

doi:10.3799/dqkx.2012.113

# 三峡水库库岸滑坡涌浪物理模型试验

殷坤龙<sup>1</sup>, 刘艺梁<sup>1</sup>, 汪洋<sup>1</sup>, 姜治兵<sup>2</sup>

1. 中国地质大学工程学院, 湖北武汉 430074

2. 长江科学院, 湖北武汉 430010

**摘要:** 三峡水库自2003年开始蓄水以来, 库岸滑坡变形明显加剧, 滑坡变形不仅造成建筑物破坏, 高速滑坡滑入水库还会产生很大的涌浪, 其潜在的危害性远远超过滑坡本身。2003年7月13日发生在三峡库区的千将坪滑坡就是由水库蓄水诱发所致, 滑坡最高涌浪达到39 m, 在水库传播达30 km之远, 涌浪造成了人员伤亡与财产损失。为了更好地研究水库滑坡涌浪特征和传播规律, 以三峡库区重大科研项目为依托, 采用室内大型物理模拟实验手段, 对三峡库区滑坡涌浪开展了深入研究。通过对三峡库区已经开展勘探的潜在滑坡的地质资料进行统计分析, 按照正交试验设计方法, 制定了包含滑坡规模、入水速度、滑动面倾角、水深、岸坡坡角等综合影响因素的试验方案, 以三峡库区白水河滑坡上下游河道为原型, 建立了1:200比例尺的河道物理模型, 采用试验控制系统、试验量测系统开展了滑坡涌浪三维物理模型试验。通过细致的物理模型实验, 得到了不同试验条件下的三峡库区滑坡涌浪物理模型实验观测数据, 分析滑坡涌浪形态变化, 明确了滑坡最大首浪的含义。在此基础上, 以国内外经典的Noda和潘家铮提出的滑坡涌浪公式为基础, 基于试验量测数据, 提出了三峡库区滑坡涌浪计算公式。最后以三峡库区正在变形的白水河滑坡为例进行了滑坡涌浪预测研究, 预测了滑坡最大首浪高度和沿水库传播的涌浪衰减规律。

**关键词:** 三峡库区; 滑坡; 涌浪; 物理模型试验; 最大首浪高度; 地质灾害; 工程地质。

**中图分类号:** P642.22

**文章编号:** 1000-2383(2012)05-1067-08

**收稿日期:** 2011-11-08

## Physical Model Experiments of Landslide-Induced Surge in Three Gorges Reservoir

YIN Kun-long<sup>1</sup>, LIU Yi-liang<sup>1</sup>, WANG Yang<sup>1</sup>, JIANG Zhi-bing<sup>2</sup>

1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Changjiang Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China

**Abstract:** The impoundments of Three Gorge Reservoir have obviously intensified the reservoir bank landslide deformation since 2003. Landslide deformation can cause not only damages, but also evokes great surge once high-speed landslide sliding into reservoir, which is a potential hazard far worse than landslide itself. Owing to the reservoir impoundment, Qianjiangping landslide in Three Gorges Reservoir Area (TGRA) occurred on July 13, 2003. The highest height of landslide-induced surge reached 39 meters which resulted in wave spreading more than 30 kilometers far away along the channel, causing casualties and property losses. In order to study the characteristics and propagation law of landslide-induced surge, based on the major scientific project in TGRA, this paper presents a comprehensive researches on landslide surge hazard in TGRA through large laboratory physical model experiments. Through the statistical analysis of geological data about the potential landslides in TGRA, adopting the orthogonal experimental design method, we formulated the experiment scheme which included landslide scale, speed entering into the water, sliding plane obliquity, water depth, and slope angle. Besides, we took the channel of Baishuihe landslide in TGRA as prototype, established the river physical model in map scale 1:200, and thus developed landslide surge three-dimensional physical model experiment by adopting the experimental control system and measurement system. According to the careful physical model experiments, we obtained reliable experimental data of landslide surge. Based on the morphological changes of landslide surge, we confirmed the concept of head wave. Then based on the classical landslide surge formulas proposed by Noda and Pan Jiazheng, by analyzing the measured data, we deduced the landslide surge calculation formulas in TGRA. At last, taking Baishuihe landslide being in deformation as an example, these formulas were used to forecast the maximum head wave

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(No. 41002103); 三峡库区三期地质灾害防治重大科研项目(SXKY3-2-3-200704)。

**作者简介:** 殷坤龙(1963—), 男, 博士生导师, 教授, 主要从事地质灾害预测预报与风险研究。E-mail: yinkl@cug.edu.cn

height and the decay law of landslide surge along the channel.

**Key words:** Three Gorges Reservoir Area; landslide; surge; physical model experiment; maximum height of head wave; geological hazard; engineering geology.

## 0 引言

大型高速滑坡岩土体入水激起的涌浪不但在滑坡失事处造成人员伤亡和财产损失,而且在河道上下游长距离内传播,容易造成洪水、漫坝等更大的灾难. 2011 年三峡库区坝前水位首次蓄水达到 175 m,在高水位及以后水库水位变动因素影响下,库岸滑坡活动性必然显著加强. 因此研究三峡库区滑坡形成的涌浪特征,保护库区航运及受涌浪威胁的居民的生命财产安全有重要的理论意义和实际应用价值.

