

# 水库库岸滑坡的运动过程分析及初始涌浪计算

汪 洋, 殷坤龙

(中国地质大学工程学院, 湖北武汉 430074)

**摘要:** 从地面运动和 underwater 运动 2 个阶段对水库库岸滑坡的受力特征进行了分析, 用牛顿定律和运动学基本原理求解滑坡地面运动的加速度和速度, 且把地面运动的末状态作为水下运动的初始状态, 用流场阻力公式和粘滞力公式求解滑坡水下运动的时间与速度, 并运用动量定理对其初始涌浪高度进行了计算. 以三峡库区新滩滑坡为例, 采用条分方法, 计算出各条块入水速度、水下运动的时间及其激起的涌浪高度值, 得出了地面运动过程中滑坡速度值先增后减及水下运动过程中滑坡速度与时间呈反正切型关系的规律, 并认为涌浪高度变化与条块的高度变化具有较强的关联性.

**关键词:** 粘滞力; 动量定理; 涌浪; 新滩滑坡.

**中图分类号:** P642.2      **文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-2383(2003)05-0579-04

**作者简介:** 汪洋(1978—), 男, 地质工程专业博士研究生, 主要从事滑坡稳定性数值模拟及库岸灾害的研究. E-mail: quenten1978@sohu.com

水库库岸滑坡的失稳会导致岩土体高速入水, 不仅会冲毁水工建筑物、堵塞河道, 而且还会激起巨大的涌浪, 威胁航行船只、库区坝体及沿岸居民生命的安全, 如意大利瓦依昂水库滑坡、湖南拓溪水库塘岩光滑坡、云阳鸡扒子滑坡及新滩滑坡等. 因此, 正确地评价库区滑坡涌浪是非常重要的.

目前国内外对滑坡涌浪灾害的研究甚少, 进展也较为缓慢, 研究方法以模型试验、经验公式估算及统计回归分析为主; 其基本思路是先选出重要的影响因子, 再结合模型试验, 运用统计回归分析, 得出具体情况的经验公式. 如潘家铮<sup>[1]</sup>认为滑坡体侵入水库的单宽体积变化率是确定初始浪高的主要因素; 中南勘测设计院的陈学德<sup>[2]</sup>补充说明了涌高与滑坡无量纲动能的关系; 意大利的史蒂瓦内拉<sup>[3]</sup>提出了根据滑坡方量、滑坡时间和水库深度计算涌高. 模型试验可模拟水库滑坡的地面及涌浪灾害过程, 但耗资大、试验周期长, 而经验与统计计算则把水库滑坡的地面运动和水下运动完全独立开来. 本文从滑坡运动过程的连续性出发, 通过分析水库库岸滑坡的地面运动和水下运动的受力特征, 把地面运动的末状态作为水下运动的初始状态, 并运用滑坡动

力学、运动学原理及动量定理对其初始涌浪高度进行了计算.

## 1 滑坡的入水前后运动过程分析

### 1.1 滑坡的地面运动过程分析

滑动面的形状为曲线, 其倾角及力学参数会变化, 所以在进行动力学分析时, 采用条分法的思想先对整个滑体进行分块, 条块垂直划分, 对于每个条块, 其受力图如下(图 1). 假定条块发生位移时, 按刚体运动, 即条块内部不发生相对的位移, 根据牛顿第二定律:

水平方向

$$\begin{aligned} \Delta T_i - (C_i L_i + N_i \tan \varphi_i) \cos \alpha_i + \\ (U_i + N_i) \sin \alpha_i = M_i a_{ix}, \end{aligned} \quad (1)$$

竖直方向

$$\begin{aligned} W_i + \Delta Q_i - (C_i L_i + N_i \tan \varphi_i) \sin \alpha_i - \\ (U_i + N_i) \cos \alpha_i = M_i a_{iy}. \end{aligned} \quad (2)$$

计算时认为条块间的竖直作用力可以忽略, 条块的合加速度沿滑动面方向及所有条块在某一时刻的水平加速度相等<sup>[1]</sup>, 根据块体间的内力为零解得加速度

