



水流动力条件下滑坡涌浪初始波浪特征研究^{*}

王梅力^{1,2}, 田野², 杨胜发², 王平义²

(1. 重庆交通大学 建筑与城市规划学院, 重庆 400074;

2. 国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074)

摘要:借助水流动力条件下弯道浅水区三维散体岩质滑坡涌浪模型试验系统,研究水流动力条件下滑坡涌浪的初始涌浪基本特征和首浪高度的确定方法。根据物理模型试验观测资料,统计计算得到初始涌浪的最大波高、最大周期、有效波高、有效周期及波陡特征值;分析滑坡倾角、滑坡方量、河道水深、水流流速对首浪高度的影响;采用无量纲及多元回归分析方法,给出首浪高度的计算公式。采用长江新滩滑坡涌浪实测资料,将本文给出的首浪高度计算公式与 Noda 公式、Slingerland 公式、潘家铮公式、殷坤龙公式、中国水利水电科学研究院公式进行对比,表明本文公式计算值与实测值相差最小。

关键词:滑坡涌浪;水流流速;初始涌浪;首浪高度

中图分类号: U 656.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)08-0129-06

Initial wave characteristics of landslide surges under current condition

WANG Mei-li^{1,2}, TIAN Ye², YANG Sheng-fa², WANG Ping-yi²

(1.College of Architecture and Urban Planning, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2.National Engineering Research Center of Inland Waterway Regulation, Chongqing 400074, China)

Abstract: The basic characteristics of initial wave and the determination method of the first wave height of landslide surges under current condition are studied by means of the 3D model test system of wave induced by granular rock landslide in curved shallow water area. According to the observation data of physical model test, we calculate statistically the maximum wave height, maximum period, effective wave height, effective period and wave steepness characteristic values of initial surge, analyze the effects of landslide angle, landslide volume, river depth and current velocity on the height of the first wave, and give the calculation formula of head wave height by using dimensionless and multiple regression analysis. Using the measured data of surge wave in Xintan landslide of the Yangtze River, we compare the formulas given in this paper with Noda formula, Slingerland formula, Pan Jiazheng formula, Yin Kunlong formula and formula of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, and come to the conclusion that the difference between the calculated and measured values in this paper is the least.

Keywords: landslide surge; flow velocity; initial surge; first wave height

在河流、水库、湖泊或者海岸等具有一定水深的区域发生的山体滑坡,以较高的速度滑入水中时,水体受到滑坡体扰动、挤压发生位移,将会产生巨大的涌浪并沿岸传播,损毁水利、水运、

市政等工程设施,威胁航道通航安全,在较大范围内造成严重涌浪灾害^[1-4]。滑坡涌浪的致灾程度与其初始涌浪基本特征及首浪高度直接相关。

Noda^[5]在一半无限长的静止水体中进行滑坡涌浪

收稿日期: 2021-12-25

***基金项目:** 国家自然科学基金项目(51479015、52009014);重庆市教育委员会科学技术研究项目(KJQN-201900745)

作者简介: 王梅力(1991—),女,博士,工程师,从事资源环境与生态航道研究。

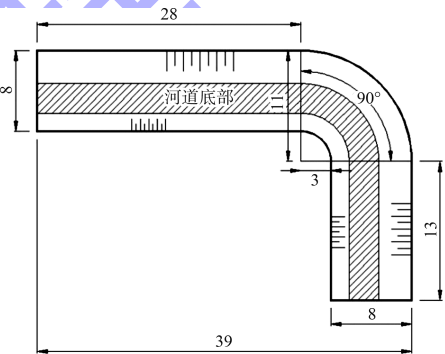
试验, 给出初始涌浪高度计算公式; Slingerland 等^[6]结合美国 Libby 坝和 Koocasusa 湖的滑坡涌浪物理模型试验资料, 分析得出适用于湖泊或滨海中的滑坡涌浪最大涌浪高度经验公式; 潘家铮^[7]基于 Noda 的研究, 利用单向流分析成果和一些近似假定, 提出初始涌浪的近似估算方法; 殷坤龙等^[8]应用运动力学相关理论进行分析, 给出初始涌浪最大高度的计算表达式; 中国水利水电科学研究院通过对美国的利贝坝及加拿大的麦卡坝等多座水库的滑坡涌浪模型试验资料的研究, 提出最大首浪高度计算公式^[9]; Grilli 等^[10]分别采用二维和三维解析方法对水下滑坡形成的涌浪特征进行了分析; Evers 等^[11]在一波浪池中进行了快速入水滑坡形成的巨大水波的特征研究; 李荣辉等^[12]基于近坝库区块体滑坡涌浪水槽概化模型试验, 分析滑坡形状、体积、下滑高度和库区水深等因素对涌浪高度的影响; 彭辉等^[13]设计制作与实际情况吻合度较高的河道型水库物理模型, 研究滑坡体的几何形状及入水角度、河道水深等因素对滑坡体形成的涌浪及首浪高度的影响; 戴磊等^[14]利用水槽块体滑坡模型试验, 对滑坡导致的涌浪形成及首浪波高进行了分析。

