

V 形河谷滑坡最大冲击波面高度估计

孔增增^{1,2}, 翟建国³, 黄筱云^{1,2}, 刘 灿^{1,2}, 程永舟^{1,2}

(1. 长沙理工大学水利工程学院, 湖南 长沙 410004; 2. 水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410004;
3. 中交武汉港湾工程设计研究院有限公司, 湖北 武汉 430040)

摘要:提出一种计算 V 形河谷滑坡冲击波浪最大波面高度的经验公式。运用 Flow-3D 软件建立 V 形河谷滑坡冲击波浪传播的数值模型,开展 96 种工况的数值模拟试验,分析滑坡体的入水速度、入水体积、水下滑行时长以及滑坡角度和对岸爬坡角度对最大波浪高度的影响,并回归分析获得最大波面高度的拟合公式。新公式用于估计龚家坊滑坡产生的最大冲击波面高度,计算结果与物理模型试验值吻合。

关键词:V 形河谷;最大冲击波面高度;经验公式;Flow-3D

中图分类号:TV139.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2018)03-0015-07

Estimation of maximum water elevation of impact wave by landslide in a V-shaped river valley//KONG Zengzeng^{1,2}, ZHAI Jianguo³, HUANG Xiaoyun^{1,2}, LIU Can^{1,2}, CHEN Yongzhou^{1,2}(1. School of Hydraulic Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410004, China; 2. Key Laboratory of Water & Sediment Science and Water Hazard Prevention of Hunan Province, Changsha 410004, China; 3. CCCC Wuhan Harbor Engineering Design and Research Co., Ltd., Wuhan 430040)

Abstract: An empirical estimation formula for the maximum water elevation of the impact wave generated by the landslide in a V-shaped river valley is presented. Using the Flow-3D software, a numerical model of the impact wave resulting from the landslide in a V-shaped river valley was established and numerical experiments under 96 conditions were carried out. Effects of the inserting velocity of landslide into water, landslide volume, time of underwater sliding, inserting angle and climbing angle on the maximum water elevation were analyzed respectively. The fitting formula of the maximum water elevation was obtained by regression analysis. The new formula was used to evaluate the maximum water elevation for the Gongjiafang landslide event, and it is shown that the calculated result is very close to the value of the physical experiment.

Key words: V-shaped river valley; maximum water elevation of impact wave; empirical formula; Flow-3D

库岸或河岸滑坡引起的冲击波浪会造成严重的人员和财产损失,其中,最大波浪高度决定着灾害程度,因此,准确估算最大波浪高度将对灾害预警具有重要意义。目前,最大波浪高度的经验估算^[1]只考虑入水速度和水深,如潘家铮公式,或入水速度和入水体积对波浪高度的影响,如水科院经验公式。除了考虑入水速度、水深和入水体积外,河道地形条件也是影响滑坡涌浪高度的重要因素^[2]。例如,任兴伟等^[3]在潘家铮算法的基础上,考虑滑坡角度的影响,改进了初始涌浪高度计算公式,获得与实际调查值更接近的结果;许文杰等^[4]在分析滑坡涌浪影响因素时,发现涌浪高度随水面宽度减小而增加;石传奇等^[5]通过数值模拟发现,在 V 形河谷中,地形对涌

浪形成影响显著。事实上,在 V 形河谷中,由于河面较窄,涌浪还未形成即发生波浪变形,故其冲击波浪的最大波面高度应与滑坡涌浪最大高度有所不同。

由于滑坡涌浪产生的过程非常复杂,涌浪高度的预测,除了理论分析法外,还可通过物理试验和数值模拟来获得^[6]。在物理试验研究方面,Walder 等^[7]通过因次分析认为涌浪高度等特征的影响因素为无量纲滑坡体体积、无量纲入水时长和无量纲的垂向冲击速度;Fritz 等^[8]通过对试验数据的多元回归分析,建立了最大涌浪高度与弗汝德数、滑坡体相对体积以及滑坡体相对厚度的关系;Panizzo 等^[9]所提出的最大涌浪高度拟合公式,包含了滑坡体尺寸、水深以及滑坡角度等诸多因素;Ataie-Ashtiani

等^[10]通过 120 组次的试验认为最大涌浪高度主要受滑坡角度、入水速度和滑坡体厚度的影响,并指出最大涌浪高度受滑坡体形状影响较小;Heller 等^[11]定义了一个冲击效果参数(包含弗汝德数、相对厚度和相对质量),并通过试验确定了最大相对涌浪高度与该参数的关系;Huang 等^[12]在关于三峡库区滑坡涌浪高度的物理模型试验中,所考虑的参数主要包括滑坡体尺寸、入水速度、水深和滑坡角度等;Wang 等^[13]则提出复杂地形库区滑坡涌浪最大涌浪高度的经验公式。除了采用物理模型试验的方式外,一些学者亦通过数值模拟开展滑坡涌浪研究。在目前主流的滑坡涌浪数值模型^[14-19]中,应用最广泛的是浅水方程模型。不过,因滑坡涌浪具有较强的色散性,且存在较大的垂向加速度,浅水方程的假设并不适用^[16],而基于 N-S 方程的自由表面流模型被认为能更好地捕捉滑坡涌浪的特征^[13]。除了采用自编^[15]或开源代码^[20-21]外,滑坡涌浪数值模拟研究亦可采用 FLUENT 等商用软件^[22-24]。

