三峡库区干支流交汇河段滑坡涌浪爬高试验研究*

方　博[1]，王平义[2]

（1. 重庆交通大学 河海学院，重庆 400074；2. 国家内河航道整治工程技术研究中心，重庆 400074）

摘要：通过开展三峡库区碎石土滑坡在干支流交汇河段的三维概化物理模型试验，探究在静水条件下河道型水库干支流交汇河段的涌浪爬高特征。通过无量纲分析方法研究在对岸顺直段内滑坡体体积、滑坡倾角、水深 3 个因素对滑坡涌浪最大相对爬高的影响，并通过多元回归分析方法给出临水条件下的碎石土滑坡的最大爬高预测公式。结果表明，相对爬高与 3 个因素均呈正相关变化；在同岸顺直段中，通过对比相同距离(1~3 m)内不同方向的涌浪爬高衰减规律，发现两者皆在一定距离内符合指数衰减规律，逆河道方向涌浪爬高均值相较顺河道方向涌浪爬高均值大约 9.8%，而超出一定传播距离(1~3 m)后则会出现不同程度的爬高值增大现象；在支流段，在上、下游滑坡与支流入口传播距离、涌浪入射角度一致的情况下，在上、下游滑坡涌浪爬高中支流左岸爬高危险程度大于右岸爬高。

关键词：碎石土滑坡；干支流交汇河段；涌浪爬高；最大爬高

中图分类号：U656.5　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1002-4972(2026)08-0172-08

Experiment on landslide surge run-up height at confluence reaches of main and tributary streams in Three Gorges area

FANG Bo[1], WANG Pingyi[2]

(1. College of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;
2. National Engineering Research Center of Inland Waterway Regulation, Chongqing 400074, China)

Abstract: By conducting three-dimensional generalized physical model experiments on gravelly soil landslides in the Three Gorges Reservoir area at the confluence reaches of main and tributary streams, we explore the surge run-up characteristics of river-type reservoir confluence reaches under hydrostatic conditions. Using a dimensionless analysis method, we study the influence of three factors including landslide volume, slope angle, and water depth on the maximum relative run-up height in the straight reach on the opposite bank, and derive a predictive formula for the maximum run-up height of gravelly soil landslides under hydrodynamic boundary conditions by the multiple regression analysis method. The results indicate that relative run-up height shows a positive correlation with all three factors. In the same-bank straight section, comparing surge run-up height attenuation laws at identical distances (1−3 m) but different directions reveal that both directions follow exponential attenuation within a certain distance. The mean surge run-up height against the river channel is about 9.8% greater than that along the river channel. Beyond a certain propagation distance (1−3 m), varying degrees of run-up height increase occur. In the tributary stream section, under consistent propagation distances from upstream/downstream landslides to the tributary inlet and consistent surge incidence angles, the surge run-up hazard level on the left bank of the tributary is greater than that on the right bank for both upstream and downstream landslides.

Keywords: gravelly soil landslide; confluence reach of main and tributary stream; surge run-up height; maximum run-up height

收稿日期：2025-12-06　　**录用日期：**2026-01-09

***基金项目：**国家自然科学基金面上项目(52379059)

作者简介：方博(2000—)，男，硕士研究生，研究方向为水力学与河流动力学。

通信作者：王平义(1964—)，男，博士，教授，研究方向为水力学与河流动力学。E-mail：py-wang@163.com

水运工程

三峡库区支流横布，流域内面积 100 km^2 以上的支流在 150 条以上，诸多支流汇入长江干流形成独特的河道水库型干支流汇合口[1]。库区内滑坡灾害频繁，当大型岩土体滑坡滑入水中，其挟带的巨大动能会导致涌浪沿河道对岸、上下游方向传播，并产生沿岸爬高，造成一定的安全隐患[2]。由于该区域内复杂的地形导致岸坡传播波浪与反射波浪的汇聚和叠加作用，很难确定具体波浪最大高度以及时间[3]。由此可见，涌浪爬高是威胁库岸安全的重要因素和滑坡涌浪的重点研究对象，故在三峡库区复杂地形背景下研究滑坡涌浪爬高规律具有十分重要的意义。

