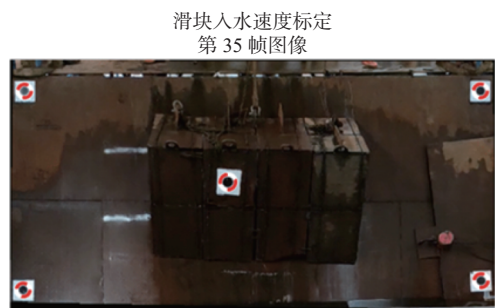


图 3 滑块入水速度控制示意图

Fig. 3 Water-entry velocity control of landslide

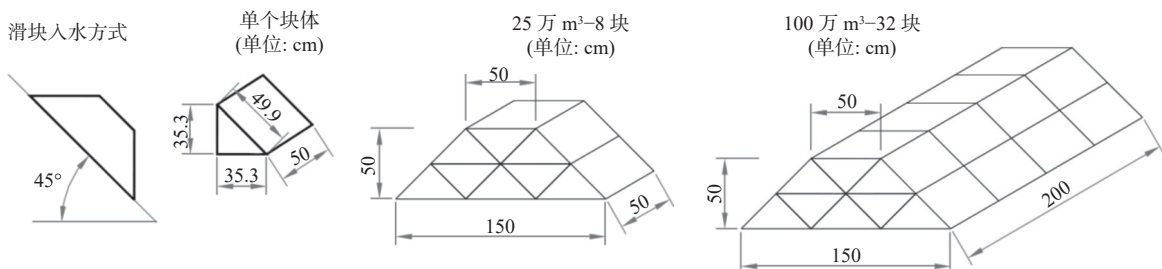


图 4 滑块入水方式及拼装示意图

Fig. 4 Water-entry mode and assembly of landslide

2 不同因素对坝前涌浪特性的影响

涌浪的形成机理和传播特性受诸多因素影响,坝前区域的涌浪高度直接影响大坝及其他设施的安全,若涌浪翻坝将造成更大的危害。本文主要对滑坡体入水方量和入水速度对浪高的影响进行试验研究。根据水体与滑坡体的单宽比可将水体分为深水区和浅水区;入水后部分淹没的滑坡也称为浅水滑坡,反之则为深水滑坡^[27]。根据滑块尺寸与水深的对比关系及滑块入水后的实际情况,本文所述的滑坡属于深水滑坡。