本文将运用 Flow-3D 数值计算软件,建立 V 形河谷滑坡冲击波浪的概化模型,模拟滑坡体入水后波浪的产生与传播过程,分析滑坡体的入水速度、入水体积、水下滑行时长以及河谷滑坡角度和对岸爬坡角度等因素对冲击波浪最大高度的影响,进一步建立 V 形河谷滑坡冲击波浪最大波面高度估计的经验公式,并通过龚家坊滑坡实例对其进行验证。

1 V 形河谷冲击波浪数值模拟

1.1 数值模型配置

Flow-3D 是基于求解不可压缩黏性流体 N-S 方程的计算流体软件,其独特的 TruVOF 方法能够精确计算动态自由表面的拓扑变化,而独有的 FAVOR 技术能够在矩形网格下高效且准确地定义复杂的几何外形,另外,所包含的 GMO 模型能够模拟刚体在流体内的运动,同时,也能很好地处理刚体间的碰撞。本文基于 Flow-3D 计算软件建立的滑坡冲击波浪数值模型,将选用 RNG $k-\epsilon$ 模型描述水体动力特征,滑坡体则看作为刚体,滑坡体与河谷岸壁间的摩擦系数和碰撞系数分别取为 0.5 和 0.55。

为了验证数值模型配置的有效性,本文以 Heinrich^[25]的物理模型试验结果作为基础数据。在文献[25]中,水槽宽度为 0.55 m,深度为 1 m,斜坡的坡度为 45°,岸坡的角度为 15°,初始水深为 0.4 m。滑块选用截面为 0.5 m×0.5 m 的等腰直角三角形的三棱柱(图 1),其密度为 2 650 kg/m³。不同时刻数值模拟结果与物理模型试验结果的对比如图 2 所示,可以看出,本文的数值模拟结果与文献[25]

中的结果吻合较好,在 1.5 s 时,计算值稍微大于试验值,一方面是由于数值模拟中水槽侧壁设置为对称边界,消除了边壁影响;另一方面数值模型底部边界设为光滑边界,减少了因底部摩擦造成的能量损失。

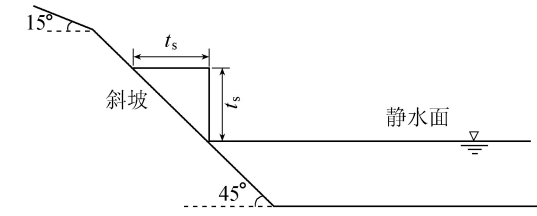


图 1 滑块体沿斜坡下滑试验^[25]

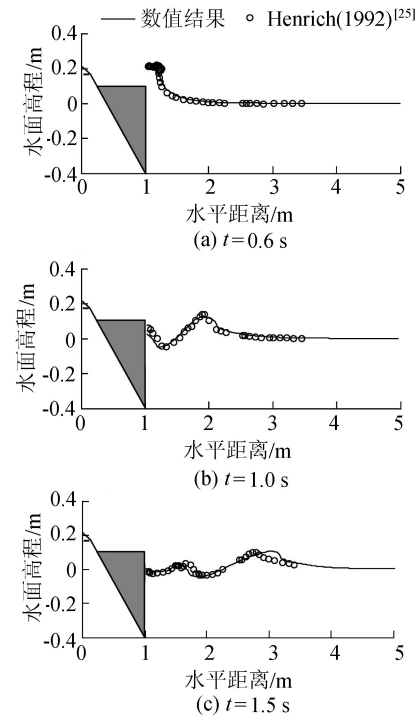


图 2 不同时刻数值模拟与试验结果的对比

1.2 V 形河谷滑坡冲击波浪模型

所建立的 V 形河道冲击波浪模型如图 3 所示,

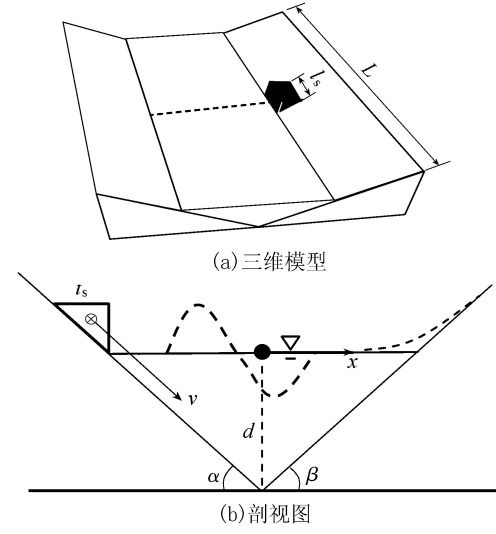


图 3 V 形河谷模型

其中: L 为河道长度,取100 m; d 为河道最大水深; v 为初始下滑速度; α 和 β 分别是河谷两侧斜坡角度和爬坡角度。文献[10]表明滑块形状对涌浪最大高度影响不大,所以滑坡体仍采用断面为等腰直角三角形的三棱柱代替,其长度为 l_s ,厚度为 t_s ,而体积为 V_s ,密度取为2650 kg/m³。坡面摩擦系数 f 取为零,碰撞系数为0.5。试验中,滑坡体长度 l_s 保持20 m不变。