国内外学者针对涌浪爬高的研究已取得了一定的成果。国外方面，di Risio 等[4]通过研究半椭圆形的刚性滑坡体在大型水池中的圆形岸坡的涌浪爬坡过程，得出涌浪爬高与圆形岸坡半径呈正相关关系；Trinaistich 等[5]通过改变岸坡坡度，发现在近场区内，破碎波的涌浪爬升与波幅和水深有关，而与坡度几乎无关；Ataie-ashtiani 等[6]通过研究发现，由于散粒体滑坡颗粒间存在着水体的填充作用，从而导致能量转化效率相对块体滑坡较低；Evers 等[7]提出一种针对小坡度的小波峰振幅的爬升预测公式；Synolakis[8]则建立了一种未破碎孤立波传播理论并给出未破碎孤立波爬高公式。国内方面，刘宙[9]提出波浪入射角的概念，并分析该因素对涌浪的影响，发现波浪在岸坡上的破碎形态与爬高密切相关，且斜向波爬高不一定小于正向波爬高；曹婷等[10]在静水条件下，研究滑坡体厚度、宽度以及滑坡倾角与对岸涌浪爬高的关系；董力志等[11]通过敏感性分析研究各因素对涌浪最大爬高的影响程度；杨飞彭[12]针对不同的河道断面做了相关的涌浪爬高对比研究，发现 V 形断面河道对岸涌浪爬高较 U 形断面河道对岸涌浪爬高相对较大；王梅力等[13]通过三维弯曲水槽概化试验，给出动水条件下弯曲河道的涌浪爬高衰减计算公式以及对岸最大爬高计算公式；贺仁品[14]通过在凸岸与凹岸布置爬坡测点，并针对每个爬坡测点讨论不同因素对凹岸与凸岸的爬高影响性分析；彭程等[15]通过物理模型试验研究得到新型斜波堤上规则波的爬高规律，发现波浪爬高随着斜波堤坡度的增加呈现先增大后减小的趋势；朱昭力等[16]通过直立堤波浪物理模型试验发现不规则波在直立堤上的爬高现象主要与波高有关，波周期的影响较小。

综上所述，目前针对滑坡涌浪爬高的物理模型概化试验尚存在一定的局限性：滑坡模型多采用单一河道形式，忽略了干支流交汇形式导致的复杂地形对涌浪爬坡的影响作用；大部分滑坡体模型采用如块体、等径玻璃球体等相对规则的材料，而真实的滑坡体往往由大小不一、形状各异的土石颗粒及块体构成，导致爬高预测研究的理论在实际滑坡模型中的适用性降低。本文的河道模型根据三峡库区河道型水库干支流交汇河段真实地形进行概化设计，并设计由 5 种不同粒径范围、配比组成的碎石土滑坡模型进行试验，丰富了三峡库区复杂地形条件下的滑坡涌浪爬高理论研究内容。

1　试验方法与设备

本文物理模型试验在国家内河航道整治工程技术研究中心开展，河道水槽参考三峡库区干支流交汇河道实地调研结果进行设计。河道水槽呈“支流衔接型”，即 1 条长 6 m、宽 2 m 的支流河道以 30°交汇角度接入长 29 m、宽 3 m 的干流河道，河道模型比尺按 1∶100 设计，根据相关研究[17]，三峡库区自 2003 年蓄水以来，重庆—宜昌段的水动力过程发生明显改变，干流断面平均流速由原来的 2~3 m/s 下降至每秒厘米级，越靠近三峡大坝流速越小，支流段甚至可降至每秒毫米级，其中三峡水库中下游河段支流段水体基本处于准静止状态，整体水动力特征受库区影响极大，导致湖泊属性逐渐加强，故本文按照静水条件设计实验。本文按照河道地形特性将爬坡测点分为两个部分，分别为干流河道爬坡段和支流河道爬坡段。其中，干流河道爬坡段包括：上游滑坡涌浪对岸顺直段（S_1~S_4）、下游滑坡涌浪对岸顺直

段(X_1~X_4)、滑坡同岸顺直段(T_1~T_5)。支流河段爬坡段包括支流左岸段(L_1~L_3)、支流右岸段(R_0~R_3)，河道模型及测点布置见图 1。

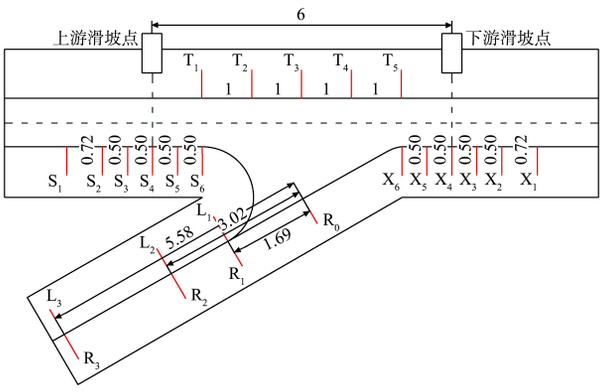


图 1　河道模型及测点布置(单位：m)