目前, 国内外对滑坡涌浪近场波特征的研究都未能考虑水流动力条件下波浪要素的变化特征^[15-16]。但是, 当水流流速较大时, 受水流动力的影响, 初始涌浪波高、波长和周期等将与静水情况下不同。笔者借助水流动力条件下浅水区三维散体岩质滑坡涌浪物理模型试验, 探讨初始涌浪的基本特征和首浪高度的计算方法。

1 模型设计

模型以长江三峡库区干流复杂水域环境的典型弯道段为原型。根据相似理论, 为保证试验现象与原型试验现象一致, 模型按照几何相似、运动相似和动力相似进行正态相似设计。考虑试验的供水条件、试验场地、仪器设备和测试技术等因素, 在满足相似条件的前提下, 模型基本比尺选取 1:70。在国家内河航道整治工程技术研究中心

建造试验水槽, 水槽横断面为梯形, 顶宽为 8.0 m、底宽为 2.94 m、槽深 1.6 m, 水槽两侧边坡分别为 33°(左岸/凹岸)和 20°(右岸/凸岸); 河道中心线长 60 m, 弯道以上顺直段长 28 m, 弯道以下顺直段长 13 m, 平面弯曲角度为 90°, 河道底坡坡降 1.5‰。模型平面布置见图 1a)。滑架和滑槽位于河道左岸顺直段与弯曲段交界处, 根据长江三峡库区岩质滑坡体的裂隙构造及发育程度, 试验中散体岩质滑坡模型采用不同尺寸的刚性块体组合而成。该弯曲波浪水槽模型既考虑了水流动力对滑坡涌浪产生及传播的影响, 又考虑了浅水区滑坡、河道弯曲平面形态及岸坡形状等对滑坡涌浪产生及传播的影响。试验模型实体如图 1b) 所示。



a) 平面布置



b) 模型实体

图 1 河道模型 (单位: m)

试验选取的岩质滑坡体体积分别为 0.2、0.4、0.6、0.9 m³, 滑面倾角分别为 30°、40°、50°和 60°; 模型进口断面控制水流流速分别为 0.18、0.24、0.30、0.36 m/s; 模型控制断面水深分别为 15、20、25、30 cm。采用四因子四水平正交试验

设计和单一变量设计相结合的方法给出 28 组试验工况。采用超声波测波仪, 对滑坡入水后产生的近场初始涌浪特征值进行测量, 每次试验的采集时间为 200 s, 采样频率 50 Hz, 在不包含气泡的动态波场中测波仪的测量精度可达±1.0 mm。

2 初始涌浪基本特征分析

2.1 波高及周期

采用波浪理论中特征波法将波高和周期作为

描述波浪特征时的主要定义值。散体岩质滑坡涌浪极其复杂, 具有非线性三维特征和明显的随机性, 为随机波浪的一种类型。由于其波形的不规则性, 通常采用跨零点法进行波高及周期的提取^[17]。根据特征波的定义, 选取初始涌浪的最大波高、最大周期、有效波高和有效周期作为初始涌浪的特征值。对水流动力条件下 28 组工况的初始涌浪的波高和周期的特征值进行统计分析, 结果见表 1。

