

库区滑坡涌浪试验研究综述

陈 里¹, 喻 涛^{2,3}, 王平义^{2,3}, 何 庆¹

(1. 重庆交通大学 河海学院, 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 水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074)

摘要:在对库区滑坡涌浪资料统计和分析的基础上,概述了库区滑坡涌浪典型实例及其危害。深入研究了已有的滑坡涌浪模拟技术和计算方法,并进行了分析评价。由于滑坡产生的涌浪特征与滑坡体本身的几何参数、运动方式、滑坡角度等众多因素有关,且不是单纯的线性关系,因此,从整体能量的角度考虑,提出了库区滑坡涌浪的实验室分类模拟方法。可为滑坡涌浪物理模型试验提供系统和完整的技术支撑。

关 键 词:滑坡涌浪; 研究评价; 土质滑坡; 岩体滑坡; 陡岩体滑坡; 模拟分类

中图法分类号: P642

文献标志码: A

DOI:10.16232/j.cnki.1001-4179.2015.07.022

水库库岸滑坡以及滑坡所产生的涌浪将直接威胁到水利水电工程、港口航道工程和两岸人民群众的生命财产安全。随着国民经济的快速发展,我国逐步加快在长江中上游山区河流的水利水电和航道工程建设,这一问题就显得尤为突出。

目前,在滑坡形成机制、滑坡监测及预防预报方面,国内外的研究颇多,而对滑坡涌浪的特性研究尚没有较为深入和完整的理论与计算方法。滑坡涌浪的研究有大量的技术性难题,很多理论只是简单的科学推测和推导,特定的课题和研究很少,甚至没有一个统一的理论体系。总结过去,展望未来,找出不足,不断前进,具有重要的历史和现实意义。

1 滑坡涌浪典型实例

目前,库区滑坡涌浪典型实例很多,选取土质、岩体和陡岩体3种典型滑坡及其产生涌浪的特征和破坏性做简单介绍。

(1) 三峡库区鸡扒子滑坡。鸡扒子滑坡由滑坡堆积、崩坡积、残坡积和冲积等不同成因的松散堆积物组成,是典型的土质滑坡。滑坡总体积1 500万 m^3 ,滑体有230万 m^3 滑入河道中。滑坡所处地区属于低山河谷地貌,江面宽300~600 m,河谷呈“V”形,北岸缓,

南岸陡。区域地质较为发育,北岸由砂岩、泥岩互层组成顺向坡,坡上崩滑、冲沟较发育。

1982年7月,鸡扒子滑坡附近区域连降暴雨,老的宝塔滑坡后缘先发生崩滑,约17万 m^3 泥石流堵塞排水沟导致了鸡扒子滑坡的发生。滑坡发生时正值长江洪水期,230万 m^3 的土石进入河道导致河床被抬高,过水断面被缩小,流速从3 m/s迅速增大,造成航行困难。

鸡扒子滑坡属于缓慢的蠕变土质滑坡,滑坡体阻塞河床,恶化了水流条件。

(2) 三峡库区链子崖滑坡。链子崖滑坡长约700 m,宽约50~180 m,其物质构成主要有巨厚和中厚层的灰岩,区域地质较为发育,滑坡体后缘离江面高达50 m。滑坡体体积约为250万 m^3 ,其中入水量仅为75万 m^3 。

受长期降雨和当地采煤的影响,岩体构造裂隙发育区形成较大裂缝,岩体结构被破坏。滑坡发生较为突然,且散列块体较大,岸坡较高,能量较大,形成了巨大的涌浪。滑坡发生后,由于其传播范围较广,破坏了水流条件,致使严重碍航或断航。

链子崖滑坡属于典型的陡岩体滑坡,滑坡体较大,入水方量较小,由于其距江面高度大,能量较高,所引

起的涌浪传播范围广,破坏性大。

(3) 清江水布垭库区大堰塘滑坡。大堰塘滑坡总体积约为 300 m^3 ,其物质构成主要有碎裂岩、块裂岩、碎石及崩坡积物。区域地质较为发育,共两条两组节理,局部岩体破碎松散,整体性较差。

由于水库蓄水及大堰塘滑坡附近区域的连续降雨,滑坡发生前曾发生过小范围的小滑坡。滑坡发生时,滑坡前缘小部分土体发生坍塌,随着后缘裂缝的增大,中后部岩体随后滑入水中。经调查发现,滑坡发生时,滑坡附近涌浪爬高最大可达 50 m 左右,距离滑坡入水点 20 km 处,涌浪爬高也可达到 4 m 左右。