目前国内外学者对滑坡涌浪物理模型试验研究探索的内容主要集中在滑坡入水过程涌浪形态变化、最大涌浪高度及传播规律的研究,其中以滑坡入水激起的最大涌浪高度研究较为普遍. 在二维模型试验研究方面,涌浪经验公式中考虑的影响因素主要有弗劳德数、滑坡相对单宽体积、滑坡相对厚度、滑坡相对质量(Noda, 1970; Kamphuis and Bowering, 1971; 庞昌俊, 1985; 袁银忠和陈青生, 1990; Fritz *et al.*, 2004; Zweifel *et al.*, 2006). 在三维模型试验研究方面,涌浪经验公式中考虑的影响因素主要有滑坡入水速度、滑体入水体积、滑坡水下运动时间、滑坡迎水面积、滑动面倾角、极坐标角度、极坐标传播距离等(黄种为和董兴林, 1983; 王育林等, 1994; Panizzo *et al.*, 2005; Ataie-Ashtiani and Nik-Khah, 2008).

不难看出,目前的滑坡涌浪模型试验能够较为全面地考虑滑坡形状、速度、滑坡密度、水深等影响因素,但在河道形态对涌浪影响研究方面不够深入,河道大部分为规则矩形,许多模型试验仅仅是针对某项具体工程,应用性不强. 为了建立一种以滑坡和河道特征为主要参数来预测三峡库区滑坡涌浪特征的方法,本文以三峡库区重大地质灾害防治科研项目为依托,选取三峡库区白水河滑坡上下游河道为原型,在几何相似的前提下,采用正态模型,建立了 1:200 比例尺的河道物理模型,采用液压装置研制实验控制设备,开展了滑坡涌浪三维物理模型试验,量测了滑坡涌浪的形成特征和沿程传播特征. 基于量测实验数据,提出滑坡涌浪的经验预测公式,最后以白水河滑坡为例对涌浪公式进行了预测应用.

## 1 物理模型试验技术

### 1.1 试验相似条件和试验模型

模型依据重力相似准则设计为正态模型,与原型保持几何相似、水流运动相似与动力相似.

本试验的几何相似比为  $c_l = l_p/l_m = 200$ , 体积相似比  $c_V = V_p/V_m = c_l^3 = 200^3$ ; 原型与模型的密度相似比  $c_\rho$  和重力加速度相似比  $c_g$  均为 1. 基于弗劳德模型定律,模型与原型的弗劳德数相等是重力作用下动力相似的充要条件. 因此,  $Fr_p = v_p/\sqrt{g_p l_p} = Fr_m = v_m/\sqrt{g_m l_m}$ ; 得出速度相似比  $c_v = v_p/v_m = \sqrt{l_p/l_m} = \sqrt{200}$ ; 时间相似比  $c_t = t_p/t_m = \sqrt{2l_p/g_p}/\sqrt{2l_m/g_m} = \sqrt{c_l/c_g} = \sqrt{200}$ , 式中的下标中 m 表示模型, p 表示原型).

(1)河道模型:河道模型以三峡库区秭归县白水河滑坡为起点,沿长江河道上游取 3.5 km、下游取 0.5 km 为试验段,以 1:200 的比例尺将河道缩小成室内模型. 河道地形采用等高线方法制作,模拟至 220 m 高程(三峡库区调度最高水位为 175 m),滑坡本岸水下岸坡采用概化地形模型,为 45° 直线段,见图 1.

(2)滑块模型:为了研究不同规模的滑坡在不同情况下滑入水库的滑坡涌浪情况,滑坡体采用不同尺寸的滑块来进行制作,模型采用水泥和碎石作为材料,按密度相似进行设计与制作,设计制作过程中取固定值  $\rho = 2.2 \text{ g/cm}^3$ , 形状为长方体.



图 1 河道模型

Fig. 1 The river channel model



图2 滑动控制设备

Fig. 2 Sliding control equipment

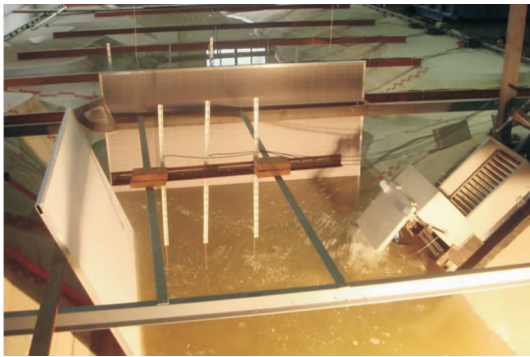


图3 滑坡首浪及爬坡浪高程的高速摄影背景板

Fig. 3 Background boards of landslide head wave and opposite climbing wave

## 1.2 试验控制系统

滑坡入水速度作为产生涌浪的初始边界条件,是试验中需要重点准确控制的变量。速度的控制通过滑速控制设备完成(图2),主要是调节滑坡在滑道上的位置,通过控制滑程而达到不同的试验速度值。滑道倾角可调范围为 $5^{\circ}\sim 75^{\circ}$ ,最大承重250 kg,可控制滑坡体入水速度为 $0.2\sim 2.5$  m/s。

