

水上滑坡冲击涌浪的远场传播特征数值模拟分析

黄瑞启¹, 黄筱云^{1,2}, 张少强¹, 程永舟^{1,2}

(1. 长沙理工大学水利与环境工程学院, 湖南 长沙 410114;
2. 水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114)

摘要:为分析三维滑坡冲击涌浪的远场传播特征,采用 FLOW-3D 软件建立三维模型,选取不同的滑坡体厚度、宽度与入水速度,模拟滑坡体入水、水体飞溅以及涌浪产生和传播过程。结果表明:滑坡涌浪在传播 7 倍水深距离后趋于稳定,其相对波高与周期由滑坡体弗劳德数、相对下滑时间以及滑坡体相对体积决定,滑坡体对远场涌浪能量的传递率在 8.0%~19.7% 之间。

关键词:水上滑坡;冲击涌浪;远场传播;FLOW-3D;三维模型

中图分类号:TV139.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2023)01-0036-07

Numerical simulation analysis on far-field propagation characteristics of impulse waves generated by subaerial landslides//HUANG Ruiqi¹, HUANG Xiaoyun^{1,2}, ZHANG Shaoqiang¹, CHENG Yongzhou^{1,2}(1. School of Hydraulic and Environmental Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China; 2. Key Laboratory of Water and Sediment Science and Water Disaster Prevention of Hunan Province, Changsha 410114, China)

Abstract: To investigate the far-field propagation characteristics of three-dimensional impulse waves generated by subaerial landslide, a three-dimensional landslide-generated wave model was established using FLOW-3D. The process of the landslide mass impact with water splash followed by landslide-induced wave generation and propagation were investigated under the condition of slides with different thickness, width and variable entry speeds. The results show that the landslide wave propagation keeps stable beyond a distance of 7 times of water-depth from the slide entry point. The dimensionless wave height and wave period are determined by the Froude number of landslide mass, the dimensionless motion time and the landslide body size. The energy conservation rate from the landslide to the far-field wave fluctuates from 8.0% to 19.7%.

Key words: subaerial landslide; impulse wave; far-field propagation; FLOW-3D; three-dimensional model

库岸边坡失稳、崩落,滑坡体以一定速度冲击水体,将产生巨大的涌浪。国内外滑坡浪事件屡见不鲜,如 1963 年意大利的瓦伊昂水库滑坡^[1]、2007 年清江水布垭水库大堰塘滑坡^[2]、2008 年长江巫峡龚家方滑坡^[3]等。按照滑坡发生位置,可以将滑坡分为水上滑坡(subaerial)、水下滑坡(submarine)和滨水滑坡(partially submerged)3 种类型^[4]。与滨水滑坡、水下滑坡相比,水上滑坡会冲击水面,涌浪的初始形态更加复杂,且与滑坡体运动与动力特征密切相关^[5]。水上滑坡产生涌浪过程可分为以下 4 个阶段^[6]:①滑坡体开始移动、加速、冲击水面;②滑坡体入水滑行产生涌浪;③涌浪向外传播;④涌浪抵达岸线、爬高。按近场首波的非线性特征,滑坡涌浪大致可分为线性波、孤立波、椭圆余弦波和涌潮^[7],具

体类型与滑坡体体积以及滑坡体与水之间的动量交换有关。

滑坡涌浪的特征研究主要采用理论分析^[8-12]、物理模型试验^[13-19]和数值模拟^[20-26]方法。现阶段滑坡涌浪的数值模拟方法有基于 N-S 方程的数值模拟^[27-28]、基于浅水方程的数值模拟^[29-30]、基于 Boussinesq 波方程的数值模拟^[31-32]和基于势流方程的数值模拟^[33-34]4 类。若要完全模拟滑坡体冲击水面造成水花飞溅和涌浪的传播过程,基于 N-S 方程的数值模型是唯一选择。基于 N-S 方程的数值模型又分为二维和三维两类。在二维模型中,滑坡体宽度与水体宽度一致,涌浪只在一个方向上传播;而三维模型可以呈现涌浪的不同径向传播。滑坡涌浪的三维数值模拟研究远少于二维数值模拟研究,且滑

基金项目:国家自然科学基金面上项目(52171245);湖南省教育厅科学研究重点项目(20A011);湖南省自然科学基金青年项目(2021JJ40607)

作者简介:黄瑞启(1997—),男,硕士研究生,主要从事边坡稳定与滑坡涌浪研究。E-mail:864344627@qq.com
通信作者:黄筱云(1980—),男,副教授,博士,主要从事水波运动数值模拟研究。E-mail:xiaoyun.huang@csust.edu.cn