与宽阔河道不同,V形河谷滑坡冲击浪沿断面传播会受到地形的影响,甚至在波浪生成时即发生浅水变形。图4为V形河谷断面不同位置最大波面高度与宽阔河道情况的比较,其中,最大水深 d 达8 m,滑坡体截面尺寸 t_s 为8 m,V形河谷和宽阔河道的 α 值均取30°,V形河谷的 β 值仍取30°,而宽阔河道的 β 值则为0°。可以看出,在五个测点位置上,V形河谷的最大波浪高度值均大于宽阔河道的情况。

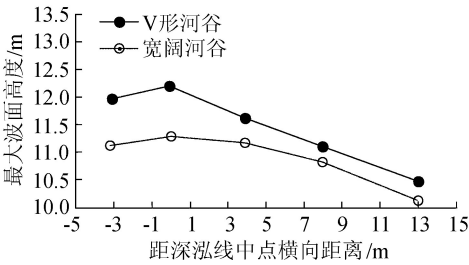


图4 V形河谷与宽阔河谷断面相同位置最大波面高度的比较

1.3 数值模拟试验

按照文献[9]中所述,滑坡涌浪任一特征变量都可以表示成以下多个物理参数的函数。

$A=f(l,w,h,d,v,\alpha,\gamma,p,\rho_s,\rho_w,\mu,g,r,\theta,t)$ (1)
式中: l 、 w 和 h 分别为滑坡体的长、宽和高; d 为水深; v 为滑坡体冲击水面时的速度; α 为斜坡角度; γ 为滑坡体前沿与斜坡的夹角; p 为滑坡体的孔隙率; ρ_s 和 ρ_w 分别为滑坡体和水体的密度; μ 为水体黏滞系数; g 为重力加速度; r 和 θ 为极坐标; t 为滑坡体水下滑行时间。

由于所研究的对象为河谷断面上最大波面高度 $\eta_{\max}$,故不考虑 r 和 θ 。由于不考虑滑坡体形状的影响,几何参数 l 、 w 和 h 用体积 V_s 代替,而 γ 将被忽略。同时,按照文献[9]设置,孔隙率 p 和黏滞系数 μ 的值均取零, g 取9.81 m/s²。于是, $\eta_{\max}$ 的表达式为^[26]

$$\eta_{\max}=f(V_s,d,v,\alpha,\beta,g,t) \tag{2}$$

式中 β 为爬坡角度。通过因次分析,无量纲最大冲击波面高度 η^* 可表示为^[27]

$$\eta^*=\frac{\eta_{\max}}{d}=f\left(\frac{V_s}{d^3},\frac{v}{\sqrt{gd}},\sin\alpha,\sin\beta,t\sqrt{\frac{g}{d}}\right) \tag{3}$$

上式中,参数 α 和 β 采用正弦函数的形式是因为引起滑坡体运动的重力加速度分量为 $g\sin\alpha$ 和 $g\sin\beta$ 。

表1给出了96组数值模拟试验所采用的参数。其中,1~18组为3种水深下体积为 $V_s=640\text{ m}^3$ 的滑坡体以5种不同的冲击速度入水,19~33组为滑坡体从5种不同斜坡角度的滑坡下滑所产生的最大波面高度,34~48组给出不同爬坡角度下的最大波面高度,49~66组数据为不同滑坡体体积所产生的最大波面高度,67~81组数据为测试不同水深对最大波面高度影响,82~96组则是评估最大波面高度与水下滑行时间的关系。需要说明的是,滑块体水下滑行时间是测量结果,无法预先设置其值,为评估其对 η^* 的影响,82~96组试验将通过改变坡面摩擦系数,获得不同 t 值。试验开始前,采用不同网格分辨率对同一种工况进行重复计算以减少网格分辨率造成的计算误差^[28],最终确定网格分别为0.35 m×0.35 m×0.35 m。