## 1.3 试验量测系统

(1)涌浪过程的观测与首浪高度的量测:采用高速摄影仪拍摄滑坡入水产生涌浪的整个过程,在河道适当断面设置高程背景板作为辅助,背景板的网格分辨率为5 mm;在滑动方向上布置若干监测点,采用电容式波高仪记录不同位置涌浪高度随时间的变化过程(图3)。(2)对岸爬坡浪高度的量测:在滑坡体对岸设置宽度2 m的高程背景板(图3),通过摄像机记录涌浪爬坡过程。背景板的网格分辨率为5 mm。(3)沿程传播浪高度的量测:沿河道深泓线布置6个涌浪测点,通过波高仪记录深泓线上的波高变化,量测误差为 $\pm 0.2$  mm(模型值)。波高仪所测

数据通过电脑自动采集存储,并基于Labview软件分析涌浪波形和传播浪高度。

## 2 试验方案设计

参考Kamphuis and Bowering(1971)、潘家铮(1980)、黄种为和董兴林(1983)、庞昌俊(1985)、Panizzo et al. (2005)和Ataie-Ashtiani and Nik-Khah(2008)的工作,我们选取滑坡体长度 $l$ 、宽度 $w$ 、厚度 $t$ 、滑坡入水速度 $v$ 、滑坡入水处最大水深 $h$ 、滑动面倾角 $\alpha$ 、滑坡入水断面的河道宽度 $b$ 作为滑坡最大首浪高度物理模拟实验的影响因素,选取对岸岸坡坡角 $\beta$ 作为对爬坡浪高度的影响因素。

采用量纲分析方法,研究具有物理意义的滑坡相对长度、相对宽度、相对厚度、相对速度(弗劳德数)、滑面倾角,滑坡最大首浪高度可以写为下面的无量纲形式:

$$\frac{H_{\max}}{h} = f_1\left(\frac{v}{\sqrt{gh}}\right)f_2(\alpha)f_3\left(\frac{l}{b}, \frac{w}{b}, \frac{t}{h}\right), \quad (1)$$

(1)式中 $H_{\max}$ 为滑坡最大首浪高度, $g$ 为重力加速度。由于试验中河道模型是以三峡库区秭归县境内的白水河滑坡上下游河道地形为原型,所以滑坡入水断面的河道宽度可在实验现场量测。根据式(1),通过统计分析“三峡库区三期地质灾害防治监测预警工程专业监测崩塌滑坡灾害点涌浪分析与危害评估”报告中122个滑坡的长度、宽度、厚度、下滑速度、不同库水位工况下水深、岸坡坡角,同时考虑动力条件和场地限制,根据各因素大小分布特点,选取了其水平值(表1)。河道横断面宽度及无量纲参数的分布范围见表2。

为了避免完成试验要求所需的实验次数过多,并且使每个因素数据点的分布很均匀,我们按照正交试验设计方法,选用 $L_{49}(7^8)$ 正交表,制定了1:200比例尺的试验方案,每组试验做三次取其平均值。

## 3 试验结果

### 3.1 涌浪产生过程与最大首浪的定义

滑坡体入水后各特征时刻的水面形态见图4,分析各特征时刻的水面形态,可将涌浪的产生过程分为3个阶段:第1阶段为滑坡体入水阶段。滑坡体沿滑动面滑入水体过程中,持续将其携带的能量传输给周

表 1 各因素水平

Table 1 Levels of each factor

因素水平	水深(m)	宽度(m)	厚度(m)	长度(m)	速度(m/s)	滑动面倾角(°)	本岸岸坡坡角(°)	对岸岸坡坡角(°)
1	0.5	0.1	0.1	0.1	0.2	5	45	45
2	0.55	0.15	0.15	0.2	0.5	15	/	60
3	0.6	0.2	0.2	0.3	0.8	20	/	70
4	0.7	0.25	0.25	0.4	1.1	25	/	80
5	0.8	0.3	0.3	0.5	1.4	30	/	90
6	0.9	0.35	0.35	0.6	1.7	35	/	/
7	1	0.4	0.4	0.7	2	45	/	/

表 2 无量纲参数及滑坡横断面河道宽度的范围

Table 2 Ranges of the nondimensional parameters and landslide cross section channel width

$v/\sqrt{gh}$	$l/b$	$t/h$	$w/b$	$b(m)$
0.064	0.023	0.1	0.023	2.4
0.903	0.292	0.8	0.167	4.3