坡涌浪传播远场特征的分析与讨论较少见。

本文采用 FLOW-3D 软件模拟水上滑坡产生涌浪的三维过程,分析不同径向上周期与波高变化过程以及涌浪传播近远场的界限,并探讨了远场涌浪能量大小及其能量转换率,以为滑坡涌浪地质灾害的预警提供参考。

1 数值模型及验证

1.1 模型概况

三维滑坡涌浪模型(以下简称“本文模型”)采用 FLOW-3D 软件建模,其中流体控制方程为不可压缩流体运动的 Navier-Stokes 方程,采用标准 RNG $k-\varepsilon$ 模型描述流体紊动特征, GMO 模型控制滑坡体运动, TruVOF 技术捕捉水面起伏和飞溅。通过调整 GMO 模型中的摩擦系数和碰撞系数可以改变滑坡体下滑、撞击水面、触底等状态,以获得准确的涌浪结果,碰撞系数取 1 表示碰撞物完全弹性,取 0 则是完全塑性。

1.2 模型验证

通过与 Liu 等^[35]的物理试验结果对比来检验本

文模型的有效性。该物理试验在长 104 m、宽 3.7 m、高 4.6 m 的水槽中进行,槽内水深为 3 m,滑坡坡度为 27° ,滑坡体长 91 cm、宽 65 cm、高 46 cm,质量为 475.52 kg,初始时刻滑坡体顶面距水面高度为 0.46 m。本文模型采用渐变网格,最小网格尺寸是 0.02 m,时间步长根据柯朗条件自动调整,摩擦系数和碰撞系数均取 0.1。

图1为6个测点(图2)波面高度 η 实测结果与模拟结果的比较。总体上,本文模型模拟结果较Liu等^[35]模拟结果更接近实测结果,说明本文模型各参数设置合理。

2 数值模拟试验

2.1 试验设置

整个试验区域纵向长度设为 200 m,水面横向宽度为 100 m,水深为 10 m,滑坡坡度为 45° 。滑坡体为前缘角度为 45° 的四棱柱,长 9 m、宽 8 m、厚 3 m,置于区域中线上,如图 3 所示。为节省计算资源,将整个区域按中线分开,并将与中线重合的边界设为对称边界,其余边界设置为出流边界,并布置多

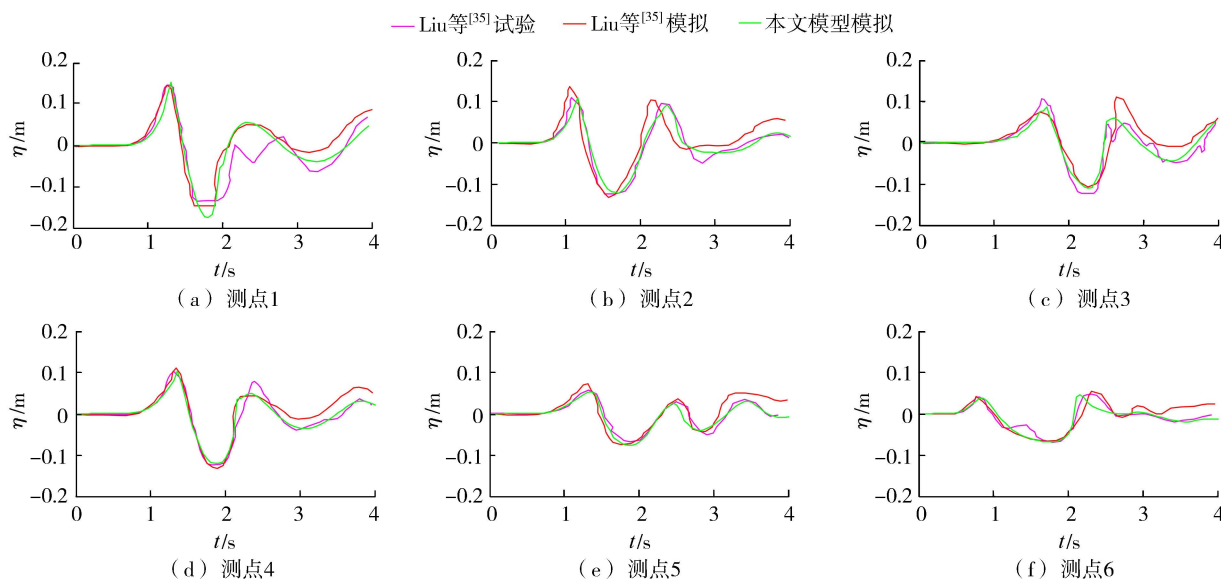
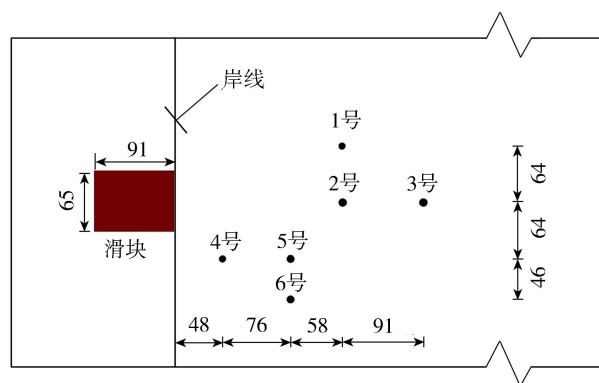
图 1 本文模型模拟结果与 Liu 等^[35]模拟和试验结果比较