2 最大冲击波浪高度的影响因素分析

2.1 入水速度

图5则给出了无量纲波面高度 η^* 随滑坡体无量纲入水冲击速度 $v/\sqrt{gd}$ 的变化趋势,可以看出,当无量纲速度增加,波面高度 η^* 有所增长。同时考虑到当入水冲击速度为零时, η^* 亦等于零,故假定无量纲波浪高度 η^* 的与无量纲入水冲击速度 $v/\sqrt{gd}$ 的关系为

$$\eta^*=\frac{\eta_{\max}}{d}=1/[a_1+b_1(v/\sqrt{gd})^{-0.28}] \tag{4}$$

式中参数 a_1 和 b_1 与斜坡角度 α 、爬坡角度 β 、无量纲滑坡体体积 $V^*=V_s/d^3$ 和无量纲滑行时间 $t^*=t\sqrt{g/d}$ 相关。所拟合的曲线如图5所示,而曲线拟合参数如表2所示,其中 R 为相关系数, R_{MSE} 为均方根误差。

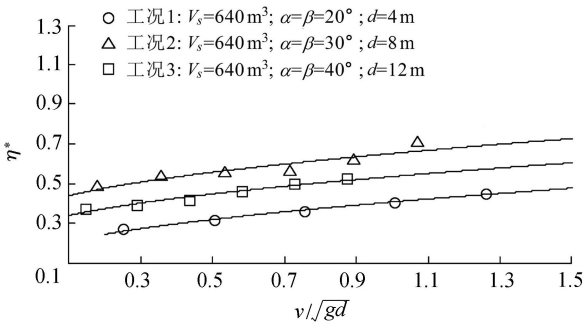


图5 η^* 实测值与 $v/\sqrt{gd}$ 拟合曲线的比较

表 1 不同试验组次的参数设定与测量结果

组次	d/m	V_s/m^3	$\alpha/(\text{^\circ})$	$\beta/(\text{^\circ})$	$v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$\eta_{\text{max}}/\text{m}$	t_s/s	组次	d/m	V_s/m^3	$\alpha/(\text{^\circ})$	$\beta/(\text{^\circ})$	$v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$\eta_{\text{max}}/\text{m}$	t_s/s
1	4	640	20	20	1.58	3.24	2.63	49	4	160	20	20	1.58	2.11	3.56
2	4	640	20	20	3.16	3.74	2.20	50	4	360	20	20	1.58	2.68	2.85
3	4	640	20	20	4.74	4.31	1.79	51	4	640	20	20	1.58	3.24	2.63
4	4	640	20	20	6.32	4.79	1.49	52	4	1000	20	20	1.58	3.51	2.54
5	4	640	20	20	7.91	5.34	1.29	53	4	1440	20	20	1.58	3.76	2.53
6	4	640	20	20	9.49	5.87	1.14	54	4	1960	20	20	1.58	3.93	2.53
7	8	640	30	30	1.58	3.86	2.64	55	8	160	30	30	3.16	2.36	3.09
8	8	640	30	30	3.16	4.26	2.32	56	8	360	30	30	3.16	3.82	2.51
9	8	640	30	30	4.74	4.43	1.96	57	8	640	30	30	3.16	4.26	2.32
10	8	640	30	30	6.32	4.47	1.73	58	8	1000	30	30	3.16	5.02	2.22
11	8	640	30	30	7.91	4.96	1.53	59	8	1440	30	30	3.16	5.36	2.20
12	8	640	30	30	9.49	5.64	1.36	60	8	1960	30	30	3.16	5.73	2.19
13	12	640	40	40	1.58	4.45	2.75	61	12	160	40	40	6.32	3.13	2.61
14	12	640	40	40	3.16	4.69	2.41	62	12	360	40	40	6.32	4.17	2.12
15	12	640	40	40	4.74	5.00	2.16	63	12	640	40	40	6.32	5.47	2.02
16	12	640	40	40	6.32	5.47	2.02	64	12	1000	40	40	6.32	6.56	1.94
17	12	640	40	40	7.91	5.98	1.86	65	12	1440	40	40	6.32	7.27	1.84
18	12	640	40	40	9.49	6.30	1.76	66	12	1960	40	40	6.32	7.63	1.77
19	4	640	20	20	1.58	3.24	2.85	67	4	640	20	20	1.58	3.24	2.63
20	4	640	25	20	1.58	3.10	2.32	68	6	640	20	20	1.58	3.51	3.51
21	4	640	30	20	1.58	3.20	1.92	69	8	640	20	20	1.58	3.58	4.33
22	4	640	35	20	1.58	3.28	1.55	70	10	640	20	20	1.58	3.36	5.04
23	4	640	40	20	1.58	3.12	1.30	71	12	640	20	20	1.58	3.58	5.83
24	8	640	20	30	3.16	4.02	3.54	72	4	640	30	30	3.16	3.05	1.42
25	8	640	25	30	3.16	4.20	2.84	73	6	640	30	30	3.16	3.79	1.87
26	8	640	30	30	3.16	4.26	2.32	74	8	640	30	30	3.16	4.26	2.32
27	8	640	35	30	3.16	4.35	2.20	75	10	640	30	30	3.16	3.85	2.73
28	8	640	40	30	3.16	4.41	2.08	76	12	640	30	30	3.16	3.55	3.26
29	12	640	20	40	6.32	4.80	4.28	77	4	640	40	40	6.32	3.61	0.84
30	12	640	25	40	6.32	4.72	3.31	78	6	640	40	40	6.32	4.85	1.13
31	12	640	30	40	6.32	4.66	2.57	79	8	640	40	40	6.32	5.58	1.37
32	12	640	35	40	6.32	4.92	2.21	80	10	640	40	40	6.32	5.52	1.71
33	12	640	40	40	6.32	5.47	2.02	81	12	640	40	40	6.32	5.47	2.02
34	4	640	20	20	1.58	3.24	2.63	82	4	640	20	20	1.58	3.24	2.63
35	4	640	20	30	1.58	3.27	2.63	83	4	640	20	20	1.58	3.02	2.93
36	4	640	20	40	1.58	3.30	2.63	84	4	640	20	20	1.58	2.78	3.17
37	4	640	20	50	1.58	3.37	2.63	85	4	640	20	20	1.58	2.26	3.88
38	4	640	20	60	1.58	3.21	2.63	86	4	640	20	20	1.58	1.99	4.44
39	8	640	30	20	3.16	4.20	2.32	87	8	640	30	30	3.16	4.26	2.32
40	8	640	30	30	3.16	4.26	2.32	88	8	640	30	30	3.16	4.23	2.38
41	8	640	30	40	3.16	4.27	2.32	89	8	640	30	30	3.16	4.14	2.47
42	8	640	30	50	3.16	4.30	2.32	90	8	640	30	30	3.16	4.05	2.52
43	8	640	30	60	3.16	4.20	3.32	91	8	640	30	30	3.16	3.93	2.60
44	12	640	40	20	6.32	4.89	2.02	92	12	640	40	40	6.32	5.47	2.02
45	12	640	40	30	6.32	4.92	2.02	93	12	640	40	40	6.32	5.45	2.05
46	12	640	40	40	6.32	5.47	2.02	94	12	640	40	40	6.32	5.41	2.10
47	12	640	40	50	6.32	5.49	2.02	95	12	640	40	40	6.32	5.33	2.14
48	12	640	40	60	6.32	5.49	2.02	96	12	640	40	40	6.32	5.31	2.19

