

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2018.0138

曹婷,王平义,胡杰龙.基于物理模型试验的库区岩质滑坡涌浪爬高研究[J].南水北调与水利科技,2018,16(5):159-164,185. CAO T, WANG P Y, HU J L. Impulse wave run up generated by reservoir rocky landslides based on physical model experiments[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(5): 159-164, 185. (in Chinese)

基于物理模型试验的库区岩质滑坡涌浪爬高研究

曹婷,王平义,胡杰龙

(重庆交通大学 国家内河航道整治工程技术研究中心,重庆 400074)

摘要: 库区滑坡涌浪会对附近岸坡造成不利影响,可能引发次生灾害。以岩质滑坡涌浪对岸坡的影响演变过程为研究对象,建立了相似比1:70的三峡库区典型河道滑坡涌浪的三维地质力学模型,研究了滑坡体宽度、厚度、滑面倾角等27组不同组合工况下的滑坡涌浪爬高规律,提出了适用于岩质滑坡涌浪爬高估算公式。结果表明,涌浪爬高随着滑坡体宽度、厚度、滑面倾角增大而呈现不同幅度的增加,滑坡体宽度对涌浪爬高的影响最为显著,其次为滑坡体厚度和滑面倾角;现有波浪爬高估算公式结果与岩质滑坡模型试验值存在较大差异。在试验基础上,提出了有关相对水深、波坦和岸坡角度的波浪爬高的估算公式,为库区岩质滑坡涌浪爬高估算提供理论基础。

关键词: 滑坡涌浪;波浪爬高;模型试验;影响因素;估算公式

中图分类号: TV 142 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2018)05-0159-06

Impulse wave run up generated by reservoir rocky landslides based on physical model experiments

CAO Ting, WANG Pingyi, HU Jielong

(National Engineering Technology Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing

Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: Impulse wave generated by landslide in the reservoir area will adversely affect nearby bank slopes and may cause secondary disasters. This study took the evolution process of the impact of impulse wave generated by rocky landslide on bank slopes as the study object, and established a 3D geomechanical model of impulse wave generated by rocky landslide in the Three Gorges reservoir area with a similarity ratio of 1:70. We studied the law of run up of impulse wave generated by rocky landslide through 27 sets of model tests with different combinations of width, thickness, and slip angle of the landslide, and proposed a formula for estimating the run up of impulse wave generated by rocky landslide. The results showed that the run up of impulse wave would increase with the increase in width, thickness, and slip angle of the landslide. The width of the landslide had the most significant effect on the impulse wave run up, followed by the thickness of the landslide and the slip angle of the landslide. The result of the existing wave run up estimation formula differed greatly from that of the rocky landslide model test value. Based on the experiment, we proposed a formula for estimating the wave run up using the relative depth, Potain, and bank slope angle, which can provide a theoretical basis for estimating run up of impulse wave generated by rocky landslide in the reservoir area.

Key words: impulse wave generated by landslide; wave run up; model test; influence factor; estimation formula

收稿日期: 2018-03-06 修回日期: 2018-06-05 网络出版时间: 2018-06-14

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20180614.0644.006.html>

基金项目: 国家自然科学基金(51479015); 重庆市基础研究与前沿探索(重点)项目(cstc2017jcyjBX0070)

Funds: National Natural Science Foundation of China (51479015); Chongqing Basic Research and Frontier Exploration Project (cstc2017jcyjBX0070)

作者简介: 曹婷(1988-),女,湖南益阳人,实验师,博士研究生,主要从事水沙动力学方面研究。E-mail: 1214433724@qq.com

通讯作者: 王平义(1964-),男,河南周口人,教授,博士生导师,主要从事水沙动力学、航道整治方面研究。

早期三峡地区为滑坡多发区,三峡建成蓄水以来,随着对库区边坡的治理,滑坡发生的次数虽有所减少,但由水位升降造成的滑坡事件仍有巨大风险,如龚家方崩滑体,产生了 13 m 拍岸浪高,造成了巨大的经济损失^[1]。库区滑坡涌浪传播范围广、危害大,对库区滑坡隐患区域进行涌浪的研究和预测,是预防灾害引发次生灾害有效的方法。涌浪爬高是滑坡涌浪重点研究对象之一,波浪爬高的研究开始于 20 世纪 30 年代,由于波浪的随机性,目前的爬高计算多采用经验公式,常用的爬高计算方法有经大量试验得出的苏联公式^[2]、适用于海边建筑物的海港水文规范^[3]、铁路工程技术手册路基部分^[4]等。