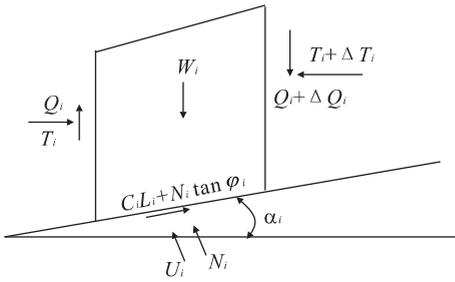


图 1 块体受力分布  
Fig. 1 Forces of block

$$a_{ix} = \left[ \sum_{i=1}^n (U_i \sin \alpha_i - C_i L_i \cos \alpha_i) - \sum_{i=1}^n K_i (M_i g - U_i \cos \alpha_i - C_i L_i \sin \alpha_i) \right] / \sum_{i=1}^n M_i (1 - K_i \tan \alpha_i) \quad (3)$$

其中  $K_i = \frac{\tan \varphi_i \cos \alpha_i - \sin \alpha_i}{\tan \varphi_i \sin \alpha_i + \cos \alpha_i}$ 。 (4)

然后根据运动学的基本理论,即初速、末速、时间和加速度的关系求出滑块地面运动时间及末速度。

1.2 滑坡的水下运动过程分析

物体在液体中运动时,主要克服 2 个阻力做功,一个是流场的阻力,不管液体是否有粘性,这种阻力都存在<sup>[4]</sup>,其值为  $(1/2) m_i (dv/dt)$  ( $m_i$  为物体质量);另一个就是物体还要克服表面摩擦力做功<sup>[4]</sup>,其值为  $(1/2) c_d \rho_f v^2 S$  (其中  $c_d$  为粘滞阻力系数<sup>[5]</sup>,  $S$  为表面积)。

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = m_i g \sin \alpha_i - (C_i L_i + N_i \tan \varphi_i) - \frac{1}{2} m_{f,i} \frac{dv_i}{dt} - \frac{1}{2} c_d \rho_f v_i^2 S_i \quad (5)$$

其中,  $dv_i/dt =$

$$\frac{m_i g \sin \alpha_i - (C_i L_i + N_i \tan \varphi_i)}{m_i + 0.5 m_{f,i}} - \frac{c_d \rho_f S_i}{2 m_i + m_{f,i}}$$

在这里,认为水底的倾角  $\alpha$  很小,忽略重力的水平分量;另外,由于水的润滑,认为水底运动的粘聚力很小,忽略  $C_i$  的影响,公式可简化为

$$\frac{dv_i}{dt} = - \frac{N_i \tan \varphi_i}{m_i + 0.5 m_{f,i}} - \frac{c_d \rho_f S_i}{2 m_i + m_{f,i}} v_i^2 \quad (6)$$

令  $A = \frac{N_i \tan \varphi_i}{m_i + 0.5 m_{f,i}}$ ,  $B = \frac{c_d \rho_f S_i}{2 m_i + m_{f,i}}$ , 则  $A > 0, B > 0$ ,

公式可变为

$$\frac{dv_i}{dt} = -(A + B v_i^2) \quad (7)$$

根据数学分析积分解得

$$t_i = -\sqrt{\frac{1}{AB}} \arctan\left(\sqrt{\frac{B}{A}} v_i\right) + C \quad (8)$$

把滑坡地面运动的末速度作为水下运动的初速度,由初始条件  $v = v_0, t = 0$  代入上式即可求得积分常数  $C$ ,将  $C$  代入上式就可求得每个块体在水底的运动时间。

2 滑坡初始涌浪高度计算

在滑坡块体与水作用过程中,可以认为块体受到的水的压强远大于水的粘滞应力,设滑块质量为  $m_i$ ,滑入水库时的速度为  $v_i$ ,在水底的运动时间为  $t_i$ ,块体截面高为  $H_i$ ,宽为  $B_i$ ,块体截面受到的平均压强为  $p_i$ ,由动量定理得

$$m_i v_i = p_i \cdot H_i \cdot B_i \cdot t_i \quad (9)$$

在水中  $p_i = \rho \cdot g \cdot \eta_i$ 。 (10)

由上两式解得:  $\eta_i = \frac{m_i v_i}{H_i \cdot B_i \cdot t_i \cdot \rho \cdot g}$ 。 (11)

$\eta_i$  为条块中心到涌浪最高点的距离,设  $h_0$  为涌浪发生前的原始水面高,  $H_i$  为滑块高度,因此,初始涌浪高为:

$$\eta = \eta_i + H_i/2 - h_0 \quad (12)$$

3 新滩滑坡运动分析及涌高计算

新滩滑坡位于长江西陵峡上段兵书宝剑峡出口的北岸,隶属湖北省秭归县,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—柳林一带几百万  $m^3$  的岩土体滑入长江<sup>[6]</sup>。