Fig. 1　Model of river channel and monitoring point layout(unit:m)

根据对三峡库区岸坡角度统计发现岸坡角度范围为 1°~65°，在此区间内的坡度均值约为 31.2°，考虑三峡库区岸坡角度条件试验条件限制，该试验干支流河道岸坡角度设计为 30°，该岸坡角度可以很好地反映三峡库区岸坡条件并在此基础上进行后续研究。其中干流河道断面为梯形，支流河道断面为三角形。河道坡降参考三峡库区山区河流真实坡降 2‰。滑坡试验分别在交汇口上、下游进行，具体滑坡位置见图 1。根据李磊[18]研究发现不同滑体类型会影响相对波高及相对波长，且在相对波高相同的情况下，散粒体滑块的相对爬高大于刚性滑块。为了更加真实地对三峡库区涌浪爬高进行研究，试验对三峡库区碎石土滑坡体真实特征参数进行统计，设计了依据三峡库区碎石土滑坡体的模型级配，分别由 0.6~2.5、2.5~5、5~10、10~20、20~25 mm 五种粒径范围的砾石按照 5%、15%、40%、25%、15%的比例进行配制，级配曲线结果见图 2，滑坡体密度为 2.5 g/cm^3，这样的设计避免了规则散粒体滑坡体模型对试验结果的理想化。模型试验以静水水深、滑坡体体积、滑坡倾角为控制变量，其中作为临水条件下的滑坡涌浪，滑坡倾角为滑体滑动弗劳德数的直接影响因素，具体表现为滑坡速度随着滑坡倾角的增大的增大，故滑动弗劳德数也随着滑坡倾角的增大而增大。试验整体采用单因素试验设计，试验工况共计 10 种，见表 1，每组工况重复两次。

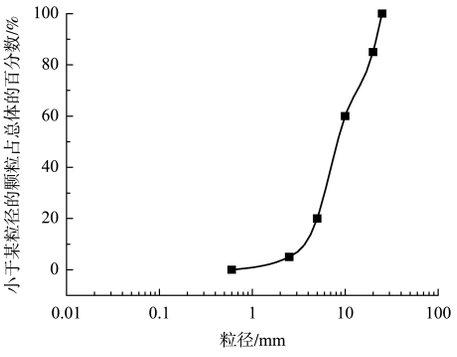


图 2　颗粒级配曲线

Fig. 2　Particle size distribution curve

表 1　试验工况

Tab. 1　Experimental conditions

工况	h/m	V/m^3	α/(°)
M_1	0.25	0.080	40
M_2	0.30	0.080	40
M_3	0.35	0.080	40
M_4	0.40	0.080	40
M_5	0.30	0.048	40
M_6	0.30	0.064	40
M_7	0.30	0.096	40
M_8	0.30	0.080	30
M_9	0.30	0.080	50
M_{10}	0.30	0.080	60

注：h 为水深；V 为滑坡体积；α 为滑坡角度。

2　干流河道涌浪爬高分析

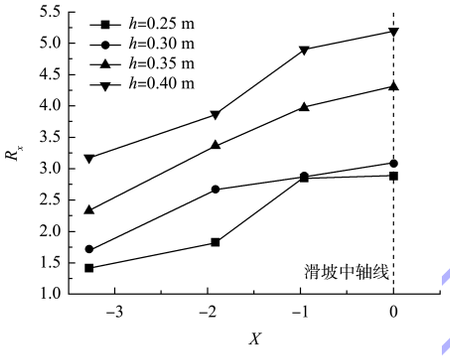
2.1　对岸顺直段涌浪爬高分析

将滑坡对岸顺直爬坡段数据进行无量纲化处理，得到相对爬高 $R_x=r_x/H_0$ 和相对距离 $X=x/B$ 的关系曲线，其中 r_x 为试验测点爬高值，H_0 为首浪波峰高度，x 为滑坡测点距滑坡中轴线的库岸距离，B 为河道宽度；以滑坡中心为轴线，逆河道方向定义为滑坡中心左侧顺直河段，即上游滑坡对岸顺直段爬高，顺河道方向定义为滑坡中心右侧顺直河段，即下游滑坡对岸顺直段爬高，顺河道方向爬高衰减率为 X_4~X_1 测点爬高衰减率，逆河道方向爬高衰减率为 S_4~S_1 测点爬高衰减率。通过对比讨论不同水深、滑坡体积、滑坡倾角对涌浪爬高的影响进行分析。

