水库库岸滑坡引起的初始涌浪计算

汪　洋，殷坤龙

（中国地质大学工程学院，湖北 武汉 430074）

摘　要：为了解决水库库岸滑坡引起的初始涌浪高度问题，从滑坡涌浪的形成机制着手，把滑坡引起的涌浪分为体积涌浪和冲击涌浪两部分，并根据体积守恒原理、明槽中扰动波的传播速度及块体水下运动的位移公式求出了两者的计算式。体积守恒原理用于解决滑坡的入水体积与涌浪高度的关系，水流连续性原理用于解决传播的波速与波高的关系，粘滞力公式用于解决块体水下运动的位移与速度的关系。以新滩滑坡为例对初始涌浪高度进行了计算，得出了滑坡入水过程中初始涌浪高度先增后减以及它与滑坡速度的变化不一致的规律。

关键词：滑坡；体积涌浪；冲击涌浪；体积守恒

作者简介：汪　洋(1978－)，男，博士，主要从事滑坡稳定性数值模拟及库岸灾害的研究。

0　引　　言

水库库岸滑坡涌浪的计算主要使用经验公式和数值模拟方法。经验公式是根据解析方法和模型实验方法得到的，如 E. Noda 公式、无量纲组合公式、瑞士方法、潘家铮算法等[1-4]；近十年来，滑坡涌浪计算方法不断发展和完善，国外方面，P. Heinrich 和 S. Guibourg 利用 Navier-Stokes 方程的三维流体力学模型对滑坡引起的海啸进行了数值模拟[5]；S. T. Grilli 和 P. Watts 利用边界单元法对被水浸没运动物体激起的水波进行了模拟[6]；Andrea Panizzo、Giorgio Bellotti 和 Paolo De Girolamo 利用小波变换方法计算了滑坡引起的表面波[7]，Gerald F. Wieczorek 及 Matthias Jakob 等人对经验公式作了总结[8]；H. M. Fritz，W. H. Hager 和 H.-E. Minor 通过二维物理实验对滑坡引起的冲击波的特征作了详细的探讨[9]；Philip Watts1，Stéphan T. Grilli 等人从二维和三维的角度利用解析方法对潜水体引起的海啸的高度进行了研究[10]。国内学者在涌浪的试验、计算和模拟方面也作了很多的工作，王晓鸿、杨学堂等利用有限元分析方法对滑坡涌浪数值进行了计算[11-12]；郭洪巍和吴葱葱根据滑坡体模型和水流模型导出了滑坡涌浪的计算方程[13]；姜治兵，金峰，盛君推导了滑坡涌浪的 DIF 方程，建立了滑坡涌浪数值模型[14]。本文从滑坡岩土体入水过程的连续性出发，分析了滑坡涌浪的形成机制，把滑坡引起的涌浪分为冲击涌浪和体积涌浪两部分，根据水体的体积守恒原理及明槽中扰动波的传播速度给出了两者的计算式，并以三峡库区新滩滑坡为例对涌浪高度进行了计算。

1　滑坡涌浪的形成机制

1.1　滑坡体积涌浪的形成机制

大型高速滑坡入水会在很短的时间内占用大量的水下容积（图 1），被侵占了空间（图中 *bcde* 部分）的水体会在水表面涌出形成涌浪，并以一定的速度向远处传播，这种由于大体积岩土体入水而引起的涌浪称为体积涌浪。

滑坡体积涌浪形成有两个充分条件：第一，滑入水库的滑坡必须具有一定的体积，微小体积的岩土体滑入水库中几乎不会激起体积涌浪；第二，滑坡岩土体必须以一定的速度滑入水库，岩土体以微小速度滑入水库中也不会激起体积涌浪。



图 1 涌浪形成机制示意图

1.2　滑坡冲击涌浪的形成机制

在滑坡当前部分入水过程中，滑坡前缘已经入水的部分受到当前部分的推力以一定的速度继续运动（图 1），在水体粘滞阻力作用下，从 *BE* 运动到 *CD*，那么 *BEDC* 范围内的水体会在滑坡界面的挤压作用下在水体表面形成涌浪，笔者认为，这种前推后阻的作用在水体表面引起涌浪称为冲击涌浪。

滑坡冲击涌浪形成有二个充分条件：第一，库水位以下运动的岩土体必须具有一定的速度，微小速度的水下运动不会激起冲击涌浪；第二，库水位以下运动的岩土体必须具有一定的截面面积，除了截面面积微小的岩土体的水下运动不会激起冲击涌浪外，高而扁或者宽而短形状的岩土体的水下运动也不会激起冲击涌浪。