表 2 η^* 与 $v/\sqrt{gd}$ 的拟合分析

工况	a_1	b_1	R	R_{MSE}
1	-0.495	2.980	0.978	0.012
2	0.936	0.713	0.892	0.019
3	0.784	1.195	0.875	0.021

2.2 滑坡角度

滑坡角度决定了滑块体的加速度大小,从而影响到滑块水下滑行的时间。图 6 给出了无量纲波面高度 η^* 随滑坡角度 α 的变化趋势,容易看出,滑坡

越陡,最大相对冲击波浪高度越大,几乎呈线性增长,但增长的幅度很小。故 η^* 与 α 之间的关系为

$$\eta^* = a_2 \sin \alpha + b_2 \tag{5}$$

式中参数 a_2 和 b_2 与爬坡角度 β 、无量纲入水冲击速度 $v/\sqrt{gd}$ 、无量纲体积 V^* 和无量纲滑行时间 t^* 有关。表 3 给出了拟合曲线的参数值,虽然在工况 1 到工况 3 下相关系数较小,但考虑到滑坡角度 α 对最大相对涌浪高度的影响较小,故仍可用公式(5)描述两者关系。

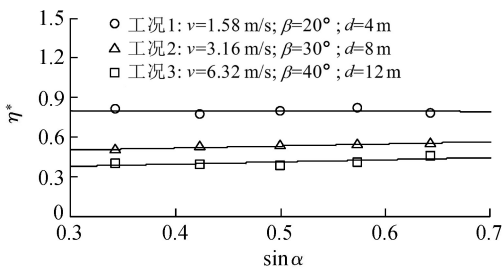


图6 η^* 实测值与滑坡角度 $\sin\alpha$ 拟合值的比较

表3 η^* 与 $\sin\alpha$ 的拟合分析

工况	a_2	b_2	R	R_{MSE}
1	-0.014	0.804	0.010	0.018
2	0.131	0.462	0.939	0.006
3	0.141	0.333	0.562	0.013

2.3 爬坡角度

当爬坡角度等于零时,V形河道滑坡涌浪退化成常规滑坡涌浪,而爬坡角度增大意味着河道宽度变窄。从图7可以看出,爬坡角度 β 对无量纲波面高度 η^* 的影响与滑坡角度 α 类似,其关系亦可写成如下形式:

$$\eta^* = a_3 \sin\beta + b_3 \quad (6)$$

式中参数 a_3 和 b_3 与其他无量纲参数相关。获得的拟合曲线见图7,其相应的拟合参数见表4。

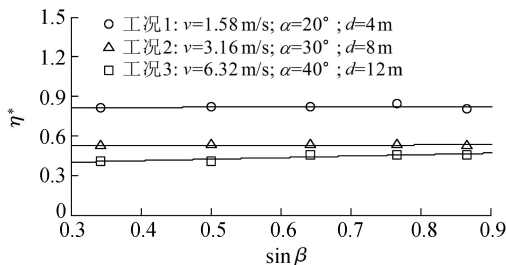


图7 η^* 实测值与滑坡角度 $\sin\beta$ 拟合值的比较

表4 η^* 与 $\sin\beta$ 的拟合分析

工况	a_3	b_3	R	R_{MSE}
1	0.012	0.811	0.029	0.027
2	0.005	0.527	0.049	0.014
3	0.114	0.366	0.815	0.031