新滩滑坡地面运动、水下运动及初始涌高的计算都是分块进行的。本文选取姜家坡至长江间的部分进行分块,滑坡块体分布见图 2,条块高度变化见图 3,它反映了滑坡本身厚度的变化。在地面运动

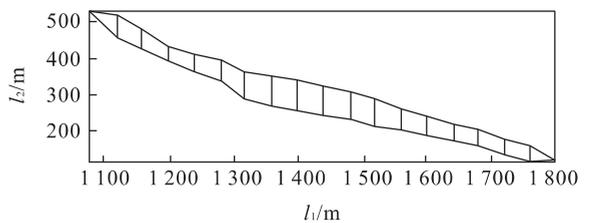


图 2 新滩滑坡分块

Fig. 2 Slices of Xintan landslide

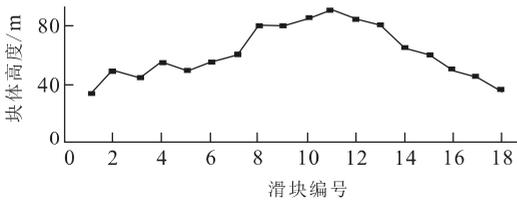


图 3 条块高度变化

Fig. 3 Height changes of slices

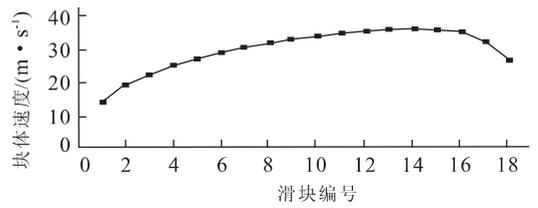


图 4 新滩滑坡速度分布

Fig. 4 Velocity distribution of Xintan landslide

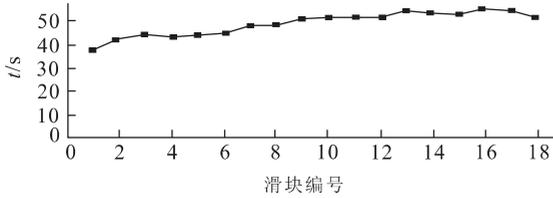


图 5 条块水下运动时间

Fig. 5 Movement time of slices below water level

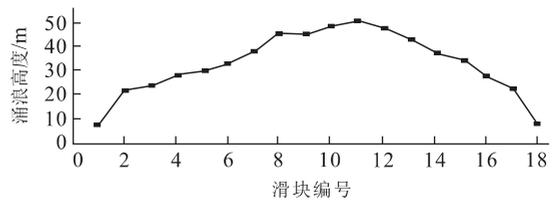


图 6 新滩滑坡涌浪高度分布

Fig. 6 Height distribution of surge of Xintan landslide

中,新滩滑坡滑动的速度先增后减(图 4),到第 15 号出现最大值;在水下运动中,所有的阻力及速度大小都会影响块体的运动时间,变化较为复杂,其时间图(图 5)有小起伏,但总体呈增长的,最后几块有减少的趋势;滑坡引起的涌浪高度是先增后减(图 6),开始滑入水中体积及速度小,涌浪较小,后逐渐增大,最大值达 49.2 m,最后由于体积及速度的改变,涌浪又降低,从图中还可以看出涌浪高度变化与条块的高度变化关联性较强。

## 4 结论与建议

(1)水库库岸滑坡的地面运动过程分为加速阶段和减速阶段,滑坡先作加速运动后作减速运动。  
 (2)在考虑了流场阻力和表面摩擦力的情况下,水库库岸滑坡水下的运动时间与速度呈反正切型的关系。  
 (3)通过分析水库滑坡的地面运动和水下运动的连续性,结合动量定理,可以较为准确地计算速度及涌高的变化过程,并可以看出涌浪高度变化与条块的高度变化关联性较强的规律。

本文只是考虑了每一条块冲入水库引起的涌浪高度,实际上,滑坡引起的涌浪高度问题需要考虑当前条块与已滑条块引起的涌浪高度的叠加。因此,还需进一步研究涌浪高度在短时间的衰减问题。

### 参考文献:

[1] 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. 133—154.

PAN J Z. Stability of construction against sliding and landslide analysis [M]. Beijing: Water Conservancy Press, 1980. 133—154.

[2] 陈学德. 水库滑坡涌浪的经验算法及程序设计[M]. 武汉:水利电力部中南勘测设计院科研所,1984. 1—18.

