

文章编号:0559-9350(2009)09-1116-04

## 滑坡初始涌浪高度计算方法的改进及其应用

任兴伟<sup>1,3</sup>, 唐益群<sup>1,3</sup>, 代云霞<sup>2</sup>, 方瑜<sup>4</sup>

(1. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 中国地质大学(武汉) 工程学院, 湖北 武汉 430074;

3. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 4. 湖北国土资源职业学院 资源工程系, 湖北 荆州 434000)

**摘要:**在阐述了使用潘家铮算法对滑坡水平运动模式和垂直运动模式下初始涌浪高度进行求解的基础上, 基于线性插值原理, 提出了滑坡斜向运动模式下的初始涌浪高度的计算公式。以长江的新滩滑坡为例, 根据修正后的算法对其初始涌浪高度进行了计算, 并利用计算结果采用潘家铮方法对涌浪的传播及爬坡高度进行了分析计算。结果表明计算的初始涌浪高度值及经传播后的爬坡高度与实际调查值比较吻合。

**关键词:**初始涌浪高度; 线性插值; 潘家铮算法; 新滩滑坡

**中图分类号:** TU139.2<sup>+</sup>32

**文献标识码:** A

## 1 研究背景

大型高速水库库岸滑坡可以产生巨大的涌浪, 这些涌浪不仅能冲毁水工建筑物、堵塞河道, 更重要的是随着涌浪的传播和叠加, 有可能造成溃坝等水库失事事故, 如意大利瓦依昂水库滑坡、湖南拓溪水库塘岩光滑坡、云阳鸡扒子滑坡及湖北新滩滑坡等都造成了巨大的损失<sup>[1]</sup>。随着三峡大坝的建成和运营, 对滑坡涌浪的研究就显得意义更加重大。

在滑坡涌浪的研究中, 滑坡初始涌浪高度是个非常重要的概念和参数。若想获得涌浪传播和叠加的较准确估算值, 首先要有较准确的初始涌浪高度估算值。目前, 滑坡初始涌浪高度的算法主要有经验公式法、试验计算方法和数值模型方法。经验公式法主要有 Noda 法<sup>[2]</sup>、潘家铮算法、水利水电科学院经验公式法及无量纲组合模式等; 试验计算方法主要为具体滑坡的水工模型试验及多组试验后得到的统计公式; 数值模型方法有杨学堂等<sup>[3]</sup>用有限元分析方法对滑坡涌浪数值进行了计算; 郭洪巍等<sup>[4]</sup>根据滑坡体模型和水流模型导出了滑坡涌浪的计算方程等; 汪洋等<sup>[5]</sup>从滑坡运动过程的连续性出发, 运用滑坡动力学、运动学原理及动量定理对其初始涌浪高度进行了估算。尽管新的方法特别是数值模型法不断涌现, 但是 Noda 法、潘家铮算法等经验公式法因其简单及可操作性强而被广泛应用。由于 Noda 法、潘家铮算法都仅给出了垂直下落模式和水平壁移动模式下的求解公式, 对于最普遍的斜向运动模式却未给出。本文考虑滑坡入水角度的影响, 在潘家铮算法的基础上, 根据线性插值原理, 推导出了滑坡斜向运动模式下初始涌浪高度的计算公式, 并以新滩滑坡为例, 用修正后的方法(斜向运动模式下初始涌浪高度计算方法)对其初始涌浪高度进行计算, 并利用计算结果分别对涌浪的传播及爬坡高度进行分析。

## 2 潘家铮算法

潘家铮<sup>[6]</sup>于 1980 年在 Noda 法的基础上, 引入了  $dA/dt$  的概念, 提出了初始涌浪高度的计算方法。

收稿日期: 2009-01-19

基金项目: “十一·五”国家科技支撑计划资助项目(2008BAJ08B14-06); 上海市重点学科(地质工程)建设项目资助(B308)

作者简介: 任兴伟(1985-), 男, 山东临沂人, 硕士生, 主要从事工程地质方面的研究。E-mail: x0850815@126.com

他假定涌浪首先在滑坡入水处发生,产生初始波,然后向周围传播,并认为滑坡体侵入水库的断面积随时间的变化率是确定初始涌浪高度的主要因素,其计算模式按变形分为水平运动和垂直运动两种,两种模式下的初始涌浪高度求解曲线见图 1。

