

考虑压脚措施下滑坡涌浪经验估算法对比研究

陈玺¹, 李守义¹, 孙平², 王琳¹, 程帅³, 黎康平¹

(1. 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048; 2. 中国水利水电科学研究院
岩土工程研究所, 北京 100048; 3. 西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054)

摘要: 分别利用潘家铮方法和水科院经验公式法计算了雾江库岸滑坡体不同工况及压脚措施前后的滑坡涌浪高度, 通过两种估算方法计算结果的对比, 发现水科院经验公式法算出的涌浪高度远小于潘家铮法的计算结果, 建议在进行滑坡涌浪估算时以潘家铮法作为主要的经验估计法, 水科院经验公式法作为辅助方法。通过采取坡脚压脚措施前后计算结果的对比, 发现坡脚压脚措施可有效降低涌浪高度, 防治涌浪灾害。

关键词: 库岸滑坡涌浪; 潘家铮方法; 水科院经验公式法; 坡脚压脚; 涌浪高度

中图分类号: TV697.3⁺3; P642.22 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2017)04-0131-06

The comparative study of the empirical estimation of landslide surge under the measure of pressing foot

CHEN Xi¹, LI Shouyi¹, SUN Ping², WANG Lin¹, CHENG Shuai³, Li Kangping¹

(1. Faculty of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;
2. Department of Geotechnical Engineering, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China;
3. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China)

Abstract: Two common empirical estimate methods, PAN Jiazheng method and IWHR empirical formula method, were used to calculate the height of reservoir bank landslide surge of Wu River. By comparing the results from two estimate methods, it is found that the height of surge calculated by IWHR empirical formula method is far less than that of PAN Jiazheng method. It is suggested that Pan Jiazheng method should be used as the main empirical method in the estimation of landslide while the IWHR empirical formula method as an auxiliary method. By comparing the results of surge height before pressing foot at the toe of slope and after, it is indicated that height of surge decreased obviously after pressing foot at the toe of slope. The method of pressing foot at the toe of slope can prevent the disaster of reservoir bank landslide surge.

Key words: reservoir bank landslide surge; PAN Jiazheng method; IWHR empirical formula method; pressing foot at the toe of slope; height of surge

1 研究背景

库区滑坡体滑动失稳高速落入水库将引发一系列的次生灾害。一方面大量的固体物质进入水库, 减少有效库容, 甚至有可能堵塞河道。另外更为严重的是, 大体积滑坡体高速入水, 将激起巨大的涌浪, 直接影响挡水建筑物的安全运行, 从而造成不可估量的灾难性后果^[1]。因此, 对蓄水后可能发生滑

动失稳的库岸滑坡^[2]进行涌浪高度的估算, 并预测其危害程度是十分必要的。

滑坡体失稳产生的最大涌浪高度主要受两个因素的影响, 分别为滑坡体规模和滑动速度。由于滑坡体失稳后的运动为一个十分复杂过程, 其滑动速度很难精确地计算。目前滑坡体滑速主要通过求解能量守恒或动量守恒方程获得, 其中代表性方法有能量法与由潘家铮院士提出的垂直条分法。而滑坡

收稿日期: 2017-04-06; 修回日期: 2017-05-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(51579208)

作者简介: 陈玺(1993-), 男, 陕西西安人, 硕士研究生, 研究方向为水利水电工程及边坡稳定。

通讯作者: 李守义(1955-), 男, 甘肃庄浪人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为水工结构应力分析。

体滑动引起的涌浪高度的影响因素更为复杂,并且许多因素不能明确确定而仅为估计值,此外计算时的边界条件与初始条件也较为复杂,还没有一个通用的计算方法。现阶段,水库滑坡引起的涌浪高度的求解方法包括模型试验法与算法两种,其中计算方法主要有水科院经验公式法^[3]、美国土木工程学会建议的推算法^[4]、潘家铮法^[5]等。