表 1 水流动力条件下初始涌浪特征值试验成果

试验工况	流速 $v_t/(m \cdot s^{-1})$	水深 h/cm	方量/ m^3	滑坡角度 $\alpha/(^{\circ})$	首浪高度 H/m	有效 波高/ m	波浪 周期 T/s	有效 周期/ s	首浪 波长 L/m	波陡 H/L
M1	0.18	15	0.2	30	0.050	0.011	1.369	1.073	1.56	0.032
M2	0.18	20	0.4	40	0.032	0.012	1.855	1.524	2.52	0.013
M3	0.18	25	0.6	50	0.108	0.018	1.411	1.018	2.02	0.053
M4	0.18	30	0.9	60	0.065	0.016	1.221	0.974	1.80	0.036
M5	0.24	15	0.4	50	0.069	0.019	1.799	1.412	2.12	0.033
M6	0.24	20	0.2	60	0.104	0.017	1.366	1.165	1.78	0.059
M7	0.24	25	0.9	30	0.113	0.019	1.614	1.389	2.35	0.048
M8	0.24	30	0.6	40	0.118	0.014	1.807	1.516	2.88	0.041
M9	0.30	15	0.6	60	0.072	0.020	1.181	0.984	1.33	0.054
M10	0.30	20	0.9	50	0.054	0.041	0.834	0.598	0.94	0.057
M11	0.30	25	0.2	40	0.071	0.010	1.472	1.127	2.13	0.033
M12	0.30	30	0.4	30	0.080	0.012	1.379	1.134	2.12	0.038
M13	0.36	15	0.9	40	0.076	0.016	0.925	0.611	1.00	0.076
M14	0.36	20	0.6	30	0.095	0.020	1.028	0.783	1.27	0.075
M15	0.36	25	0.4	60	0.094	0.016	1.145	0.891	1.57	0.060
M16	0.36	30	0.2	50	0.083	0.012	1.531	1.245	2.40	0.035
M17	0.18	25	0.4	40	0.090	0.017	1.124	0.891	1.52	0.059
M18	0.24	25	0.4	40	0.101	0.015	1.630	1.305	2.37	0.043
M19	0.30	25	0.4	40	0.098	0.015	1.420	1.179	2.04	0.048
M20	0.36	25	0.4	40	0.064	0.013	0.914	0.661	1.15	0.056
M21	0.30	15	0.4	40	0.084	0.018	1.798	1.435	2.12	0.040
M22	0.30	20	0.4	40	0.073	0.020	1.736	1.494	2.30	0.032
M23	0.30	30	0.4	40	0.082	0.012	1.738	1.471	2.77	0.030
M24	0.30	25	0.6	40	0.104	0.014	1.524	1.284	2.21	0.047
M25	0.30	25	0.9	40	0.093	0.018	1.069	0.791	1.43	0.065
M26	0.30	25	0.4	30	0.101	0.017	1.424	1.186	2.05	0.049
M27	0.30	25	0.4	50	0.086	0.015	1.525	1.289	2.22	0.039
M28	0.30	25	0.4	60	0.076	0.012	1.371	1.093	1.96	0.039

1)最大波高和最大周期。将滑坡涌浪波列中的波高和周期的最大值作为初始涌浪的最大波高和最大周期。初始涌浪的最大波高也是滑坡入水点处第一列波的最大涌浪高, 即首浪高度。由表 1

可知: 水流动力条件下散体岩质滑坡涌浪模型试验所测得的最大波高范围为 3.2~11.8 cm, 根据模型比尺, 则原型的最大初始波高范围为 2.24~8.26 m; 模型波高的平均值为 8.34 cm, 相应原型

的平均波高为 5.84 m；模型周期的范围为 0.83 ~ 1.85 s，原型的周期范围则为 3.04~15.47 s。

2)有效波高和有效周期。将波列中的波高由大到小依次排列，其中最大的 1/3 部分波高和周期的平均值作为有效波高和有效周期。由表 1 对初始涌浪的有效波高和有效周期进行统计的结果可知：有效波高范围为 1.0~4.1 cm、有效周期范围为 0.60~1.52 s；反算原型的有效波高范围为 0.70~2.87 m、有效周期范围为 5.02~12.72 s。对所有工况下散体岩质滑坡涌浪的有效波高和有效周期取平均值(表 2)，初始涌浪的有效波高约为最大波高的 1/5，有效周期约为最大周期的 4/5。

表 2 初始涌浪特征极值

特征极值	最大波高/m	有效波高/m	周期/s	有效周期/s
极大值	0.12	0.04	1.86	1.52
极小值	0.03	0.01	0.83	0.60
平均值	0.08	0.02	1.40	1.13

