

岩质滑坡涌浪对三峡库区岸坡的冲刷模型试验

胡杰龙¹,王平义¹,喻涛¹,曹婷²,程志友³

(1. 重庆交通大学水利水运工程教育部重点实验室,重庆 400074;
2. 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;
3. 重庆交通大学航运与船舶工程学院,重庆 400074)

摘要:为了解岩质滑坡涌浪对三峡库区岸坡的冲刷破坏情况,以万州港为原型,设计岩体滑坡涌浪物理模型试验,分析了不同滑坡体体积和滑面倾角情况下滑坡涌浪对库区 3 种不同粒径岸坡的冲刷深度和静水面上下 15 m 岸坡整体的冲刷特性。试验结果表明:岸坡最大冲刷深度与滑坡体宽度及厚度呈正相关关系;滑坡体体积较大时,岸坡冲刷深度在滑坡体滑面倾角为 40° 时最大,滑坡体体积较小时,岸坡冲刷深度在滑坡体滑面倾角为 60° 时最大;岸坡需防护范围为静水面上下 7 m,在静水面和岸坡接触的部位需重点防护。根据试验数据,给出了计算岸坡最大冲刷深度的经验公式。

关键词:岩质滑坡;涌浪;岸坡;冲刷深度;三峡库区

中图分类号:TV139.2⁺5 文献标志码:A 文章编号:1006-7647(2018)01-0088-07

Experimental study on erosion of bank slopes induced by rock landslide surges in the Three Gorges Reservoir Region/HU Jielong¹, WANG Pingyi¹, YU Tao¹, CAO Ting², CHENG Zhiyou³ (1. Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering of the Ministry of Education, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 3. School of Shipping and Marine Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: In order to study the landslide failure of rock slopes induced by rock landslide surges in the Three Gorges Reservoir Region, physical model tests of rock landslide in Wanzhou port have been designed as the prototype. The influences of landslide volumes, inclination angles of the slip surface and three different slope soil particle diameters were studied in the experiment. The scouring depths and the overall erosion characteristics of slopes in the range of 15 m below and above static water level have been analyzed. The results show that the maximum scouring depths are in positive correlation with the width and thickness of the landslide mass. For large volume of landslide mass, the scouring depth can reach its maxima if the inclination angle of the slip face is 40° while for relatively smaller volume of landslide mass, the inclination angle is 60°. The suggested scope for bank protection is in the range of 7 m below and above static water level. The empirical formula for the maximum erosion depth of bank slope was obtained based on experimental data.

Key words: rock landslide; surge; slope; scouring depth; Three Gorges Reservoir

三峡库区地处我国地形第二阶梯和第三阶梯的过渡带,地跨川东丘陵区 and 川鄂低中山峡谷区,当地地质条件复杂,暴雨以及洪水经常发生,是我国最容易发生地质灾害的地区之一,其中最常见两种灾害是滑坡和崩塌^[1]。随着我国航运事业的发展,特别是在三峡水库蓄水以来,受水库调度影响,水位经常发生较大变化,诱发库区滑坡频繁发生,滑坡形成的涌浪具有巨大的能量,会对库区岸坡造成巨大的冲刷破坏,严重影响岸坡的稳定性和航道通行的安全性。

国内外学者很早就对岸坡冲刷以及滑坡涌浪灾害进行了研究。在岸坡冲刷方面,Osman 等^[2]早期进行了侵蚀堤岸的简单土坡稳定分析,建立了 Thome 模型,但该模型缺点是简单土坡的几何剖面与自然侵蚀堤岸的几何剖面不相符。同时,Osman 等^[3]考虑河流冲刷对岸坡几何形状改变,包括河流对岸坡的侧向侵蚀和对河床的冲深,建立了 Osman-Thome 模型,将河流冲刷对堤岸的影响和堤岸边坡稳定分析进行了较好的结合。Darby^[4]在研究岸坡