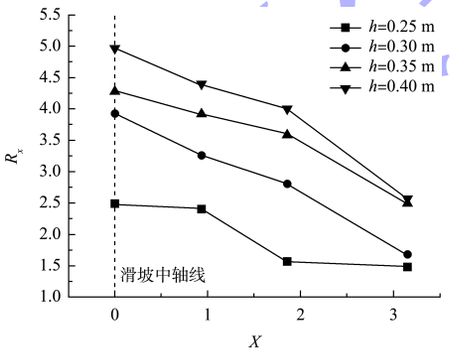
2.1.1　不同水深对涌浪爬高的影响分析

上、下游涌浪对岸相对爬高值与水深呈正相关关系，结果见图 3，即随着水深的增大，相对爬高值也不断增大，这是因为随着水深的增加，滑体与水体的摩擦效应逐渐增大，水体势能更多地转化为水体动能，首浪在行进过程中的能量损失变小，导致相对爬高增大。

对比顺河道方向与逆河道方向在对岸顺直河道段的爬高衰减率，可以得到在逆河道方向的平均相对爬高衰减率为 41.5%，顺河道方向的平均相对爬高衰减率为 48.5%，即在相同传播距离内，顺河道方向对岸顺直段的爬高衰减率大于逆河道方向。



a) 逆河道方向



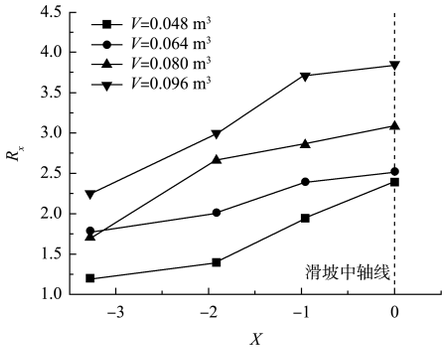
b) 顺河道方向

图 3　上、下游涌浪在不同水深工况下的对岸顺直段爬高衰减曲线

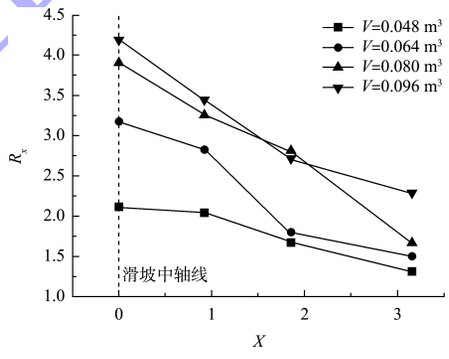
Fig. 3　Run-up attenuation curves of upstream and downstream surges on opposite bank's straight section under different water depth conditions

2.1.2　不同滑坡体积对涌浪爬高的影响分析

对比上、下游滑坡工况下的相对爬高可发现，上游滑坡工况最大相对爬高值由 2.4 增加至 3.8，下游滑坡工况最大相对爬高值由 2.1 增加至 4.2，上、下游滑坡工况下相对爬高皆与滑坡体积呈正相关关系，结果见图 4。这是由于体积的变大导致对水体的抬升效应增强，首浪浪高增大，从而导致相对爬高增大。以滑坡中心为轴线，可以得到逆河道方向的平均相对爬高衰减率为 45.2%，顺河道方向的平均相对爬高衰减率为 47.2%，即在相同传播距离内，顺河道方向对岸顺直段的爬高衰减率大于逆河道方向。



a) 逆河道方向



b) 顺河道方向

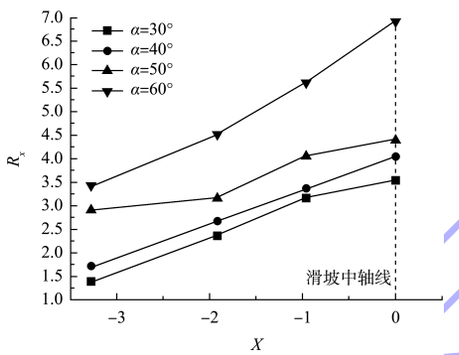
图 4　上、下游涌浪在不同体积工况下的对岸顺直段爬高衰减曲线

Fig. 4　Run-up attenuation curves of upstream and downstream surges on opposite bank's straight section under different volume conditions