大堰塘滑坡属于典型的岩体滑坡,体积属于中型滑坡,其所引起的涌浪传播范围广,破坏性大。

2 滑坡涌浪研究评价

以三峡库区为例,随着三峡水库蓄水,库区滑坡的稳定平衡状态逐渐被打破,现有以及潜在的滑坡及产生的涌浪将会对库区航道造成严重危害。目前,国内对库区滑坡涌浪的研究也越来越多,结合已研究的资料,现有滑坡涌浪的模拟技术方法主要有理论分析和估算、数值模拟计算和物理模型试验。

2.1 理论分析和数值模拟法

理论分析方法主要以 Edward Noda^[1]和潘家铮^[2]的两种计算方法为主,后来的研究多是对这两种方法进行的修正计算。数值模拟计算方法主要有有限元法、有限差分法和离散法等,主要是对已有的滑坡建立数学模型进行求解。例如 H. M. Fritz 等^[3]对滑坡涌浪二维计算的数学模型进行了深入分析,G. Perezl 等^[4]以 Saint - Venant 模型为基础,从水平滑坡运动和垂直滑坡运动两个方面,分析计算了涌浪的传播和衰减规律。

目前为止,由于从滑坡到涌浪产生的过程非常复杂,人们对滑坡涌浪的认识还不清晰。例如,滑坡涌浪影响因素的确定及因素之间的关系尚不明确,数值模拟中的初始条件和边界条件界定不清,往往每个分析方法和公式之间所计算出来的数值都很难接近,运用理论分析和数值模拟的计算方法所计算出来的数值很难达到预期的效果。

2.2 物理模型试验

将物理模型试验所得数据进行拟合,得出滑坡涌浪经验计算公式。物理模型试验方法分为两种,即概化滑坡涌浪物理模型试验和特定滑坡涌浪物理模型试验。

概化滑坡涌浪物理模型试验从滑坡涌浪机理的认

识出发,对其影响因素进行分析,对滑坡及其影响因素进行概化模拟,并在概化水槽中进行试验。已有的国内外概化滑坡涌浪物理试验得出的经验计算公式有很多,但每个公式计算结果往往相差很大。

特定滑坡涌浪物理模型试验是对某个特定的滑坡进行概化模拟,不仅考虑了滑坡实际的形态、体积、密度、坡度和速度等特征,还对河道的形态、宽度、水深进行模拟,甚至还可以考虑码头船舶等实际航道附属设施。特定滑坡涌浪模型试验虽然很接近真实效果,但其应用价值往往具有一定的局限性。

已有滑坡涌浪的模型试验很多,大多数只是进行概化的简单模拟,考虑的因素各不相同,参数的选取也极不统一,以下对已有的滑坡涌浪模拟做简单的分析评价。

(1) Edward. Noda 和潘家铮方法主要考虑了水平、垂直两种极端的运动,实际中滑坡多是沿着滑动面倾斜入水,没有考虑滑坡的厚度、长度及宽度对涌浪高度的影响,只是从单一固定刚性长方体来考虑。

(2) B. Ataie - Ashtiani^[5]用水泥制作长方体、楔形体作为刚性滑坡模型,用碎石等颗粒材料制作柔性滑坡模型,考虑滑坡体长、宽、厚度的影响,首次考虑了散体滑坡体模型。

(3) 长江科学院^[6-7]将滑坡体初始状态概化为长方形散粒石堆积体,由箱体控制滑坡体初始形状,滑坡体脱离箱体后可全部碎裂。滑坡体模型主要考虑散石堆积体的粒径。

(4) 中国地质大学滑坡涌浪模型试验^[8],滑坡体采用水泥和碎石作为滑坡模型材料,在满足坡体密度相似的前提下,按照尺寸要求,制作滑坡模型,考虑滑坡的长宽厚度,并将滑坡体的形状概化为长方体、六面楔形体 and 七面楔形体。

(5) 重庆交通大学滑坡涌浪模型试验^[9],滑坡体设计参照原型三峡库区典型土质滑坡,按几何比尺和物理比尺来确定,其设计关键是确定土样的土石比、含水量、碎块石粒径以及压实度等物理指标。试验首次选用了土体作为滑坡体的物质构成,模拟具有一定的真实性。

(6) 重庆交通大学陡岩体滑坡涌浪模型试验^[10],滑坡体设计参照原型三峡库区典型陡岩体滑坡,按几何比尺和物理比尺来确定,考虑了陡岩体滑坡的密度、发育裂隙等物理指标,将滑坡体散体化,试验中首次选用了滑坡体的临水状态和坡面起伏度,试验具有一定的真实性。