图5为等腰梯形断面滑块整体一次性入水3个典型工况坝前测点浪高时程线。

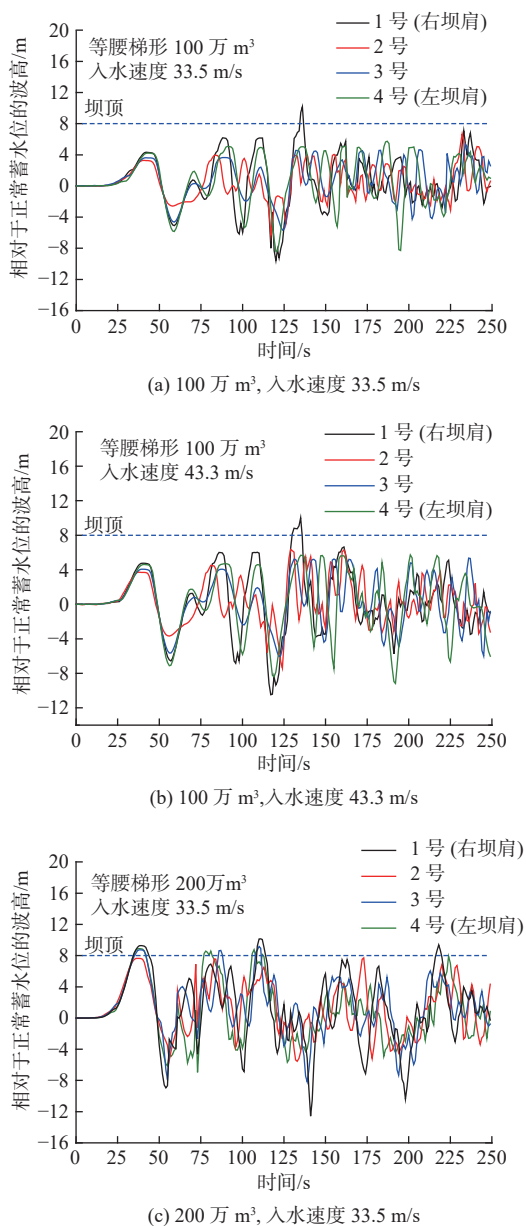


图5 坝前测点浪高时程线

Fig. 5 Time history of wave height

2.1 涌浪特性

依据坝前测点浪高时程线(图5)可知:在不同入水方量和入水速度工况下,坝前各测点涌浪变化趋势相近,在浪高变化上有所不同。岸坡失稳时涌浪到达坝前测点的时间约为25 s,失稳区到坝前的距离约为1 200 m,计算得出波速约为48 m/s;由坝前测点浪高时程线得出波周期约为23 s,计算得出涌浪波长约为1 100 m;库区水深约200 m,则 $h/L \approx 0.182$ (式中 h 为库区水深, m; L 为涌浪波长, m)。对照波浪性质的界定“ $h/L \leq 0.05$ 为长波, $0.05 < h/L \leq 0.5$ 为中长波, $h/L > 0.5$ 为短波”,可以判定近坝库区涌浪为“中长波(偏长波)”。涌浪蕴含能量巨大,能量沿水深衰减较小,形式类似湖库海啸,只在近坝库区水面表层设置消浪设施的消浪效果甚微。本文重点研究坝前测点的首浪高度和最大浪高,为防护措施提供依据。

坝前区域的最大浪高几乎都出现在右坝肩1号测点,具有更大的翻坝风险。由于在坝前区域河谷走向略偏向右岸,涌浪在左岸反射后传至右岸导致右岸浪高叠加更严重,因此重点关注最具翻坝风险的右坝肩1号测点的首浪高度和最大浪高。

2.2 入水方量影响

右坝肩1号测点的首浪高度和最大浪高随入水方量的变化趋势见图6。

在试验范围内:首浪高度随入水方量的增加有明显增加,不同入水速度有相似的规律。入水方量小于100万 m^3 时最大浪高基本随方量的增加而增加,入水方量在100万~200万 m^3 时最大浪高随方量的变化不明显;不同入水速度有相似的规律。200万 m^3 、入水速度40~45 m/s整体一次性入水,右岸坝肩1号测点首浪高度为8.64 m(超过坝顶0.64 m)、最大浪高达10.62 m(超过坝顶2.62 m)。

2.3 入水速度影响

右坝肩1号测点的首浪高度和最大浪高随入水速度的变化趋势见图7。

在试验范围内:首浪高度、最大浪高随入水速度的增加整体上略有增加,但增加的幅度不大,且并非呈现严格的增加趋势;总体来说,首浪高度、最大浪高受入水速度的影响不大。100万 m^3 整体一次性入水,入水速度从22 m/s增加至52 m/s,右岸坝肩1号测点首浪高度从4.08 m增加至4.72 m、最大浪高从9.57 m(超过坝顶1.57 m)增加至10.24 m(超过坝顶2.24 m)。

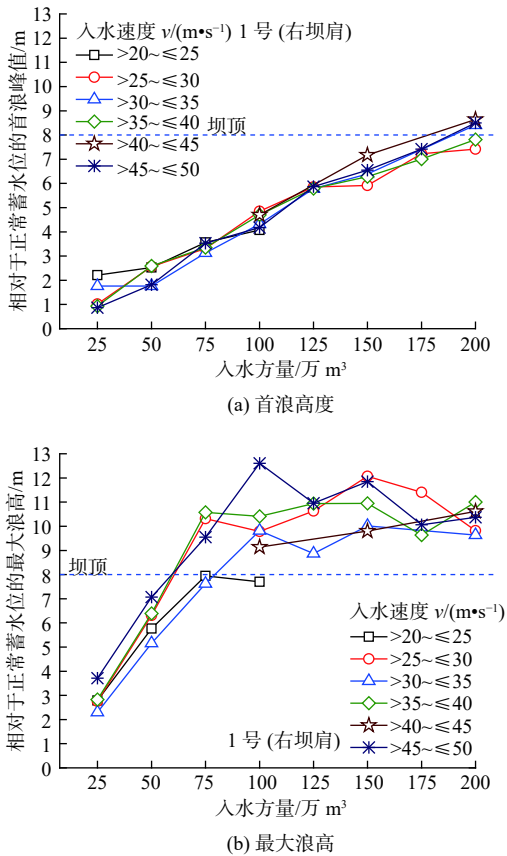


图 6 入水方量对首浪高度、最大浪高的影响
Fig. 6 The influence of landslide volume on the primary wave height and the maximum wave height