2.2 波陡

随机波浪的波陡是指波浪的波高 H 与其波长 L 的比值。波陡的极限值为 0.142^[18]。本文散体岩质滑坡涌浪试验的波陡计算统计见表 1。由表 1 可知，各试验工况得到的初始涌浪的波陡在 0.013~0.076，均小于波浪波陡的极限值，表明初始涌浪形成后不容易发生破碎现象。

3 水流动力条件下首浪高度分析

3.1 首浪高度的影响因素

从已有研究成果可知，影响散体岩质滑坡涌浪初始浪高大小的主要因素有岩体滑坡的体积、滑面坡度、水体介质的状态及交换程度等。本文试验选取岩体滑坡倾角、滑坡方量、河道水深、水流流速作为主要控制变量。

定义涌浪传播方向与水流流向夹角为 θ (图 2)，涌浪顺水流方向传播时 $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ ，涌浪逆水流方向传播时 $90^\circ < \theta < 180^\circ$ 。根据试验资料可绘制各方位角上的初始涌浪首浪波高与滑坡倾角、滑坡方量、河道水深、水流流速之间的关系。

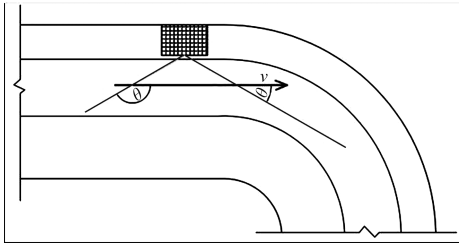


图 2 水流流向与涌浪波向夹角

3.1.1 滑坡倾角

各方位角上的初始涌浪首浪波高与滑坡倾角之间的关系见图 3。由图 3 可知，各方位角上的初始涌浪首浪波高均随着滑坡倾角的增加而增大，因为滑坡倾角越大，滑坡体下滑摩擦力消耗的能量越小，传递给水体的能量越多，产生涌浪的波高越大。

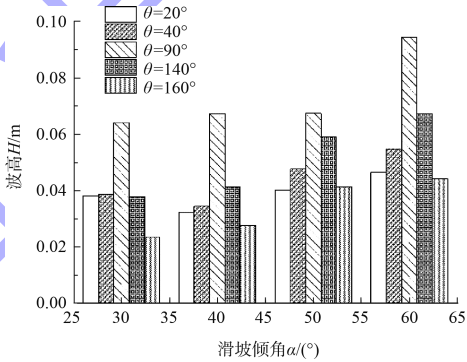


图 3 滑坡倾角对初始涌浪首浪波高的影响

3.1.2 滑坡方量

各方位角上的初始涌浪首浪波高与滑坡方量之间的关系见图 4。由图 4 可知，各方位角上的初始涌浪首浪波高随着滑坡方量的增大而增大，因为滑坡体方量越大所具有的势能越大，传递给水体的能量越多，进而产生的涌浪越高。

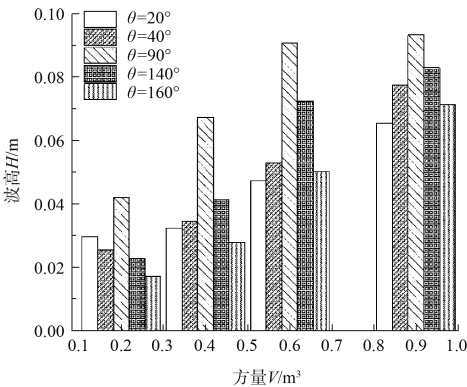


图 4 滑坡方量对初始涌浪首浪波高的影响

3.1.3 河道水深

各方位角上的初始涌浪首浪波高与河道水深之间的关系见图 5。由图 5 可知, 各方位角上的初始涌浪首浪波高随着河道水深的增大而减小, 因为河道水深越大, 能量交换的水介质越多, 表面重力波分得的能量越小, 表现为产生的涌浪波高越小。