2.4 滑坡体体积

当滑坡体无量纲体积 V^* 较小时,即滑坡体全部入水, η^* 随 V^* 逐渐增大,而体积大于某一值后,即滑坡体垂直厚度超出最大水深后, η^* 趋于恒定。此外,当 V^* 趋近于零时, η^* 也接近零。根据 η^* 的变化趋势,进一步假定 η^* 的计算公式有如下形式:

$$\eta^* = \frac{(V^*)^{0.45}}{a_4(V^*)^{0.45} + b_4} = \frac{\left(\frac{V_s}{d^3}\right)^{0.45}}{a_4\left(\frac{V_s}{d^3}\right)^{0.45} + b_4} \quad (7)$$

式中参数 a_4 和 b_4 是滑坡角度、爬坡角度、无量纲入水冲击速度和滑行时间的函数。曲线拟合的结果见

图8,表5给出了相应的参数值。

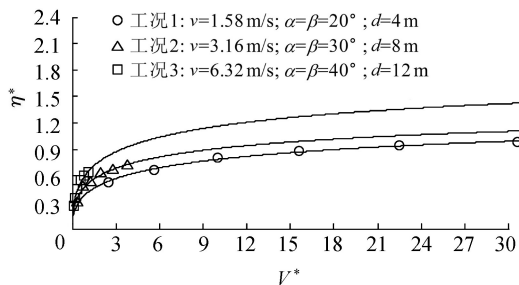


图8 η^* 实测值与 V^* 拟合值的比较

表5 η^* 与 V^* 的拟合分析

工况	a_4	b_4	R	R_{MSE}
1	0.594	1.906	0.993	0.016
2	0.600	1.409	0.965	0.029
3	0.460	1.127	0.988	0.018

2.5 滑行时间与最大冲击波面高度的关系

为分析滑行时间与最大冲击波面高度的关系,选取5种不同坡面摩擦系数,其值分别为0、0.05、0.10、0.15和0.20,相对应的滑行时间见表1。表6给出了图9中拟合曲线的参数值。从图9可以看出,无量纲时间 t^* 愈长, η^* 愈小。同时,可以预见,当 t^* 趋近于无穷大时, η^* 应趋近于零。因此,假定两者之间存在如下关系。

$$\eta^* = a_5(t^*)^{-0.65} = a_5(t\sqrt{g/d})^{-0.65} \quad (8)$$

式中参数 a_5 与滑坡角度、爬坡角度、滑坡体体积和滑行速度有关。

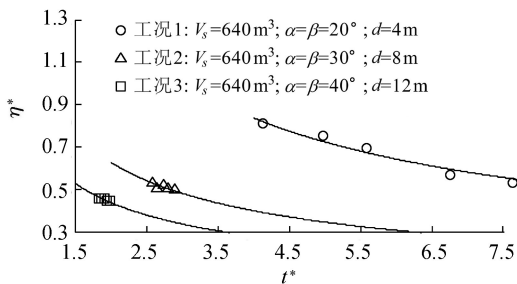


图9 η^* 实测值与 t^* 拟合值的比较

表6 η^* 与 t^* 的拟合分析

工况	a_5	R	R_{MSE}
1	2.059	0.957	0.025
2	0.980	0.531	0.011
3	0.638	0.833	0.052

2.6 最大冲击波浪高度的公式拟合

根据以上分析,假定最大相对冲击波浪高度具有如下形式:

$$\eta^* = \frac{(a' \sin\alpha + b' \sin\beta + c'(t^*)^{-0.65} + d')}{\left(a''\left(\frac{V}{d^3}\right)^{-0.45} + b''\right) \left(c''\left(\frac{v}{\sqrt{gd}}\right)^{-0.28} + d''\right)} \quad (9)$$

式中系数 a' 、 b' 、 c' 、 d' 、 a'' 、 b'' 、 c'' 和 d'' 皆为常数。通过多元回归分析,所确定最终的表达式为

$$\eta^* = \frac{[-2.266\sin\alpha + 0.013\sin\beta + 2.557(t^*)^{-0.65} + 1.692]}{\left[0.71\left(\frac{V}{d^3}\right)^{-0.45} + 1.227\right]\left[1.217\left(\frac{v}{\sqrt{gd}}\right)^{-0.28} + 0.841\right]} \quad (10)$$