为了预防库岸滑坡产生,可对岸坡进行加固除险处理。滑坡防治的方法有抗滑桩法^[6]、锚索法^[7]、削坡法、压脚法^[8]等,其最经济简单的方法为压脚法,即将剥离了的上覆岩层堆积在陡边坡的坡脚处,使之起到增加坡脚岩土围压和支挡边坡上部岩土体下滑的作用。

本文分别利用潘家铮方法和水科院经验公式法计算了雾江库岸滑坡体滑坡涌浪高度,并对坡脚压脚治理措施实施前后结果进行了对比。

2 滑坡体滑动速度计算方法

要估算滑坡产生的涌浪高度,就必须确定滑坡体的下滑速度^[9]。滑坡体下滑速度通常根据动能定理进行计算,在滑坡体下滑的过程中,滑坡体重力势能转化为动能,滑坡体滑动过程需要克服滑面摩擦阻力做功。根据动能定理,合外力对滑坡体做功等于滑坡体动能的改变量,据此可求出滑坡体的下滑速度。计算滑速时,动能定理对于平面滑动比较准确,但对于非平面滑动误差较大,实际滑坡(特别是非岩质滑坡)大部分都为非平面滑动;另外,利用动能定理计算时一个最大的缺点是所求取的滑速是将滑坡岩土体作为一个整体考虑时下滑的平均速度,无法反映滑坡下滑过程中速度的变化特征。要了解滑坡的最大滑速和运动过程中滑速的变化规律,就必须计算出局部滑坡体运动到前缘时的速度。滑坡体滑速计算方法中能量法和潘家铮院士提出的垂直条分法是较为常用的两种计算方法^[10]。

2.1 能量法

能量法将滑坡体的运动视为匀加速运动,并利用经典的牛顿运动定律进行求解。滑坡体运动的基本方程为:

$$F = ma$$

$$= mgs\sin\alpha - (mg\cos\alpha - u)f - cl \quad (1)$$

式中: α 为滑面的倾角, ($^\circ$); u 为滑面上的孔隙水压力, N ; f 为滑面的摩擦系数; c 为滑面单位长度凝聚力, N/m ; m 为滑体的单宽质量, kg ; g 为重力加速度, m/s^2 ; a 为滑体的加速度, m/s^2 ; l 为滑动面长

度, m 。

假定滑坡体在运动过程中其质量、滑面倾角、抗剪强度指标保持不变,则滑体的最大运动速度 V_{\max} 的计算公式为:

$$V_{\max} = \sqrt{2al}$$

$$= \sqrt{2gH\left(1 - \frac{f}{\tan\alpha} + \frac{uf}{W\sin\alpha} - \frac{cl}{W\sin\alpha}\right)} \quad (2)$$

式中: H 为滑体质心落差,这里应为滑体重心至水面的高度, m 。若不考虑 c 值,则式(2)可简化为:

$$V_{\max} = \sqrt{2gH\left(1 - \frac{f}{\tan\alpha} + \frac{uf}{W\sin\alpha}\right)} \quad (3)$$

当滑面为非平面时,可取 f 和 α 的平均值作近似计算。

2.2 潘家铮法

将滑坡体的运动视为平面问题,并选择滑体中具有代表性的剖面作为研究对象。同时,这种方法将滑体划分为一系列具有垂直界面的条块,并假定条块界面在滑动后仍保持垂直。

现取一垂直条块 i 作为研究对象,其上的作用力如图1所示。不难看出,作用在条块上的力有:作用在滑面上的法向反力 N_i , 孔隙水压力 U_i , 作用在界面上的作用力 $H, H + \Delta H_i, Q, Q + \Delta Q_i$ 。根据牛顿运动定律,有:

$$\Delta H_i + (N_i + U_i)\sin\alpha_i - (f_i N_i + c_i L_i)\cos\alpha_i = \frac{W_i}{g} a_x \quad (4)$$

$$\Delta Q_i + (W_i - U_i\cos\alpha_i) - N_i\cos\alpha_i - (f_i N_i + c_i L_i)\sin\alpha_i = \frac{W_i}{g} a_y \quad (5)$$