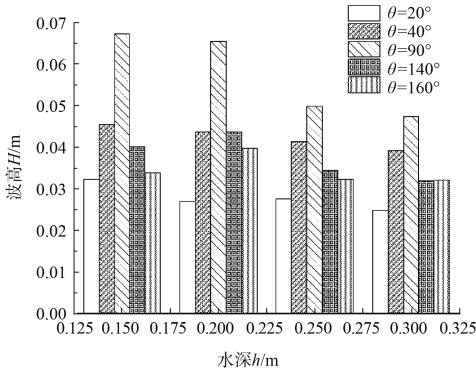


图 5 河道水深对初始涌浪首浪波高的影响

3.1.4 水流流速

各方位角上的初始涌浪首浪波高与水流流速之间的关系见图 6。由图 6 可知, 各方位角上的初始涌浪首浪波高随着水流流速的增大而减小, 说明在初始涌浪形成过程其不仅与滑坡体因素有关, 受库水水流影响也较大, 这与静水滑坡产生了鲜明的对比。滑坡体在入水兴波过程中受水流的影响, 一部分能量抵抗水流改变瞬时流态, 另一部分能量交换作用兴波, 故而随着库区流速的增大, 更多的能量用于抵抗水流, 兴波过程分得能量更少, 所产生的初始涌浪波高越小。

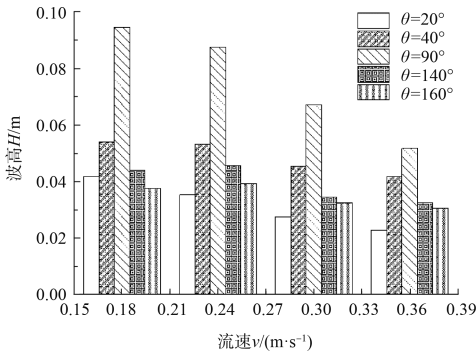


图 6 水流流速对初始涌浪首浪波高的影响

由图 3~6 可知, 处于滑坡轴线方向 ($\theta = 90^\circ$) 上的初始涌浪首浪波高最大。随着与滑坡轴向夹

角的增大, 初始涌浪首浪波高逐渐减小, 这也说明了波的主方向性。滑坡在作用水体产生涌浪的过程中, 能量主要分布在与轴向一定夹角的范围, 称为主波区。主波区波能大、破坏力强; 夹角范围以外的区域称为次波区, 次波区波能较小、破坏力较弱。

3.2 首浪高度的分析计算

目前, 国内外对首浪高度的研究大多采用物理模型试验经验法。常用的首浪高度经验计算公式主要有 Noda 公式、Slingerland 公式、潘家铮公式、殷坤龙公式、中国水利水电科学研究院公式等。但是, 这些经验计算公式中的参数都是通过静水条件下的滑坡涌浪物理模型试验而确定的。

本文采用物理模型试验经验算法, 确定水流动力条件下滑坡涌浪的首浪高度, 除考虑静水条件下滑坡体的宽度 b 、滑坡体的厚度 w 、滑坡体的速度 v_s 、滑面角度 α 和河道水深 h 等主要影响因子外, 还主要考虑了水流流速 v_f 的影响。对初始浪高 H 及其影响参数进行无量纲化后, 可得出如下的函数关系:

$$\frac{H}{b} = f\left(\frac{h}{b}, \frac{w}{b}, \frac{F_f}{F_s}, \alpha\right) \tag{1}$$

式中: F_f 为水流弗汝德数; F_s 为滑坡体弗汝德数; $\frac{F_f}{F_s} = \frac{v_f}{v_s}$ 。

分别采用线性函数、指数函数和幂函数进行多元回归分析, 可以得出如下 3 个水流动力条件下散体岩质滑坡涌浪的首浪高度经验计算公式:

$$H = \left(-0.057 + 0.161 \frac{h}{b} + 0.094 \frac{w}{b} + 0.211 \frac{F_s}{F_f} + 0.001\alpha \right) b \tag{2}$$

$$H = 0.018b \cdot e^{\left(0.275 \frac{h}{b} + 1.923 \frac{w}{b} + 2.556 \frac{F_s}{F_f} + 0.015\alpha \right)} \tag{3}$$

$$H = 0.025 \left(\frac{h}{b} \right)^{0.549} \left(\frac{w}{b} \right)^{0.348} \left(\frac{F_s}{F_f} \right)^{0.295} \alpha^{0.307} b \tag{4}$$