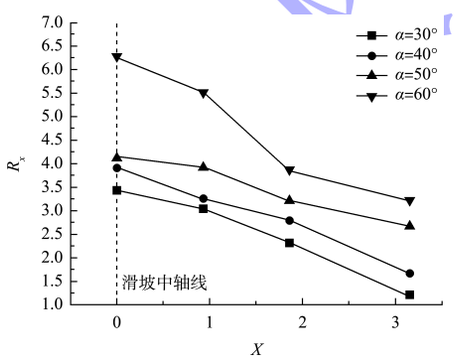
2.1.3　不同滑坡倾角对涌浪爬高的影响分析

滑坡倾角与相对爬高呈正相关关系，结果见图 5，由于滑坡倾角的增大导致滑体速度增大，滑体滑动弗劳德数增大，这意味着滑体动能随着倾角的增大而增大，故导致对岸相对爬高增大。随着滑坡倾角的增大，上游滑坡工况对岸相对爬高由 3.6 增长至 6.9，下游滑坡工况相对爬高由 3.4 增长至 6.3，在 30°、40°、50°工况下，最大相对

爬高呈一定幅度的增长，但是在 60°工况下，对岸最大相对爬高呈大幅增长，较 50°工况下，上游滑坡对岸最大相对爬高增长了 63%，下游滑坡对岸最大相对爬高增长了 66%。这是由于滑坡倾角过大时，滑坡散粒体在重力的作用下向前端掉落，在滑槽内形成前端较厚的滑坡体模型，接触水体后会产生能量高度集中的涌浪首波，从而导致 60°工况下的爬高大幅度增长现象。以滑坡中心为轴线，可以得到逆河道方向的平均相对爬高衰减率为 51%，顺河道方向的平均相对爬高衰减率为 51.8%，两者相差不大，依旧符合在相同传播距离内，顺河道方向对岸顺直段的爬高衰减率大于逆河道方向的衰减规律。



a) 逆河道方向



b) 顺河道方向

图 5　上、下游涌浪在不同滑坡角度工况下的对岸顺直段爬高衰减曲线

Fig. 5　Run-up attenuation curves of upstream and downstream surges on opposite bank's straight section under different angle conditions

2.2　同岸顺直段涌浪爬高分析

针对同岸顺直段的涌浪爬坡分析，由于交汇河道边界影响，故使用相对距离分析沿岸爬高不够准确。为直观展现同岸顺直段涌浪爬高与距滑坡中心点的水平距离的关系，绘制同岸顺直段爬高衰减曲线，见图 6。可以看出，在相同距离内（1~3 m），由于河床坡降的影响导致逆河道方向涌浪爬高均大于顺河道方向涌浪爬高，逆河道方向涌浪爬高均值相较顺河道方向涌浪爬高均值约大 9.8%，但两者在该距离内均符合指数衰减规律并呈现先快后慢的衰减趋势。在 3~5 m 段，可以看出不同方向的涌浪爬高均会产生不规则的爬高增大现象，其原因主要是由在 3~5 m 处的近岸（同侧）涌浪发生破碎产生的二次爬坡流与干支流河段边界的反射波叠加而共同导致。

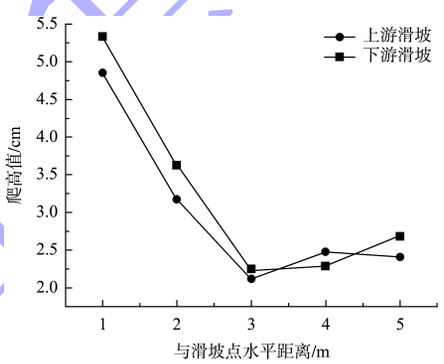


图 6　同岸顺直段爬高衰减曲线

Fig. 6　Run-up attenuation curves on same bank's straight sections

2.3　涌浪最大爬高预测分析

涌浪爬高受到诸多因素的影响，国内外许多学者针对静水条件下的涌浪爬高给出了大量的拟合公式。通过统计试验中爬高数据发现涌浪最大爬高均位于对岸顺直段滑坡中轴线处，本文在静水条件下针对真实三峡库区碎石土临水滑坡模型，通过考虑相对滑坡体积 V/h^3、滑体倾角 α、相对传播距离 L/h、滑动弗劳德数 $v_s/\sqrt{gh}$、对岸坡度 m 等因素对涌浪最大相对爬高 r/h 的影响，利用多元回归分析方法得到的临水碎石土滑坡涌浪最大爬高经验公式为：

$$\frac{r}{h}=0.55\left(\frac{V}{h^3}\right)^{0.85}\left(\frac{L}{h}\right)^{-2.72}\alpha^{0.1}\left(\frac{v_s}{\sqrt{gh}}\right)^{0.94}m^{1.26} \tag{1}$$