式中: a_x, a_y 分别为条块的水平与竖直加速度, m/s^2 , 这里假定所有条块的水平加速度均相同。

求出水平加速度 a_x 后,便可利用运动学原理求出不同时段滑体的速度 v 、运行距离 L 等。

还需要指出的是,水下条块的自重应按浮容重计,水上条块按天然容重计。

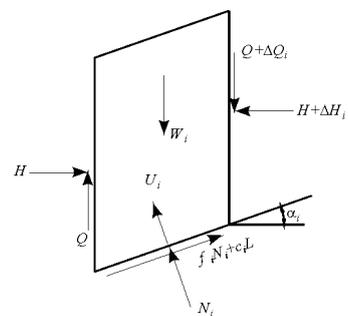


图1 作用在条块上的作用力

3 滑坡涌浪计算方法

滑体的滑速一旦计算出来,就可以进一步计算滑体入水时可能产生的最大涌浪高度,目前较为常用的方法为水科院经验公式法、潘家铮法与美国土木工程学会建议的推算公式。

3.1 水科院经验公式法

水科院经验公式是根据一个援外工程库内边坡的室内试验、美国利贝 1:120 的滑坡涌浪模型试验、国内白龙江碧口水电站坝址上游 5 km 滑坡的 1:150 模型的滑坡涌浪试验 3 个模型的试验资料以及柘溪原型滑坡资料,选择滑坡区对岸和坝区两处最大涌浪高度为代表,进行整理,得出滑坡区对岸最大涌浪高度与滑速及滑体体积的关系曲线,尽管这些资料是来自不同的模型试验、不同的比尺、滑体方量、滑动方式以及河道的特征各不相同,但所有的试验点子还是基本上在一小条带内,说明滑速和滑体方量是影响涌浪高度的主要因素,滑体入水前的最大涌浪高度的计算公式为:

$$\eta_{\max} = K \frac{V^{1.85}}{2g} U^{0.5} \quad (6)$$

式中: K 为综合影响因子,取平均值 0.12; U 为滑体体积, 10^4 m^3 ; V 为滑速, m/s ; η_{\max} 为最大涌浪高度。

距滑坡处 x 处的涌浪高度的估算公式为:

$$\eta = K_1 \frac{V^n}{2g} U^{0.5} \quad (7)$$

式中: K_1 为与滑坡点距离 x 有关的函数,当 $x = 2000 \text{ m}$ 时, $K_1 = 0.08$; 当 $x = 5000 \text{ m}$ 时, $K_1 = 0.05$; 当 $x = 12000 \text{ m}$ 时, $K_1 = 0.02$; $n = 1.3 \sim 1.5$; η 为涌浪高度, m 。

3.2 潘家铮法滑坡涌浪估算

这一方法在单向流分析成果的基础上,假定涌流首先在滑坡入水处发生,产生初始波,然后向周围传播,在传播的过程中,通过反射波的叠加,来求得涌浪高度。该方法首先需要判断岸坡变形类型,然后根据滑坡速度求初始浪高,再根据初始浪高求任意点处的浪高。具体的求解步骤如下:

(1) 初始浪高 ζ_0 的确定。当岸坡发生水平运动时,激起的初始浪高为: $\frac{\zeta_0}{h} = 1.17v / \sqrt{gh}$;

当岸坡发生垂直运动时, $0 < v / \sqrt{gh} < 0.5$ 时,激起的初始浪高为: $\frac{\zeta_0}{\lambda} = v / \sqrt{gh}$;

$0.5 < v / \sqrt{gh} < 2$ 时, ζ_0 / λ 呈曲线变化,如图 2

所示;

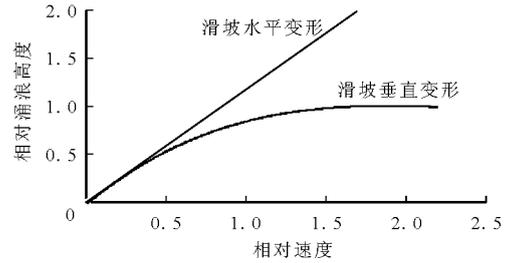


图 2 滑坡体初始浪高变化曲线图^[5]