2　滑坡入水引起的初始涌浪计算

2.1　滑坡入水的体积守恒原理

滑坡入水的体积守恒原理就是指一定体积的滑坡岩土体高速滑入水库必定在瞬间要排开一定体积的水体，不考虑滑坡岩土体入水过程中水在岩土体内部孔隙中的渗透，

基金项目：中国地质大学优秀青年教师资助计划项目及工程学院优秀青年教师科技项目预研究基金的资助

收稿日期：2006－07－30

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

那么，它排开水的体积就等于滑入水中的岩土体体积。

这些被排开的水体就会在库水表面激起涌高，并以一定的速度向远处传播（图 2），设其速度为 c_1，产生的涌浪高度为 h_1，设库水的深度为 h_0，滑坡岩土体体积为 V_0，那么引起涌浪的水体体积用 V_1 表示，入水时间为 t_1，该涌浪将以滑入点为圆心，以水库库岸为边界，在库水表面呈半圆型方式展布，其展布半径为 R，根据体积守恒：

$$V_1 = V_0 = \frac{\pi R^2}{2} h_1 = \frac{\pi (c_1 t_1)^2}{2} h_1 \quad 。 \tag{1}$$

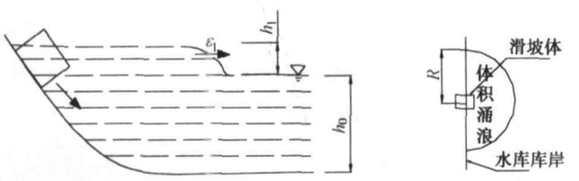

图 2 体积守恒原理示意图

2.2　扰动波在明槽中的传播速度计算

根据水力学中水体表面扰动波运动的机械能及水流连续性原理[15]，传播的波速（c_1）与水深（h_0）及波高（h_1）的关系可表示为

$$c_1 = (h_0 + h_1)\sqrt{\frac{2g}{2h_0 + h_1}} \quad 。 \tag{2}$$

2.3　初始体积涌浪计算

根据式 1 及 2，可以求出引起体积涌浪的岩土体体积（V_1）与体积涌浪高度（h_1）、水深（h_0）及运动时间（t_1）的具体关系式为

$$V_1 = g\pi t_1^2 \cdot \frac{h_1 (h_0 + h_1)^2}{(2h_0 + h_1)} \quad 。 \tag{3}$$

上式采用迭代法进行求解。

2.4　初始冲击涌浪计算

块体在水中运动，可以认为其受到的阻力主要是流体阻力，根据牛顿运动定律：

$$m \frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t} = -\frac{1}{2} c_d \rho v^2 A \quad , \tag{4}$$

令 $B = \dfrac{c_d \rho A}{2m}$，其初始条件 $t=0$，$v=v_0$，式 4 的解为

$$v = \frac{v_0}{Bv_0 t + 1} \quad 。 \tag{5}$$

根据速度求位移：

$$S_2 = \int_0^t v \mathrm{d}t = \int_0^t \frac{v_0}{Bv_0 t + 1} \mathrm{d}t = \frac{\ln(Bv_0 t + 1)}{B} , \tag{6}$$

设引起的冲击涌浪的库水位以下部分岩土体的截面面积 SS 为，在 t 时段内，冲击涌浪的总体积为

$$V_2 = SS \cdot S_2 \quad 。 \tag{7}$$

根据体积守恒的原理，求出冲击涌浪的高度 h_2 与体积的关系可以表示如下：

$$V_2 = g\pi t^2 \cdot \frac{h_2 (h_0 + h_2)^2}{(2h_0 + h_2)} \quad 。 \tag{8}$$

3　新滩滑坡产生的初始涌浪计算

3.1　新滩滑坡的速度计算

本文选取新滩滑坡的姜家坡 - 新滩镇 - 柳林一带的岩土体为研究对象，根据其地形地貌将其分为 31 个条块，如图 3 所示。

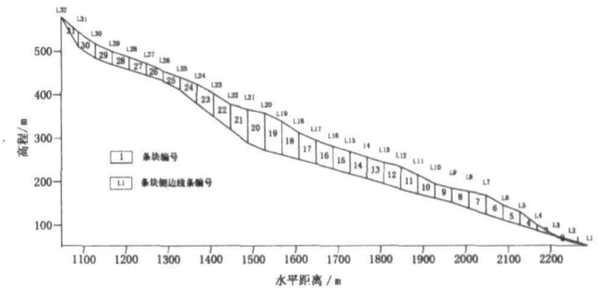

图 3 新滩滑坡条分图

计算出来的新滩滑坡的速度见图 4。另外，条块的截面面积，体积以及滑坡运动的时间都可以从速度求解过程中得出。

3.2　新滩滑坡引起的初始涌浪计算

图 5 表示的是新滩滑坡引起的体积涌浪，从该图可以看出，滑坡引起的体积涌浪高度的变化趋势是先增后减，当滑坡运动约 46 s 到达最大值 28.03 m；图 6 表示的是新滩滑坡引起的冲击涌浪，其变化趋势也是先增后减，当滑坡运动约 30 s 时到达最大值 17.89 m；图 7 表示的是新滩滑坡引起的总涌浪，其变化趋势还是先增后减，与体积涌浪的变化趋势相似，当滑坡运动 32 s 时，总涌浪到达最大值 45.34 m；在滑坡运动 46 s 以后，总涌浪高度以很大的幅度递减，直至消失。