式中：r 为涌浪最大爬高；h 为静水水深；V 为滑

坡体的体积；L 为涌浪传播距离；α 为滑坡倾角；v_s 为滑体速度；m 为对岸坡度。

运用式(1)分别对上、下游滑坡涌浪最大相对爬高做出计算并对比实测最大相对爬高，结果见图 7。经分析发现上、下游滑坡涌浪最大相对爬高计算值与预测值均集中在 $y=x$ 趋势线两侧，整体相关系数 $R^2=89.9\%$，表明式(1)对临水条件下的碎石土滑坡涌浪最大爬高预测均具有一定的准确度。

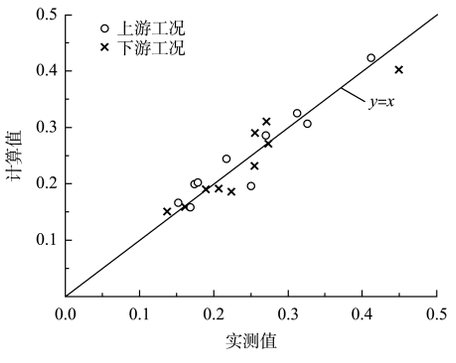


图 7　对岸最大相对爬高实测值与计算值对比

Fig. 7　Comparison of measured and calculated values for maximum relative run-up height on opposite bank

式(1)基于本物理模型试验条件拟合，岸坡坡度 30°，适用于高山峡谷地区河道型水库临水碎石土滑坡对岸最大爬高预测。由于式(1)设计的变量不够全面，如没有考虑滑坡点距水面高程、水流速度等因素，故该公式只针对静水条件下临水碎石土滑坡可进行爬坡高度预测理论指导，后续需要结合其他实际情况进一步开展研究。

3　支流河道涌浪爬高分析

为对比支流段左岸、右岸爬高，定义 R_0 的爬高尺底部位置为支流起始点，该点距离上、下游滑坡的距离、波浪入射角度一致，且位于支流河道中心线。以距离起始点的支流河道长度定义为测点距离，将支流河段分为支流右岸(测点 R_1～R_3)、支流左岸(测点 L_1～L_3)。由于涌浪传播至支流段时衰减较大，由于变量因素的改变所导致的爬高差异在支流段爬高规律中表现性不强，故统计所用工况条件下的支流段爬高数据并进行平均分析，结果见表 2。可以发现在支流区域，左岸爬高均值大于右岸爬高均值，其中上游滑坡涌浪在支流段的左岸爬高均值比右岸爬高均值大 40.3%，下游滑坡涌浪在支流段的左岸爬高均值比右岸爬高均值大 12.9%。且下游滑坡涌浪在支流段的两侧爬高均值均大于上游滑坡涌浪在支流段的两侧爬高均值，具体表现为下游滑坡涌浪在支流段的爬高均值比上游涌浪爬高均值大 40.4%。