除已有的经验公式,诸多学者对不规则波浪爬高展开了较多的研究,如陈国平等^[5,6]建议波浪爬高分布采用韦伯分布,给出了单坡、复坡爬高计算方法;由水槽试验得出了坡度、波坦、波浪入射角、平台宽度等对不规则波浪爬高的影响规律,拟合出了适用于海堤结构的波浪爬高计算公式;李建习等^[7]分析了堤前植物、护面结构对波浪爬高的影响,指出风浪爬高计算公式结果差别大,对重大或复杂堤防需进行模型试验。以上研究对多针对海浪及风浪引发的不规则波,且试验多在水槽中进行,因滑坡涌浪激起的水体雍高极大,呈现出不同波浪特性,现有的涌浪经验估算方法主要有美国土木工程学会推荐方法、潘家铮方法^[8]、水科院经验公式,其中潘家铮方法较为常用。黄锦林等^[9]对比了三种估算方法,并与鹅公带古滑坡体模型试验结果进行了比较,结果表明经验估算结果差异较大,其中潘家铮方法计算结果与试验值最为接近。以上涌浪估算方法均认为堤前涌浪高度即为爬高高度,汪洋等^[10]区分了堤前涌浪高与爬高,给出了涌浪爬高与斜坡坡角、爬坡方位角的相关公式,并通过新滩滑坡得到了验证。针对三峡库区滑坡涌浪爬高,展开过一些模型试验,特别是岩质的滑坡,因其涌浪高度大,范围广而得到高度的重视。汪洋^[11]、刘艺梁^[12]、肖莉丽^[13]等开展了影响三峡库区滑坡涌浪因素研究,重点针对涌浪高和爬坡浪高;门永强^[14]、杨渠锋^[15]等开展了一系列陡岩滑坡涌浪的特性研究,以海港水文公式为基础,拟合出了相应的涌浪爬高公式;陈里^[16]区分了陡岩和岩质滑坡涌浪,并拟合出了有关首浪高度的涌浪爬高估算公式。

本次研究在滑坡涌浪物理试验基础上,开展不同滑坡体宽度、厚度、滑面倾角影响因素下的涌浪爬

高研究,分析各影响因素的规律变化,与波浪爬高经验公式进行对比,评价库区涌浪模型试验拟合的涌浪爬高公式,拟合出适合库区岩质滑坡涌浪爬高的估算公式。

1 模型试验设计

本文概化模拟三峡万州江南沱口码头段,取河道底部平均高程为 93.55 m,滑坡侧岸坡坡度为 30°,对岸岸坡坡度为 20°,模型比尺 1:70。依据三峡运行水位 145 m、155 m、175 m,因水深对爬高影响不大^[6],且水深越大,首浪高度越小^[17],本试验取最不利情况,即在 145 m 运行水位时的河道水深 0.74 m。岩质滑坡多为大中型滑坡,因其裂隙发育及地质构造,在其下滑和入水时多表现为散体,致使涌浪既包括水面推移产生的波高或雍高,也有土体及水体振荡产生的波浪,为充分体现岩质滑坡的特性,滑坡体模型由 5 种不同水泥小块体按相应配比组合成滑坡整体,块体密度取泥岩和砂岩的平均密度 2.5 g/cm³,见图 1;滑坡体入水处河床坡度取最不利情况 90°;滑坡体临水状态为滑坡体前缘刚好与水面接触。



图 1 滑坡体模型

Fig. 1 Model of landslide

通过对库区岩质滑坡区域体积和滑坡角度的统计^[12,16],本试验采用滑坡体固定长度为 1 m,通过不同的宽厚比控制滑体体积,宽度取值为 1.5 m、1 m、0.5 m,厚度取值为 0.6 m、0.4 m、0.2 m,角度取值为 60°、40°、20°。采用单因子试验方案设计,在滑坡体不同宽度、不同厚度、不同滑面倾角三个水平下,包含 27 种工况,见表 1。