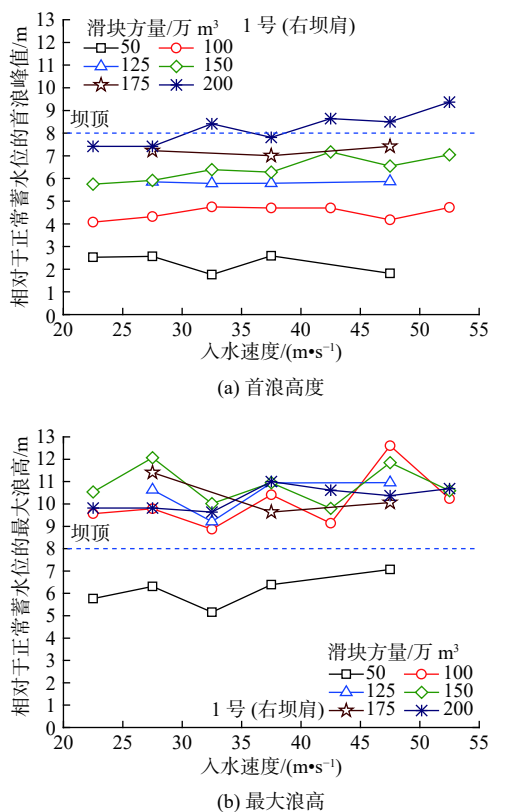


图 7 入水速度对首浪高度、最大浪高的影响
Fig. 7 The influence of water-entry velocity on the primary wave height and the maximum wave height

3 浪高分析

3.1 浪高敏感性分析

试验采用固定其他自变量,研究某一自变量变动对因变量的影响。敏感度分析用于研究因变量受自变量变化的影响程度。

$$\text{敏感度系数} = \frac{\text{因变量变化率}}{\text{某一自变量变化率}} \quad (1)$$

选取坝前区域右坝肩 1 号测点的部分试验数据,分析首浪高度和最大浪高对滑块入水方量、入水速度的敏感性,分别见表 1、表 2。

根据敏感性分析表 1、表 2 可以看出:首浪高度、最大浪高对块体方量(宽度)变化的敏感性大于对入水速度变化敏感性;相比于最大浪高,首浪高度对方量变化、入水速度变化的敏感性更大。坝前区域右坝肩 1 号测点的首浪高度、最大浪高对滑块宽度(方量)变化的平均敏感度系数分别为 0.858、0.358,对入水速度变化的平均敏感度系数分别为 0.217、0.115。

由于波浪的色散效应以及河谷窄深地形的影响,首浪在河谷中波高衰减迅速,涌浪在坝前区域的涌高更多受波列总能量的影响;在整个入水过程中,滑块排水体积和扰动能力受滑块方量(宽度)影响更大、对波列能量的影响更为明显,因此坝前区域浪高对滑块方量变化敏感性更高。

3.2 浪高预测公式分析

综合考虑影响涌浪高度的因素及样本数量,选取模型试验变量中滑块入水速度 v 、滑块宽度 b 两个影响因素进行分析,以求得坝前区域右坝肩 1 号测点涌浪高度的回归分析关系式。使用以量纲推导分析为基础的多元非线性回归分析方法对 36 组试验数据进行分析处理,拟合出以滑块宽度 b 、滑块入水速度 v 为回归自变量,坝前浪高值 H 为因变量的回归方程式。

3.2.1 量纲分析

试验中滑坡涌浪浪高涉及的物理量一共 5 个,这些物理量之间关系式为

$$H = f(h, \rho, g, v, b) \quad (2)$$

式中: H 为涌浪高度, m; h 为入水区域静水深, m; ρ 为流体密度, kg/m^3 ; g 为当地重力加速度, m/s^2 ; v 为滑块入水时刻速度, m/s ; b 为滑块宽度, m。