图2 Liu等^[35]物理试验测点布置(单位:cm)

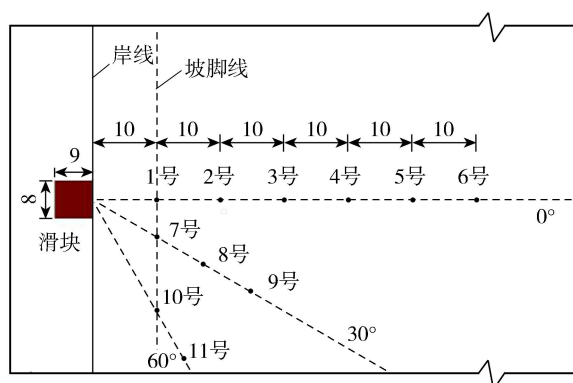


图3 三维滑坡涌浪数值模拟试验测点布置(单位:m)

孔介质用于消波。

2.2 数值模拟结果

滑坡涌浪的产生与传播区域可以分为飞溅区、近场和远场。一般而言,入水点至滑坡体停止点的水域属于飞溅区;从停止点开始,波浪出现色散的区域称为近场;呈现振荡波特点的区域则为远场^[5]。就本文数值模拟试验而言,坡脚线可以看作飞溅区与近场的界限。为获取滑坡涌浪近远场涌浪三维特征,在0°径向上等间距布置6个测点,30°径向上布置3个测点,60°径向上布置2个测点,如图3所示,其中,2、8号测点和10号测点径距一致,3、9号测点和11号测点径距相等。表1为滑坡体以4 m/s初始速度下滑时各测点的首、次波波峰高度 η_c 与周期 T 模拟结果。

表1 各测点首、次波波峰高度与周期

测点	η_c/m		T/s	
	首波	次波	首波	次波
1号	1.42	0.33	4.15	4.37
2号	0.71	0.42	5.00	3.10
3号	0.43	0.65	8.06	3.00
4号	0.25	0.76	7.75	3.74
5号	0.18	0.75	7.95	4.50
6号	0.14	0.61	8.20	4.50
7号	0.94	0.76	5.50	2.65
8号	0.48	0.78	6.75	2.90
9号	0.28	0.78	7.55	3.66
10号	0.25	0.37	6.03	2.28
11号	0.17	0.44	7.10	3.30

图4给出了1~6号测点相对波面高度时程变化(图中 $\eta^* = \eta/h$ 为相对波面高度, $t^* = t\sqrt{g/h}$ 为相对时间,其中 h 为水深, g 为重力加速度, t 为时间)。可以看出,首波向外传播时,出现明显色散,低频波与高频波分离;次波则吸收了首波的高频部分能量,波幅逐渐增大,在4倍水深位置达到最大,并在相当长距离(2倍水深距离以上)缓慢减小,特别是5倍水深距离后,次波周期也保持不变,故认为该滑坡涌浪的近远场界线位于5倍水深以外。从坡脚3个测点的波面时程图(图5)可以看出,首波依次经过1、7、10号测点,波幅与频率依次减小。另外,在0°和30°径向上,坡脚处首波波幅大于次波波幅,而在

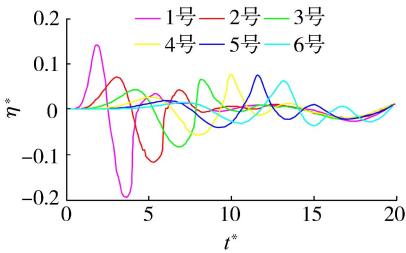


图4 0°径向各测点波面时程变化

60°径向上情况相反。从不同径向等径距测点波面时程变化来看(图6),等径距测点波面首次达到波峰高度的时间接近,波幅随径向角增大而减小,同时,30°、60°径向上2倍水深以外测点次波波幅变化较小,但周期变化较大。