CHEN X D. Experiential method and program design of surge triggered by landslide in reservoir [M]. Wuhan: Science and Research School in Zhongnan Institute of Reconnaissance and Design of the Ministry of Water Conservancy and Electric Power, 1984. 1—18.

[3] 史蒂瓦内拉 G. 滑坡引起波浪的估算[J]. 刘忠清,译. 人民长江,1991, 22(3): 55—59.

Thdivla G. Estimation of wave triggered by landslide [J]. Translated by LIU Z Q. People's Yangtse River, 1991, 22(3): 55—59.

[4] Chuen-Yen Chow. 计算流体力学导论[M]. 孙祥海,周文伯,杜振凡,等译. 上海:上海交通大学出版社,1987. 5—20.

Chuen-Yen Chow. Calculating hydrodynamics introduction [M]. Translated by SUN X H, ZHOU W B, DU Z F, et al. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 1987. 5—20.

[5] 李炜,徐孝平. 水力学[M]. 武汉:武汉水利电力大学出版社,2000. 4—13.

LI W, XU X P. Hydraulics [M]. Wuhan: Wuhan University of Hydraulic and Electricity Press, 2000. 4—13.

[6] 薛果夫,吕贵芳,任江. 新滩滑坡研究[A]. 中国典型滑坡 [C]. 北京:科学出版社,1988. 200—210.

XUE G F, LÜ G F, REN J. Research of Xintan land-

slide [A]. Typical landslides in China [C]. Beijing: Science Press, 1988. 200—210.

# Analysis of Movement Process of Landslide in Reservoir and Calculation of Its Initial Surge Height

WANG Yang, YIN Kun-long

(Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** The movement of landslide in reservoir is divided into two stages, which are movement on ground and movement below water level, and the forcing characteristics of both stages are analyzed in this paper. The Newton law and the basic principles of kinematics are used to solve velocity and acceleration of landslide when it moves on ground surface, and the terminal conditions of stage on ground are considered as the initial conditions of stage below water level. The resistance formula in flow field and viscous force formula are applied to solve velocity and time of landslide when it moves below water level. At last, the momentum theory is adopted to calculate surge height. This paper takes Xintan landslide in the Three Gorges reservoir as the example and takes use of vertical slice method to calculate speed on ground surface, time below water level and surge height of each slice. It comes to the conclusions that the landslide firstly accelerates, then decelerates on surface, and the relationship between time and speed below water level is arc tangent and shows that the surge height keeps a great correlation with the height of slice.

**Key words:** viscous force; momentum theory; surge; Xintan landslide.

\*\*\*\*\*

(上接 567 页)

差函数. 此方程组含有  $n + 1$  个方程,  $n + 1$  个未知数, 由此可以解线性方程组得出未知数  $w_i$  及  $\mu$ .

对于关键技术问题之三——三角网格等值线绘制, 主要分以下 3 个部分: (1) 遍历各个三角单元, 寻找等值点; (2) 跟踪等值点, 判断等值线是开曲线还是闭曲线; (3) 对每条等值线完成标注与光滑曲线连接工作.

以陕西某处地下水流数值模拟研究项目为例, 用本软件进行了地下水流数值模拟前后处理. 根据地下水流模型初始边界及拟设的点和线, 利用软件进行网络自动生成, 生成的三角剖分图如图 1 所示, 总结点 1 440 个, 总单元 2 697 个. 对于已知水位点数据利用 Kriging 插值得所有结点数据. 限于篇幅, 三角网络等值线图、初始图形和分区图形没有

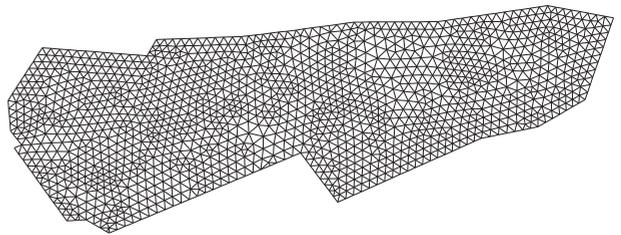


图 1 三角网络

Fig. 1 Triangle element mesh

显示.

对于地下水流数值模拟前后处理软件的设计, 笔者作了一个大胆的尝试, 设计的软件包括数值模拟可能涉及到的三角网络自动生成、插值、绘等值线、分区文件的显示等部分. 设计的软件基本满足地下水流数值模拟的要求.