$v / \sqrt{gh} > 2$ 时,激起的初始浪高为: $\frac{\zeta_0}{\lambda} = 1$ 。式

中: v 为滑坡体的水平(竖向)速度, m/s ; h 为水深, m ; λ 为滑体的平均厚度, m 。

(2) 滑体对岸点 A 处的浪高。

$$\zeta_{\max} = \frac{2\zeta_0}{\pi} (1+k) \sum_{1,3,5,\dots}^n \left\{ k^{2(n-1)} \cdot \ln \left[\frac{l}{(2n-1)B} + \sqrt{1 + \left(\frac{l}{(2n-1)B} \right)^2} \right] \right\} \quad (8)$$

式中: ζ_0 为初始波高, m ; k 为波的反射系数,可近似取 1; \sum 为级数之和,其项数取决于滑坡历时 T 与涌浪从本岸传播至对岸需时 Δt 之比。

(3) 距滑体 x_0 处的 A' 的浪高

$$\zeta = \frac{\zeta_0}{\pi} \sum_{1,3,5,\dots}^n (1+k \cos \theta_n) k^{n-1} \cdot \ln \left[\frac{\sqrt{1 + \left(\frac{nB}{x_0 - L} \right)^2} - 1}{\frac{x_0}{x_0 - L} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{nB}{x_0} \right)^2} - 1 \right]} \right] \quad (9)$$

式中: θ_n 为传至 A' 的第 n 次入射线与岸坡法线的交角, ($^\circ$), $\tan \theta_n = \frac{x}{nB}$ 。式中的级数 n , 可通过查表法或迭代法进行求解。

4 工程实例

雾江滑坡位于扩建工程库首右岸的雾江峡谷进口段,是一个典型的古滑坡。初步探明,滑坡总体积约为 $1327 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。滑坡体下游边界距现坝体 300 m,距水库扩建推荐坝轴线约 590 m,上游边界距现坝体距离约 1000 m。滑坡区山顶高程为 700 m,河床高程 220 m,相对高差 480 m,边坡地形陡峻,冲沟发育。滑坡体前缘顺河向宽度达 700 m,呈舌状伸入河床。滑坡区地形呈两级台阶状,一级台阶高程为 300~310 m,宽约 50~70 m,长约 350 m;前缘边

坡坡角约 $26^\circ \sim 33^\circ$, 局部可达 45° 。二级台阶高程为 $400 \sim 410$ m, 宽约 $40 \sim 100$ m, 长约 250 m, 前缘边坡坡角约 $22^\circ \sim 28^\circ$ 。滑坡后缘壁分布高程为 $510 \sim 700$ m, 地形坡角约为 $42^\circ \sim 53^\circ$, 沿后缘壁崩塌现象显著。

4.1 滑坡滑速涌浪分析计算条件

滑速计算是滑坡涌浪高度预测的前提。前文提到了两种计算滑速的方法, 即能量法与潘家铮的条分法。从上述两种方法的适应条件来看, 能量法适用于直线滑裂面, 而潘家铮的条分法适用于光滑曲线滑裂面。对于雾江滑坡体而言, 显然潘家铮的条分法更为适用。

因此, 采用潘家铮建议的条分法进行滑速估算, 并分别采用水科院经验公式法与潘家铮法进行涌浪高度预测。

关于滑坡运动时底滑面的抗剪强度参数的选取问题。研究表明, 滑带土的抗剪强度参数将直接影响着滑坡体滑动时的运动状况^[11]。事实上, 滑坡体在变形不断积累、逐渐增加的过程中, 滑面的抗剪强度指标 (f, c) 也将逐渐降低, 最终将降为残余强度。从这个意义上说, 采用滑面的残余强度参数来模拟滑坡失稳后的运动状态更符合实际情况。