受力过程中分析了静水压力以及孔隙水压力对岸坡的影响,在 Osman-Thome 模型基础上建立了 Darby-Thome 模型,该模型的不足是假设的崩滑体形状特殊,不一定符合实际情况,且模型参数过多,部分参数难以在工程中准确测量,在实际使用中有诸多不便。范云冲等^[5]研究表明岸坡的破坏主要是由波浪对岸坡的冲刷、搬运以及堆积造成的。程昌华等^[6]以物理模型试验为基础,分析得出岸坡变形与波高、岸坡坡度和岸坡土质之间的关系。程昌华等^[7]通过概化模型试验,初步研究了波浪特性对岸坡的影响。蔡晓禹等^[8-9]研究了波浪对散体岸坡冲刷破坏的机理以及三峡库区风成浪对岸坡的侵蚀作用。于玉贞等^[10]等通过水槽试验分析了渗流作用下岸坡冲刷变形。以上研究都是基于库岸附近的水动力特性或者在规则波作用下岸坡的冲刷破坏情况,没有考虑具有强破坏性的水动力特性以及波浪的叠加反射等复杂情况。在滑坡涌浪灾害方面,黄锦林^[11]通过物理模型试验研究了库岸滑坡涌浪对坝体的影响,提出了涌浪压力计算模型。杨艳^[12]运用物理模型试验和数值模拟相结合的方式,研究了山区河道型水库滑坡涌浪对架空直立式码头结构的影响。王平义等^[13-15]通过物理模型试验研究了山区弯曲河道型水库滑坡涌浪对船舶系缆力和船舶撞击力的影响。罗超等^[16-18]通过数值模拟计算了滑坡涌浪对其他结构物的影响。赵兰浩等^[19]归纳总结了边坡滑动过程以及涌浪产生过程的数值模拟方法的研究成果,提出要在现阶段独立研究的基础上融合固体力学和流体力学的相关研究方法,建立库区滑坡涌浪全程数值模拟方法,实现滑坡涌浪的全过程模拟。马鑫磊等^[20]在归纳总结大量国内外滑坡涌浪灾害预测评价方法的基础上,将滑坡涌浪的灾害预测评价方法分为 4 类,并根据各种预测评价方法的研究现状、局限性以及发展趋势提出建立滑坡涌浪灾害影响范围评估预警系统,为滑坡涌浪评价提供初始判据。上述滑坡涌浪灾害研究都是针对滑坡涌浪对航道整治建筑物、码头以及船舶的影响,很少涉及对岸坡冲刷的影响。

综上所述,国内外对于滑坡涌浪这种复杂的强灾害性波浪对库区岸坡的破坏研究还很少,基于此,本文结合实际工程通过物理模型试验,研究在滑坡涌浪作用下岸坡整体的冲刷特性,以及对岸坡造成的最大冲刷深度,以供三峡库区岸坡稳定性研究参考。

1 模型试验设计

1.1 滑坡体模型设计

试验以万州江南沱口码头河段为原型,为使得

原型和模型中物理现象相似,必须满足几何相似、重力相似和运动相似 3 个条件。根据统计资料得到的滑坡体几何尺寸以及试验条件和试验可操作性确定几何比尺为 1 : 70。根据 1 : 70 的几何比尺将该河段概化为长 52m、宽 8m 的弯曲河道。根据岩体滑坡实测资料中几何形态统计资料,考虑到试验条件限制和操作的方便性,试验拟定滑坡体长度为 1 m,通过不同滑坡体宽厚比控制滑坡体的体积,结合库区滑坡体宽厚比统计资料选取 3 种不同的宽度和厚度,得到概化滑坡体几何参数如表 1 所示。

表 1 概化滑坡体几何参数 m

滑坡体编号	长度	宽度	厚度
1	1	0.5	0.2
2	1	1.0	0.4
3	1	1.5	0.6

通过对库区滑坡区域滑面倾角的数据统计发现,滑坡滑面倾角在 20° ~ 60°之间,平均为 36°,因此滑坡滑面倾角取为 20°、40°和 60°。

岩质滑坡体由岩石块体和块体之间的空隙与空区组成,因此在结构形式上根据统计资料将滑体散体化,对滑坡体采用散体模拟时,确保其密度相似。采用 5 种不同尺寸但块体长度、宽度和厚度满足 1 : 0.667 : 0.333 比例的矩形块体经过不同的排列组合来实现岩质滑坡体的离散和裂隙情况的模拟,块体规格如表 2 所示。

表 2 概化滑坡体块体尺寸 cm

块体编号	长度	宽度	厚度
A1	21	14	6
A2	18	12	5
A3	15	10	4
A4	12	8	3
A5	9	6	2

滑坡体的宽度通过宽度可以变化的铁质滑槽来控制,可变范围为 0.5 ~ 1.5 m。滑槽底部摩擦因数和滑坡体原型基本相似。滑坡体模型如图 1 所示。



图 1 滑坡体模型

1.2 岸坡模型设计

三峡库区为一狭长河谷,位于长江上游宜昌三斗坪至重庆江津之间。经调查,三峡库区的古滑坡体或松散边坡大部分由砂土、碎石和块石组成^[21-22]。根据几何相似、重力相似原则,按照 1 : 70 的比尺进行岸坡模型设计,试验岸坡分别采用<0.25 mm、1 ~ 5 mm、5 ~ 10 mm 3 种不同粒径的砂来模拟砂质岸坡、碎石质岸坡和块石质岸坡。岸坡整体宽度为 105 cm,分成 3 部分,长度为 108 cm,坡度为 20°,如图 2、图 3 所示。岸坡冲刷模型如图 4 所示。