当岸坡发生水平运动时,激起的初始浪高可表示为:

$$\frac{\xi_0}{h} = 1.17 \cdot \frac{v}{\sqrt{g \cdot h}} \quad (1)$$

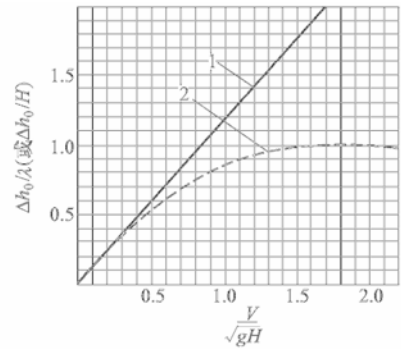
式中:  $\xi_0$  为激起的初始涌浪高度(m);  $h$  为水库平均深度(m);  $v$  为岸坡水平运动速度(m/s);  $g$  为重力加速度(m/s<sup>2</sup>)

当岸坡上有一厚度为  $\lambda$  的滑坡体以速度  $v'$  垂直进入水库时,激起的初始浪高可用下面的函数表示为:

$$\frac{\xi_0}{h} = f\left[\frac{v'}{\sqrt{g \cdot h}}\right] \quad (2)$$

式中:当  $0 < \left[\frac{v'}{\sqrt{g \cdot h}}\right] \leq 0.5$  时,  $\frac{\xi_0}{h} = \frac{v'}{\sqrt{g \cdot h}}$ ; 当  $0.5 < \left[\frac{v'}{\sqrt{g \cdot h}}\right] \leq 2$  时,  $f\left[\frac{v'}{\sqrt{g \cdot h}}\right]$  呈曲线变化。当  $\left[\frac{v'}{\sqrt{g \cdot h}}\right] > 2$  时,  $\frac{\xi_0}{h} = 1$ 。

两者模拟下的变化曲线见图 1;由图 1 可以看出,在  $v\sqrt{g \cdot h}$  相同的条件下,岸坡水平运动模式下激起的涌浪要高于垂直运动模式下的,特别是在滑速很大而水深较浅即  $v\sqrt{g \cdot h}$  较大时尤为明显,这时也可以这样理解:涌浪的初始最大浪高主要是由岸坡水平运动引起的,这也是为什么在实际估算涌浪高度时经常把低缓倾斜的岸坡运动近似看作水平运动处理的原因。很明显,这样处理得出的估算值要偏高,这对滑坡涌浪灾害的预防虽是偏于安全但不科学。而若按垂直运动模式处理,得出的估算值将偏低,这在灾害预防治理时是不合理的,因此,需要对潘家铮进行修正,以提高计算准确度。



(1—水平运动模式;2—垂直运动模式)

图 1 两种模式下的初始涌浪高度求解曲线图<sup>[1]</sup>

### 3 斜向运动模式下初始涌浪高度计算

考虑滑坡体入水角度  $\beta(^{\circ})$ ,则斜向运动模式下  $\xi_0$  可用下列公式求解:

$$\xi_0 = f(\beta, v, h) = m(\beta) \cdot \frac{h \cdot v}{\sqrt{g \cdot h}} \quad (3)$$

$$\frac{\xi_0}{h} = m(\beta) \cdot \frac{v}{\sqrt{g \cdot h}} \quad (4)$$

式中:  $m(\beta)$  为滑坡体入水角度  $\beta(^{\circ})$  对  $m$  的函数关系式

因此,只要求出  $m(\beta)$  代入式(4)中即可解得  $\xi_0$ 。因为已知  $m(0)$  和  $m(90)$ ,因此利用线性插值定理可得:

$$\frac{m(0) - m}{\beta - 0} = \frac{m(0) - m(90)}{90 - 0} \quad (5)$$

即:  $\frac{1.17 - m}{\beta - 0} = \frac{1.17 - m(90)}{90 - 0}$ , 并得:  $m = 1.17 - \frac{\beta(1.17 - m(90))}{90}$ 。

将式(5)代入式(4)中可得:

$$\frac{\xi_0}{h} = \left[1.17 - \frac{\beta(1.17 - m(90))}{90}\right] \cdot \frac{v}{\sqrt{g \cdot h}} \quad (6)$$