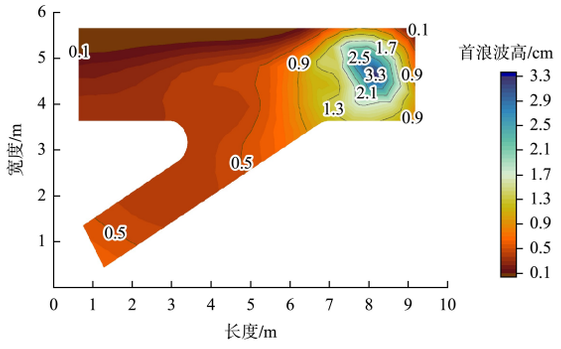
表 2　支流段各测点爬高均值

Tab. 2　Average run-up height at each monitoring point in tributary section

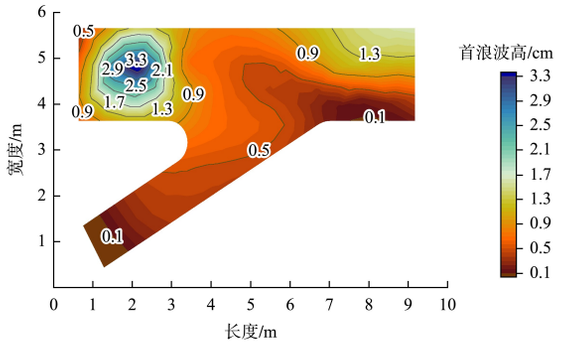
区域	爬高测点	测点距离/m	上游滑坡爬高均值/cm	下游滑坡爬高均值/cm
支流右岸	R_1	1.69	1.53	2.20
	R_2	3.02	1.31	2.23
	R_3	5.58	1.23	2.02
支流左岸	L_3	5.58	1.72	2.37
	L_2	3.02	2.04	2.20
	L_1	1.69	1.95	2.71

为进一步揭示交汇口地形对支流爬高的作用机理，绘制了 M9 工况下不同滑坡位置的首浪波高云图，见图 8。可以发现，在交汇口弯道转角处，首浪波向线均紧密收缩，这种称之为辐聚的现象会使靠近凸岸一侧的涌浪传播的衰减速度变小[19]，当上游位置滑坡涌浪传递至支流河道时，支流左侧为靠近凸岸的一侧，故导致支流左岸爬高大于右岸爬高，而当下游位置涌浪传递至进入支流顺直河段后，可看出支流左岸侧波高大于右岸侧波高，这是由于支流左岸为靠近较大凸岸的一侧，故同样导致支流左岸爬高大于右岸爬高的现象。对比图 8a)与 b)可知，下游滑坡涌浪在支流段的波高衰减速率较上游滑坡涌浪较慢，原因是下游涌浪受来自地形的影响更小，涌浪能量衰减较小，故下游滑坡涌浪在支流段的爬高值普遍大于上游滑坡涌浪。

水运工程



a) 上游



b) 下游

图 8　不同滑坡位置首浪波高云图

Fig. 8　Cloud map of first-wave heights at different landslide locations

4　结语

1）通过无量纲分析方法，发现滑坡体对岸最大相对爬高与水深、滑坡体体积、滑坡体倾角呈正相关关系，且在相同传播距离内，顺河道方向爬高衰减率大于逆河道方向爬高衰减率，并利用多元回归分析方法以及最小二乘法针对临水条件下的碎石土滑坡涌浪对岸最大爬高拟合出涌浪爬高预测公式。

2）在同岸顺直段内，不同方向的涌浪爬高衰减在一定传播距离内(1~3 m)皆服从指数衰减模式，且由于河道坡降的影响，逆河道方向爬坡均值比顺河道方向爬坡均值大 9.8%；超出一定范围后(3~5 m)，由于反射波及波浪破碎作用影响会出现小幅度且不规则的涌浪爬升现象。

3）通过对比距支流入口处相同距离、相同涌浪入射角度的两处滑坡点，可发现上游滑坡涌浪在支流段的左岸爬高均值比右岸爬高均值大 40.3%，下游滑坡涌浪在支流段的左岸爬高均值比右岸爬高均值大 12.9%，且下游滑坡涌浪在支流段的爬高均值比上游涌浪爬高均值大 40.4%，故可得出：当干支流交汇角度为 30°时，支流左岸爬高危险程度大于支流右岸爬高，且下游滑坡涌浪对支流段的爬高影响程度大于上游滑坡涌浪。

参考文献：

[1] 宋思敏, 何林应, 王卓微, 等. 三峡库区支流治理现状及对策[C]//中国水利学会. 2022 中国水利学术大会论文集: 第 2 分册. 郑州: 黄河水利出版社, 2022: 235-241.
SONG S M, HE L Y, WANG Z W et al. Chinese Hydraulic Engineering Society. Current status and countermeasures for tributary management in the Three Gorges Reservoir area [C]//Proceedings of the 2022 China Water Resources Academic Conference (Volume 2). Zhengzhou: The Yellow River Conservancy Press, 2022: 235-241.

[2] 杨渠锋, 王平义, 喻涛, 等. 三峡库区陡岩滑坡涌浪爬高试验分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2014, 25(3): 43-48, 55.
YANG Q F, WANG P Y, YU T, et al. Experimental research on dangerous rock-type landslide run-up of the river-channel type reservoir in mountainous area[J]. The Chinese journal of geological hazards and prevention, 2014, 25(3): 43-48, 55.