选取基本物理量 h 、 ρ 、 g , 由 π 定理有:

$$\pi = \frac{H}{h}, \pi_4 = \frac{v}{\sqrt{gh}}, \pi_5 = \frac{b}{h} \quad (3)$$

式中: π 、 π_4 、 π_5 为无量纲的比例系数。

表 1 首浪高度、最大浪高对入水方量(宽度)的敏感性(入水速度 30~35 m/s)

Tab. 1 Sensitivity of the primary wave height and the maximum wave height to landslide volume(width)(velocity:30-35 m/s)

方量/ 万m ³	滑块宽度/ m	宽度变化率/ %	右坝肩1号测点-首浪高度敏感性				右坝肩1号测点-最大浪高敏感性			
			首浪高度/ m	首浪高度 变化率/%	敏感度系数	平均敏感度 系数	最大浪高/m	最大浪高 变化率/%	敏感度系数	平均敏感度 系数
200	400	100	7.92	83.33	0.833		10.39	2.16	0.022	
150	300	50	5.94	37.50	0.750		9.56	-6.00	-0.120	
125	250	25	5.14	18.98	0.759		8.84	-13.08	-0.523	
100	200	0	4.32	0	-	0.858	10.17	0	-	0.358
75	150	-25	3.28	-24.07	0.963		8.16	-19.76	0.791	
50	100	-50	1.76	-59.26	1.185		5.16	-49.26	0.985	
25	50	-75	2.19	-49.31	0.657		2.58	-74.63	0.995	

注: (1) 滑块宽度指垂直入水速度方向的滑块尺寸, 试验中滑块横截面积不变, 通过调整宽度来改变入水方量。(2) 表中宽度变化率是指以宽度 200 m 的滑块(100 万 m³) 为基准, 其他滑块宽度变化量与基准滑块宽度的比值, 文中采用百分数(%)表示。

表 2 首浪高度、最大浪高对入水速度的敏感性(入水方量 100 万 m³)

Tab. 2 Sensitivity of the primary wave height and the maximum wave height to water-entry velocity(volume:10⁶ m³)

速度/ (m·s ⁻¹)	速度变化率/ %	右坝肩1号测点-首浪高度敏感性				右坝肩1号测点-最大浪高敏感性			
		首浪高度/m	首浪高度 变化率/%	敏感度系数	平均敏感度 系数	最大浪高/m	最大浪高 变化率/%	敏感度系数	平均敏感度 系数
52.7	58.73	4.72	9.26	0.158		10.24	10.46	0.178	
43.3	30.42	4.77	10.42	0.342	0.217	10.01	7.98	0.262	0.115
33.2	0.	4.32	0			9.27	0		
21.9	-34.04	4.10	-5.09	0.150		9.57	3.24	-0.095	

注: 表中速度变化率是指以 33.2 m/s 入水速度为基准, 其他入水速度变化量与基准入水速度的比值, 文中采用百分数(%)表示。

则

$$\frac{H}{h} = f_1\left(\frac{v}{\sqrt{gh}}, \frac{b}{h}\right) = f_2\left(\frac{v}{\sqrt{gh}}\right) f_3\left(\frac{b}{h}\right) \quad (4)$$

即

$$H = h f_2\left(\frac{v}{\sqrt{gh}}\right) f_3\left(\frac{b}{h}\right) \quad (5)$$

式中: f_1 、 f_2 、 f_3 为待定函数关系式, 需要利用试验数据进行回归分析确定。

则以量纲分析为基础的非线性回归方法, 浪高公式为

$$H = a_1 h \left(\frac{v}{\sqrt{gh}}\right)^{a_2} \left(\frac{b}{h}\right)^{a_3} \quad (6)$$

式中: a_1 、 a_2 、 a_3 为待定系数, 其他变量意义同前。

3.2.2 浪高公式

对坝前区域右坝肩 1 号测点首浪高度公式、最大浪高公式进行拟合, 经 SPSS 多次迭代计算得到最优解。

坝前区域右坝肩 1 号测点首浪高度和最大浪高为

$$H_1 = 0.022h \left(\frac{v}{\sqrt{gh}}\right)^{0.139} \left(\frac{b}{h}\right)^{0.891}, R^2 = 0.908 \quad (7)$$

$$H_{1\max} = 0.042h \left(\frac{v}{\sqrt{gh}}\right)^{0.086} \left(\frac{b}{h}\right)^{0.424}, R^2 = 0.779 \quad (8)$$

