

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2024.01.002

# 水库滑坡涌浪演进与最大爬高 影响规律试验研究

董力志, 周家文, 胡宇翔, 李海波

(四川大学 水利水电学院 水力学与山区河流开发保护国家重点试验室, 四川 成都 610065)

**摘要:** 为了研究水库滑坡涌浪造成的灾害程度, 考虑以高山峡谷岩质滑坡涌浪沿河道上下游传播及其与挡水建筑物撞击形成爬高的影响, 建立水槽物理试验模型, 研究滑坡体下滑高度、滑坡体体积、涌浪传播距离等不同工况下的滑坡涌浪爬高规律, 提出滑坡涌浪沿着河道向下游传播时与垂直挡水建筑物撞击形成的最大爬高估算公式, 并对滑坡体体积、下滑高度、涌浪传播距离进行无量纲处理和敏感性分析。结果表明: 滑坡体入水弗劳德数对涌浪爬高的影响最为显著, 其次为涌浪相对传播距离、滑坡体形状系数、滑坡体相对体积。在试验的基础上, 提出了有关滑坡体入水弗劳德数、涌浪相对传播距离、滑坡体形状系数的涌浪最大爬高公式, 可为高山峡谷地区岩质滑坡涌浪的爬高估算提供依据。

**关键词:** 滑坡涌浪; 最大爬高; 影响因素; 经验估算公式

中图分类号: TV697.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2024)01-0009-09

## Evolution and Climb Height of Reservoir Landslide Surge Based on Model Experiments

DONG Lizhi, ZHOU Jiawen, HU Yuxiang, LI Haibo

(State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, College of Water Resources and Hydropower, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China)

**Abstract:** Taking the propagation of rock landslide surge along the upstream and downstream of the river channel in the mountain canyon and the climbing process caused by the collision with the water-retaining building as the research object, a water tank physical test model was established to study the sliding height of the landslide body, the volume of the landslide body, and the propagation of surge waves. The climbing law of landslide surges under different working conditions such as distance is proposed. The maximum climb height estimation formula is proposed when landslide surges propagate downstream along the river and collide with vertical water-retaining buildings. Through dimensionless processing and sensitivity analysis of the landslide volume, sliding height, and surge propagation distance, the results show that the Froude number ( $Fr$ ) of the landslide body has the most significant impact on the surge climb, followed by the relative surge propagation distance, landslide body shape coefficient, landslide body relative volume. On the basis of experiments, a formula for the maximum surge height is proposed concerning the Froude number ( $Fr$ ) of the landslide body entering the water, the relative propagation distance of the surge, and the shape coefficient of the landslide body, which provides a basis for estimating the surge height of rock landslides in alpine canyon areas.

**Keywords:** landslide surge; climb height; influence factors; estimation formula

收稿日期: 2023-09-16

修稿日期: 2023-10-04

基金项目: 国家重点研发计划青年科学家项目(2022YFC3080100); 国家自然科学基金(42102316)

作者简介: 董力志(2002—), 男, 本科在读, 专业为水利科学与工程研究。E-mail: 3211553508@qq.com

通讯作者: 李海波(1991—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事滑坡灾害防控减灾研究。E-mail: hbli@scu.edu.cn

滑坡涌浪是指斜坡岩石土体在重力作用下发生失稳,顺着坡向滑入水中,与水体激烈碰撞后形成的波浪。当滑坡涌浪形成后,向四周传播,对传播途径上的建筑、船只等造成剧烈冲击,严重威胁着周围人民的生命和财产安全。随着我国高坝大型水利水电工程的大规模建设和相继运行,近坝库岸特大滑坡已成为影响工程运行安全和库区生态环境的重大隐患,滑坡涌浪作为水库滑坡主要的次生灾害,常常造成重大的人员伤亡、经济损失和环境破坏<sup>[1]</sup>。

在全球范围内,水库滑坡引发涌浪并导致灾难性事件有很多:1961年3月6日,中国湖南柘溪水库在近坝库区右岸发生滑坡,形成了21 m高的涌浪,并翻过正在施工的大坝,造成较大损失<sup>[2]</sup>;1963年意大利瓦伊昂水库,因水库蓄水诱发了库区左岸体积近 $3 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的滑坡,形成超过坝顶100 m左右的涌浪,涌浪翻过大坝而下,形成冲走下游5个市镇的洪水,造成3 000多人丧生<sup>[3-5]</sup>;2015年,三峡水库重庆巫山发生大型库岸滑坡,见图1,体积为 $2.4 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的滑坡体冲入水中,引发巨大涌浪,造成对岸靠泊的21艘小型船舶翻沉<sup>[6]</sup>;2003年发生于秭归县的千将坪滑坡,堵塞青干河,造成断流,摧毁厂房、房屋等多处建筑物,造成10人失踪、14人死亡,直接和间接经济损失上亿元<sup>[7-9]</sup>。表1列举了国内外多起滑坡涌浪灾害事件。尽管大量的滑坡涌浪灾害事件引发了全球的广泛关注,但关于滑坡涌浪在沿着河流流向向上下游传播时与挡水建筑物作用,形成的爬高形态和最大爬升高度很少被研究。