滑坡涌浪的影响因素较多,主要有滑坡产状(长、宽、高、重心等)、滑坡坡度、滑面摩擦系数、水深、河道

地形等,很难一次模拟较多因素对涌浪的影响,只能根据实际情况,科学选取。

3 库区滑坡涌浪模拟技术研究

目前,在滑坡涌浪模拟分类方面没有一个统一而详细的界定。经过对多家公式的验证、比较,可得出不同类型的滑坡涌浪计算公式不能互用、计算结果相差较大的结论。这是因为滑坡的类型众多,特点各不相同,不同类型的滑坡产生涌浪的主要影响因素、能量交换机制等不尽相同。这些都影响试验因素的选取、模拟方式的确定、计算公式的选择,所以得出的结果只能应用于既定滑坡类型产生的涌浪。因此需要对所研究的滑坡类型进行详细的分类,只有明确研究对象及前提条件,得出的结果才有实用价值。

3.1 滑坡涌浪特征

目前,相关学科已经将滑坡做了较为详细的分类,对三峡库区来说,主要分为土质滑坡、岩体滑坡和陡岩体滑坡,在已有的滑坡涌浪模型试验基础上,对库区 3 大类型的滑坡涌浪特性也有了较深入的认识。

库区土质滑坡的物质构成以土体以及表面堆积物为主,由于其分布范围大,规模主要是大中型,在下滑和入水过程中近似整体,分布高程较低,一般是靠近江边或库岸边,滑速主要以中低速为主。由于库区土质滑坡滑面坡度较小,滑速较低,涌浪主要是较大能量的土体对水体产生推移而形成的,水面推移产生的波高或壅浪高占很大部分,由于土体和水体振荡所产生的波浪较小,在滑速较低的情况下,水体很难产生溅高。

库区岩体滑坡的物质构成是以岩体为主,分布范围较广,规模为大中型,由于裂隙发育以及地质构造,滑坡在下滑和入水过程中近似散体,滑速主要以中高速为主。由于岩体滑坡的这些特点,其产生的涌浪也较为复杂,既有一部分水面推移所产生的波高或壅浪高,土体和水体振荡所产生的波浪也占很大一部分,还有在较高滑速作用下,一部分能量的水体溅高。

库区陡岩体滑坡的物质构成是以岩体为主,规模中小型,多为散体,由于分布高程较高,滑面坡度较大,具有较高的能量,入水速度极快。因此,陡岩体滑坡所产生的涌浪很大一部分能量都转化为水体的溅高,也就是说大部分的水体由于滑体的作用而四处飞溅。当然,块体和水体振荡所产生的波浪也占很大一部分。

3.2 滑坡涌浪模拟分类

滑坡入水前的能量和其交换程度是整个问题的关键,而这些和滑坡入水前本身的状态和特性息息相关,也就是说,滑坡入水前的状态和特性直接决定着涌浪

本身的特性。主要影响因素包括滑坡体的产状(地理位置、几何尺寸、重心高程、前缘形态、滑面坡度、裂隙发育程度、物质组成、规模等)、滑带(滑动面倾角、物质组成、滑面摩擦系数、走向、地形的起伏度等)、介质特征(流速、水位、水面宽度、库容量等)、地形条件(河床宽度、深度、岸坡坡度、河道形态等)等。产状和滑带参数会影响滑坡体入水前的滑动速度、能量、离散程度、固液接触面形态、接触面面积。介质特征和地形条件主要是影响固、液能量交换的充分程度(交换时间、交换方式、地形对能量的消耗)和涌浪的传播。

在对库区滑坡分类及前人滑坡涌浪模拟的基础上,从整体能量的角度出发,根据库区滑坡类型和其产生涌浪特性的不同,在今后物理模型试验中可将滑坡涌浪实验室模拟分为 3 大类(见表 1),分别为土质滑坡涌浪、岩体滑坡涌浪和陡岩体滑坡涌浪实验室模拟。

表 1 滑坡涌浪实验室模拟分类

模拟分类	物质构成	规模	分布状态	滑速	离散程度
土体滑坡	土体和堆积物	大、中	分布广	中低速	整体为主
岩体滑坡	岩体和少量土体	大、中	分布较广	中高速	散体为主
陡岩体滑坡	岩体	小	分布较散	高速	多为散体