本次计算对滑坡体滑动时滑面的抗剪强度参数取值为: $\phi = 18^\circ, c = 0$ 。

考虑到滑体的滑面相对平缓, 在采用潘家铮建议的条分法进行滑速计算时, 假定滑出滑床面上的滑体仍与其后的滑坡体连在一起共同滑动。

采用潘家铮的条分计算滑速时, 考虑了迎水面所受的水的阻力, 根据潘家铮的建议, 水对滑体的阻力的计算公式为:

$$F = C_D A \frac{\gamma_0 v^2}{2g} \quad (10)$$

式中: A 为挡水面积, m^2 ; v 为滑速, m/s ; γ_0 为水的容重, N/m^3 ; C_D 为系数, 取 $1.5 \sim 2.0$ 。

计算中系数 C_D 取 1.5 。

因滑面相对较为平缓, 采用潘家铮法进行涌浪预测时, 计算假定岸坡变形属于水平变形类型。计算中所用主要参数见下表 1:

表 1 主要计算参数表

计算方法	参数	数值
水科院	n	1.3
经验公式法	k_1	0.08
	k (反射系数)	1
潘家铮法	λ (滑体平均厚度)/m	50
	B (河道宽度)/m	150
	X_0 (计算点距滑体距离)/m	700

有关滑体及水深的相关参数在下文各自工况中加以说明。

4.2 滑坡滑速涌浪分析计算

4.2.1 自然边坡滑坡涌浪预测 对于未处理的自然边坡计算了以下 2 种工况: (1) 正常蓄水位 313.0 m, 考虑中部至底部滑动滑移模式; (2) 水位骤降期, 即库水位由 320.27 m 骤降至 310.50 m, 考虑中部至底部滑动滑移模式。

(1) 正常蓄水位 313.00 m, 考虑滑体由中部至底部剪出模式, 图 3 为进行滑速计算的剖面及滑体示意图。单宽滑体体积为 $22\,800 \text{ m}^3$, 相应的滑体总体积为 $1\,140 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。利用潘家铮法进行滑速计算得: 最大滑速 v_{\max} 为 2.79 m/s , 平均滑速为 1.85 m/s 。当进行涌浪预测时, 平均水深 $h = 90.0$ m, 相应的涌浪计算结果如表 2 所示。

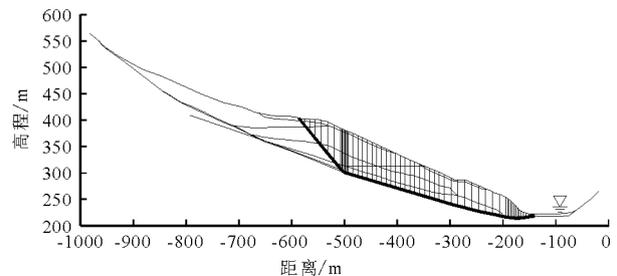


图 3 滑坡体滑速估算剖面图

表 2 基于平均滑速获得的涌浪分析计算结果

水科院经验公式法		潘家铮法		
最大涌浪高度 η_{\max}/m	运行至坝前的最大涌浪高度 η/m	初始浪高 ζ_0/m	对岸最大浪高 ζ_{\max}/m	运行至坝前的最大涌浪高度 ζ/m
0.95	0.68	6.55	10.71	4.45

(2) 水位骤降,即库水位由 320.27 m 降至 310.50 m,考虑中部至底部滑动滑移模式,图 4 为进行滑速计算的剖面及滑体示意图。单宽滑体体积为 23 000 m³,相应的滑体总体积为 1 150 × 10⁴ m³。利用潘家铮法进行滑速计算得:最大滑速 v_{max} 为 3.03 m/s,平均滑速为 2.27 m/s。当进行涌浪预测时,平均水深 $h = 87.5$ m,相应的涌浪计算结果如表 3 所示。