式中: H_1 为右坝肩 1 号测点首浪高度, m; $H_{1\max}$ 为右坝肩 1 号测点最大浪高, m; R^2 为决定系数; 其他变量意义同前。

用公式 (7)~(8) 对坝前区域右坝肩 1 号测点的首浪高度及最大浪高进行预测, 并与试验数据进行对比。浪高预测值与试验值对比散点图及包络线见图 8。浪高预测值和试验值对比散点几乎都分布在 $Y=X$ 直线周围, 说明回归公式效果良好, 可以较好预测坝前区域首浪高度和最大浪高。

3.3 公式验证及适用性分析

选取没有参与公式拟合的 3 组典型工况的试验数据对坝前区域右坝肩 1 号测点的首浪高度公式、最大浪高公式进行检验, 具体拟合偏差和误差见表 3。拟合的回归公式计算结果与试验结果存在不同程

度的误差;首浪高度拟合偏差基本在 0.14 m 以内,最大误差约 2.91%;最大浪高往往由涌浪叠加而成,

受库区地形影响较大导致波动较大,最大拟合偏差 1.68 m,最大误差约 14.46%。

表 3 首浪高度及最大浪高公式检验

Tab. 3 Verification of the primary wave height and the maximum wave height formula

入水方量/万 m ³	入水速度/(m·s ⁻¹)	首浪高度——公式(7)检验				最大浪高——公式(8)检验			
		试验结果/m	拟合结果/m	拟合偏差/m	误差/%	试验结果/m	拟合结果/m	拟合偏差/m	误差/%
100	34.5	4.13	4.25	0.12	2.91	8.94	8.13	-0.81	-9.06
150	48.4	6.31	6.39	0.08	1.27	11.62	9.94	-1.68	-14.46
175	35.0	6.87	7.01	0.14	2.04	11.04	10.32	-0.72	-6.52

从图 8 也可以看出:浪高公式对首浪高度的预测精度高于最大浪高;首浪高度超过 8 m 以后预测误差不得超过 12%;最大浪高更容易受到两岸山体、坝体及其他建筑等的影响,涌浪反射叠加以及部分水体翻坝使得最大浪高更加复杂,最大浪高的预测也更加困难,在最大浪高超过 8 m 以后预测误差明显增大,但最大浪高预测误差不得超过 25%。

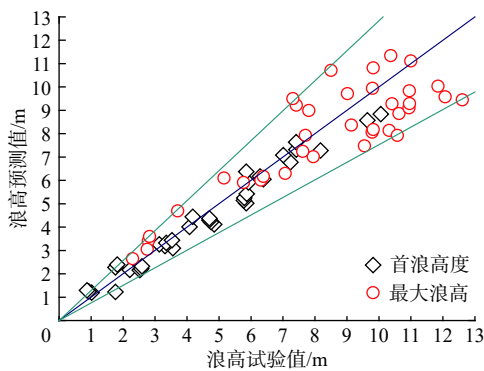


图 8 浪高预测值与试验值对比散点图

Fig. 8 Comparison between predicted and experimental value of wave height

由于控制因素和试验条件的差别,本文所拟合公式的预测结果与国内外传统公式存在不同程度的差别,基本只适用于与本研究近似的窄深河谷近坝岸坡的整体大方量滑坡涌浪分析。

4 结论

基于物理模型试验,研究入水方量、入水速度对坝前区域右坝肩测点首浪高度和最大浪高的影响规律,并拟合首浪高度和最大浪高公式。主要结论如下:

文中的滑坡涌浪经试验数据验证为中长波(偏长波),坝前区域的最大浪高出现在右坝肩 1 号测点,具有更大的翻坝风险。

在试验范围内(入水方量 25 万~200 万 m³、入水速度 20~55 m/s):首浪高度随入水方量的增加有

明显增加;最大浪高在入水方量小于 100 万 m³ 时基本随方量的增加而增加,最大浪高在入水方量为 100 万~200 万 m³ 时随方量的变化不明显且均超过坝顶。首浪高度、最大浪高随入水速度的增加整体上略有增加但并非呈严格增加趋势。