表 1 各因素水平值

Tab. 1 Levels of each factor

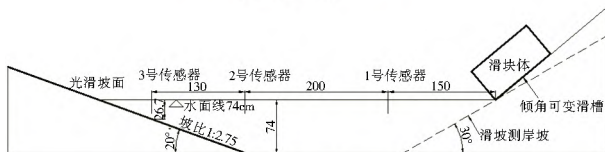
因素水平	滑坡体宽度/m	滑坡体厚度/m	滑面倾角(°)
1	1.5	0.6	60
2	1	0.4	40
3	0.5	0.2	20

滑坡体对岸坡角固定为 20°,岸坡采用光滑斜

板,不考虑岸坡糙率的变化。试验波高、周期测量采用重庆西南水运工程科学研究所自主研发的超声波浪采集分析仪,在滑块入水点和坡面之间布置3个传感器,如图2所示,1号传感器距入水点1.5 m,2号传感器位于对岸坡角处,3号传感器距2号传感器1.3 m。



(a) 模型整体图



(b) 模型布置简图

图2 模型试验

Fig. 2 Model of the test

2 试验数据分析

2.1 试验结果

影响涌浪爬高的因素主要有堤前波坦、水深、岸坡角度、风速等,在三峡库区,风速相应较小,本试验为固定水深和岸坡角度,只考虑堤前波浪特性对爬高的影响,选取不同滑坡体宽度、厚度、滑面倾角,研究其对涌浪爬高的影响,得到的爬高值见表2。

2.2 正交试验结果分析

对正交试验结果进行方差分析,分析各影响因素对涌浪爬高的影响程度,并从显著水平上分析试验结果。从方差分析表(表3)可知,滑坡体宽度、厚度及滑面倾角对涌浪爬高影响是显著的,其中滑坡体宽度的影响是极为显著的,滑坡体厚度次之,而滑坡体滑面倾角的影响最小。选取的库区滑坡涌浪各影响因素对爬高大小的影响及贡献程度是符合以往的研究成果的。

2.3 各因素下爬高规律

在不同滑坡体宽度、厚度及滑面倾角影响下,呈现出如下的规律。

表2 试验结果

Tab. 2 Test results

试验编号	宽度/m	厚度/m	角度(°)	爬高/m
1	1.5	0.6	60	8.974
2	1.5	0.6	40	8.615
3	1.5	0.6	20	8.375
4	1.5	0.4	60	7.850
5	1.5	0.4	40	8.375
6	1.5	0.4	20	8.420
7	1.5	0.2	60	5.982
8	1.5	0.2	40	6.850
9	1.5	0.2	20	4.547
10	1	0.6	60	7.658
11	1	0.6	40	7.179
12	1	0.6	20	4.547
13	1	0.4	60	5.025
14	1	0.4	40	5.982
15	1	0.4	20	6.700
16	1	0.2	60	3.589
17	1	0.2	40	5.400
18	1	0.2	20	4.150
19	0.5	0.6	60	4.547
20	0.5	0.6	40	4.068
21	0.5	0.6	20	3.111
22	0.5	0.4	60	3.014
23	0.5	0.4	40	3.750
24	0.5	0.4	20	3.350
25	0.5	0.2	60	2.560
26	0.5	0.2	40	2.393
27	0.5	0.2	20	1.840

表3 方差分析表

Tab. 3 Variance analysis

误差来源	离差平方和	自由度	均方差	F	Prob> F
宽度	86.3183	2	43.1591	76.2101	4.41E-10
厚度	23.7587	2	11.8793	20.9764	1.23E-05
滑面倾角	3.8017	2	1.9008	3.3565	0.055345
误差	11.3264	20	0.56632		
总和	125.205	26			

(1) 爬高与滑坡体宽度。

从图3可以看出,在滑坡体厚度和滑面倾角相同的条件下,总体趋势为最大爬高随着滑坡体宽度的增加而增加,各工况下增加的幅度均较大。因滑坡体宽度增加,滑坡体体积增大,滑坡体势能增加,在波浪传播中损失的能量一定时,堤前波高较大,涌浪爬高值也就越大。