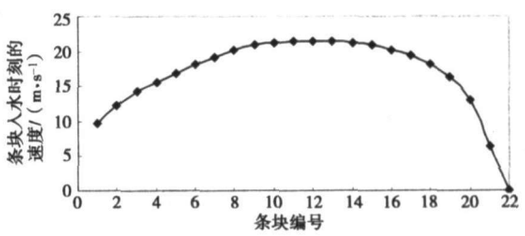

图 4 新滩滑坡的速度分布图

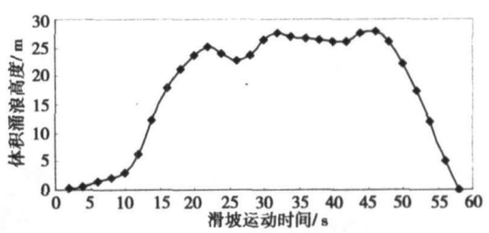

图 5 新滩滑坡引起的体积涌浪

4　结　　语

(1) 本文从滑坡入水的过程中水土的相互作用出发，提出了滑坡涌浪的形成机制，并从体积涌浪和冲击涌浪两

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

方面来计算滑坡引起的初始涌浪。

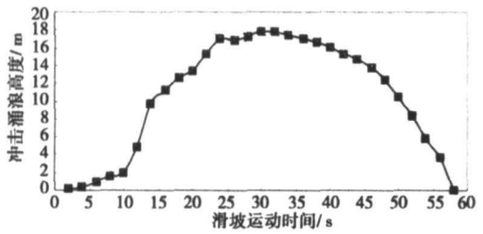

图 6 新滩滑坡引起的冲击涌浪

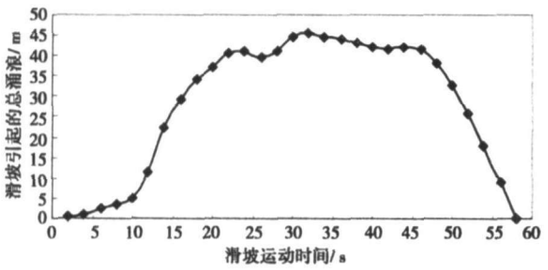

图 7 新滩滑坡引起的总涌浪

(2) 以条分方法计算出来的滑坡的基本几何参数和运动参数是计算滑坡引起体积涌浪和冲击涌浪的前提条件。

(3) 在计算滑坡初始涌浪时，体积涌浪和冲击涌浪的高度根据体积守恒原理求出，涌浪的传播速度根据明槽中扰动波传播速度求出。

(4) 从新滩滑坡涌浪计算的结果可以看出：滑坡引起的初始涌浪高度先增后减，其变化与滑坡入水速度的变化不一致，可以认为，初始涌浪高度除了与滑坡速度有关外，还应该与其它因素有关（体积、截面积），它们的相关关系有待于进一步的研究。

参考文献：

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

[2] 陈学德. 水库滑坡涌浪研究的综合评述[J]. 水电科研与实践, 1984, **1**(1):78 - 96.

[3] 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.

[4] 哈秋聆, 胡维德. 水库滑坡涌浪计算[J]. 人民黄河, 1980, **2**(2):30 - 36.

[5] HEINRICH P, GUIBOURG S, MANGENEY A, et al. Numerical modeling of a landslide-generated tsunami following a potential explosion of the montserrat volcano. [J]. Phgs Chem Earrh, 1999, **24**(2):163 - 68.

[6] GRILLI S T, WATTS P. Modeling of waves generated by a moving submerged body: Applications to underwater landslides[J]. Engineering Analysis with Boundary Elements, 1999, **23**:645 - 656.

[7] PANIZZO Andrea, BELLOTTI Giorgio, GIROLAMO Paolo De. Application of wavelet transform analysis to landslide generated waves [J]. Coastal Engineering, 2002, **44**:321 - 338.

[8] WIECZOREK Gerald F, JAKOB Matthias, MOTYKA Roman J, et al. Preliminary assessment of landslide-induced wave hazards: Tidal Inlet, Glacier Bay National Park, Alaska [R]. U S Geological Survey Open-File Report, 2003: 3 - 100.

[9] FRITZ H M, HAGER W H. MINOR H E. Water waves near field characteristics of landslide generated impulse waves [J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 2004, **130**(6):287 - 302.

[10] WATTS Philip, STÉPHAN T, GRILLI M, TAPPIN David 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.

[11] 王晓鸿, 刘汉超, 张倬元. 滑坡涌浪的二维有限元分析[J]. 地质灾害与环境保护, 1996, **7**(4):19 - 22.

[12] 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.

[13] 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, **21**(1):24 - 27.

[14] 姜治兵, 金 峰, 盛 君. 滑坡涌浪的数值模拟[J]. 长江科学院院报, 2005, **22**(5):1 - 3.

[15] 李 炜, 徐孝平. 水力学[M]. 武汉: 武汉水利电力大学出版社, 2000.

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net