围水体. 滑坡体迎水面推挤水体,使其上部水体以舌状形态跃向对岸并溅落于水面或对岸岸坡,而其下部水体由静止开始运动(图 4a). 第 2 阶段为涌浪形成阶段. 随着滑坡体不断下滑,其尾部形成的空腔越来越大,空腔内外水位差较大,周围水体快速汇入空腔内并相互撞击产生巨大的水花团(图 4b),水花团并不向前行而是很快在原地跌落,与此同时滑坡体携带的能量不断传递给周围水体,在其周围形成涌浪(图 4c),其中以滑坡体滑动方向上的涌浪高度为最大,此即为最大首浪(图 4d),最大涌浪高与滑坡发生前河道初始水位的高差称为最大首浪高度. 涌浪以振动波的形式向四周传播,同时伴随少量的水体流动,因此也兼有推移波的属性. 定义最大首浪主要从水体携带能量的大小与致灾角度考虑. 滑坡体入水阶段激起的水舌与滑坡体尾部空腔内水体撞击产生的水花虽然较高,但携带的能量及可能致灾的程度与范围均相对较小,且明显不具备波浪的有关特征,因此未将它们定义为最大首浪. 第 3 阶段为涌浪传播与衰减阶段. 涌浪在向四周传播过程中浪高逐渐衰减. 定义涌浪前峰达到岸坡的最大高度与滑坡发生前河道初始水位的高差称为涌浪爬高.

3.2 三峡库区滑坡最大首浪计算公式

国际上最早提出滑坡最大首浪计算公式的是 Noda(1970)基于室内渠道二维模型实验与理论推导而得,见公式(2);国内应用比较广的是潘家铮(1980)提出的滑坡最大首浪计算公式,见公式(3)和(4).

$$\frac{H_{max}}{h} = 1.17 \frac{v}{\sqrt{gh}}, \tag{2}$$

$$\text{水平滑坡: } \frac{H_{max}}{h} = 1.17 \frac{v}{\sqrt{gh}}, \tag{3}$$

$$\text{垂直滑坡: } \frac{H_{max}}{h} =$$

$$\begin{cases} \frac{v}{\sqrt{gh}}, & 0 < \frac{v}{\sqrt{gh}} < 0.5; \\ f(\frac{v}{\sqrt{gh}}), & 0.5 < \frac{v}{\sqrt{gh}} < 2; \\ 1, & \frac{v}{\sqrt{gh}} > 2. \end{cases} \tag{4}$$

可以看出,(2)、(3)、(4)式中滑坡最大首浪高度只与滑坡的入水速度、水深有关,而没有考虑滑坡的规模、形态、滑坡入水角度等重要几何参数,这使得水库滑坡最大首浪高度计算预测存在很大的误差.

为此,本文依据物理模拟实验的观测数据,在潘家铮公式的基础上引入滑坡规模函数和滑动面倾角函数进行修正. 对于滑坡规模函数,采用滑坡相对单宽体积  $\frac{lt}{bh}$  和滑坡相对宽度  $\frac{w}{b}$  的幂函数形式. 关于滑动面倾角函数,由于首浪高度随滑动面倾角增加而增大,我们采用函数  $\sin^2\alpha + m\cos^2\alpha$  ( $m$  为待定系数,且  $0 < m < 1$ ),此函数的变化范围为  $[\frac{m+1}{2}, 1]$ ,并且在  $\alpha \in [0^\circ, 90^\circ]$  范围内为增函数. 因此滑坡最大首浪高度的无量纲形式在(1)式的基础上可修改为:

$$\frac{H_{max}}{h} = 1.17 \frac{v}{\sqrt{gh}} (\sin^2\alpha + m\cos^2\alpha) g_1(\frac{lt}{bh}) g_2(\frac{w}{b}). \tag{5}$$

将最大首浪高度实验数据转化为无量纲形式,应用最优化分析软件进行非线性拟合,得到滑坡最大首浪计算公式:

$$\frac{H_{max}}{h} = 1.17 \frac{v}{\sqrt{gh}} (\sin^2\alpha + 0.6\cos^2\alpha) (\frac{lt}{bh})^{0.15} (\frac{w}{b})^{0.15}. \tag{6}$$