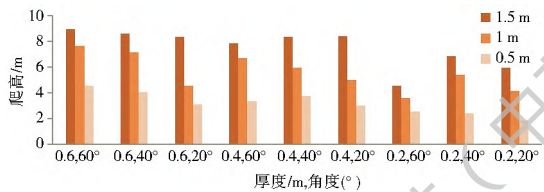


图 3 涌浪爬高与滑坡体宽度关系

Fig. 3 Relationship between impulse wave run up and width of landslide

(2) 爬高与滑坡体厚度。

从图 4 可以看出, 在滑坡体宽度和滑面倾角相同的条件下, 总体趋势为最大爬高随着滑坡体厚度的增加而加大, 增加幅度较小, 增加的原因与宽度增加原理一致。部分点在厚度较低时仍具有较大的爬高值, 可能因能量交换更为充分, 或反射作用较强等致使堤前波高升高。

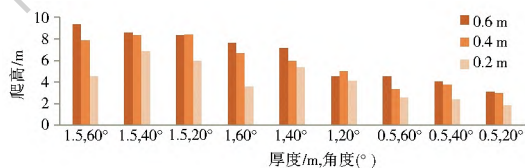


图 4 涌浪爬高与滑坡体厚度关系

Fig. 4 Relationship between impulse wave run up and the thickness of the landslide

(3) 爬高与滑面倾角。

从图 5 可以看出, 宽度与厚度一致的情况下, 在多数工况下, 总体趋势为最大爬高随着滑面倾角的

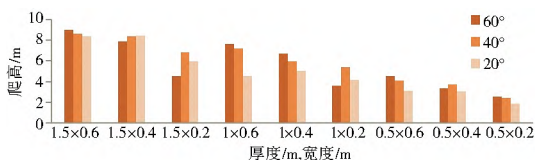


图 5 涌浪爬高与滑面倾角关系图

Fig. 5 Relationship between impulse wave run up and slip angle

由以上试验结果分析可知, 滑坡对岸波浪爬高随着滑坡体宽度、厚度、滑面倾角的增加而增大, 增加的幅度大小不一, 结合方差分析结果, 滑坡体的宽度、厚度和滑面倾角会对爬高产生重要影响, 其影响程度依次减小。

3 涌浪爬高计算公式

3.1 常用经验公式及其对比

波浪爬高的经验公式众多, 对库区涌浪或风浪作用下不规则波浪特性研究, 运用较多的有苏联公式^[13,19]、海港水文规范^[14,16]、铁路工程设计技术手册路基部分(华东水利学院推荐方法)^[20], 后文简称路基公式。其对比见表 4。

表 4 常用波浪爬高经验公式

Tab. 4 The commonly used empirical formulas of wave run up

公式名称	经验公式	参数意义	适用条件	异同点
苏联公式	$R_{1\%} = K_1 K_2 K_3 K H_{1\%}$ (1)	$R_{1\%}$ 为超值频率为 1% 的爬高; K_1 为斜坡的糙率系数; K_2 为斜坡渗透系数; K_3 为风速系数; K 为波陡和坡度系数; $H_{1\%}$ 为超值频率为 1% 的波高。	波浪正向入射 坡前水深 $d \geq 3(H_0)_{1\%}$ 及 $d \geq 3H_{1\%}$	相同点: 公式均考虑了坡面超渗系数、风速系数、与波坦(或波陡)和斜坡坡度有关的系数 不同点: 波陡和坡度系数的取值相差较大
海港水文规范	$R_{1\%} = K_{\Delta} K_U R_1 H_{1\%}$ (2)	K_{Δ} 为与斜坡护面结构形式有关的糙渗系数; K_U 为与风速有关的系数; R_1 、 K_{Δ} = 1、 $H = 1$ m 时的爬高; $R_{1\%}$ 、 $H_{1\%}$ 意义同上。	波浪正向作用、斜坡坡度 m 为 1~5 水深 $d = (1.5 \sim 5.0) H$ 底坡 $i \leq 1/50$	
路基公式	$R_{1\%} = K_{\Delta} K_{nd} R_0 H_{1\%}$ (3)	K_{nd} 为与风速和水深有关的系数; R_0 、 K_{Δ} = 1、 $H = 1$ m 时的侵袭高; $R_{1\%}$ 、 K_{Δ} 、 $H_{1\%}$ 意义同上。	边坡与水平面倾斜角小于 45° ; 堤前水深 $d = (1.5 \sim 5.0) H$; 路堤前水底坡度 $i \leq 1/25$	