库区滑坡涌浪的实验室分类模拟方法,为滑坡涌浪物理模型试验提供了系统和完整的技术支撑,今后特定的滑坡涌浪物理模型试验都可在此基础上进行细化和发展。

4 展 望

现阶段理论分析、数值模拟和物理模型试验等方法都不可能明确包含所有因子,在影响因素较为复杂的情况下,对库区滑坡涌浪的计算研究应该具体问题具体分析。由于滑坡产生的涌浪特征与滑坡体本身的几何参数、运动方式、滑坡角度等众多因素有关,且相关性不是单纯的线性关系。因此,今后在滑坡涌浪相关问题研究及模型规程制定过程中,首先要对滑坡的类型进行具体细致的区分和类定^[11],以保证研究结果的可靠性。

参考文献:

[1] Edward. Noda. Waterwaves generated by landslides. Journal of the Waterways[J]. Harbors and Coastal Eneineering Division,1970,96(4): 835-855.

[2] 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.

[3] H. M. Fritz, W. H. Hager, H. E. Minor. Near field characteristics of landslide generated impulse waves[J]. Journal of the waterway Port Coastal and Ocean Division, ASCE,2004,130(6):287-302.

[4] G. Perezl, P. Garcia - Navarro, M. E. Vaquez - Cendon. One - dimensional model of shallow water surface waves generated by landslides

- [J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 2006, 132(5): 462 – 473.
- [5] B. Ataie – Ashtiani, A. Nik – Khah. Impulsive waves caused by sub-aerial landslides[J]. Journal of the Environ Fluid Mech, 2008, 8(7): 263 – 280.
- [6] 任坤杰, 韩继斌, 陆虹. 滑坡涌浪首浪高度试验研究[J]. 人民长江, 2012, 43(2): 43 – 45.
- [7] 任坤杰, 韩继斌. 散体滑坡体首浪高度模型试验研究[J]. 人民长江, 2010, 42(24): 69 – 72.
- [8] 汪洋, 殷坤龙. 水库库岸滑坡涌浪的传播与爬高研究[J]. 岩土力学与工程学报, 2008, 29(4): 1031 – 1034.
- [9] 李 颖, 王平义, 胡小卫. 山区河道型水库滑坡涌浪的计算研究[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2011, 30(2): 295 – 298.
- [10] 门永强, 王平义, 喻涛, 等. 山区河道型水库滑坡涌浪首浪高度试验研究[J]. 科技信息, 2013, (11): 22 – 24.
- [11] 中国水利水电科学研究院. 滑坡涌浪模型试验规程 SL165 – 2010 [S]. 2010.

(编辑: 徐诗银)

Summary of experimental study on landslide – induced surge in reservoir area

CHEN Li¹, YU Tao^{2,3}, WANG Pingyi^{2,3}, HE Qing¹

(1. School of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing, 400074, China; 2. National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 3. Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering of the Ministry of Education, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: On the basis of data statistics and analysis of the landslide – induced surge in reservoir area, the typical examples and the harm of the landslide surge are described. By further study of the existing computation method and simulation technology of the landslide – induced surge, the analysis and evaluation are conducted. The characteristics of landslide – induced surge in reservoir area are related to the geometric parameters, movement mode and angle of landslide body. From the perspective of a overall energy, the laboratory classification simulation method of the landslide – induced surge is determined, which can provide systematic and complete technical support for the physical model test of landslide – induced surge.

Key words: landslide – induced surge; research evaluation; soil landslide; rock landslide; steep rock landslide; simulation classification

(上接第 63 页)

Comparative experiment on different combination of physics schemes of WRF model in mountain torrent early – warning

CHEN Chaojun^{1,2}, LI Jun²

(1. Hydrology and Water Resources Investigation Bureau of Chongqing, Chongqing 401147, China; 2. Hubei Key Laboratory for Heavy Rain Monitoring and Warning Research, Institute of Heavy Rain, China Meteorological Administration, Wuhan 430205, China)

Abstract: To obtain the optimal combination of physical schemes for the forecast of mountain torrent disaster precipitation, on the basis of WRF model, the historic mountain flood process occurred in Yangtze River Basin was simulated by using different combinations of physical schemes, and the results were compared, analyzed and checked. The forecast ability for precipitation of all magnitudes using different combinations was evaluated by TS verification and an optimal physical process was obtained. It shows that the simulated rainfall gets the most close to observed data when the micro – physical parameter adopts WSM6 and the convection parameter adopts Kfeta, so this scheme is the most stable. It demonstrates that the reasonable selection of combination of physical schemes is the key to gaining better forecast results.

Key words: numerical weather prediction; WRF model; TS verification; mountain torrent disaster