图1 中国三峡水库重庆巫山滑坡

滑坡涌浪的物理模型试验对于理解涌浪的产生和传播机制提供了一个真实的场景,有助于涌浪传播规律及经验公式的研究,同时还可以利用试验数据经分析处理后得到拟合的经验公式,为数值模拟分析提供依据。滑坡涌浪的传播方向包括两个:沿着滑坡体入水方向往河道对岸传播和顺河流流向往

河道上下游传播。由于沿着下滑方向的涌浪具有能量大、爬升高度大、致灾严重等特点,在近些年得到广泛的关注与研究,顺河流方向传播的涌浪与河道中船只、桥梁、大坝等挡水建筑物之间的激烈作用研究较少。Ataie等<sup>[19]</sup>通过试验,研究了不同因素影响下的涌浪规律,并提出了涌浪波的波幅和周期的经验公式。根据1958年阿拉斯加Lituya湾Gilbert Inlet滑坡和1905年阿拉斯加Disenchantment湾冰崩灾害,Slingerland等<sup>[20]</sup>建立模型,得出无量纲动能与相对最大波幅具有重要关系。曹婷等<sup>[21]</sup>以三峡库区地形为基础,研究了27组不同组合工况下的滑坡涌浪爬高规律,提出了适用于岩质滑坡涌浪爬高估算公式。

表1 典型的滑坡涌浪灾害

年份	滑坡	国家	体积 / ( $\times 10^4 \text{ m}^3$ )	波高 / m	水域类型	死亡失踪 / 人
1959	Pontesei 水库 <sup>[10]</sup>	意大利	300	20	水库	1
1961	湖南柘溪水库 <sup>[11]</sup>	中国	165	21	水库	40
1971	丘加 <sup>[12]</sup>	秘鲁	10	30	湖泊	400~600
1982	四川云阳鸡扒子 <sup>[11,13-14]</sup>	中国	1500	40	河道	0
2003	湖北千将坪 <sup>[7]</sup>	中国	2040	26	水库	24
2007	湖北大堰塘 <sup>[7]</sup>	中国	300	50	水库	7
2015	阿拉斯加 <sup>[15-16]</sup>	美国	8000	150	峡湾	—
2018	白格滑坡 <sup>[17-18]</sup>	中国	1500	54	河道	—

对于高山峡谷地区,由于河道两岸坡度陡,岩石多,危岩体失稳进入水体中往往呈现出崩塌滑坡的类型。崩塌滑坡体由于整体性好,体积排水大,形成与散粒体滑坡不同机制的滑坡涌浪。因此,本文拟重点研究在高山峡谷地区,非水下块状滑坡与水体作用形成的涌浪爬高机制,其主要目的是以高山峡谷滑坡涌浪为背景,设计三维块状滑坡模型试验,研究涌浪的运动演化机制,着重分析不同滑坡类型的涌浪形成后沿着河道传播时与垂直迎水面撞击形成爬高的形态和最大爬升高度。同时试图通过对滑坡体的形状、体积、下滑高度以及涌浪传播距离进行无量纲处理,以期得到滑坡体和水的性质与形成的涌浪最大爬高之间的经验关系。

## 1 物理模型试验设计

物理试验只是对物理过程进行基本规律的研究,试验过程都会进行一定的简化。在本试验中采用块状模型对滑坡体进行简化,与天然散粒体滑坡

体存在一定的误差。根据 Ataie<sup>[19]</sup>的研究,由于散粒滑坡体颗粒之间的相互作用以及颗粒缝隙之间的水体填充作用,使得散粒滑坡体的能量转化率小于刚体滑坡体,形成的涌浪最大爬高也相对较低<sup>[22]</sup>。因此,采用块状模型简化自然界滑坡体,预测出的涌浪爬高较实际爬高会更高,这对于风险评估是有利的。

试验中的滑坡涌浪物理模型试验装置以高山峡谷河道为背景,由滑槽、水槽、控速设备以及透明挡板四个部分组成。滑槽底部为钢板,两侧采用透明钢化玻璃,采用 40°的固定坡度,长度为 2 m,宽度为 0.4 m。滑槽内部设置有控速设备。控速设备由装料箱和牵引设备组成,牵引设备包含牵引绳和定滑轮。装料箱的一端与牵引绳连接,另一端通过滑轮和摇动手柄控制牵引绳的长度,从而改变装料箱在滑槽中位置,实现对滑坡体下滑高度的控制。装料箱长为 0.6 m,宽为 0.35 m,高为 0.3 m,用于装载滑坡体。滑槽前部安装有可抽离的挡板,试验开始时,通过手动快速抽离挡板,使滑坡体在重力作用下沿着滑槽滑入水中。水槽长度为 8 m,顶宽为 1.11

m,底宽为 0.4 m。水槽的一侧边坡为 90°,另一侧边坡为 40°,与滑槽的底端平滑连接,水槽断面为直角梯形。水槽设置有进水口和出水口,可以对水槽内的水深进行自由控制。水槽中垂直放置有由钢化玻璃制成的透明挡板。透明挡板形状与水槽横截面相同,四周设计有塑封条,可以与水箱横截面紧密贴合。透明挡板放置在距离滑坡体入水口一定距离的水体中,用于模拟船只、重力坝、桥梁墩等迎水面垂直或接近垂直的挡水建筑物,起到阻挡涌浪传播,形成爬高的作用。挡板上粘贴有网格纸,并在旁边架设运动相机,最高拍摄速度为 240 帧/s,用于记录滑坡涌浪在挡板上的爬高过程以及形成的最大浪高。试验装置如图 2 所示。