结合 3 种不同的经验公式, 对比本试验结果。其结果见图 6。

从图 6 可看出, 苏联公式和路基公式计算值在 $y = x$ 以上, 均比试验值大, 爬高较小时, 计算值与试验值较为接近, 爬高较大时, 两者相差较大。苏联公式中, 考虑了库区风速的影响, 而三峡库区常年风速较低, 试验过程中风速很小, 导致苏联公式计算值较试验值大, 同时与坡度和波陡相关的系数值亦较大,

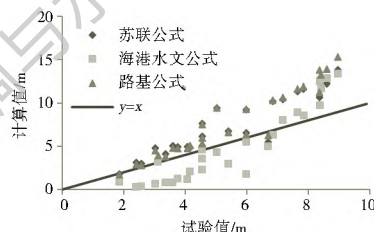


图 6 试验值与计算值对比

Fig. 6 Contrast diagram between experimental and calculated data

导致苏联公式计算结果为最大。海港水文规范计算值,在爬高较小时,结果较试验值小,且相差较大,在爬高较大时,结果较试验值大,计算值较试验值整体浮动范围大,认为直接用海港水文规范计算库区涌浪爬高具有较大的误差。

对比 3 种不同经验公式,苏联公式和路基公式较

试验值大,苏联公式较为保守,海港水文规范值与试验值相差较大,路基公式计算值与试验值最为接近。

3.2 试验值与库区涌浪爬高拟合公式对比

对库区滑坡涌浪研究,重庆交通大学和中国地质大学开展了大量的模型试验,拟合出了不同的库区涌浪爬高的计算公式,见表 5。

表 5 库区涌浪爬高计算公式与结果

Tab. 5 Calculation formulas of impulse wave run up in reservoir area and their results

序号	计算公式	参数意义	公式拟合及验证	文献出处	与试验值比较
1	$R = 1.259H K_{\Delta} \left(\frac{H}{d}\right)^{0.475} \left(\frac{H}{L}\right)^{-0.387} \alpha^{0.618}$ (4)	R 为波浪爬高; H 为堤前波高; d 为堤前水深; L 为堤前波长; α 为斜坡坡度。	依据海港水文规范	[14]	偏小,较接近
2	$\frac{R}{H} = 1.425K_{\Delta} \left(\frac{H}{d}\right)^{0.597} \left(\frac{H}{L}\right)^{-0.527} \alpha^{0.485}$ (5)	各参数意义同公式(4)	依据海港水文规范	[13]	偏大,较接近
3	$\frac{R}{h} = 2.3 \frac{H_c}{h} \left(\frac{90}{\beta}\right)^{0.2}$ (6)	R 为正对岸爬坡浪高度; H_c 为正对岸坡前波高; h 为滑坡入江点最大水深; β 为对岸岸坡坡角。		[11]	较大,偏离较多
4	$\Delta h = [(\sqrt{\frac{\pi}{2\alpha}} - 1) \cos\beta + 1]h$ (7)	Δh 为爬坡高度; β 为爬坡方位角; α 为斜坡坡脚; h 为库岸边的涌浪高度。	新滩滑坡验证	[9、10]	最大,偏离最多

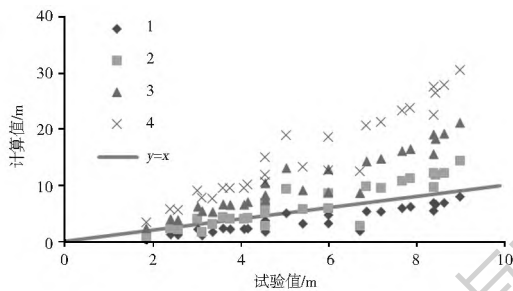


图 7 试验值与拟合公式计算值对比

Fig. 7 Contrast diagram between experimental data and calculated value of fitting formula