滑块方量变化比入水速度变化对首浪高度和最大浪高的影响更大;首浪高度比最大浪高对方量变化和入水速度变化的更加敏感。坝前区域右坝肩首浪高度、最大浪高对滑块宽度(方量)变化的平均敏感度系数分别为 0.858、0.358,对入水速度变化的平均敏感度系数分别为 0.217、0.115。

得到首浪高度和最大浪高公式 $H_1 = 0.022h \left(\frac{v}{\sqrt{gh}}\right)^{0.139} \left(\frac{b}{h}\right)^{0.891}$ 和 $H_{1max} = 0.042h \left(\frac{v}{\sqrt{gh}}\right)^{0.086} \left(\frac{b}{h}\right)^{0.424}$,首浪高度预测效果较好,最大浪高预测误差相对较大。首浪高度低于和超过 8 m 时,预测误差分别低于 3% 和 12%;最大浪高低于和超过 8 m 时,预测误差分别低于 15% 和 25%。由于控制因素和试验条件的限制,该公式基本仅适用于与本研究近似的窄深河谷近坝岸坡的整体大方量滑坡涌浪分析。

参考文献:

- [1] 潘家铮. 建筑物的抗滑稳定和滑坡分析[M]. 北京:水利出版社, 1980.
- [2] 赵兰浩, 侯世超, 毛佳. 库区滑坡涌浪数值模拟方法研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2016, 36(2): 79-86. DOI: 10.3880/j.issn.1006-7647.2016.02.015.
- [3] 韩林峰, 王平义, 牟萍, 等. 滑坡涌浪近场波特特性研究综述[J]. 武汉大学学报(工学版), 2021, 54(6): 477-487. DOI: 10.14188/j.1671-8844.2021-06-001.
- [4] 殷坤龙, 张宇, 汪洋. 水库滑坡涌浪风险研究现状和灾害链风险管控实践[J]. 地质科技通报, 2022, 41(2): 1-12. DOI: 10.19509/j.cnki.dztkq.2022.0064.
- [5] HELLER V, HAGER W H, MINOR H. Scale effects

- in subaerial landslide generated impulse waves[J]. *Experiments in Fluids*, 2008, 44(5): 691-703. DOI: 10.1007/s00348-007-0427-7.
- [6] PANIZZO A, DE GIROLAMO P, PETACCIA A. Forecasting impulse waves generated by subaerial landslides[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2005, 110(C12). DOI: 10.1029/2004JC002778.
- [7] HUANG B, ZHANG Q, WANG J, et al. Experimental study on impulse waves generated by gravitational collapse of rectangular granular piles[J]. *Physics of Fluids*, 2020, 32(3): 33301. DOI: 10.1063/1.5138709.
- [8] HUANG B, YIN Y, WANG S, et al. A physical similarity model of an impulsive wave generated by Gongjiafang landslide in Three Gorges Reservoir, China[J]. *Landslides*, 2014, 11(3): 513-525. DOI: 10.1007/s10346-013-0453-x.
- [9] 刘艺梁. 三峡库区库岸滑坡涌浪灾害研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2013.
- [10] 肖莉丽, 殷坤龙, 王佳佳, 等. 基于物理模拟试验的库岸滑坡冲击涌浪[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(5): 1618-1626.
- [11] 殷坤龙, 刘艺梁, 汪洋, 等. 三峡水库库岸滑坡涌浪物理模型试验[J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, 2012, 37(5): 1067-1074. DOI: 10.3799/dqkx.2012.113.
- [12] 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. DOI: 10.3969/j.issn.1674-0696.2020.10.17.
- [13] 岳书波, 刁明军, 王磊. 滑坡涌浪的初始形态及其衰减规律的研究[J]. *水利学报*, 2016, 47(6): 816-825. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20150895.
- [14] 曹婷, 王平义, 胡杰龙. 基于物理模型试验的库区岩质滑坡涌浪爬高研究[J]. *南水北调与水利科技*, 2018, 16(5): 159-164, 185. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdk.2018.0138.
- [15] 戴磊, 白志刚. 涌浪形成与传播滑坡模型试验研究[J]. *港工技术*, 2018, 55(4): 1-5. DOI: 10.16403/j.cnki.ggjs20180401.
- [16] MCFALL B C, FRITZ H M. Physical modelling of tsunamis generated by three-dimensional deformable granular landslides on planar and conical island slopes[J]. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2016, 472(2188): 20160052. DOI: 10.1098/rspa.2016.0052.
- [17] 张少强, 黄筱云, 程永, 等. 滑坡涌浪近远场划分及其水波特性分析[J]. *长江科学院院报*, 2022, 39(5): 76-82. DOI: 10.11988/ckyyb.20201283.
- [18] 朱朋, 卢书强. 西南某电站库区堆积体稳定性分析及涌浪预测[J]. *南水北调与水利科技*, 2014, 12(5): 129-132. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdk.2014.05.029.
- [19] 霍志涛, 黄波林, 张全等. 三峡库区黑板石滑坡涌浪分析[J]. *水利水电技术*, 2020, 51(1): 115-122. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2020.01.013.
- [20] 邓成进, 党发宁, 陈兴周. 库区滑坡涌浪传播及其与大坝相互作用机理研究[J]. *水利学报*, 2019, 50(7): 815-823. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20190113.
- [21] 郑莉, 杜娟, 刘庆丽, 等. 水库滑坡涌浪动压力特征试验研究[J]. *安全与环境工程*, 2022, 29(2): 85-94. DOI: 10.13578/j.cnki.issn.1671-1556.20210383.
- [22] 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. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-950X(2004)130:6(287).
- [23] ZWEIFEL A, HAGER W H, MINOR H E. Plane impulse waves in reservoirs[J]. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 2006, 132(5): 358-368. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-950X(2006)132:5(358).
- [24] 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. DOI: 10.12170/20210416001.
- [25] LINDSTRØM E K. Waves generated by subaerial slides with various porosities[J]. *Coastal Engineering*, 2016, 116: 170-179. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2016.07.001.
- [26] 张玉洁, 许国庆, 汪洋, 等. 约束条件对滑坡涌浪特征影响的室内试验研究[J]. *地质科技通报*, 2022, 41(2): 309-314. DOI: 10.19509/j.cnki.dzky.2022.0052.
- [27] HUANG B, WANG S, ZHAO Y. Impulse waves in reservoirs generated by landslides into shallow water[J]. *Coastal Engineering*, 2017, 123: 52-61. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2017.03.003.