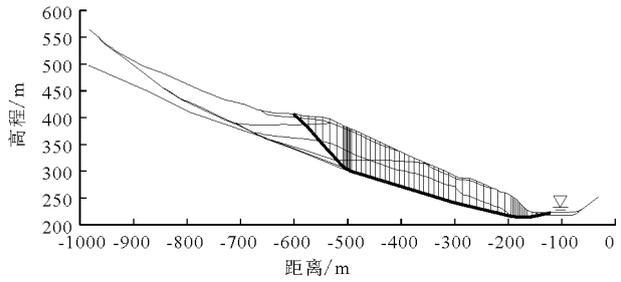


图 4 滑坡体滑速估算剖面

表 3 基于平均滑速获得的涌浪分析计算结果

水科院经验公式法		潘家铮法		
最大涌浪高度 η_{max}/m	运行至坝前的最大涌浪高度 η/m	初始浪高 ζ_0/m	对岸最大浪高 ζ_{max}/m	运行至坝前的最大涌浪高度 ζ/m
1.39	1.00	7.93	12.96	4.04

4.2.2 不开挖,仅压脚至 250.00 m 高程的涌浪预测 当滑坡体坡脚回填至 250.00 m 高程时主要讨论以下 2 种工况:(1) 正常蓄水位 313.00 m,考虑中部至底部剪出滑移模式;(2) 水位骤降工况,即库水位由 320.27 m 骤降至 310.50 m,考虑中部至底部滑动滑移模式。

最大滑速 v_{max} 为 2.43 m/s,平均滑速为 1.62 m/s。当进行涌浪预测时,平均水深 $h = 63.0$ m,相应的涌浪计算结果如表 4 所示。

(1) 正常蓄水位 313.00 m,考虑中部至底部剪出滑移模式,图 5 为进行滑速计算的剖面及滑体示意图。单宽滑体体积为 17 500 m³,相应的滑体总体积为 875 × 10⁴ m³。

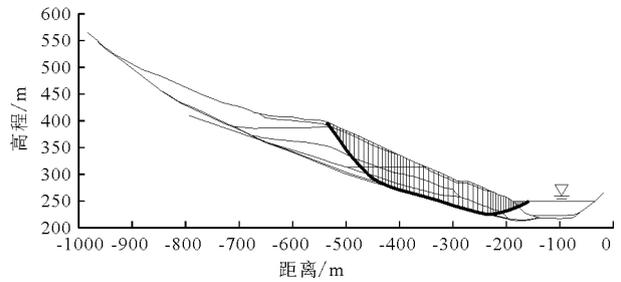


图 5 滑坡体滑速估算剖面图

利用潘家铮法进行滑速计算得:

表 4 基于平均滑速获得的涌浪分析计算结果

水科院经验公式法		潘家铮法		
最大涌浪高度 η_{max}/m	运行至坝前的最大涌浪高度 η/m	初始浪高 ζ_0/m	对岸最大浪高 ζ_{max}/m	运行至坝前的最大涌浪高度 ζ/m
0.65	0.48	4.80	7.85	2.44

(2) 水位骤降,即库水位由 320.27 m 降至 310.50 m,考虑由滑坡体中部至底部滑动滑移模式,图 6 为进行滑速计算的剖面及滑体示意图。单宽滑体体积为 23 600 m³,相应的滑体总体积为 1 180 × 10⁴ m³。利用潘家铮法进行滑速计算得:最大滑速 v_{max} 为 2.81 m/s,平均滑速为 2.00 m/s。当进行涌浪预测时,平均水深 $h = 60.5$ m,相应的涌浪计算结果如表 5 所示。

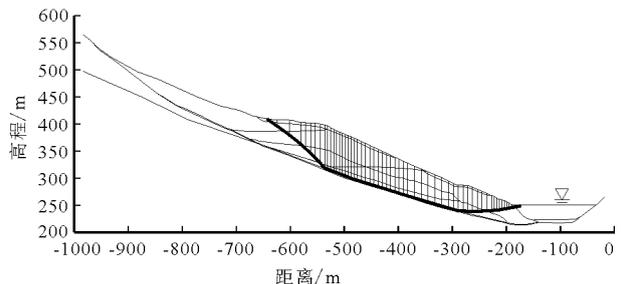


图 6 滑坡体滑速估算剖面图

表 5 基于平均滑速获得的涌浪分析计算结果

水科院经验公式法		潘家铮法		
最大涌浪高度 η_{max}/m	运行至坝前的最大涌浪高度 η/m	初始浪高 ζ_0/m	对岸最大浪高 ζ_{max}/m	运行至坝前的最大涌浪高度 ζ/m
1.11	0.80	5.81	9.49	2.95