对于高山峡谷地区的岩质滑坡,其滑动特征呈现出崩塌滑坡的类型,具有整体性好、体积排水大等特点,因此采用一定体积的水泥块用于模拟滑坡体。水泥块由水泥和细砂拌合制成,平均密度为 2 500 kg/m<sup>3</sup>。一共制作 7 组不同体积的滑坡体模型,试验工况条件具体见表 2。

表 2 物理模型试验的所有工况条件

试验编号	水深 /m	下滑高度 /m	滑块形状 (长×宽×高) /cm	滑块体积 /cm <sup>3</sup>	传播距离 /m
01	0.3	0.60	30×20×8	4800	1.50
02	0.3	0.70	30×20×8	4800	1.50
03	0.3	0.80	30×20×8	4800	1.50
04	0.3	0.90	30×20×8	4800	1.50
05	0.3	1.00	30×20×8	4800	1.50
06	0.3	1.10	30×20×8	4800	1.50
07	0.3	1.20	30×20×8	4800	1.50
08	0.3	1.00	25×15×6	2250	1.50
09	0.3	1.00	27×17×7	3213	1.50
10	0.3	1.00	30×20×8	4800	1.50
11	0.3	1.00	32×22×9	6336	1.50
12	0.3	1.00	35×25×10	8750	1.50
13	0.3	1.00	37×27×11	10989	1.50
14	0.3	1.00	40×30×12	14400	1.50
15	0.3	1.00	30×20×8	4800	0.50
16	0.3	1.00	30×20×8	4800	0.75
17	0.3	1.00	30×20×8	4800	1.00
18	0.3	1.00	30×20×8	4800	1.25
19	0.3	1.00	30×20×8	4800	1.50
20	0.3	1.00	30×20×8	4800	1.75
21	0.3	1.00	30×20×8	4800	2.00
22	0.3	1.00	30×20×8	4800	2.25
23	0.3	1.00	30×20×8	4800	2.50

图 2 滑坡涌浪物理模型试验设备布置图

试验采用运动学公式计算滑坡体的入水速度。经试验测定,滑坡体与滑槽之间的平均动摩擦系数为 0.6。试验中考虑了滑坡体性质、水体性质以及涌浪传播性质三个方面。由于滑坡体的下滑高度以及下滑时间共同决定滑坡体的入水速度,而滑坡体的下滑时间受到下滑高度的影响,为简化试验,在试验中仅考虑下滑高度的影响,对下滑时间不予考虑。因此试验只考虑滑坡体体积( $V$ )、下滑高度( $H$ )以及涌浪传播距离( $l$ )三个因素对涌浪爬高的影响。下滑高度变化范围为 0.6 m~1.2 m,涌浪传播距离范围为 0.5 m~2.5 m,滑坡体共有  $25 \times 15 \times 6$ 、 $27 \times 17 \times 7$ 、 $30 \times 20 \times 8$ 、 $32 \times 22 \times 9$ 、 $35 \times 25 \times 10$ 、 $37 \times 27 \times 11$ 、 $40 \times 30 \times 12$ (单位 cm),7 种体积式样。试验中记录了块状滑坡体引起涌浪的爬高过程、爬高形态以及最大涌浪爬高等详细数据。所有的参数定义如表 3 所示。

表 3 试验中的控制参数和控制无量纲数

符号	基本量纲	描述
$h$	[L]	水深
$H$	[L]	下滑高度
$V$	[L <sup>3</sup> ]	体积
$l$	[L]	涌浪传播距离
$V_s$	[LT <sup>-1</sup> ]	滑块体入水速度
$w$	[L]	滑块体宽度
$s$	[L]	滑块体高度
$am$	[L]	涌浪最大爬高
$A_m = am/h$	[-]	相对最大爬高
$Fr = V_s \sqrt{gh}$	[-]	弗劳德数
$Sc = ws/h^2$	[-]	形状系数
$H_w = H/h$	[-]	相对下滑高度
$V_w = V/h^3$	[-]	相对体积
$L_w = l/h$	[-]	相对涌浪传播距离