(6)式的相关系数为 0.76,由于试验中滑坡规模偏



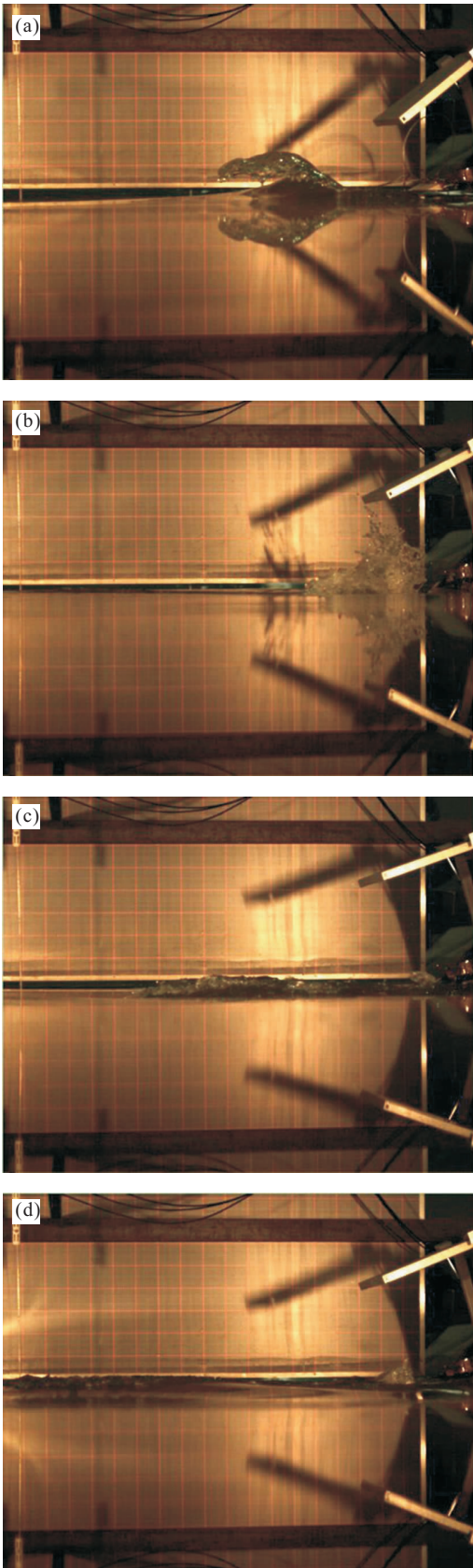


图 4 滑坡涌浪过程形态变化

Fig. 4 Morphological changes of landslide-induced surge

小,所有滑块均全部入水,在具体应用于滑坡实例计算时,这里的长度  $l$ 、宽度  $w$ 、厚度  $t$  应取滑坡的入水长度、入水宽度和入水厚度,水深  $h$  为滑坡入水处最大水深.由表 2 可知,相对于滑坡规模,河道比较开阔,因此文中提出的最大首浪计算公式适用于比较宽广的河道.

### 3.3 三峡库区滑坡对岸爬坡浪计算公式

本实验中影响对岸爬坡浪高度的因素除了对岸岸坡坡角外,还有岸坡前涌浪高度.由于物理模型试验中河道断面比较开阔,因此很有必要研究涌浪由本岸向对岸的横断面传播浪变化规律.不同水深工况下,河道横断面 3 个波高仪的相对距离见表 3.采用多元非线性回归方法对传播浪高度进行数据拟合,得到横断面传播浪计算公式,见式(7),相关系数为 0.95.

$$\frac{H_p}{h} = 1.47 \frac{H_{max}}{h} \left(\frac{x}{h}\right)^{-0.5} \left(\frac{x}{h} > 2.13\right), \quad (7)$$

式(7)中,  $H_p$  为滑坡横断面某处涌浪高度;  $H_{max}$  为滑坡最大首浪高度;  $x$  为本岸向对岸的传播距离;  $b$  为滑坡发生点河道宽度;  $h$  为滑坡入江点最大水深.

表 3 河道横断面从本岸向对岸的相对传播距离

Table 3 Relative propagation distance from this bank to opposite bank in river channel cross section direction

水深 $h$ (m)	相对距离 $x$ (h)		
0.5	2.92	3.84	4.5
0.55	2.69	3.44	4.02
0.6	2.53	3.25	3.8
0.7	2.31	2.93	3.4
0.8	2.15	2.69	3.1
0.9	2.03	2.51	2.88
1	2.19	2.62	2.95

表 4 沿程传播浪相对传播距离

Table 4 Relative propagation distance of propagation wave along the channel

水深(m)	相对距离(h)				
0.5	4	8	12	18	24
0.55	3.64	7.27	10.91	16.36	21.82
0.6	3.33	6.67	10	15	20
0.7	2.86	5.71	8.57	12.86	17.14
0.8	2.5	5	7.5	11.25	15
0.9	2.22	4.44	6.67	10	13.33
1	2	4	6	9	12

利用式(7)求得对岸岸坡前浪高,采用多元非线性回归方法将对岸爬坡浪高度进行数据拟合,得到

对岸爬坡浪计算公式,见式(8),相关系数为 0.93.

$$\frac{R}{h} = 2.3 \frac{H_c}{h} \left(\frac{90}{\beta}\right)^{0.2}, \quad (8)$$

式(8)中, $R$  为正对岸爬坡浪高度, $H_c$  为正对岸岸坡前波高,由横断面传播浪公式(7)计算, $\beta$  为对岸岸坡坡角,适用范围为  $45^\circ < \beta < 90^\circ$ , $h$  为滑坡入江点最大水深.

### 3.4 三峡库区沿程传播浪计算公式

滑坡沿程传播浪衰减规律是基于距离 5 个波高仪的波高数据来展开研究的.不同水深工况下,河道横断面 5 个波高仪的相对距离见表 4.采用多元非线性回归对传播浪高度进行数据拟合,得到沿程传播浪计算公式,见式(9),相关系数为 0.93.

$$\frac{H_r}{h} = \frac{H_{\max}}{h} e^{-0.4\left(\frac{x}{h}\right)^{0.35}}, \quad (9)$$

式(9)中, $H_r$  为河道沿程某处传播浪高度, $H_{\max}$  为滑坡最大首浪高度, $x$  为沿程某处至滑坡点的距离, $h$  为滑坡入江点最大水深.