从图 7 可以看出,1 号数据点聚集在 $y = x$ 以下,计算值整体小于试验值,2 号数据点聚集在直线以上,爬高越大,计算值与试验值差异越大,1、2 号数据点为陡岩滑坡涌浪模型试验得出,本次试验是基于文献[15-16]的岩质滑坡涌浪模型,陡岩滑坡区别于岩质滑坡,其下滑过程受自然边坡起伏度影响大,入水时能量大部分转化为水体溅高,滑坡体的不同特征致使产生的涌浪过程不一致,从而试验值与其估算公式计算值有一定的差异。3 号和 4 号数据点均分布在直线以上较大区域,其中 4 号点计算值最大,两者得出的结果类似,计算结果对本试验来说较为保守,3 号和 4 号的涌浪爬高计算公式是与堤前波高有关的,而堤前波高是依据涌浪首浪高度及其传播规律估算得出的,而 1 号、2 号及本试验的堤前波高均为实测值,致使两个模型试验分析值有较大差异,且通过实测堤前波高可较为贴切的反应波

浪爬高的变化。

3.3 涌浪爬高拟合公式

由以上分析可知,在库区岩质滑坡涌浪作用下,对岸涌浪爬高值与路基公式计算结果较为接近,以路基公式为基础,对本试验岩质滑坡涌浪爬高公式进行拟合。路基公式中,单位爬高与相对水深 d/H ,波坦 L/H 及岸坡坡角呈现非线性关系,结合已有的试验成果,拟合出了相对爬高与相对水深、波坦和岸坡坡角的相关公式,其结果见图 8。

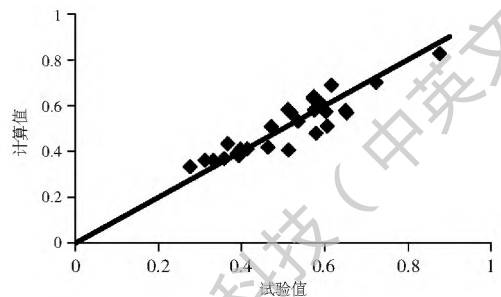


图 8 试验值与计算值对比

Fig. 8 Contrast diagram between experimental data and calculated value

从图 8 中可以看出,试验值与计算值集中在 $y = x$ 趋势线周围, R^2 为 0.84,试验值与计算值较为吻合,拟合公式为

$$\frac{R}{H} = K_{\Delta} \left(\frac{d}{H}\right)^{0.286} \left(\frac{L}{H}\right)^{-0.074} m^{0.0483} \quad (8)$$

式中: R 为正对岸波浪最大爬高(m); H 为正对岸堤前最大波高(m); d 为堤前水深(m); L 为堤前波长

(m); R/H 为相对爬高; d/H 为相对水深; L/H 为波坦; K_{Δ} 为与斜坡护坡结构型式有关的糙渗系数, 整片光滑不透水护坡(沥青混凝土)取 1.00, 混凝土护坡取 0.90, 其余材料取值见路基规范表 8-3; m 为岸坡坡比。

本物理模型试验基于三峡库区某河段, 爬高拟合公式适用于三峡库区或类似环境下的岩质滑坡涌浪, 波坦较大时, 在有限水深条件时, 滑坡正对岸的最大波浪爬高的计算, 但因试验中涉及到的影响因素不够完善, 未考虑岸坡角度、坡面糙率变化、波浪破碎等因素对爬高值的影响, 该公式可提供一定的参考, 全面准确的爬高预测公式需进一步的试验研究。

4 结论

(1) 方差分析得出滑坡体宽度、厚度、滑面倾角对涌浪爬高有显著影响, 其影响程度依次减小, 涌浪爬高随着滑坡体宽度、厚度和滑面倾角的增加而增大。

(2) 涌浪爬高经验公式与计算结果有较大差异, 其中海港水文公式差别较大, 苏联公式过于保守, 路基公式于试验值最为接近。

(3) 已有的三峡库区模型试验波浪爬高公式之间计算结果有较大差异, 拟合出了岩质滑坡涌浪爬高的估算公式, 为库区岩质滑坡涌浪爬高估算提供一定的理论基础。

(4) 试验只考虑了部分影响爬高的因素, 其他因素影响下岩质滑坡涌浪爬高的有待进一步的试验研究, 库区岩质滑坡涌浪爬高的经验估算公式有待进一步的修正和完善。

参考文献(References):