Surge characteristics and influence factors of wave height of landslide near the dam in a narrow deep valley

MA Bin¹, LI Huiping¹, LIU Dongming¹, LIU Yongxi¹, WANG Yuxiao², LU Yongzheng²

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Qinghai Yellow River Upstream Hydropower Development Co., Ltd. Engineering Construction Branch, Xining 810007, China)

Abstract: A model experiment is one of the most effective and important ways to study landslide surge in a reservoir. A large-scale model can usually help obtain more reliable results. Therefore, to investigate the characteristics of a surge in front of a dam and its contributing factors, especially when the whole volume of unstable landslides is relatively large, a physical model with a scale as large as 1:100 was built up to simulate the topography of the reservoir in a narrow deep valley. Furthermore, the generation and the propagation of the landslide surge in the reservoir and near the dam were studied by utilizing the rigid sliding blocks. It is found that the shoulders of the dam have the most probable risks of overtopping. The height of the initial surge wave and that of the maximal wave were investigated. The influences of different volume of the sliding blocks, as well as the entry velocity on the heights of the surge wave were compared and analyzed. Furthermore, a formula to predict the surge wave height on the shoulders of the dam is proposed by nonlinear regression based on dimensional analysis. It is shown from the experimental results that although the trend of surge wave heights in front of different gauging points is similar, the maximal wave heights usually occurred near the right shoulder of the dam, so it possesses more risks of overtopping. In addition, the influence of the volume of the sliding blocks on the wave heights is larger than that of the entry velocity. The initial wave height is more sensitive to the volume and entry velocity of the blocks than the maximal one. The mean sensitivity to the volume of the blocks on the initial and maximal wave height at the right shoulder of the dam is 0.858 and 0.358, respectively, while the mean sensitivity to the entry velocity is 0.217 and 0.115, respectively. The difference between the predicted results from the fitting formula and the experimental data for the initial wave height is less than 3%, indicating that the fitting formulae for the initial height have great accuracy and consistency. On the other hand, the maximal surge wave height has larger randomness, with the difference between the predicted results and the experimental data being less than 15%.

Key words: surge in reservoir; wave height analysis; physical model experiment