## 2 试验结果

### 2.1 涌浪爬高形态分析

相同体积的滑坡体从不同下滑高度滑入水中,

涌浪在挡板上呈现出不同的爬高形态。涌浪在水槽内传播示意图 3。在下滑高度较小的条件下,涌浪在挡板两端以相同的速度往上爬升,呈现出一条近乎水平的直线。而随着下滑高度的增加,涌浪两端出现高度差,爬高形态表现为从一端向另一端急剧下降的曲线。当下滑高度足够高时,涌浪在爬高顶点处激起浪花,出现破碎现象。涌浪在挡板上的爬高形态与滑坡的惯性力和重力有关,这被称为滑坡弗劳德数的控制参数,其定义为:

$$Fr = \frac{V_s}{\sqrt{gh}} \quad (1)$$

其中: $V_s$  是滑坡体入水速度; $g$  为重力加速度; $h$  为水槽内水深。

涌浪的爬高形态主要取决于弗劳德数( $Fr$ ),涌浪爬高形态如图 4 所示。当弗劳德数较小时(在本试验中,当  $Fr < 1.3$  时),涌浪以近乎一条水平的直线向上爬升,涌浪两端变现出相近的爬升速度和爬升高度,如图 4(a) 所示。但当弗劳德数较大时(在本试验中,  $Fr > 1.3$  时),爬高形态不再呈现出水平的直线,涌浪两端爬升速度和高度不同,出现一定的高度差,涌浪形态表现为从一端向另一端急剧下降的曲线,如图 4(b) 所示。当弗劳德数足够大时(在本试验中,  $Fr > 1.5$  时),涌浪爬高出现破碎的迹象,部分水体表现出从主体脱离的趋势。此外,在不同的试验工况下,若  $Fr$  保持不变,则会呈现出几乎一致的涌浪爬高形态。如图 4(b) 和图 4(c) 所示的两组涌浪爬高形态是在水深 0.3 m,下滑高度 1.0 m,滑块体积分别为 4 800 cm<sup>3</sup>(试验编号 05)和 14 400 cm<sup>3</sup>(试验编号为 14)的涌浪最大爬高形态。尽管两组试验的滑坡体体积不同,有较大的差距,但是进入水体的  $Fr$  相同,在最大爬高处呈现出几乎相同的爬高形态。

### 2.2 涌浪爬高影响因素分析

#### 2.2.1 滑坡体下滑高度影响

研究滑坡体下滑高度对涌浪爬高的影响时,保

图 4 不同试验条件下的涌浪在挡板处的爬高形态(a1,a2,a3,b1,b2,b3,c1,c2,c3 分别表示同一爬高不同时刻的爬高形态)

持水深 0.3 m 和涌浪传播距离 1.5 m 不变,使滑坡体分别从表 2 中试验编号 01—07 所列高度下滑,得到的试验数据如表 4 所示。将涌浪在挡板上的最大爬高与滑坡体下滑高度进行无量纲处理后,得到涌浪相对最大爬高  $A_m$  与滑坡体相对下滑高度  $H_w$  的关系如图 5(I) 所示。从图中可以看出,滑坡涌浪相对最大爬高  $A_m$  随着相对下滑高度  $H_w$  的增加而增加, $A_m$  与  $H_w$  呈线性关系。滑坡体下滑高度  $H$  的增加实质上是增加滑坡体的势能,在沿着滑槽下滑的过程中,势能转化为动能,滑坡体的入水速度也随之增大,即对应弗劳德数  $Fr$  增大,涌浪的最大爬高增大。

表 4 下滑高度影响下各工况试验数据

试验编号	下滑高度/m	入水速度/(m·s <sup>-1</sup> )	涌浪最大爬高/cm	弗劳德数	相对下滑高度	相对最大爬高
01	0.6	1.83	4.4	1.068	2.00	0.147
02	0.7	1.98	4.8	1.153	2.33	0.160
03	0.8	2.11	5.1	1.233	2.67	0.170
04	0.9	2.24	6.2	1.308	3.00	0.207
05	1.0	2.36	7.0	1.378	3.33	0.233
06	1.1	2.48	8.5	1.446	3.67	0.283
07	1.2	2.59	9.2	1.510	4.00	0.307

### 2.2.2 滑坡体体积影响

研究滑坡体体积对涌浪最大爬高的影响时,共设置了 7 组工况,即表 2 试验编号 08—14。将滑坡体体积与涌浪在挡板上的最大爬高进行无量纲处理,得到的试验结果如表 5 所示,涌浪相对最大爬高  $A_m$  与滑坡体相对体积  $V_w$  的关系如图 5(II) 所示。涌浪相对最大爬高  $A_m$  随着滑坡体相对体积的增加

呈现出三个不同的变化阶段:当  $V_w < 0.178$  时,随着  $V_w$  的增大而增大, $A_m$  呈现出上升的趋势,但变化速率在逐渐降低;当  $V_w$  在 0.178 ~ 0.22 之间时,随着  $V_w$  不断增大, $A_m$  没有增大反而呈现出下降的趋势;当  $V_w > 0.22$  时,随着  $V_w$  的增大, $A_m$  不再下降,随着  $V_w$  的不断增大而增大。在整个试验过程中,当滑坡体的体积较小时,随着滑坡体体积增大,单位时间内排出水的体积增大,导致形成的初始浪高增大,传播至挡板时拥有较大的初始爬高,使得最大爬高随之越大,呈现出第一个变化趋势。但当  $V_w$  位于 0.178 ~ 0.22 这个区间时,随着滑坡体体积的增大,涌浪在挡板上的爬高开始下降,这是由于滑坡体与水体接触表面积和滑坡体入水时间共同作用的结果。