## 4 白水河滑坡涌浪预测应用

### 4.1 白水河滑坡工程地质条件

白水河滑坡位于三峡库区秭归县沙镇溪镇白水河村,距三峡大坝坝址 56 km.该滑坡处于长江南岸,地形上南高北低,后缘以岩土分界处为界,东西两侧以基岩山脊为界.后缘高程约为 390 m,前缘高程约为 70 m,其南北向长度 780 m,东西向宽度 700 m,体积约  $1\,260 \times 10^4 \text{ m}^3$  (图 5).

白水河滑坡处于单斜顺向坡地形,呈阶梯状分布展布,滑体主要由第四系残坡积土、滑坡堆积土组成,包括粉质粘土和碎石土.根据钻孔资料和野外监测数据所揭示的信息,滑带有上下两层:浅层滑带为堆积体与块裂基岩的接触带,以软塑—可塑的粉质粘土为主,从钻孔倾斜仪测得位移看滑坡体的变形主要集中在此滑带;深层滑带为块裂泥质粉砂岩与下伏粉砂岩的接触带,未见明显的变形.

滑坡宏观变形迹象明显,根据滑坡体地表宏观变形特征和地表监测位移,白水河滑坡可以分为 2 个大区(图 5):(1)强烈变形的滑坡中前部,把此区域划分为预警区(A区),其东侧和后缘边界基本贯通,西侧边界羽状裂隙断续展布.这个区包括于 2007 年 6 月 30 日发生滑塌的 C 区,垮塌量约为  $10 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,该破坏区位于预警 A 区的后部;(2)滑坡的后缘和西侧相对较稳定,累计变形量小,且变形缓慢,变形速度仅为

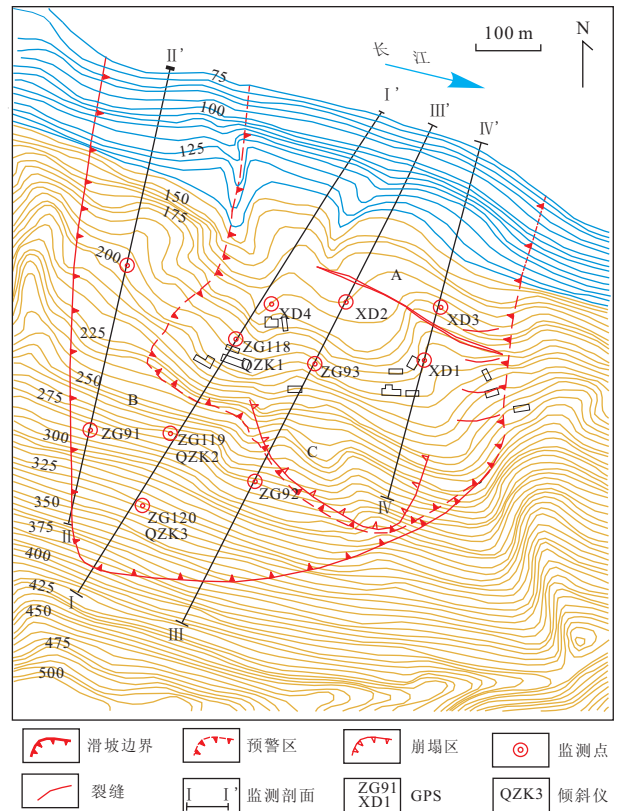


图 5 白水河滑坡监测点布置(据三峡库区地质灾害防治工作指挥部)

Fig. 5 Schematic of monitoring arrangement in Baishuihe landslide

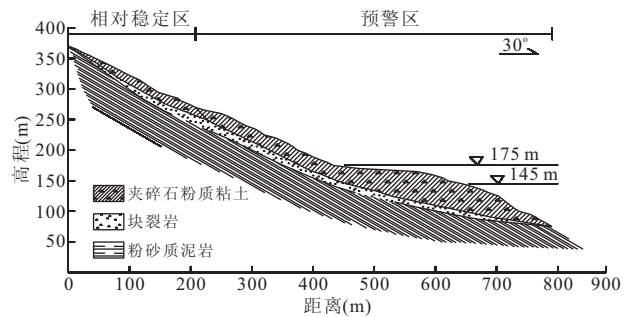


图 6 白水河滑坡 III-III' 剖面

Fig. 6 The III-III' cross section of Baishuihe landslide

1.5~4 mm/a,该区定为相对稳定的 B 区.

因滑坡 B 区变形微小,现在处于相对稳定阶段,滑坡的主要风险集中在滑坡前缘的预警区,故选择 III-III' 剖面(图 6)对平面图中预警区在不同工况下的滑坡涌浪进行预测.