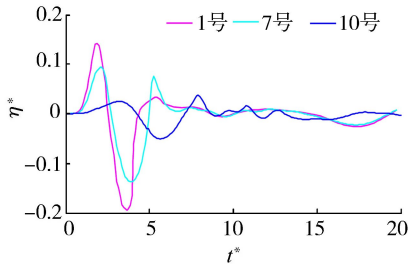
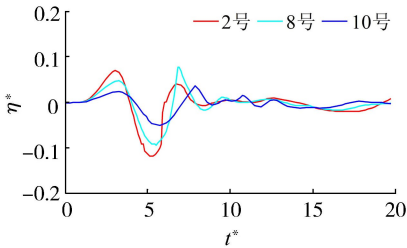
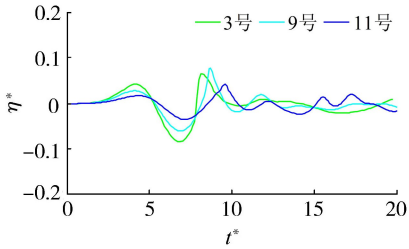


图5 坡脚各测点波面时程变化



(a) 20 m径距



(b) 30 m径距

图6 不同径向等径距测点波面时程变化

3 滑坡涌浪特征分析

为分析滑坡涌浪特征,本文通过改变滑坡体厚度 s 、宽度 b 与入水速度 v 以获得不同的涌浪形态,数值模拟试验具体工况见表2。

3.1 滑坡体运动

滑坡体撞击水面入水后做减速运动,触底后会停止或翻滚。相对滑坡特征时间形式为 $t_s^* = t_s \sqrt{g/h}$ (t_s 为滑坡体入水至触底的时长,称为滑坡特征时间)。相对滑坡特征时间可认为是滑坡体弗劳德数 Fr 、斜坡角度 α 以及相对滑坡体体积 V_s^* 的函数^[6],即

$$t_s^* = f(Fr, \sin\alpha, V_s^*) \tag{1}$$

其中

$$V_s^* = lbs/h^3$$

式中 l 为滑坡体长度。由于滑坡体下滑主要受到水体的正面阻力,若不考虑侧向阻力,有

$$t_s^* = f(Fr, \sin\alpha, A_s^*) \tag{2}$$

其中

$$A_s^* = bs/h^2$$

表 2 数值模拟试验工况与结果

工况	s/m	b/m	$v/(m \cdot s^{-1})$	E_w/MJ	t_s/s
1	3	6	4	3.72	1.73
2	3	9	4	7.10	1.72
3	3	12	4	1.15	1.72
4	3	6	5	3.90	1.67
5	3	9	5	7.17	1.66
6	3	12	5	1.22	1.66
7	3	6	6	3.33	1.62
8	3	9	6	7.66	1.61
9	3	12	6	1.28	1.61
10	4	6	4	5.00	1.72
11	4	9	4	1.12	1.72
12	4	12	4	1.37	1.71
13	4	6	5	5.43	1.66
14	4	9	5	1.12	1.65
15	4	12	5	1.38	1.65
16	4	6	6	5.31	1.61
17	4	9	6	1.08	1.61
18	4	12	6	1.43	1.60
19	5	6	4	6.17	1.72
20	5	9	4	1.39	1.71
21	5	12	4	2.16	1.71
22	5	6	5	6.01	1.66
23	5	9	5	1.32	1.65
24	5	12	5	1.98	1.65
25	5	6	6	6.11	1.61
26	5	9	6	1.51	1.60
27	5	12	6	1.92	1.60

注: E_w 为通过近远场分界面断面的涌浪总能量。

根据 27 组工况的滑坡体滑坡特征时间数值模拟结果(表 2),相对滑坡特征时间的拟合公式为

$$t_s^* = 1.466 A_s^{-0.011} Fr^{-0.1607} \tag{3}$$

式(3)的拟合度为 0.991,均方误差为 3.47×10^{-4} 。

3.2 近远场

Walder 等^[5]将近场定义为从飞溅区边界至涌浪动能与势能趋近于某一渐近值的位置,Watts^[13]则采用如下能量积分表示通过位置 x 断面的涌浪总势能:

$$E'(x/h) = \int_0^\infty \eta^2(t,x/h) dt \tag{4}$$

当上述积分沿程趋近一定值时,便可确定近场的外边界。图 7~9 为不同径向上沿程各测点的涌浪总势能(图中 $s^*=s/h$ 为滑坡体相对厚度, $b^*=b/h$ 为滑坡体相对宽度),横坐标 $x^*=x/h$ 。可以看出,总势能沿程减小,其中,弗劳德数对近场总势能的沿程变化影响较小,而相对厚度与相对宽度的影响明显。在 1~3 倍水深之间,总势能的下落幅度较大,而后下降幅度开始减少,当涌浪达到 6~7 倍水深区间时,各径向涌浪总势能变化较小,且在 7 倍水深位置不同径向的涌浪总势能几乎相等。因此,7 倍水深距离可看作三维滑坡涌浪近场的外边界。