表 5 滑块体积影响下各工况试验数据

试验编号	滑块体积/cm <sup>3</sup>	涌浪最大爬高/cm	形状系数	相对体积	相对最大爬高
08	2250	5.2	0.100	0.083	0.173
09	3213	6.2	0.132	0.119	0.207
10	4800	7.0	0.178	0.178	0.233
11	6336	6.5	0.220	0.235	0.217
12	8750	6.9	0.278	0.324	0.230
13	10989	7.5	0.330	0.407	0.250
14	14400	9.0	0.400	0.533	0.300

随着滑坡体长、宽、高的不断增大,与水体接触的表面积增大,导致滑坡体与水体接触后排出水的体积增大,能够形成较大的初始浪高;同时滑坡体长度的增加会导致滑坡体全部入水时间的增长,这就使得滑坡体仅有一部分会参与到初始涌浪的形成。初始涌浪在滑坡体完全进入水体之前就已经传播出

去,滑坡体无法将全部能量转化为初始涌浪的动能,初始涌浪传播出去时携带的能量较低。在两者的共同作用下也就出现了涌浪爬高不升反降的现象。当

$V_w > 0.22$  时,滑坡体的底面积足够大,起到主导作用,滑坡涌浪相对最大爬高随着滑坡体体积的增大又呈现出上升趋势。

图 5 不同试验条件下的最大浪高拟合情况

### 2.2.3 传播距离影响

滑坡体进入水体后会沿着两个方向传播,一个是沿着滑坡方向向河道对岸传播,另一种是沿着河流流向向上、下游传播。涌浪沿程传播和衰减规律决定着上、下游被涌浪影响的程度<sup>[23]</sup>。在本试验中,主要研究涌浪沿着河道方向向下游传播时与挡水建筑物作用形成的最大爬高的衰减规律。通过调整挡水建筑物距离滑坡体入水口的距离,实现对涌浪传播距离的控制,一共设置了九组工况即表 2 试验编号 15—23。将涌浪传播距离与涌浪在挡板上形成的最大爬高进行无量纲处理,得到的试验数据如表 6 所示,涌浪相对传播距离与涌浪相对最大爬高的关系如图 5(Ⅲ)所示。从整体上看,涌浪在传播过程中,由于与岸边的不断接触以及水体之间的相互挤压碰撞作用,涌浪具有的能量不断被消耗,随着传播距离的不断增大,到达挡板时剩余能量不断减小,涌浪在挡板上形成的涌浪爬高也就逐渐降低,符合基本的动力学规律。其次,由于涌浪是以波的形态沿着河道方向传播,涌浪达到挡板时,不同的波形对于涌浪的爬高具有较大的影响,波前垂直方向上位移对涌浪在挡板上形成的最大浪高具有较大的

表 6 涌浪传播距离影响下各工况试验数据

试验编号	涌浪传播距离/m	涌浪最大爬高/cm	相对传播距离	相对最大爬高
15	0.50	10.3	1.667	0.343
16	0.75	13.2	2.500	0.440
17	1.00	7.9	3.333	0.263
18	1.25	7.4	4.167	0.247
19	1.50	8.3	5.000	0.277
20	1.75	4.6	5.833	0.153
21	2.00	3.3	6.667	0.110
22	2.25	4.8	7.500	0.160
23	2.50	4.2	8.333	0.140

影响。在本试验中,传播距离为 1.25 m 和 1.50 m 时,由于涌浪传播至挡板时,波前在垂直高度上位移不同,导致传播距离为 1.50 m 时涌浪的最大爬高略高于传播距离为 1.25 m 时的爬高。以涌浪波的波长为周期,将传播距离划分为不同的区段。在不同的区段中,随着区段距离的增加,涌浪在挡板处的最大爬高呈现出逐级递减的规律;在同一区段中,涌浪爬高随着传播至挡板处波形的变换而不断波动,但总存在一个爬高极大值和极小值。通过采用拟合曲

线( $R^2 = 0.851$ ),对涌浪相对传播距离  $L_w$  与涌浪相对最大爬高  $A_m$  的关系进行分析,从整体来看,随着  $L_w$  的增加, $A_m$  呈现出下降的规律,同时  $A_m$  的变化速率也随着  $L_w$  的增加逐渐降低,当  $L_w$  大于 13.1 时, $A_m$  的变化率小于 1%,传播距离对涌浪波造成的影响可以忽略不计。