### 4.2 滑坡稳定性计算

综合考虑滑坡体的变形主要集中在浅层滑带、水库特征水位等,对白水河滑坡 III-III' 剖面预警区进行条分(图 7).由于该滑坡目前处于变形阶段,滑

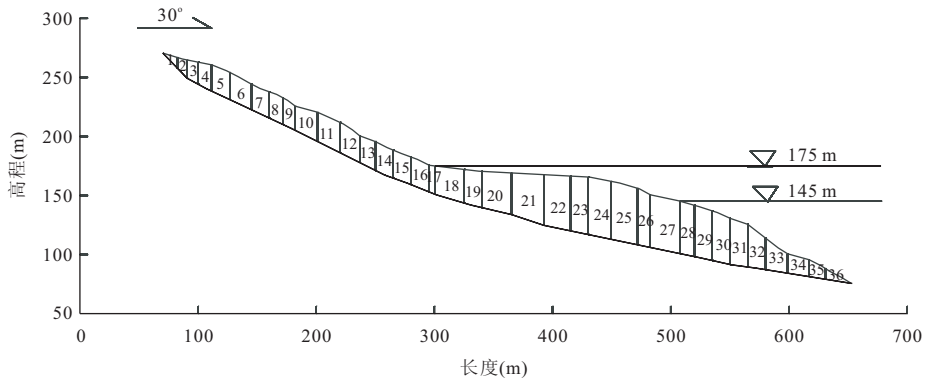


图7 计算剖面条分图

Fig. 7 Slice profile of calculation cross section

坡稳定性计算参数根据宏观变形情况,采用反演分析方法得到滑动面的剪切强度参数比较可靠,反演得到的计算参数结果是:天然状态  $C=32.3 \text{ kPa}$ ,  $\varphi=14.5^\circ$ , 饱和状态  $C=27.5 \text{ kPa}$ ,  $\varphi=13^\circ$ . 根据三峡水库水位运行曲线,坝前水位每年在 145~175 m 之间周期性升降变化,其中每年 6 月到 9 月为汛期,库水位在 145 m 与 162 m 水位之间涨落. 每年 11 月至次年 1 月,库水位抬高至正常蓄水位 175 m 运行. 因此我们选取了 145 m+暴雨、175 m 天然工况、162~145 m+暴雨 3 种工况作为稳定性计算工况,计算结果见表 5.

4.3 滑坡速度与入江方量计算方法

滑坡速度采用条分方法(潘家铮,1980;殷坤龙等,2008),沿滑面方向和垂直滑面方向建立平衡方程,假定当前条块所受的前后块体作用力合力沿滑面方向,并认为垂直滑面方向的加速度为零,对块体加速度进行求解,然后用基本运动学原理,并考虑水阻力,求出块体运动速度.

滑坡入江方量依据滑坡速度计算过程中入水条块个数确定滑坡入江长度,入江厚度取这些条块厚度的平均值,滑坡入江宽度则取入江条块在平面图上对应的宽度平均值. 不同工况下的平均速度和入江方量见表 6.

4.4 白水河滑坡涌浪计算

对滑坡入江点的河床地形进行量测,选定了计算滑坡首浪、对岸爬坡浪和传播浪的基本参数,对不同工况下滑坡最大首浪高度、对岸爬坡浪(表 7)及沿程传播浪高度进行计算,沿程传播浪计算结果见图 8. 由图 8 可知,滑坡涌浪沿程衰减先快后慢,大体呈负指数形式. 涌浪在距滑坡约 3 km 范围内衰减较快. 到达 3 km 时,涌浪传播浪高度只有滑坡发生点的 30%左右,之后衰减较慢.

表5 稳定性计算成果

Table 5 Calculation results of landslide stability

工况	145 m+暴雨	175 m	162~145 m+暴雨
Fs	0.89	0.98	0.85

表6 滑坡速度与入江规模计算

Table 6 Calculation results of landslide speed and magnitude entering into the water

工况	入江长度(m)	入江宽度(m)	入江厚度(m)	入江速度(m/s)
145 m+暴雨	230.73	475.95	37.08	7.88
175 m	103.51	493.21	24.38	2.75
162~145 m+暴雨	250.07	477.65	35.98	8.71

表7 滑坡最大首浪与对岸爬坡浪计算

Table 7 Calculation results of landslide head wave and opposite climbing wave height

工况	最大首浪高度(m)	对岸爬坡浪高度(m)
145 m+暴雨	15.4	34.5
175 m	3.6	6.4
162~145 m+暴雨	17.2	38.4

5 结论

(1)通过对三峡库区已经开展勘探的潜在滑坡地质资料的统计分析,考虑了滑坡长度、宽度、厚度、入水速度、滑动面倾角、水深、对岸岸坡坡角等影响因素,按照正交试验设计方法设计了试验方案.(2)依据试验方案,以三峡库区白水河滑坡河道为原型,建立了 1:200 比例尺的河道物理模型,采用试验控制系统、试验量测系统开展了三峡库区滑坡涌浪三维物理模型试验.(3)通过分析滑坡涌浪形态变化,明确了滑坡首浪的含义,采用量纲分析方法和多元