- [1] YIN Y P, HUANG B L, WANG W P, et al. Reservoir induced landslides and risk control in Three Gorges Project on Yangtze River, China. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2016(8): 577-595.
- [2] 潘少华译. 波浪、冰凌和船舶对水工建筑物的荷载作用. 苏联规范() [M]. 海洋出版社, 1986. (PAN S H. translation. Waves, ice and ships on hydraulic structures load effect. Soviet norms(). [M]. Ocean Press, 1986. (in Chinese))
- [3] JTS 145-2-2013 海港水文规范[S]. (JTS 145-2-2013. Code of Hydrology for Sea Harbour[S]. (in Chinese))
- [4] 铁道部第一勘测设计院. 铁路工程设计技术手册[路基][M]. 北京: 中国铁道出版社, 1992. (First Survey Design Institute China Railways. Railway Engineering Technical Manual[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1992. (in Chinese))
- [5] 陈国平, 余广明, 章家昌. 不规则波爬高分布及计算[J]. 水利水运科学研究, 1992(2): 111-120. (CHEN G P, YU G M, ZHANG J C. Distribution and computation of irregular wave rurr up[J]. *Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute*, 1992(2): 111-120. (in Chinese)) DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640x.1992.02.001.
- [6] 陈国平, 王铮, 袁文喜, 等. 不规则波作用下波浪爬高计算方法[J]. 水运工程, 2010(2): 23-30. (CHEN G P, WANG Z, YUAN W X, et al. Calculation of wave rurr up under the irregular wave action[J]. *Port & Waterway Engineering*, 2010(2): 23-30. (in Chinese)) DOI: 10.16233/j.cnki.issn1002-4972.2010.02.015.
- [7] 李建习, 沈小雄, 赵利平, 等. 影响库区波浪爬高因素的分析[J]. 水电能源科学, 2007(5): 95-98. (LI J X, SHEN X X, ZHAO L P, et al. The analysis of the influence factors of reservoir wave rurr up[J]. *Water Resources and Power*, 2007, 25(5): 95-98. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-7709.2007.05.026.
- [8] 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. (PAN J Z. Structure stability against sliding and landslide analyze[M]. Beijing: China Hydraulic Press, 1980. (in Chinese))
- [9] 黄锦林, 张婷, 李嘉琳. 库岸滑坡涌浪经验估算方法对比分析[J]. 岩土力学, 2014(z1): 133-140. (HUANG J L, ZHANG T, LI J L. Comparative analysis of empirical estimate methods of reservoir bank landslide surge[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014(z1): 133-140. (in Chinese)) DOI: 10.16285/j.rsm.2014.s1.046.
- [10] 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. (WANG Y, YIN K L. Research on propagation and climb height of surge triggered by landslide in reservoir[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(4): 1031-1034. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-7598.2008.04.033.
- [11] 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, 2005. (WANG Y. The research on speed of the landslide and its surge hazard in reservoir[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2005. (in Chinese))
- [12] 刘艺梁. 三峡库区库岸滑坡涌浪灾害研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2013. (LIU Y L. The research on speed of the landslide and its surge hazard in reservoir[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2013. (in Chinese))
- [13] 肖莉丽. 库岸滑坡涌浪数值模拟研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2015. (XIAO L L. Numerical Simulation of Landslide Generated Waves in Reservoir[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2015. (in Chinese))
- [14] 门永强. 山区河道型水库陡岩滑坡涌浪特性及对航道通航条件影响研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2013. (MEN Y Q. Experimental research on dangerous rock type landslide swell characteristics and impact for navigable conditions of the river-channel type reservoir in mountainous area [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2013. (in Chinese))

(下转第 185 页)