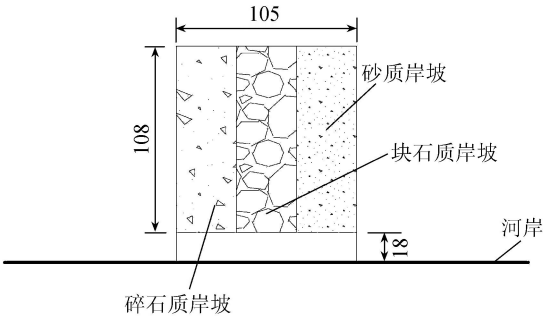


图2 岸坡模型横剖面(单位:cm)

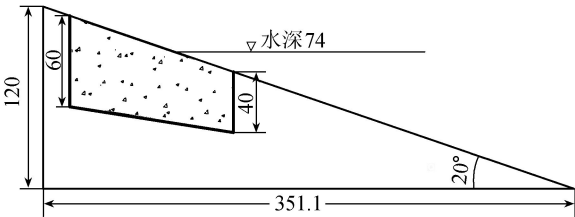


图3 岸坡模型纵剖面(单位:cm)

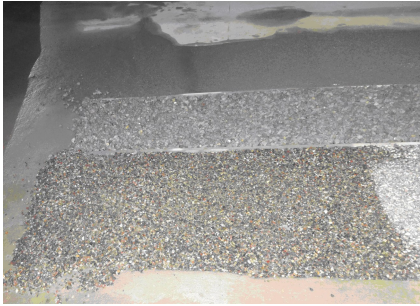


图4 岸坡冲刷模型

1.3 滑坡体和岸坡位置设计

模型试验平面布置见图 5,滑坡体处于河道凹岸的直道段处(紧邻弯段),岸坡处于滑坡体的正对面,模型岸坡的最前端距离滑坡体入水点 5.62 m,模型岸坡最后端与河岸距离为 0.18 m。

1.4 试验工况设计

三峡库区正常蓄水位 175 m,枯水期消落水位 155 m,汛期防洪限制水位 145 m。在三峡库区中,库区水深远远大于岩质滑坡体的几何尺寸,在滑坡体入水时,固液能量交换过程中富裕水深充足,在滑坡体产状和滑面倾角相同的情况下,即滑坡体重心高

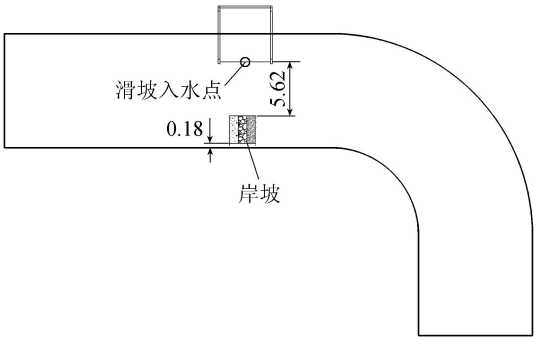


图5 模型试验平面布置示意图(单位:m)

度一定、滑坡体重力势能一定时,水深增加,滑坡体势能(相对静水面)就相对减小,滑坡体入水时的动能也就相应减小,固液能量交换后,波能也就相对减小,涌浪高度也就减小,所以对岸坡的冲刷就会相对减轻。相关研究^[23-26]也证明了上述理论的正确性。为了更加清楚地观察涌浪对岸坡的冲刷现象,试验水深按三峡水库防洪限制水位 145 m 控制,结合实际地形,按照 1 : 70 的几何比尺设计试验水位为 0.74 m。通过统计分析库区滑坡体产状资料,选择滑坡体宽度、厚度、滑面倾角 3 个参数进行滑坡体产状设计。最终试验设计为三因素三水平完全试验,共 27 组试验方案,影响因素设计如表 3 所示。

表3 影响因素设计

水平	宽度/m	厚度/m	滑面倾角/(°)
1	0.5	0.2	20
2	1.0	0.4	40
3	1.5	0.6	60

1.5 试验量测系统

试验波高采用重庆西南水运工程科学研究所自主研发的 UBL-2 型超声波浪采集分析仪测量,采集时间为 200 s,采集频率为 50 Hz。采用高清摄像机拍摄岸坡受涌浪冲刷的过程。