式中  $m(90)$  可根据图 1 中的曲线 2 或表 1 查得,此外,当  $\left[\frac{v}{\sqrt{g \cdot h}}\right] > 2$  时,  $m(90) = \frac{\sqrt{g \cdot h}}{v}$ 。

表1 滑坡体垂直运动模式下  $m(90)$ 取值

$\vartheta\sqrt{g \cdot h}$	$\leq 0.6$	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2
$m(90)$	1.0	0.986	0.925	0.889	0.87	0.818	0.767
$\vartheta\sqrt{g \cdot h}$	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	2.0
$m(90)$	0.731	0.693	0.653	0.616	0.582	0.551	0.5

该方法在比较适合用于大而深的水库中,即 $\sqrt{g \cdot h}$ 值较大,所以 $\vartheta\sqrt{g \cdot h}$ 常在0.5或0.6以下。此时, $m(90)=1.0$ ,相应的, $m=1.17-0.00189\beta$ ,则初始最大浪高 $\xi_0$ 为:

$$\frac{\xi_0}{h} = (1.17 - 0.00189\beta) \cdot \frac{v}{\sqrt{g \cdot h}} \quad (7)$$

#### 4 实例分析

新滩滑坡位于长江西陵峡上段兵书宝剑峡出口北岸,隶属湖北省秭归县,地形多有高山陡壁,以志留系砂页岩为深部滑移控制面。1985年6月12日凌晨发生了大规模的滑动,姜家坡—新滩镇—柳林一带几百万方的岩土体滑入长江<sup>[7-9]</sup>。

本文以新滩滑坡为例,选取滑动的姜家坡—新滩镇—柳林一带的岩土体作为研究对象,将滑坡体运动水上和水上运动两种情况,采用汪洋等改进条分法<sup>[10]</sup>,根据地形地貌进行将滑体进行条分,运用牛顿定律建立动力学方程,可求出每一块体入水时的速度,加速度及入水时间<sup>[6]</sup>,然后依据每个滑块的条分长度进行加权平均即可求得整个滑体入水时的平均速度。

本文取滑坡体滑动处水面平均宽度380m,天然工况下平均水深30m,滑坡体平均宽度450m,岸坡角度平均值28.1<sup>[8-9]</sup>。据此,采用汪洋等改进条分方法<sup>[10]</sup>,求得滑坡体入水时的平均速度 $v=16.7\text{m/s}$ ,

由 $\frac{v}{\sqrt{g \cdot h}} = \frac{16.7}{\sqrt{9.8 \times 30}} = 0.97 < 2.0$ ,查表1可得 $m(90) = 0.88$ 。根据式(8)可计算得 $\xi_0=32.4\text{m}$ 。

采用潘家铮算法进行涌浪传播衰减分析和爬高分析<sup>[6,11]</sup>,以检验本文方法下计算的初始涌浪高度是否合理。涌浪传播衰减及爬坡分析的具体计算原理及公式在此不作赘述。

根据水利电力部长江流域规划办公室在新滩滑坡后的现场调查数据表2及本文的计算结果绘制的新滩滑坡涌浪爬坡高度见图2。

涌浪的衰减大致可分急剧衰减阶段和缓慢衰减阶段,且近滑坡处的涌浪衰减程度远大于远滑坡处的衰减程度。从图2中可以看出,滑坡上游河段涌浪爬坡高度计算值与调查值吻合较好,而下游河段计算值比调查值要大,滑坡体体积大而水深较浅,滑坡体入水堵塞河道造成短时间的过水断面局部或全部断流,使得下游水位得不到补给而有所下降。汪洋等<sup>[11]</sup>也得出了相似的结果。因此,可以看出本文的计算方法是合理的。

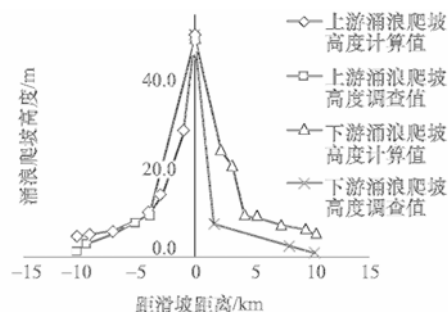


图2 新滩滑坡涌浪爬坡高度调查值与计算比较

表2 新滩滑坡涌浪爬坡高度调查<sup>[11-12]</sup>

上游河段	距滑坡距离 km	4.0	5.0	9.5	10.0
	爬坡高度 m	10.0	7.0~8.0	2.8	1.2
下游河段	距滑坡距离 km	0.0	1.5	7.5	10.0
	爬坡高度 m	28.4~49	7.5	2.4	>0.5