#### 2.2.4 弗劳德数 $Fr$ 的影响

在滑坡涌浪物理模型试验中,改变滑坡体的下滑高度,水槽水深等试验条件,实质上是改变滑坡体的入水速度,而滑坡体的入水速度可以用弗劳德数  $Fr$  来进行无量纲处理。对试验数据进行处理后,对弗劳德数  $Fr$  进行单独分析,可以得到弗劳德数  $Fr$  与涌浪相对最大爬高的关系如图 6 所示。随着弗劳德数  $Fr$  的增长,涌浪相对最大爬高呈现出三个不同的阶段。当  $Fr$  较小时,随着  $Fr$  的增长,涌浪爬高逐渐增长,但是增长速度缓慢,增长率不大;随着  $Fr$  继续增大,涌浪爬高急剧增大,且增长率也在不断变大; $Fr$  继续增大到达一个临界值时,涌浪爬高的增长率到达极大值,随涌浪爬高增长趋势变缓最终趋于稳定。在整个模型试验中,随着  $Fr$  的增加, $A_m$  的变化程度达到了 109%, $Fr$  每改变 1%, $A_m$  改变 2.37%,平均敏感系数为 2.37。对于本模型试验,在所有试验因素中, $Fr$  对涌浪爬高影响最大,敏感性最高。

图 6 弗劳德数  $Fr$  与涌浪相对最大爬高  $A_m$  关系

#### 2.2.5 滑坡体下滑时间的影响

在整个试验过程中共包含 3 个时间段:滑坡体下滑时间、涌浪生成时间以及涌浪传播时间。不同阶段都会对最终的涌浪最大爬高产生影响。滑坡体的下滑时间由滑坡体的下滑高度决定,最终影响滑坡体的入水速度,在本文中用弗劳德数表征。涌浪生成时间指的是滑坡体进入水体后到形成涌浪传播出去之间的时间。在本试验中,对涌浪生成时间影响最大的是滑坡体的体积。随着滑坡体体积的增

大,滑坡体的入水时间随之增大,对初始涌浪的形成产生不同的影响。当滑坡体体积较小时,滑坡体长度较小,入水时间短,滑坡体携带的能量能够较快传递给水体,形成的初始涌浪具有较大的能量;当滑坡体体积较大时,滑坡体入水时间长,部分涌浪在滑坡体完全进入水体前就已传播出去,滑坡体具有的能量与初始涌浪的动能转化率较低,导致形成的爬高可能会比小体积滑坡体低。第三个时间段是涌浪传播时间,这个时间由涌浪传播距离和涌浪传播速度共同控制,决定涌浪在传播过程中能量的衰减。随着涌浪传播时间的增加,涌浪的能量不断被损耗,形成的涌浪爬高也随之降低,但是由于涌浪的性质,传递到挡水建筑物不同的形态以及后浪对前浪的作用,最终导致涌浪爬高在一定区间范围内呈现出波动性。

### 3 敏感性分析

在本试验中,采用单一变量控制法研究了下滑高度、滑块体积、涌浪传播距离等因素对涌浪最大爬高的影响,因此可以采用单一变量敏感性分析方法研究各因素对涌浪最大爬高的影响程度。敏感性分析其实是从定量角度研究每一影响因素发生对研究对象影响程度<sup>[24]</sup>,单一变量敏感性分析的计算公式如下:

$$E = \frac{\Delta A}{\Delta F} \quad (2)$$

$$\Delta A = \frac{|A_j - A_i|}{A_i} \quad (3)$$

$$\Delta F = \frac{|F_j - F_i|}{F_i} \quad (4)$$

式中: $E$  为因变量  $A$  对于自变量  $F$  的敏感性系数; $\Delta A$  是自变量  $F$  发生  $\Delta F$  变化率时因变量相应的变化率; $\Delta F$  是自变量的变化率; $F_i$  为选取的自变量参考值; $A_i$  为  $F_i$  对应的因变量值; $F_j$  为剩余各组自变量; $A_j$  为  $F_j$  对应的因变量。

将滑坡体下滑高度、滑坡体体积、涌浪传播距离无量纲处理后进行单一变量敏感性分析计算,得到滑坡体弗劳德数  $Fr$ 、相对体积  $V_w$ 、形状系数  $S_c$  以及相对传播距离  $L_w$  的敏感性系数分别为:1.34、0.23、0.31、1.05。比较敏感性系数,从大到小依次为滑坡体弗劳德数  $Fr$ 、相对传播距离  $L_w$ 、形状系数  $S_c$ 、相对体积  $V_w$ 。由此可见,滑坡体弗劳德数是影响涌浪相对最大爬高最主要的因素,其次是涌浪相对传播距离,滑坡体的形状系数  $S_c$  和相对体积  $V_w$  对涌浪爬高

影响较小。

## 4 滑坡涌浪爬高高度预测

在整个物理模型试验中,试验因素可分为滑坡体性质、水体性质以及涌浪传播性质三大类。其中滑坡体性质包含滑坡体的下滑高度和滑坡体体积两个因素,通过控制滑坡体的性质实现对滑坡体入水速度的控制,而滑坡体的入水速度可以通过转化为弗劳德数进行无量纲处理;水体性质主要控制滑坡体入水后与水体进行能量交换的效率,控制滑坡涌浪的初始能量;涌浪传播性质控制涌浪在传播过程中能量的吸收效应,决定涌浪开始爬高时的剩余能量。不同的因素对滑坡涌浪的最大爬高高度都会产生影响,并且各个因素之间也存在一定的相互联系。为了便于分析计算,经过一定的假设,根据滑坡涌浪物理模型试验数据,采用无量纲参数分析以及回归分析方法计算,对滑坡涌浪产生的最大爬高进行经验估算。