2 试验结果与分析

经过对试验录像的观察和分析,发现滑坡产生的涌浪对岸坡的冲刷大致可分为入射、上爬和回落 3 个阶段。涌浪从滑坡入水点传至岸坡处,因为水深逐渐变浅导致波陡不断增大,最终波浪破碎形成射流对岸坡造成很大的冲击。波浪破碎后会在岸坡表面形成上爬水流,岸坡表面的砂受到拖曳力和上举力作用。波谷时段,波浪开始回落,形成沿坡面方向的坡面水流。3 个阶段中涌浪的入射以及回落是造成岸坡冲刷的主要原因。砂颗粒在涌浪上爬时所受的作用力很小,涌浪破碎形成的射流使砂颗粒起动,涌浪在岸坡表面回落时会带走起动的砂颗粒,最终造成岸坡的冲刷。

2.1 滑坡涌浪作用下岸坡冲刷特性

影响岸坡冲刷的因素很多,如岸坡的倾角、岸坡的组成粒径、滑坡体的产状(体积、宽度、厚度、滑面倾角)、滑坡入水点到岸坡的距离等。本文主要研究岸坡组成、滑坡体体积和滑面倾角对岸坡冲刷的影响。以静水面处为零点,测量沿岸坡平面上下20 cm范围内的冲刷深度,规定向上为正方向,向下为负方向,冲刷为负值,淤积为正值。

2.1.1 岸坡组成对岸坡冲刷特性的影响

图6为相同滑坡体体积(0.9 m³)、宽度(1.5 m)、厚度(0.6 m)、滑面倾角(60°)情况下产生的涌浪对砂质、碎石质和块石质岸坡的冲刷情况。

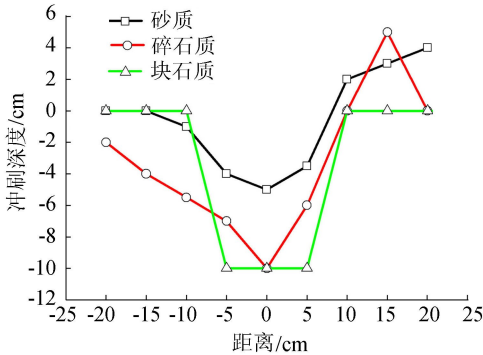


图6 不同岩质岸坡冲刷深度对比

由图6可以看出,在滑坡产状相同的情况下,砂质和碎石质岸坡具有比较明显的冲刷特征,且两者的冲刷特征基本一致,这是因为在静水面上下20 cm的范围内,滑坡产生的涌浪在两种岸坡沿程的变化规律基本一致,这从另一方面说明两种岸坡颗粒间的密度都是比较均匀的。由图6还可以看出碎石质岸坡要比砂质岸坡平均冲刷深度大一些,这是因为碎石质岸坡组成粒径大,孔隙率要比砂质岸坡大,受水的浮托力大,抗剪强度大大降低,所以在受到滑坡涌浪的打击压力时变形比砂质岸坡大。经过多组试验发现,块石质岸坡只有在滑坡体体积大而且滑面倾角大时才会形成冲刷,且没有比较明显的冲刷特性,只在岸坡某个部位形成具有一定范围的冲刷坑,且冲刷坑的部位和大小也没有规律。这是因为块石质岸坡块石之间的嵌锁力和自身重力比较大,当滑坡体体积小、滑面倾角小时产生的涌浪造成的冲击力不足以造成块石颗粒的启动,且块石之间的黏滞力很小,所以冲刷特性不明确,只会在某一大的射流情况下出现一个冲刷坑。基于此,本文着重研究砂质和碎石质岸坡的冲刷特性。

2.1.2 滑坡体产状对岸坡冲刷特性的影响

图7为相同滑面倾角(60°)情况下,0.3 m³、0.6 m³、0.9 m³ 3种体积滑坡体产生的涌浪对岸坡的冲刷特性。图8为相同体积(0.9 m³)、宽度(1.5 m)、