## 5 结语及建议

本文提出的斜向运动模式下初始涌浪高度的求解公式是在潘家铮算法的基础上推导出来的,是该算法的修正公式。根据线性插值原理进行修正,简单易懂,计算过程避免了冗繁复杂的数值分析模拟。通过新滩滑坡实例计算值与实测值对比,验证了本文建议的修正公式是合理的。由于影响滑坡涌浪的因素非常多且往往具有不确定性,计算时边界条件和初始条件也非常复杂,并且考虑到滑坡体内情况千变万化,各项指标的测定都有一定的任意性,涌浪计算难以精确。潘家铮算法简单实用,重修正后计算结果精确度有所提高。

### 参 考 文 献:

- [1] 李智毅,杨裕云.工程地质学概论[M].北京:中国地质大学出版社,1994.87、133—134.
- [2] Noda E. Water Waves Generated by Landslides[J]. Journal of Waterways, Harbors and Coastal Eng. Div. ASCE, 1970, 96(4):835—855.
- [3] 杨学堂,刘斯凤,杨耀.黄腊石滑坡群石榴树包滑坡涌浪数值计算[J].武汉水利电力大学(宜昌)学报,1998, 20(3):51—55.
- [4] 郭洪巍,吴葱葱.水库滑坡涌浪的数学模型及其应用[J].华北水利水电学院学报,2000,3(1):24—27.
- [5] 汪洋,殷坤龙.水库库岸滑坡的运动过程分析及初始涌浪计算[J].地球科学—中国地质大学学报,2003,28(5):579—582.
- [6] 潘家铮.建筑物的抗滑稳定和滑坡分析[M].北京:水利出版社,1980.120—154.
- [7] 汪洋,殷坤龙.水库库岸滑坡初始涌浪叠加的摄动方法[J].岩石力学与工程学报,2004,23(5):717—720.
- [8] 薛果夫,吴桂芳,任江.新滩滑坡研究[C]//中国典型滑坡.北京:科学出版社,1988.200—210.
- [9] 汪洋.水库库岸滑坡速度及其涌浪灾害研究[D].武汉:中国地质大学(武汉),2005.
- [10] 汪洋,刘波,汪为.滑坡速度计算的改进条分法[J].安全与环境工程,2004,11(3):67—70.
- [11] 汪洋,殷坤龙.水库库岸滑坡涌浪的传播与爬高研究[J].岩土力学,2008,29(4):1031—1034.
- [12] 汪定扬,刘世凯.长江新滩滑坡(1985年6月)涌浪调查研究[J].人民长江,1986,17(10):24—27.
- [13] 刘世凯.长江西陵峡新滩滑坡涌浪高度衰减因素初探[J].水利水电技术,1987(9):11—14.
- [14] 陈学德.水库滑坡涌浪的经验算法及程序设计[R].长沙:长江水利电力部中南勘测设计院科研究所,1984. 1—18.
- [15] 时卫民,郑颖人.库水位下降情况下滑坡的稳定性分析[J].水利学报,2004(3):76—80.

### Improved method for calculating landslide initial surge height

REN Xing-wei<sup>1,3</sup>, TANG Yi-qun<sup>1,3</sup>, DAI Yun-xia<sup>2</sup>, FAGN Yu<sup>3</sup>

(1. Tongji University, Shanghai 20009, China; 2. China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;  
3. Hubei Vocational College of Land and Resources, Jingzhou 434000, China)

**Abstract:** Based on the methods for calculating the initial surge heights due to horizontal and vertical movement of slide suggested by Pan, an improved formula for slide movement with arbitrary incline angle is proposed by applying the linear interpolation approach. The formula is used to calculate the initial surge height occurred to the Xintan Slide, located at the Yangtze River. It is found that the calculated climb up height of the surge in the process of propagation is in good agreement with field investigation data.

**Key words:** landslide; initial surge height; linear interpolation approach; improved Pan's method

(责任编辑:李琳)