[3] HUANG B L, YIN Y P, DU C L. Risk management study on impulse waves generated by hongyanzi landslide in three gorges reservoir of China on June 24, 2015[J]. Landslides, 2016, 13(3): 603-616.

[4] DI RISIO M, DE GIROLAMO P, BELLOTTI G, et al. Landslide-generated tsunamis runup at the coast of a conical island: new physical model experiments [J]. Journal of geophysical research: oceans, 2009, 114(C1): 2008JC004858.

[5] TRINAISTICH W C, MULLIGAN R P, TAKE W A. Runup of landslide-generated waves breaking on steep slopes captured using digital imagery and hydrochromic paint[J]. Coastal engineering, 2021, 166: 103888.

[6] ATAIE-ASHTIANI B, NIK-KHAH A. Impulsive waves caused by subaerial landslides [J]. Environmental fluid mechanics, 2008, 8(3): 263-280.

[7] EVERS F M, BOES R M. Impulse wave runup on steep to vertical slopes [J]. Journal of marine science and engineering, 2019, 7(1): 1-15.

[8] SYNOLAKIS C E. The runup of solitary waves [J]. Journal of fluid mechanics, 1987, 185: 523-545.

[9] 刘宙. 斜向波爬高的试验研究[J]. 河海大学学报, 1990(1): 118-121.
LIU Z. Experimental Study on climbing of oblique waves[J]. Journal of Hohai University, 1990(1): 118-121.

[10] 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.
CAO T, WANG P Y, HU J L. Impulse wave run-up generated by reservoir rocky landslides based on physical model experiments [J]. South-to-north water transfers and water science & technology, 2018, 16(5): 159-164, 185.

[11] 董力志, 周家文, 胡宇翔, 等. 水库滑坡涌浪演进与最大爬高影响规律试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2024, 22(1): 9-17.
DONG L Z, ZHOU J W, HU Y X, et al. Evolution and climb height of reservoir landslide surge based on model experiments [J]. Journal of water resources and architectural engineering, 2024, 22(1): 9-17.

[12] 杨飞鹏. 不同断面库区滑坡涌浪的产生及传播规律的数值模拟研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2018.
YANG F P. Numerical simulation study on the formation and the propagation characteristics of landslide-generated waves in the different reservoir section[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018.

[13] 王梅力, 田野, 王平义, 等. 动水条件下三维岩质滑坡涌浪爬高规律研究[J]. 水利水运工程学报, 2025(1): 111-119.
WANG M L, TIAN Y, WANG P Y, et al. Study on the pattern of surge climbing under the condition of moving water in three-dimensional rock landslides [J]. Hydro-science and engineering, 2025(1): 111-119.

[14] 贺仁品. 山区弯曲河道型水库异岸滑坡涌浪特性的试验对比研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2017.
HE R P. Experimental comparative study on thedifferent characteristics of the landslidesurge in mountain bend river type reservoir [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2017.

[15] 彭程, 王昊, 娄雅冬, 等. 斜坡堤新型人工块体 TB-CUBE 的波浪爬高和反射试验研究[J]. 水运工程, 2022(9): 1-7.
PENG C, WANG H, LOU Y D, et al. Experiment investigation on wave run-up and reflection of a new artificial block TB-CUBE for sloping breakwater [J]. Port & waterway engineering, 2022(9): 1-7.

[16] 朱昭力, 柯维林, 陈国平, 等. 不规则波作用下带挑檐直立堤爬高与越浪量试验[J]. 水运工程, 2019(4): 21-24.
ZHU Z L, KE W L, CHEN G P, et al. Experiment of wave run-up and overtopping of vertical breakwaters with wave return wall under irregular wave [J]. Port & waterway engineering, 2022(4): 21-24.

[17] 龙良红, 黄宇擘, 徐慧, 等. 近 20 年来三峡水库水动力特性及其水环境效应研究: 回顾与展望[J]. 湖泊科学, 2023, 35(2): 383-397.
LONG L H, HUANG Y B, XU H, et al. Research on hydrodynamic characteristics and its water eco-environment effects in Three Gorges Reservoir in recent 20 years: review and prospect[J]. Journal of lake sciences, 2023, 35(2): 383-397.

[18] 李磊. 滑坡涌浪波爬坡特性实验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2023.
LI L. Experimental study on runup characteristics of landslide surge wave [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2023.

[19] 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, 2020.
HAN L F. Study on the wave field characteristics of impulse waves generated by three-dimensional landslides in curved gorge-type reservoirs [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2020.

（本文编辑　王璁）