厚度(0.6 m)的情况下,20°、40°、60° 3种滑面倾角滑坡体产生的涌浪对岸坡的冲刷特性。

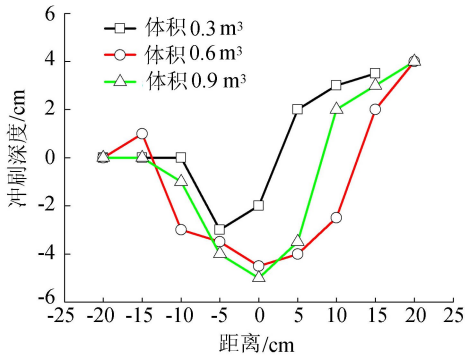


图7 不同滑坡体体积时岸坡冲刷特性

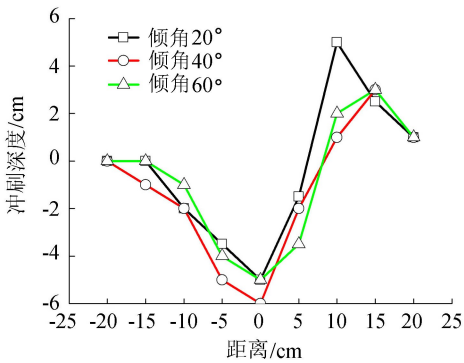


图8 不同滑坡体滑面倾角时岸坡冲刷特性

通过观察图7和图8可以发现,滑坡体体积和滑面倾角发生变化时,岸坡的冲刷特性基本相同,由此可以得知滑坡体产状变化只是对岸坡的冲刷深度大小有影响,对岸坡的冲刷特性基本没有影响。

2.1.3 岸坡冲刷防护的范围

由前可知,在岸坡结构不变的情况下,岸坡受滑坡涌浪冲刷的特性基本相同。实践中可以通过观察每次滑坡产生的涌浪对岸坡冲刷比较严重的部位以确定需要防护的范围,这样不但能够防止岸坡破坏,而且能够最大程度地节约投资。选取不同体积的滑坡体分析滑坡体体积对岸坡冲刷范围的影响,结果如图9所示。

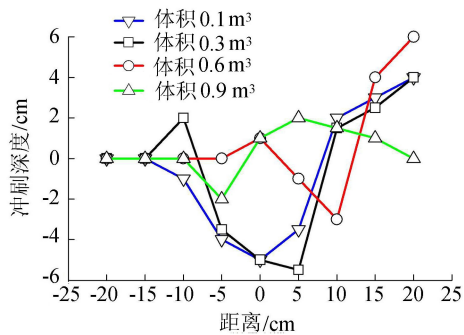


图9 岸坡冲刷范围

从图9可以看出,在静水面上下10 cm范围内,岸坡冲刷比较严重,且在静水面处冲刷最严重。按

照比尺换算,沿岸坡在静水面上下7 m 范围内要注意防护,在静水面处要重点防护。

2.2 滑坡涌浪作用下岸坡最大冲刷深度分析

前文分析得到岸坡需要进行维护的范围,但现实中除了岸坡的大范围破坏外,如果岸坡的某个部位具有很大的冲刷深度,也会使岸坡失去正常使用功能,所以分析造成岸坡最大冲刷深度的影响因素是很有必要的。

2.2.1 滑坡体宽度对最大冲刷深度的影响

以滑坡体宽度为变量,对9组相同厚度(0.6 m)和相同滑面倾角(60°)的滑坡体在宽度分别为0.5 m、1.0 m、1.5 m 情况下产生的涌浪对岸坡最大冲刷深度的影响进行对比分析,结果如图10所示。

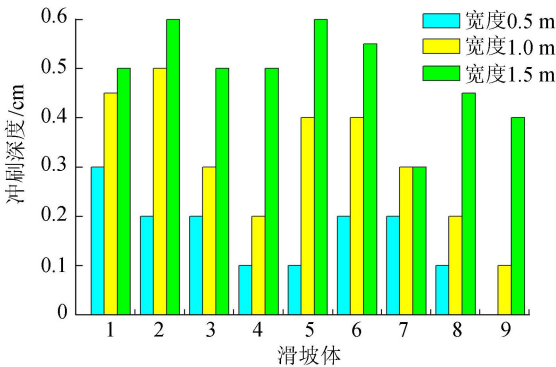


图10 不同宽度时最大冲刷深度对比

由图10可知,在滑坡体厚度和滑面倾角相同的情况下,滑坡体宽度越大,对岸坡造成的最大冲刷深度也越大。这是因为滑坡体宽度越大,滑坡体下滑入水时,在能量交换过程中,固液有效接触面越大,滑坡体动能转换成的波能越大,产生的涌浪对岸坡的冲击能量越大,导致岸坡最大冲刷深度也就越大。

2.2.2 滑坡体厚度对最大冲刷深度的影响

以滑坡体厚度为变量,对9组相同宽度(1.5 m)和相同滑面倾角(60°)的滑坡体在厚度分别为0.2 m、0.4 m、0.6 m 情况下产生的涌浪对岸坡最大冲刷深度的影响进行对比分析,结果如图11所示。