4.3 小结

对表2、表3、表4、表5中运行至坝前的最大涌浪高度计算结果汇总,见下表6。

对比分析可得:

(1) 两种方法计算结果差距较大,且潘家铮法计算得到的涌浪高度远大于水科院经验法的计算结果。

(2) 通过压脚措施处理后和自然边坡情况下涌浪高度对比,发现无论是正常蓄水位工况还是水位骤降工况通过压脚措施都能有效的减小涌浪高度。

表6 坝前最大涌浪高度计算结果汇总表 m

计算方法	自然边坡		压脚措施处理	
	正常蓄水	水位骤	正常蓄水	水位骤
	位工况	降工况	位工况	降工况
水科院经验公式法	0.68	1.00	0.48	0.80
潘家铮法	4.45	4.04	2.44	2.95

5 结论

库岸滑坡涌浪作为一种次生灾害,其所带来的危害是巨大的。要判断库岸滑坡涌浪的危害性就必须预测涌浪到达不同位置的浪高。潘家铮法相比于水科院经验公式法,涌浪高度计算结果相比较较大,因此为更加保守的估算方法。并且潘家铮法在初始涌浪分析基础上基于波的传播理论进行推导,有一定的理论基础,且推导过程中各参数的物理意义也较为明确。而水科院经验公式法则是根据多个实际工程资料及室内试验观测成果拟合得到的,普适性还有待商榷。因此在进行滑坡涌浪估算时推荐潘家铮法作为主要的经验估计法,水科院经验公式法作为辅助方法。

针对库岸滑坡涌浪问题的防治措施,本文分析了坡脚压脚对涌浪灾害的防治效果。并对不同工况

下采取坡脚压脚措施后分别利用水科院经验公式法和潘家铮法进行了计算。对有无采取坡脚压脚措施得计算结果进行对比分析,证明通过坡脚压脚措施可有效地减小涌浪高度、防治涌浪灾害。

需要指出的是,库岸滑坡涌浪的原始观测数据是比较难得到的,而物理模型试验可得到相对准确的数据。下一步将通过物理模型试验,对以上问题进行进一步的研究。

参考文献:

- [1] 马鑫磊,任光明,夏敏. 滑坡涌浪预测评价方法综述[J]. 水利水电科技进展,2015,35(3):89-98.
- [2] 王铁昕,王国体,方诗圣. 边坡稳定和滑坡实例计算对比分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2011,34(5):721-724.
- [3] 黄种为,董兴林. 水库库岸滑坡激起涌浪的试验研究[C]//. 水利水电科学研究院科学研究论文集第13集(水力学). 北京:水利出版社,1983:157-170.
- [4] 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,2014,35(S1):133-140.
- [5] 潘家铮. 建筑物的抗滑稳定与滑坡分析[M]. 北京:水利出版社1980.
- [6] 周德培,肖世国,夏雄. 边坡工程中抗滑桩合理桩间距的探讨[J]. 岩土工程学报,2004,26(1):132-135.
- [7] 桂树强,殷坤龙,罗平. 预应力锚索抗滑桩治理滑坡应用研究[J]. 岩土力学,2003,24(S2):239-243+248.
- [8] 徐晓惠,姚再兴. 内排压脚与边坡稳定性的关系[J]. 安全与环境学报,2015,15(2):71-76.
- [9] 缪吉伦,陈景秋,张永祥,等. 库岸滑坡涌浪二维光滑粒子动力学数值模拟[J]. 水土保持通报,2013,33(3):175-179+205.
- [10] 代云霞,殷坤龙,汪洋. 滑坡速度计算及涌浪预测方法探讨[J]. 岩土力学,2008,29(S1):407-411.
- [11] 徐文杰. 滑坡涌浪影响因素研究[J]. 工程地质学报,2012,20(4):491-507.