本试验的经验计算公式是对无量纲参数进行多元回归分析得到的,因此对无量纲参数的选择至关重要,直接影响了公式的合理性与适用性<sup>[25]</sup>。在滑坡涌浪试验中涉及到滑坡体下滑高度  $H$ 、滑坡体体积  $V$ 、水深  $h$  和涌浪传播距离  $l$  等基本变量。由于下滑高度主要影响的是滑坡体的入水速度,所以可以将下滑高度转换成与入水速度  $V_s$  相关的滑动弗劳德数  $Fr$  来进行无量纲处理。分析中,将试验水深作为主要控制参数,对涌浪在挡板上的最大爬高、涌浪传播距离以及滑坡体体积进行无量纲化,分别得到:涌浪相对最大爬高  $A_m = am/h$ 、涌浪相对传播距离  $L_w = l/h$ 、滑坡体相对体积  $V_w = V/h^3$ 、滑坡体的形状系数  $S_c = ws/h^2$  (所有参数定义见表 3)。通过分析,滑坡涌浪的相对最大爬高主要与滑坡体的弗劳德数和涌浪的相对传播距离有关,形状系数和滑坡体的相对体积较小,而相较于滑坡体的相对体积,滑坡体的形状系数对涌浪爬高的影响较大。因此,采用滑坡体的弗劳德数、形状系数、涌浪的相对传播距离三个参数进行公式推导。通过 SPSS 软件进行多元非线性回归分析,得到滑坡涌浪最大爬高与各因素之间的关系式为:

$$A_m = 0.264Fr^{4.131}S_c^{1.135}e^{-0.209L_w} + 0.048 \quad (5)$$

涌浪相对最大爬高计算值与试验值对比如图 7 所示,决定系数  $R^2 = 0.827$ 。从图 7 可以看出试验值与计算值集中在  $y = x$  趋势线周围,拟合结果较好。试验值与计算值之间存在一定的误差,但都处于合理范围内。

图 7 涌浪相对最大爬高计算值与试验值对比

采用 2008 年在中国重庆巫山县发生的龚家方山体滑坡对公式进行简单的验证。龚家方山体滑坡位于中国三峡大坝上游 120 km 处,滑坡的入江体积约为  $38 \times 10^4 \text{ m}^3$ <sup>[26-27]</sup>。滑坡体的约为 290 m,宽度为 40 m~160 m,中心宽度为 17.4 m。滑坡进入水体的最大冲击速度为 11.65 m/s,涌浪计算水深为 47 m<sup>[28-29]</sup>。根据滑坡体参数得出滑坡体的弗劳德数、形状系数分别为 0.543、0.593,计算出距离滑坡体下游 6 km 处的涌浪爬高为 2.26 m,与之前的研究结果 2.1 m 相接近<sup>[26]</sup>。

本物理试验模型是以高山峡谷河道背景,通过建立固定坡度为 40° 的梯形河床水槽,采用块状滑坡体模型进行试验,爬高拟合公式适用于高山峡谷坡度较陡地区或类似环境下的岩质滑坡涌浪,在有限水深的条件下,涌浪沿着河道向下游传播时与迎水面为垂直时的挡水建筑物作用形成的最大涌浪爬高的计算。同时,该公式中涌浪传播距离计算范围存在限制,当传播距离无限远时,公式将不再适用。由于本试验中涉及的影响因素不够完善,未考虑下滑坡度、滑坡体形状、迎水面角度等的影响,应用范围受到一定限制<sup>[21]</sup>,后续将结合工程实例观测数据,进一步开展应用验证和公式修正,以便提升公式的适用性与准确性。

## 5 结论

本文主要是以高山峡谷河道滑坡涌浪为研究背景,通过开展物理模型试验,研究块状滑坡体在失稳后滑入水体,与水体激烈碰撞形成的滑坡涌浪沿着河道向上、下游传播时遇到挡水建筑物产生的爬高规律。通过研究分析,得到以下结论:

(1) 采用单一变量法设计试验工况,开展了关于下滑高度、滑坡体体积、涌浪传播距离等因素的滑坡涌浪物理模型试验,分析了涌浪与垂直迎水面作用形成的最大爬高在不同因素影响下的变化规律。

(2) 经过敏感性分析,得到了各研究因素对滑坡涌浪最大爬高的影响程度,从大到小依次为:弗劳德数  $Fr(1.34)$ 、涌浪相对传播距离(1.05)、滑坡体形状系数(0.31)、滑坡体相对体积(0.23)。