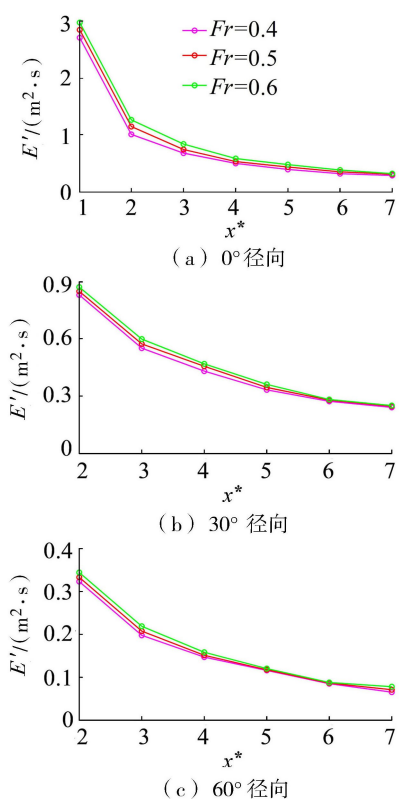


图 7 不同滑坡体弗劳德数下各径向涌浪能量积分沿程变化

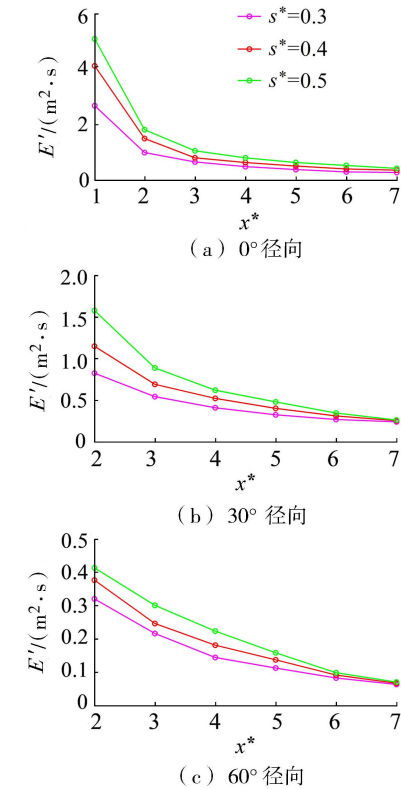


图 8 不同滑坡体相对厚度下各径向涌浪能量积分沿程变化

3.3 波峰高度

这里主要分析近场涌浪最大波峰高度和远场涌浪最大波峰高度。从空间上看,近场区域各径向坡

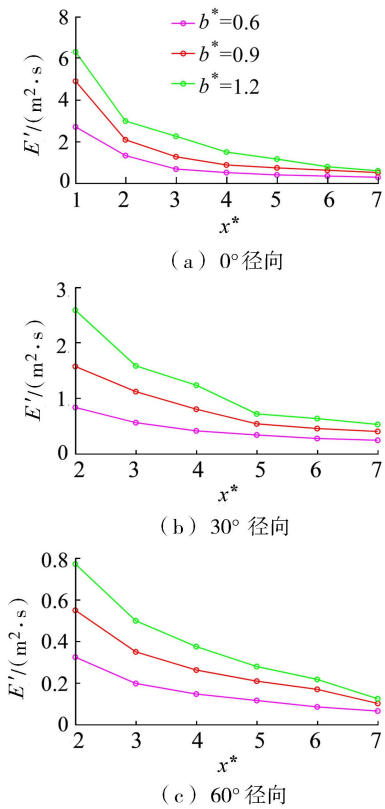


图9 不同滑坡体相对宽度下各径向涌浪能量积分沿程变化

脚线处波峰高度最大;而从时间上来看,最大波峰高度可能出于首波或次波。对于远场涌浪,取径距为7倍水深位置处的涌浪进行讨论。在三维情形中,相对波峰高度 η_c^* 可认为是滑坡体弗劳德数 Fr 、斜坡角度 α 、径向角 θ 、相对滑坡特征时间 t_s^* 以及滑坡体相对体积 V_s^* 的函数^[6],即

$$\eta_c^* = f(V_s^*, Fr, \sin\alpha, \cos\theta, t_s^*) \quad (5)$$

Walder等^[5]通过二维物理试验指出涌浪相对最大波高是 t_s^*/V_s^* 的函数,而Panizzo等^[6]通过三维涌浪试验进一步指出 0° 径向上相对最大波高可看作是 t_s^*/A_s^* 的函数。基于此,式(5)可写成