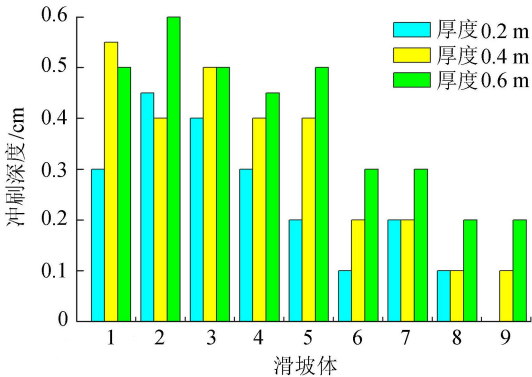


图11 不同厚度时最大冲刷深度对比

由图11可知,在滑坡体宽度和滑面倾角相同的情况下,滑坡体厚度越大,对岸坡造成的最大冲刷深度也越大。这是因为滑坡体厚度越大,滑坡体整体重心越高,滑坡体势能越大,当滑坡体入水时,所转化的波能越大,对岸坡的冲击能量也越大,岸坡最大冲刷深度就越大。

2.2.3 滑坡体滑面倾角对最大冲刷深度的影响

以滑坡体滑面倾角为变量,对9组相同宽度(1.5 m)和相同厚度(0.6 m)的滑坡体在滑面倾角分别为20°、40°、60°情况下产生的涌浪对岸坡最大冲刷深度的影响进行对比分析,结果如图12所示。

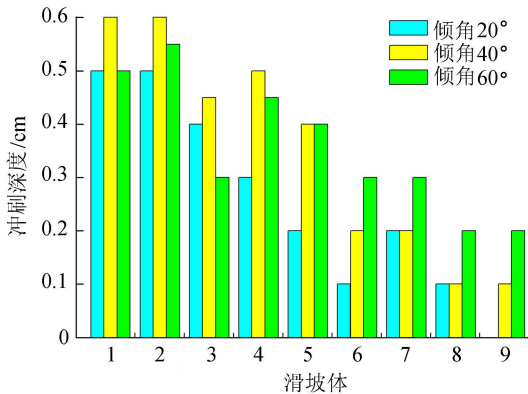


图12 不同滑面倾角时最大冲刷深度对比

由图12可知在滑坡体体积比较大的情况下,滑面倾角为40°时,岸坡最大冲刷深度最大。在滑坡体体积比较小的情况下,滑面倾角为60°时,岸坡最大冲刷深度最大。这是因为滑坡体体积大、滑面倾角为60°时,滑坡体以很快的速度入水,激起大量波浪且浪高都比较高,损失很大一部分能量;而当倾角为40°时,虽然入水时滑坡体动能没有60°时大,但是其损失的能量小,最后转换成的波能比60°时大,所以对岸坡的冲击能量更大,造成的最大冲刷深度更大。在滑坡体体积较小时,滑坡体入水损失的能量都较小,这时滑面倾角越大,滑坡体动能越大,最终转换成的波能越大,造成的岸坡最大冲刷深度越大。

2.2.4 最大冲刷深度的回归分析

库区水深越大,滑坡造成的涌浪高度越小,滑坡体产生的波能越小,对岸坡的破坏能力也越小,因此从工程安全角度出发,本文仅拟合在枯水位下滑坡涌浪对岸坡最大冲刷深度的经验公式。由上文分析可知,岸坡的最大冲刷深度受滑坡体宽度 w 、厚度 t 以及滑面倾角 β 的影响,试验中滑坡体的厚度是主要控制参数,因此对最大冲刷深度 H 及各个影响参数进行无量纲化处理,得到 H/t 、 w/t 、 β (弧度制)3个参数用于拟合经验公式。

对砂质岸坡采用线性函数、幂函数、指数函数进

行多元线性回归,可以得到以下 3 个岸坡最大冲刷深度的经验公式:

$$\frac{H}{t} = 0.00218 \frac{w}{t} + 0.00444\beta - 0.00113 \quad (1)$$

$$\frac{H}{t} = 0.0045 \left(\frac{w}{t} \right)^{0.7315} \beta^{0.3553} \quad (2)$$