回归预测值与试验值的比较结果见图 10。

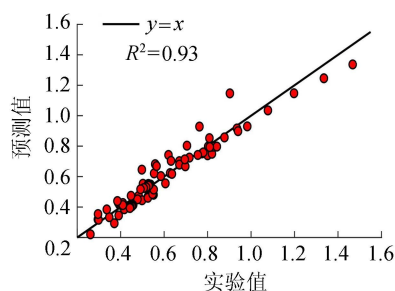


图 10 预测值与试验值对比

3 实例分析

本节将通过龚家坊滑坡实际案例,讨论上述最大冲击波浪高度计算公式的可靠性。龚家坊滑坡坐落于重庆市巫山县巫峡镇龙江村,附近斜坡区在巫山境内呈 V 形谷,水下地形也表现出 V 形峡谷特征,于 2008 年 11 月 23 日 4:40 发生崩塌。通过野外调查及影像资料分析显示,该滑坡发生时,此区域掀起了约为 31.8 m 的浪高,13.1 m 的爬高。调查结果^[27]表明,龚家坊滑坡附近河道最深水深为 140 m,滑坡总体积约为 38 万 m³,平均滑坡角度为 54°,对岸爬坡角度大致为 45°,入水初速度为 11.65 m/s,滑坡体水下运动时间大约为 15.3 s。黄波林等^[20,29]分别利用数值模拟及物理试验得出此处最大浪高值分别为 19.6 m 和 17.4 m。

根据以上数据,采用潘家铮水平公式、潘家铮垂直公式、水科院公式、Fritz 公式及本文公式对库区龚家坊滑坡最大冲击波浪高度进行估计,其结果分别为:20.95 m,17.92 m,3.54 m,6.58 m,17.69 m。可以看出,本文提出的公式与潘家铮垂直公式、黄波林物理试验结果接近,但水科院公式、Fritz 公式的计算结果与其相差较大。这是因为水科院公式是基于不同类型下实际工程数据拟合而成,不适用于狭窄河道水库库容较小情况;Fritz 公式是根据散粒体滑坡得到最大首浪高度公式,一般来说,其值要低于刚体入水首浪高度^[30]。

4 结 论

a. 在 V 形河道中,冲击波浪的产生和发展受到对岸地形的影响,河道断面沿程最大波面高度均大于宽阔梯形河道断面的情况。

b. V 形河道滑坡冲击波浪的最大波面高度主要受滑坡体下滑速度、滑坡体体积以及水下滑行时

间的影响较大,而滑坡角度和爬坡角度对其影响较小。

c. 水科院公式、Fritz 公式的计算值远小于 V 形河道的最大冲击波面高度值,而根据本文提出的估计公式得到最大波浪高度更接近实测值。

参考文献:

- [1] 黄锦林,张婷,李嘉琳. 库岸滑坡涌浪经验估算方法对比分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(增刊 1): 133-140. (HUANG Jinlin, ZHANG Ting, LI Jialin. Comparative analysis of empirical estimate methods of reservoir bank landslide surge [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(Sup1): 133-140. (in Chinese))
- [2] 陈里,喻涛,王平义,等. 库区滑坡涌浪试验研究综述[J]. 人民长江, 2015, 46(7): 84-87. (CHEN Li, YU Tao, WANG Pingyi, et al. Summary of experimental study on landslide induced surge in reservoir area [J]. Yangtze River, 2015, 46(7): 84-87. (in Chinese))
- [3] 任兴伟,唐益群,代云霞,等. 滑坡初始涌浪高度计算方法的改进及其应用[J]. 水利学报, 2009, 40(9): 1116-1119. (REN Xingwei, TANG Yiqun, DAI Yunxia, et al. Improved method for calculating landslide initial surge height. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(9): 1116-1119. (in Chinese))
- [4] 徐文杰. 滑坡涌浪影响因素研究[J]. 工程地质学报, 2012, 20(4): 491-507. (XU Wenjie. Numerical study on factors influencing reservoir surge by landslide [J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20(4): 491-507. (in Chinese))
- [5] 石传奇,安翼,杨家修. 滑坡涌浪的三维 SPH 方法模拟及其工程应用[J]. 中国科学(物理学 力学 天文学), 2015, 45(10): 57-65. (SHI Chuanqi, AN Yi, YANG Jiaxiu. A SPH based numerical method of landslide induced impulse and its application on Huangtian landslide event [J]. Scientia Sinica (Physica, Mechanica&Astronomica), 2015, 45(10): 57-65. (in Chinese))
- [6] 马鑫磊,任光明,夏敏. 滑坡涌浪预测评价方法综述[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(3): 89-98. (MA Xinlei, REN Guangming, XIA min. Review on the forecast evaluation methods of landslide surge [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(3): 89-98. (in Chinese))
- [7] WALDER J S, WATTS P, SORESENSEN O E, et al. Tsunamis generated by subaerial mass flows [J]. Journal of Geophysical Research, 2003, 108(B5): 2236-2255.
- [8] 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.
- [9] PANIZZO A, GIROLAMO P D, PETACCIA A.