$$\eta_c^* = f(t_s^*/A_s^*, \cos\theta) \quad (6)$$

根据27组工况的数值模拟结果,近场首波相对波峰高度 η_{c1}^* 和近场次波相对波峰高度 η_{c2}^* 的拟合公式分别为

$$\eta_{c1}^* = 0.6102(t_s^*/A_s^*)^{-0.7785}(\cos\theta)^{2.9457} \quad (7)$$

$$\eta_{c2}^* = 0.6866(t_s^*/A_s^*)^{-1.1039}(\cos\theta)^{8.0623} \quad (8)$$

式(7)的拟合度为0.9336,均方误差为 8.25×10^{-4} ;式(8)的拟合度为0.8819,均方误差为 4.3×10^{-3} 。故近场最大相对波峰高度为 $\eta_{cmax1}^* = \max(\eta_{c1}^*, \eta_{c2}^*)$ 。

在远场,涌浪几乎以固定频率传播,远场涌浪最大波幅将出现在近远场交界处。取径距为7倍水深位置作为远场起始位置,最大相对波峰高度出现在次波,其试验值与预测值关系如图10所示,其拟合

公式为

$$\eta_{cmax2}^* = 0.1704(t_s^*/A_s^*)^{-0.9394}(\cos\theta)^{1.3165} \quad (9)$$

式(9)的拟合度为0.9845,均方误差为 7×10^{-7} 。

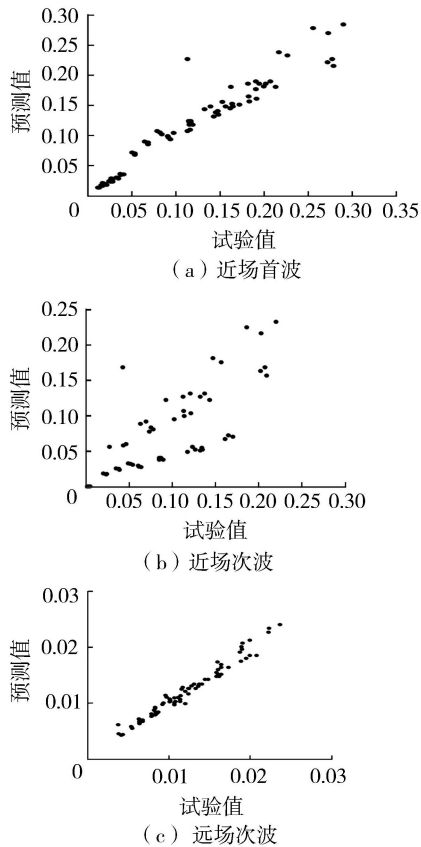


图10 近远场相对波峰高度试验值与预测值关系

3.4 周期

滑坡涌浪在近场水域的特点是频带宽,会出现明显色散。这里讨论的周期是指远场涌浪的最大波幅波浪的周期 T_∞ ,即远场起始点次波的周期。在远场,不同径向的波浪周期基本保持一致,根据模拟结果(图11)得到相对周期 T_∞^* ($T_\infty^* = T_\infty \sqrt{g/h}$)拟合公式:

$$T_\infty^* = 2.2647t_s^*^{-0.1093} \quad (10)$$

式(10)拟合度为0.85,均方误差为 7×10^{-6} 。

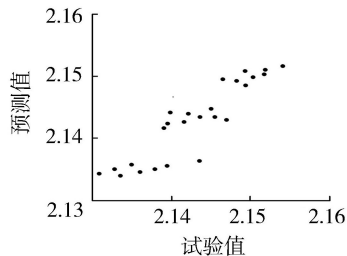


图11 远场次波相对周期试验值与预测值的关系

3.5 波形

远场涌浪的相对波长为

$$L^* = L/h = T\sqrt{gh}/h = T_\infty^* \quad (11)$$

根据式(9)(10)(11),推导出远场涌浪非线性

Ursell 数公式为

$$U_r = \left(\frac{L}{h}\right)^2 \frac{H}{h} = 0.7718 t^{*-1.0487} A^{*0.9394} (\cos\theta)^{1.3165} \quad (12)$$