$$\frac{H}{t} = 0.0025 \exp(0.2273 \frac{w}{t} + 0.5925\beta) \quad (3)$$

采用式(1)(2)(3)计算所有工况下岸坡最大冲刷深度,并与试验值进行对比,结果见图 13。

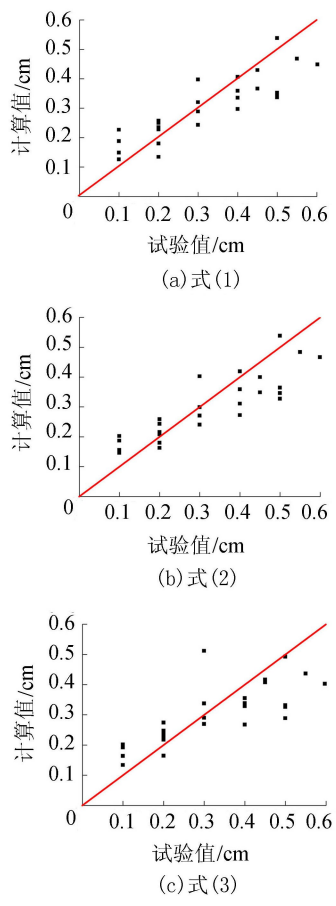


图 13 砂质岸坡最大冲刷深度经验公式
计算值与试验值对比

由图 13 可以看出各点均匀分布在两侧,计算值和试验值比较吻合,3 个公式的相关系数 $R_{(2)}^2 > R_{(1)}^2 > R_{(3)}^2$ 。因此建议采用式(2)计算砂质岸坡最大冲刷深度。

对碎石质岸坡用线性函数、幂函数、指数函数进行多元线性回归,可以得到以下 3 个最大冲刷深度的经验公式:

$$\frac{H}{t} = 0.00244 \frac{w}{t} + 0.0065\beta - 0.00369 \quad (4)$$

$$\frac{H}{t} = 0.0066 \left(\frac{w}{t} \right)^{0.5415} \beta^{0.4257} \quad (5)$$

$$\frac{H}{t} = 0.0033 \exp(0.1715 \frac{w}{t} + 0.5923\beta) \quad (6)$$

分析结果表明,计算值和试验值吻合较好,3 个公式的相关系数 $R_{(4)}^2 > R_{(5)}^2 > R_{(6)}^2$ 。因此建议采用式(4)计算碎石质岸坡最大冲刷深度。

滑坡体入水后在入水点处产生的最大波高为初始涌浪高度。初始涌浪高度的大小在一定程度上反映了滑坡产生涌浪能量的大小及涌浪破坏能力的强弱,因此可以把初始涌浪高度作为衡量涌浪灾害的指标。为了验证经验公式的可行性和正确性,对影响初始涌浪高度的 3 个参数进行了分析,滑坡体宽度、厚度以及滑面倾角对初始涌浪高度影响的试验结果表明,当其他因素相同时滑坡体宽度越大,初始涌浪高度越大;当其他因素相同时滑坡体厚度越大,初始涌浪高度越大;当其他因素相同时,在滑坡体体积比较大的情况下,滑面倾角为 40° 时,初始涌浪高度最大,在滑坡体体积比较小的情况下,滑面倾角为 60° 时,初始涌浪高度最大。初始涌浪高度受滑坡体宽度、厚度以及滑面倾角等因素影响的变化规律和岸坡最大冲刷深度的变化规律一致。试验结果分析表明,岸坡最大冲刷深度和初始涌浪高度呈线性关系。可见岸坡最大冲刷深度经验公式是可行和正确的。

3 结 论

a. 砂质和碎石质岸坡的冲刷特性基本一致,碎石质岸坡平均冲刷深度比砂质岸坡大;块石质岸坡只有在滑坡体体积大且滑面倾角大时才会形成冲刷,且没有比较明显的冲刷特性。滑坡体产状变化只对岸坡的冲刷深度大小有影响,对岸坡的冲刷特性基本没有影响。岸坡需要在静水面上下 7 m 范围内进行防护,在静水面和岸坡接触的部位要重点防护。

b. 滑坡体宽度和厚度越大,对岸坡造成的最大冲刷深度越大;在滑坡体体积比较大的情况下,岸坡冲刷深度在滑坡体滑面倾角为 40° 时最大,在滑坡体体积比较小的情况下,岸坡冲刷深度在滑坡体滑面倾角为 60° 时最大。通过多元回归分析得到了计算砂质和碎石质岸坡最大冲刷深度的经验公式。

参考文献:

[1] 易武,孟召平,易庆林. 三峡库区滑坡预测理论与方法 [M]. 北京:科学出版社,2011.

[2] OSMAN A M, THORNE C R. Riverbank stability analysis I: theory [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1988, 114(2): 134-150.

[3] OSMAN A M, THORNE C R. Riverbank stability analysis II: applications [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1988, 114(2): 151-172.