运用上述 3 个公式将所有工况下首浪高度的计算值与试验值进行对比, 结果表明采用幂函数拟合结果相关性最好。因此, 本文建议采用公式(4)计算水流动力条件下的滑坡涌浪首浪高度。

选用长江新滩滑坡涌浪实测资料,由本文试验得到的首浪高度计算公式(4)与代表性的 Noda 公式、Slingerland 公式、潘家铮公式、殷坤龙公式、中国水利水电科学研究院公式,分别计算出首浪高度值,并与实测的最大首浪高度进行对比。新滩滑坡发生滑动时,长江处于天然河道状态,最大水深约 40 m,平均水深约 30 m,水面宽度约 380 m,江水平均流速在 3.0 m/s 左右。滑入长江总方量约 300 万 m³,堵塞河道约 1/2,滑坡入水速度 10~30 m/s,平均速度约为 20 m/s,最大首浪高度约为 34.24 m。涌浪沿程传播波及上游 16 km、下游 26 km,导致上、下游 8 km 以内的船只均被打翻。各公式首浪高度计算值与实测值对比结果如表 3 所示。由表 3 可以看出,Slingerland 公式、中国水利水电科学研究院公式计算值明显偏大,殷坤龙公式明显偏小,Noda 公式、潘家铮公式、本文公式与实测值较为接近,且本文公式误差最小。

表 3 首浪高度计算值与实测值对比

计算公式	实测值/m	计算值/m	相对误差/%
Noda 公式	34.24	30.00	12.38
Slingerland 公式	34.24	85.77	150.51
潘家铮公式	34.24	40.94	19.57
殷坤龙公式	34.24	26.01	24.03
中国水利水电科学研究院公式	34.24	220.09	542.80
本文公式	34.24	37.93	10.77

4 结论

1)结合长江三峡水库汛期低水位(145 m)运行时长江上游干支流河道特征、不同的水深和流速等水流条件及三峡库区岩体结构特点,设计建立了水流动力条件下弯道浅水区三维散体岩质滑坡涌浪模型试验系统,确定了滑坡体方量、滑面倾角、水流流速、河道水深等主要影响因子及 28 组试验工况。

2)基于物理模型试验观测资料,统计计算给出初始涌浪的最大波高、最大周期、有效波高、有效周期及波陡特征值,初始涌浪的波陡在 0.013~0.076,均小于波浪波陡的极限值。分析岩体滑坡

倾角、滑坡方量、河道水深、水流流速对首浪高度的影响,各方位角上的初始涌浪首浪波高均随着滑坡倾角、滑坡方量的增加而增大,随着河道水深、水流流速的增大而减小。

3)结合物理模型试验资料,采用无量纲多元回归分析方法得到水流动力条件下首浪高度的计算公式,采用长江新滩滑坡涌浪实测资料,将本文给出的首浪高度计算公式与静水条件下得到的 Noda 公式、Slingerland 公式、潘家铮公式、殷坤龙公式、中国水利水电科学研究院经验公式进行对比,表明本文计算公式与实测值最为接近。

参考文献:

[1] DAVIDSON D D, MCCARTNEY B L. Water waves generated by landslides in reservoirs[J]. Journal of the waterway port coastal and ocean division (ASCE), 1975, 101 (12): 1489-1501.

[2] RUDY S, BARRY V P. Evaluating hazard of landslide-induced water waves[J]. Journal of the waterway port coastal and ocean division(ASCE), 1982, 108(4): 504-512.

[3] 夏元友, 朱瑞赓. 新滩滑坡滑动机理及稳定性评价研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1996, 7(3): 49-54.

[4] 王平义, 王多银, 喻涛, 等. 山区河道型水库滑坡涌浪特性及其对通航影响与预防技术[M]. 北京: 人民交通出版社有限公司, 2018.

[5] NODA E. Water Waves Generated by landslides[J]. Journal of the waterways, harbors and coastal engineering division (ASCE), 1970, 96(4): 835-855.

[6] SLINGERLAND R, VOIGHT B. Evaluating hazard of landslide-induced water waves[J]. Journal of the waterway, port, coastal, and ocean division (ASCE), 1982, 108(4): 504-512.

[7] 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.

[8] 殷坤龙, 汪洋. 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研究报告[R]. 武汉: 中国地质大学, 2008.

[9] 中国水利水电科学研究院. 滑坡涌浪模型试验规程: SL165—2010[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.