- 分析[J]. 郑州大学学报(工学版), 2010, 31(3): 110-114. (LIU J J, PENG P. Analysis of dam foundation horizontal displacement based on kalman filter fusion algorithm[J]. Journal of Zhengzhou University (Science Engineering Science), 2010, 31(3): 110-114. (in Chinese) DOI: 1671-6833(2010)03-0110-05.
- [20] SISWANTORO J, PRABU WONO A S, ABDULLAH A, et al. A linear model based on Kalman filter for improving neural network classification performance[J]. Expert Systems with Applications, 2016, 49: 112-122. (in Chinese) DOI: 10.1016/j.eswa.2015.12.012.
- [21] 蒋恩松, 李孟超, 孙刘杰. 一种基于神经网络的卡尔曼滤波改进方法[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(9): 4-6. (JIANG E S, LI M C, SUN L J. An improved method of kalman filter based on neural network[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2007, 29(9): 4-6. (in Chinese) DOI: 1009-5896(2007)09-2073-04.
- [22] HE W, WILLIARD N, CHEN C, et al. State of charge estimation for Li ion batteries using neural network modeling and unscented Kalman filter-based error cancellation[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014, 62: 783-791. DOI: 10.1016/j.ijepes.2014.04.059.
- [23] 陈善广, 鲍勇. BP 神经网络学习算法研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 1995, 3(4): 437-442. (CHEN S G, BAO Y. Studies on learning algorithms for BP Net[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 1995, 3(4): 437-442. (in Chinese) DOI: 10.16058/j.issn.1005-0930.1995.04.012.
- [24] 张群, 许强, 吴礼舟, 等. 南江滑坡群体积的 BP 神经网络模型与预测[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(1): 134-139. (ZHANG Q, XU Q, WU L Z, et al. BP neural network model for forecasting volume of landslide group in Nanjing[J]. Hydrogeology & Engineering Geology 2015, 42(1): 134-139. (in Chinese) DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2015.01.23.
- [25] 李朋丽, 田伟平, 李家春. 基于 BP 神经网络的滑坡稳定性分析[J]. 广西大学学报, 2013, 38(4): 905-911. (LI P L, TIAN W P, LI J C. Analysis of landslide stability based on BP neural [J]. Journal of Guangxi University, 2013, 38(4): 905-911. (in Chinese) DOI: 10.13624/j.cnki.issn.1001-7445.2013.04.003.

(上接第 164 页)

- [15] 杨渠锋, 王平义, 俞涛, 等. 三峡库区陡岩滑坡涌浪爬高试验分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2014, 25(3): 43-48, 55. (YANG Q F, WANG P Y, YU T, et al. Experimental research on dangerous rock type landslide sur up of the river channel type reservoir in mountainous area[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2014, 25(3): 43-48, 55. (in Chinese) DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2014.03.037.
- [16] 陈里. 山区河道型水库岩体滑坡涌浪特性及对航道的影响试验研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2014. (CHEN L. Experimental study on characteristics of rock type landslide surge and impact for navigable conditions of the river channel type reservoir in mountainous area[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2013. (in Chinese))
- [17] 郝建娟, 门永强, 王平义, 等. 山区河道型水库陡岩滑坡涌浪首浪试验研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2014(03): 672-675. (HAO J J, MENG Y Q, WANG P Y et al. Experimental research on dangerous rock type landslide surge primary wave height of the river-channel type reservoir in mountainous area[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2014 (03): 672-675. (in Chinese) DOI: 10.3963/j.issn.2095-3844.2014.03.046.
- [18] 蔡晓禹. 波浪对三峡库区路基边坡的侵蚀作用及边坡坍塌破坏试验研究[D]. 重庆: 重庆交通学院, 2004. (CAI X Y. Study on the wash out and cave in method of roadbed slopes by wave in Three Gorges Reservoir[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2004. (in Chinese))
- [19] 徐绩青. 波浪对斜坡作用力的研究[D]. 重庆: 重庆交通学院, 2005. (XU J Q. Study on the wave force on the slope[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2005. (in Chinese))
- [20] 李建习. 风浪作用下库岸动力响应及稳定分析[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2008. (LI J X. The Wind wave induced dynamic response in bank of reservoir and it, s analysis on stability [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2008. (in Chinese))