- Forecasting impulse waves generated by subaerial landslides[J]. Journal of Geophysical Research, 2005, 110(C12):1-23.
- [10] ATAIE-ASHTIANI B, NIK-KHAH A. Impulsive waves caused by subaerial landslides[J]. Environmental Fluid Mechanics, 2008, 8(3): 263-280.
- [11] HELLER V, HAGER W H. Impulse product parameter in landslide generated impulse waves [J]. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 2010, 136(3): 145-155.
- [12] HUANG B L, YIN Y P, CHEN X T, 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.
- [13] WANG W, CHEN G Q, YIN K L, et al. Modeling of landslide generated impulsive waves considering complex topography in reservoir area [J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(5):1-15.
- [14] GEIST E L, LYNETT P J, CHAYTOR J D. Hydrodynamic modeling of tsunamis from the Currituck Landslide[J]. Marine Geology, 2008, 264(1): 41-52.
- [15] ATAIE-ASHTIANI B, YAVARI-RAMSHE S. Numerical simulation of wave generated by landslide incidents in dam reservoirs[J]. Landslides, 2011, 8(4): 417-432.
- [16] VIROULET S, CÉBRON D, KIMMOUN O, et al. Shallow water waves generated by subaerial solid landslides [J]. Geophysics Journal International, 2013, 193(2): 747-762.
- [17] 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.
- [18] ZHAO L H, MAO J, BAI X, et al. Finite element simulation of impulse wave generated by landslides using a three-phase model and the conservative level set method [J]. Landslides, 2016, 13(1): 85-96.
- [19] HORRILLO J, WOOD A, KIM G B, et al. A simplified 3-D Navier-Stokes numerical model for landslide-tsunami: application to the Gulf of Mexico [J]. Journal of Geophysics Research Oceans, 2013, 118(12): 6934-6950.
- [20] 黄波林,殷跃平,刘广宁,等. 三峡库区龚家方崩滑体涌浪物理原型试验与数值模拟对比研究[J]. 岩土力学与工程学报,2014,33(增刊1):2077-2084. (HUANG Bolin, YIN Yueping, LIU Guangning, et al. Comparison study of physical prototype model test and numerical simulation of Gongjiafang Landslide in Three Gorges Reservoir[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33 (Supl): 2077-2084. (in Chinese))
- [21] 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): 212-224. (WANG Shichang, HANG Bolin, LIU Guangning, et al. Numerical simulation of tsunami due to slope failure at Gongjiafang on Three Gorges reservoir[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(1): 212-224. (in Chinese))
- [22] 邱昕,邢爱国,王国章. 基于 FLUENT 数值模拟的滑坡涌浪分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2013, 24(3): 26-31. (QIU Xin, XING Aiguo, WANG Guozhang. Numerical simulation analysis of water waves due to landslide based on FLUENT[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2013, 24(3): 26-31. (in Chinese))
- [23] 马斌,张涛,李浩韡. 雅砻江流域滑坡涌浪对库区的影响[J]. 水利水运工程学报,2016(5):47-53. (MA Bin, ZHANG Tao, LI Haowei. Impacts of landslide-generated waves of Yalong River Basin on reservoir area [J]. Hydro-Science and Engineering, 2016(5):47-53. (in Chinese))
- [24] 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))
- [25] HEINRICH P. Nonlinear water waves generated by submarine and aerial landslides[J]. Journal of Waterway Port Coastal & Ocean Engineering, 1992, 118(3): 249-266.
- [26] 柳杨,马飞,吴建华. 窄缝坎的冲击波及水舌入水宽度的计算[J]. 水利水电科技进展,2014,34(3):20-23. (LIU Yang, MA Fei, WU Jianhua. Shock waves and jet width of slit-type flip bucket [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2014, 34(3):20-23. (in Chinese))
- [27] 任坤杰,韩继斌,陆虹. 滑坡涌浪首浪高度试验研究 [J]. 人民长江,2012,43(2):43,45-61. (REN Kunjie, HAN Jibin, LU Hong. Experimental research on primary wave height generated by solid-type landslide [J]. Yangtze River,2012,43(2):43,45-61. (in Chinese))
- [28] 崔贞,王珊,傅宗甫,等. 不同网格尺度对浮体水动力学性能的影响[J]. 水电能源科学,2016,34(12): 101-105. (CUI Zhen, WANG Shan, FU Zongfu, et al. Influence of mesh scale on hydrodynamic characteristics of floating body [J]. Water Resources and Power, 2016, 34(12):101-105. (in Chinese))
- [29] 黄波林. 水库滑坡涌浪灾害水波动力学分析方法研究 [D]. 武汉:中国地质大学,2014.
- [30] 张哲瀚. 滑坡体冲击作用下的波浪生成及其传播特性 [D]. 大连:大连理工大学,2016.

(收稿日期:2017-06-20 编辑:郑孝宇)