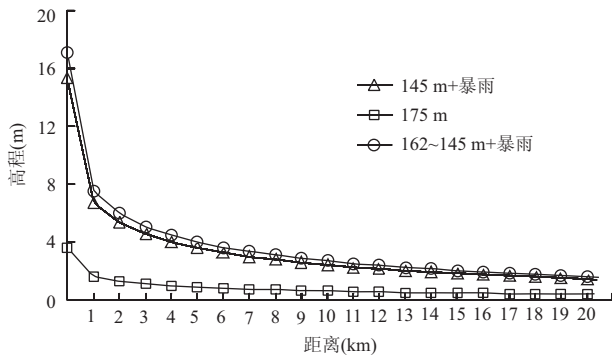


图 8 不同工况下沿程传播浪高度计算结果

Fig. 8 Calculation results of propagation wave height along the river channel under different conditions

非线性回归分析方法,以 Noda、潘家铮提出的经典涌浪计算公式为基础,提出了三峡库区滑坡涌浪计算公式,包括最大首浪高度、对岸爬坡浪和沿程传播浪三部分。(4)以三峡库区正在变形的白水河滑坡为例进行滑坡涌浪预测,结果表明白水河滑坡预警区在 162~145 m+暴雨工况下最危险,最大首浪高度为 17.2 m,对岸爬坡浪为 38.4 m,涌浪在距滑坡约 3 km 范围内衰减较快,到达 3 km 时,涌浪传播浪高度约为滑坡发生点的 30%。

本试验重在研究滑坡在斜坡上运动以某一速度全部入水后产生的涌浪形态变化和波高特征。实际上,三峡库区多数滑体前缘处在库水位下,失稳运动后只是部分滑入水库,目前在计算过程中我们主要是通过分析滑坡的地质环境和变形破坏机理来考虑这些因素,这有待于进一步研究。

## References

- Ataie-Ashtiani, B., Nik-Khah, A., 2008. Impulsive waves caused by subaerial landslides. *Environmental Fluid Mechanics*, 8 (3): 263–280. doi:10.1007/s10652-008-9074-7
- Fritz, H. M., Hager, W. H., Minor, H. E., 2004. Near field characteristics of landslide generated impulse waves. *Journal of Waterway, Port, Coast, and Ocean Engineering*, 130(6): 287–302.
- Huang, Z. W., Dong, X. L., 1983. Experimental study of water waves generated by landslide in the reservoir. The collected works of the institute of water resources and hydropower research (Vol. 13: hydraulics). Water Resources and Hydropower Press, Beijing, 157–170 (in Chinese).
- Kamphuis, J. W., Bowering, R. J., 1971. Impulse waves generated by landslides. ASCE, Proceedings of the 12th Coastal Engineering Conference, 1: 575–588.

- Noda, E., 1970. Water waves generated by landslides. *Journal of the Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division*, 96(4): 835–855.
- Pan, J. Z., 1980. Sliding stability of construction and landslide analysis. Water Conservancy Press, Beijing (in Chinese).
- Pang, C. J., 1985. Experiment research of two dimensional slope and landslide induced water waves. *Journal of Hydraulic Engineering*, 11: 54–59 (in Chinese).
- Panizzo, A., DeGirolamo, P., Petaccia, A., 2005. Forecasting impulse waves generated by subaerial landslides. *Journal of Geophysical Research*, 110, C12025. doi: 10.1029/2004JC002778
- Wang, Y. L., Chen, F. Y., Qi, H. L., et al., 1994. The effect of rockfall and landslide on channel and the study on the characteristics of surge generated by landslide. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 5(3): 95–100 (in Chinese with English abstract).
- Yin, K. L., Du, J., Wang, Y., 2008. Analysis on surge triggered by dayantang landslide in Shuibuya reservoir of Qingjiang River. *Rock and Soil Mechanics*, 29 (12): 3266–3270 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, Y. Z., Chen, Q. S., 1990. Experimental study of slide-waves in reservoirs and numerical calculation. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 18(5): 46–53 (in Chinese with English abstract).
- Zweifel, A., Hager, W. H., Minor, H. E., 2006. Plane impulse waves in reservoirs. *Journal of Waterway, Port, Coast, and Ocean Engineering*, 132(5): 358–368. doi: 10.1061/(ASCE)0733-950X(2006)132:5(358)

## 附中文参考文献

- 黄种为,董兴林,1983. 水库库岸滑坡激起涌浪的试验研究. 水利水电科学研究院科学论文集第 13 集(水力学). 北京:水利电力出版社,157–170.
- 潘家铮,1980. 建筑物的抗滑稳定和滑坡分析. 北京:水利出版社.
- 庞昌俊,1985. 二维斜滑坡涌浪的试验研究. 水利学报, 11: 54–59.
- 王育林,陈凤云,齐华林,等,1994. 危岩体崩滑对航道影响及滑坡涌浪特征研究. 中国地质灾害与防治学报, 5(3): 95–100.
- 殷坤龙,杜娟,汪洋,2008. 清江水布垭库区大堰塘滑坡涌浪分析. 岩土力学, 29(12): 3266–3270.
- 袁银忠,陈青生,1990. 滑坡涌浪的数值计算及试验研究. 河海大学学报(自然科学版), 18(5): 46–53.