- [4] DARBY S E T C. Development and testing of riverbank-stability analysis[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1996, 122(8):443-454.
- [5] 范云冲,张友谊,胡卸文. 库岸再造预测方法及其评价[J]. 四川水力发电, 2002, 21(4): 69-71. (FAN Yunchong, ZHANG Youyi, HU Xiewen. Prediction method of reservoir bank reconstruction and its evaluation [J]. Sichuan Water Power, 2002, 21(4): 69-83. (in Chinese))
- [6] 程昌华,邓伯强. 影响库岸坍塌的水动力特性研究[J]. 重庆交通学院学报(自然科学版), 1996, 15(5): 50-58. (CHENG Changhua, DENG Boqiang. Study on hydrodynamic characteristics of reservoir bank collapse [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science Edition), 1996, 15(5): 50-58. (in Chinese))
- [7] 程昌华,陈学兵. 波浪对库岸坍塌变形的试验研究[J]. 重庆交通学院学报(自然科学版), 1994, 13(增刊1): 54-59. (CHENG Changhua, CHEN Xuebing. Experimental study on the collapse deformation of reservoir bank [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science Edition), 1994, 13(Sup1): 54-59. (in Chinese))
- [8] 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.
- [9] 蔡晓禹,凌天清,唐伯明,等. 波浪对散体岸坡冲刷破坏的机理[J]. 重庆交通学院学报(自然科学版), 2006, 25(2): 73-76, 86. (CAI Xiaoyu, LING Tianqing, TANG Boming, et al. The wave of the particle bank slope erosion mechanism [J]. Journal of Chongqing Jiaotong College (Natural Science Edition), 2006, 25(2): 73-76, 86. (in Chinese))
- [10] 于玉贞,谢立全,孙逊. 渗流作用下的江河岸坡冲刷变形分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(增刊1): 311-314. (YU Yuzhen, XIE Liquan, SUN Xun. Analysis of deformation of river bank slope under seepage flow [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(Sup1): 311-314. (in Chinese))
- [11] 黄锦林. 库岸滑坡涌浪对坝体影响研究[D]. 天津:天津大学, 2011.
- [12] 杨艳. 山区河道型水库滑坡涌浪对架空直立式码头结构作用影响研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2013.
- [13] 王平义,韩林峰,喻涛. 滑坡涌浪对高桩码头船舶撞击力的影响[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2016, 37(6): 878-884. (WANG Pingyi, HAN Linfeng, YU Tao. The landslide surge effect on impact force of high pile wharf ship [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2016, 37(6): 878-884. (in Chinese))
- [14] 张捷. 山区弯曲河道型水库滑坡涌浪对直立式码头作用的试验研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2015.
- [15] 张永飞,喻涛,张捷,等. 三峡库区滑坡涌浪作用下高桩码头船舶系缆力试验研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(15): 295-300. (ZHANG Yongfei, YU Tao, ZHANG Jie, et al. Landslide in Three Gorges Reservoir area under test of cable force of high pile wharf ship [J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(15): 295-300. (in Chinese))
- [16] 罗超. 滑坡涌浪数值模拟及其与结构物的相互作用[D]. 武汉:武汉理工大学, 2012.
- [17] 徐娜娜. 大型滑坡涌浪及堰塞坝溃坝波数值模拟研究[D]. 上海:上海交通大学, 2011.
- [18] 杨艳增,陈兵. 利用 Boussinesq 方程对作用于大直径圆筒结构上的波浪力进行数值模拟[J]. 水运工程, 2006(2): 4-7. (YANG Yanzeng, CHEN Bing. Numerical simulation of using Boussinesq equation of wave forces on the large diameter cylinder structure [J]. Waterway Engineering, 2006(2): 4-7. (in Chinese))
- [19] 赵兰浩,侯世超,毛佳. 库区滑坡涌浪数值模拟方法研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2016, 36(2): 79-86. (ZHAO Lanhao, HOU Shichao, MAO Jia. Progress in numerical simulation of landslide surge in reservoir area [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36(2): 79-86. (in Chinese))
- [20] 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. (MA Xinlei, REN Guangming, XIA min. Summary of landslide prediction and evaluation methods [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(3): 89-98. (in Chinese))
- [21] 徐平. 三峡库区涉水滑坡体稳定性的可靠度研究[D]. 西安:长安大学, 2011.
- [22] 严敏嘉. 三峡库区堆积层滑坡滑动面特征及稳定性研究[D]. 武汉:武汉工程大学, 2015.
- [23] 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.
- [24] 胡小卫. 山区河道型水库滑坡涌浪特性研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2010.
- [25] 李卓,何勇军,李宏恩,等. 前期降雨作用下边坡滑坡模型试验[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2016, 44(5): 400-405. (LI Zhuo, HE Yongjun, LI Hongen, et al. Model test on slope landslides under antecedent rainfall [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2016, 44(5): 400-405. (in Chinese))
- [26] 张长宽,陈欣迪. 海岸带滩涂资源的开发利用与保护研究进展[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2016, 44(1): 25-33. (ZHANG Changkuan, CHEN Xindi. Advances in development, utilization, and protection of coastal tidal flats [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2016, 44(1): 25-33. (in Chinese))

(收稿日期:2016-12-22 编辑:熊水斌)