(3) 以水深为参数,对滑坡体体积、滑坡体形状、涌浪传播距离进行无量纲处理,将滑坡体下滑高度采用滑坡体弗劳德数进行无量纲处理,通过多元回归分析以及量纲分析,得到了滑坡涌浪在沿着河道传播一定距离后与迎水面为垂直时的挡水建筑物作用形成的最大爬高的经验公式。

(4) 本物理模型试验根据重力相似原则建立固定倾角的水槽模拟高山峡谷地区的滑坡涌浪事件,并没有采用固定的比例缩尺对实际地形地质条件进行缩小,同时关于滑坡涌浪的影响因素也未考虑周全,仅仅是模拟涌浪的生成、传播以及涌浪爬高过程,试验存在一定的误差。因此建立的涌浪最大爬高预测公式有一定的局限性,在尝试应用到工程实践时仍需要进一步完善。

#### 参考文献:

[1] 周家文,陈明亮,瞿靖昆,等. 水库滑坡灾害致灾机理及防控技术与展望[J]. 工程科学与技术,2023,55(1):110-128.

[2] 冯万里. 三峡库区典型涉水滑坡涌浪预测分析[D]. 宜昌:三峡大学,2022.

[3] 周家文,陈明亮,李海波,等. 水动力型滑坡形成运动机理与防控减灾技术[J]. 工程地质学报,2019,27(5):1131-1145.

[4] 胡杰,王道熊,胡斌. 库岸滑坡灾害及其涌浪分析[J]. 华东交通大学学报,2003,20(5):26-30.

[5] 高艳艳. 滑坡涌浪波远场特性及爬坡机理研究[D]. 西安:西安理工大学,2021.

[6] 李稳哲. 山区剧动高速滑坡形成机制及涌浪模拟研究[D]. 西安:长安大学,2013.

[7] 刘灿. V型河道下滑坡涌浪的传播及爬高研究[D]. 长沙:长沙理工大学,2017.

[8] 李松林. 三峡库区涉水滑坡对库水位变动的变形响应及其自适应性研究[D]. 成都:成都理工大学,2020.

[9] 雍袁. 水电站库区高位滑坡涌浪灾害研究[D]. 成都:成都理工大学,2016.

[10] 陈学德. 水库滑坡涌浪研究的综合评述[J]. 水电科研与实践,1984,1(1):78-96.

[11] 黄锦林. 库岩滑坡涌浪对坝体影响研究[D]. 天津:天津大学,2011.

[12] 乔治·普兰夫克, V·K·艾扎盖尔, 陈隆谦. 秘鲁丘加(CHUNGAR)岩石崩塌及造成的涌浪[J]. 人民长江,1984(2):77-79,55.

[13] 李玉生. 鸡扒子滑坡——长江三峡地区老滑坡复活的一个实例[C]//中国岩石力学与工程学会地面岩石工程专业委员会成立暨中国典型滑坡实例学术讨论会,中国:宜昌,1986.

[14] 祖福兴. 基于能量守恒和张量分析的复杂边界河道型水库滑坡涌浪机理研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2019.

[15] Stark C. Landslide dynamics from seismology: new results[C]//AGU Fall Meeting, San Francisco, 2015.

[16] George D L, Iverson R M, Cannon C M. New methodology for computing tsunami generation by subaerial landslides: Application to the 2015 Tyndall Glacier landslide, Alaska[J]. Geophysical Research Letters, 2017, 44(14):7276-7284.

[17] Hu Yuxiang, Yu Zhiyou, Zhou Jiawen. Numerical simulation of landslide-generated waves during the 11 October 2018 Baige landslide at the Jinsha River[J]. Landslides, 2020, 17(10):2317-2328.

[18] Hu Y, Li H, Li C, et al. Quantitative evaluation in classification and amplitude of near-field landslide generated wave induced by granular debris[J]. Ocean Engineering, 2022, 261:112142.

[19] Ataie-Ashtiani B, Nik-Khah A. Impulsive waves caused by subaerial landslides [J]. Environmental Fluid Mechanics, 2008, 8(3):263-280.

[20] Slingerland R V B. Evaluating hazard of landslide-induced water waves[J]. Journal of the Waterway, Port, Coastal & Ocean Division, 1982, 108:504-512.

[21] 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.

[22] 李文博. 考虑河道特征的岩质滑坡涌浪传播特性研究[D]. 宜昌:三峡大学,2021.

[23] 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.

[24] 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.

[25] 韩林峰. 弯曲峡谷水库三维浅水滑坡涌浪波场特征研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2019.

[26] 肖莉丽. 库岸滑坡涌浪数值模拟研究[D]. 武汉:中国地质大学,2015.

[27] 王世昌,陈小婷,黄波林,等. 龚家方崩滑体与滚石运动特征的对比分析[J]. 华南地质与矿产,2013, 29(2):156-161.

[28] 王世昌,黄波林,刘广宁,等. 龚家方4号斜坡涌浪数值模拟分析[J]. 岩土力学, 2015, 36(1):212-218.

[29] 徐文杰. 基于CEL算法的滑坡涌浪研究[J]. 工程地质学报,2012, 20(3):350-354.