式中波高 H 近似为波幅的 2 倍。27 组工况数值模拟试验得到的 Ursell 数如图 12 所示,不难发现,远场涌浪均属于线性波。

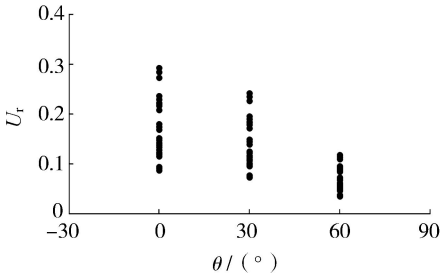


图 12 各径向远场涌浪的 Ursell 数

3.6 远场涌浪能量

计算远场涌浪能量对滑坡涌浪灾害的预测评估具有重要的影响。通过径距为 R 处的半圆断面的涌浪总势能 $E_p(R)$ 为

$$E_p(R) = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} R \int_0^\infty \frac{g}{2} \eta^2(t, R) \sqrt{gh} dt d\theta \quad (13)$$

根据线性波理论,远场涌浪的势能与动能相同,故通过远场断面($R=7h$)的涌浪总能量 $E_w=2E_p$,27 组工况的近远场分界面涌浪总能量见表 2。涌浪的总能量来自于滑块的能量,包括动能和势能,故定义能量传递率 ε 为远场涌浪能量与滑坡体能量的比值($\varepsilon=E_w/E_s$,其中 E_s 为滑坡体的能量)。计算结果表明,27 组工况的能量传递率在 8.0% ~ 19.7% 之间。能量传递率主要与波峰高度时程变化有关,根据数值模拟结果,拟合的能量传递率公式为

$$\varepsilon = 0.2951 (t^*/A^*)^{-0.5034} \quad (14)$$

式(14)的拟合度为 0.8601,均方误差为 2.08×10^{-4} 。能量传递率的试验值与预测值关系见图 13。

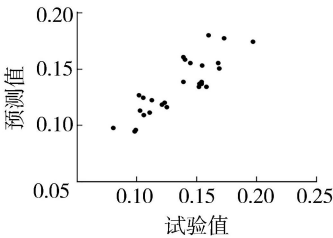


图 13 能量传递率的预测值与试验值的关系

4 结 论

a. 三维滑坡涌浪在不同径向上均出现衰减,但在 7 倍水深距离后保持稳定,该距离外的波峰高度基本与滑坡体弗劳德数、厚度以及宽度无关,故可认为冲击滑坡涌浪的近远场界线位于 7 倍水深处。

b. 相对滑坡特征时间是滑坡体弗劳德数、斜坡角度以及相对滑坡体尺寸的函数,决定了近远场最大波峰高度和远场次波周期的大小,也对远场次波的非线性特征有一定影响。

c. 定义了滑坡体的能量传递率,本文工况中能量传递率在 8.0% ~ 19.7% 之间。

参考文献:

[1] GENEVOIS R, GHIROTTI M. The 1963 Vaiont landslide [J]. Giornale di Geologia Applicata, 2005, 1(1): 41-52.

[2] 殷坤龙, 杜娟, 汪洋. 清江布垭库区大堰塘滑坡涌浪分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(12): 3267-3270. (YIN Kunlong, DU Juan, WANG Yang. Analysis of surge triggered by Dayantang landslide in Shuibuya Reservoir of Qingjiang River[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(12): 3267-3270. (in Chinese))

[3] HUANG B L, CHEN L D, PENG X M, et al. Assessment of the risk of rockfalls in Wu Gorge, Three Gorges, China [J]. Landslides, 2010, 7(1): 1-11.

[4] FRITZ H M, HAGER W H, MINOR H E. Landslide generated impulse waves: 1. instantaneous flow fields [J]. Experiments in Fluids, 2003, 35(6): 505-519.

[5] WALDER J S, WATTS P, SORENSEN O E, et al. Tsunamis generated by subaerial mass flows [J]. Journal of Geophysical Research, 2003, 108(B5): JB00070

[6] PANIZZO A, DE GIROLAMO P, PETACCIA A. Forecasting impulse waves generated by subaerial landslides [J]. Journal of Geophysical Research, 2005, 110(C12): C12025.

[7] PRINS J E. Characteristics of waves generated by a local disturbance [J]. Transaction, American Geophysical Union, 1958, 39(5): 865-874.

[8] NODA E. Water waves generated by landslides [J]. Journal of the Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division, 1970, 96(4): 835-855.

[9] GOZALI S, HUNT B. Water waves generated by close landslides [J]. Journal of Hydraulic Research, 1989, 27(1): 49-60.

[10] DI RISIO M, SAMMARCO P. Analytical modeling of landslide-generated waves [J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 2008, 134(1): 53-60.

[11] 韩林峰, 王平义. 基于动量平衡的三维滑坡涌浪最大近场波幅预测 [J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(11): 2584-2592. (HAN Linfeng, WANG Pingyi. Prediction of the maximum near-field wave amplitude of impulse waves generated by three-dimensional landslides based on momentum balance [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(11): 2584-2592. (in Chinese))

[12] 徐卫亚, 秦创创, 张贵科, 等. 基于分流比的复杂分汊河

- 道滑坡涌浪远场传播计算方法[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(3): 20-24. (XU Weiya, et al. Calculation method for far-field propagation of landslide surge based on flow diversion ratio of a bifurcated river[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(3): 20-24. (in Chinese))
- [13] WIEGEL R L. Laboratory studies of gravity waves generated by the movement of a submerged body[J]. Transactions, American Geophysical Union, 1955, 36(5): 759-774.
- [14] WATTS P. Tsunami features of solid block underwater landslides[J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 2000, 126(3): 144-152.
- [15] 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.
- [16] ATAIE-ASHTIANI B, NIK-KHAH A. Impulsive waves caused by subaerial landslides[J]. Environmental Fluid Mechanics, 2008, 8(3): 263-280.
- [17] HELLER V, HAGER W H. Wave types of landslide generated impulse waves[J]. Ocean Engineering, 2011, 38: 630-640.
- [18] TANG G Q, LU L, TENG Y F, et al. Impulse waves generated by subaerial landslides of combined block mass and granular material[J]. Coastal Engineering, 2018, 141: 68-85.
- [19] 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. (YIN Kunlong, LIU Yiliang, WANG Yang, et al. Physical model experiments of landslide-induced surge in Three Gorges Reservoir[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2012, 37(5): 1067-1074. (in Chinese))
- [20] HEINRICH P. Nonlinear water waves generated by submarine and aerial landslides[J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 1992, 118(3): 249-266.
- [21] JIANG L, LEBLOND P H. The coupling of a submarine slide and the surface waves which it generates[J]. Journal of Geophysical Research, 1992, 97(C8): 12731-12744.
- [22] SANDER J, HUTTER K. Evolution of weakly non-linear shallow water waves generated by a moving boundary[J]. Acta Mechanica, 1992, 91(3/4): 119-155.
- [23] VERRIERE M, LENOIR M. Computation of waves generated by submarine landslides[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 1992, 14(4): 403-421.
- [24] 徐卫亚, 胡业凡, 吴伟伟, 等. 基于云模型和 D-S 证据理论的多源信息融合滑坡安全性评价[J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2022, 50(1): 59-66. (XU Weiya, HU Yefan, WU Weiwei, et al. Landslide safety evaluation by multi-source information fusion based on cloud model and D-S evidence theory[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(1): 59-66. (in Chinese))
- [25] 司鹏飞, 田利勇. 基于流固耦合方法的滑坡涌浪数值模拟[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40(6): 28-32. (SI Pengfei, TIAN Liyong. Numerical simulation of landslide-induced impulse waves based on fluid-solid coupling method[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(6): 28-32. (in Chinese))
- [26] 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. (ZHAO Lanhao, HOU Shichao, MAO Jia. Review of numerical simulation of landslides and surges in reservoir districts[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36(2): 79-86. (in Chinese))
- [27] MAO J, ZHAO L H, LIU X N, et al. A three-phases model for the simulation of landslide-generated waves using the improved conservative level set method[J]. Computers & Fluids, 2017, 159: 243-253.
- [28] ROMANO A, LARA J, BARAJAS G, et al. Tsunamis generated by submerged landslides: numerical analysis of the near-field wave characteristics[J]. Journal of Geophysical Research: Ocean, 2020, 125(7): e2020JC016157.
- [29] SERRANO-PACHECO A, MURILLO J, GARCIA-NAVARRO P. A finite volume method for the simulation of the waves generated by landslides[J]. Journal of Hydrology, 2009, 373(3/4): 273-289.
- [30] BOSA S, PETTI M. Shallow water numerical model of the wave generated by the Vajont landslide[J]. Environmental Modelling & Software, 2011, 26(4): 406-418.
- [31] ATAIE-ASHTIANI B, YAVARI-RAMSHE S. Numerical simulation of wave generated by landslide incidents in dam reservoirs[J]. Landslides, 2011, 8(4): 417-432.
- [32] HUANG B L, WANG S C, ZHAO Y B. Impulse waves in reservoirs generated by landslides into shallow water[J]. Coastal Engineering, 2017, 123: 52-61.
- [33] GRILLI S T, WATTS P. Tsunami generation by submarine mass failure: I. modeling, experimental validation, and sensitivity analyses[J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 2005, 131(6): 283-297.
- [34] WATTS P, GRILLI S T, TAPPIN D R, et al. Tsunami generation by submarine mass failure: II. predictive equations and case studies[J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 2005, 131(6): 298-310.
- [35] LIU P L F, WU T R, RAICHLEN F, et al. Runup and rundown generated by three-dimensional sliding mass[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2005, 536: 107-14.

(收稿日期: 2022-03-01 编辑: 熊水斌)