

# 滑坡涌浪预测评价方法综述

马鑫磊,任光明,夏敏

(成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室,四川成都 610059)

**摘要:** 鉴于滑坡涌浪是一个涉及滑坡动力学、岩土力学及流体力学等多学科的复杂流固耦合问题,且具有重要的地质灾害研究价值,在收集整理国内外20个典型滑坡涌浪资料、归纳大量国内外滑坡涌浪预测评价方法的基础上,将滑坡涌浪的预测评价方法分为四类:经验公式法、数值分析法、物理模拟法和其他研究方法,针对各类方法的适用性与优缺点展开讨论与评析。根据滑坡涌浪各种预测评价方法的研究现状、局限性以及发展趋势,提出未来滑坡涌浪研究的几点展望。

**关键词:** 滑坡涌浪;预测方法;滑速;初始涌浪高度;综述

**中图分类号:** P642.22      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1006-7647(2015)03-0089-10

**Review on the forecast evaluation methods of landslide surge//** MA Xinlei, REN Guangming, XIA Min (State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

**Abstract:** Landslide surge is a complex fluid-solid coupling problem that involves landslide kinetics, rock-soil mechanics, hydromechanics and other disciplines, and it has an important value in geological disaster research. Therefore, in this paper data of twenty typical landslide surges were collected and analyzed. Additionally, it is presented an evaluation of the large numbers of landslide surge forecast methods at home and abroad. The forecast evaluation methods of landslide surge are generally grouped into four categories, they are: empirical formula method, numerical analysis method, physical simulation method, and other method. Then the applicability, advantages and disadvantages of each method were discussed and analyzed. Further, based on the research status, limitations and development tendency, the outlooks of landslide surge research are proposed.

**Key words:** landslide surge; evaluation methodology; sliding velocity; initial surge height; review

滑坡涌浪主要是指边坡岩土体突然滑动,并与水体相互作用而激起的波浪。在海岸沿线,水下滑坡是产生海啸的第二大诱因,其产生的破坏强度有时甚至超过地震诱发的海啸<sup>[1]</sup>。对于河流、湖泊地带,大型滑坡涌入水中必将严重威胁过往船只的航运安全。随着水利水电工程的修建,研究人员越来越重视库岸边坡的安全稳定。首先,水库的修建必然会对库周自然边坡进行人工再造,导致自然地质条件和应力场的变化,容易引发岩土体的变形破坏;其次,库水对现有松动体、滑坡体和崩塌体有浸润软化和浮托作用<sup>[2]</sup>,同时,水位的升降更易促使岩土体发生失稳,而一旦巨型滑坡甚至滑坡群高速滑入库内,必将产生巨大的涌浪,引起严重问题,如威胁航运船只,导致停航禁航;破坏库周水工建筑物,导致坝体溃决,冲毁下游农田、民房、铁路、公路,威胁城镇居民的生命财产安全等。因此,研究滑坡涌浪

问题具有重要的工程指导意义,但滑坡涌浪是一个涉及滑坡动力学、岩土力学及流体力学等多学科的复杂流固耦合问题<sup>[3]</sup>,目前该课题仍有若干问题亟待解决。本文在对前人研究成果进行评述的基础上,阐述该课题研究中存在的问题和今后的发展方向。

## 1 滑坡涌浪工程实例

滑坡涌浪是近水滑坡所引发的重要地质灾害之一,1671年,秘鲁琼加某湖泊发生滑坡,体积约为 $1.0 \times 10^5 \text{ m}^3$ ,造成400~600人死亡;1961年3月,中国柘溪水库发生了塘岩光滑坡,涌浪高度达21m,造成水工建筑的大面积损毁,并导致40余人死亡;1963年,震动水利工程界的著名意大利瓦伊昂滑坡,体积达2.4亿 $\text{m}^3$ ,激起超过250m的巨大涌浪,造成下游大面积洪水泛滥,死亡人数约3000人;1985年6月12日,中国湖北新滩滑坡约 $3.0 \times 10^7 \text{ m}^3$

基金项目:国家自然科学基金(41072229)

作者简介:马鑫磊(1990—),女,吉林四平人,硕士研究生,主要从事水利水电工程岩土体稳定性及灾害研究。E-mail:maxinlei1990@163.com

岩土体涌入长江,滑坡对岸涌浪爬高约 49 m,由于监测预警及时,仅造成部分船只受损,死亡 9 人。通过分析国内外 20 个典型滑坡涌浪资料<sup>[4-6]</sup>(表 1),可以很直观地了解到滑坡涌浪造成的巨大危害。滑坡涌浪与其坡体形态结构、滑坡体积、破坏模式、滑带特性,以及水域类型、水深、水域地形等许多因素都有关系。因此,在计算和预测滑坡涌浪时很难精确选取初始条件、边界条件和传播模型等,现多采用数学方法预先对影响因素进行敏感性和关联性分析,以确定影响大小,进而获得相对精确的滑坡涌浪计算方法。

## 2 滑坡涌浪的预测方法

多年来,在研究人员的不断努力下,滑坡涌浪计算和预测方法已经取得了较大突破,但由于滑坡涌浪形成与传播的物理力学过程复杂,进展仍相对缓慢。经查阅大量文献发现,涌浪的研究方法主要有经验公式法、数值分析法、物理模拟法,以及其他研究方法等,下面就这四大类预测方法进行分析论述。

### 2.1 经验公式法

滑坡涌浪的形成过程可分为 3 个阶段,即涌浪的形成、传播以及爬高。滑坡涌浪高度主要取决于滑坡的规模和滑坡入水速度(滑速),因此,准确、科学地计算滑速成为滑坡涌浪研究的先决条件,但在研究方法上,滑速的计算与涌浪高度的估算存在一定的差异,前者属于地质力学范畴,后者则与流体动力学紧密相关。

#### 2.1.1 滑速和初始涌浪高度预测

a. 滑速。影响滑速的因素众多,如滑坡失稳机

制、坡度、滑动方向、滑带力学特性、水阻力、空气阻力、水位、地震加速度等。目前常用的几种滑速计算方法有能量法、潘家铮法(条分法)、谢德格尔法、科内尔法、美国土木工程师协会推荐公式法等。能量法是从能量守恒的角度计算滑速,避免了滑坡运动过程的复杂性,但计算过程中忽略了变形能和水体的阻力;潘家铮法对滑体进行垂直条分进而求出条块滑速,能够相对真实地反映坡体形态,但只能静态地求解滑块的水平加速度而没有考虑滑体运动轨迹的变化;谢德格尔法基于体积效应,建立摩擦因数与滑坡体积的关系式,然后根据能量守恒定律求得滑速,因此较适用于滑动面有一定倾斜角度的滑坡;科内尔法是在流体力学的基础上,考虑摩擦阻力与水体的影响后计算滑速,该方法较适用于松散滑体甚至是碎屑流;美国土木工程师协会推荐公式法是在运动学的基础上求解滑体落于半无限水体的速度。以上方法已相对成熟,但由于均需基于一定的假设条件,导致其适用性具有一定的局限性,因此,后人在其基础上针对不同工程实例,对滑速计算公式、方法、手段等进行了修正和改进。

平推式滑坡多由暴雨和地震触发失稳,因此计算此两类滑坡滑速需重点考虑静水压力、扬压力及地震的影响。刘贵荣等<sup>[7]</sup>根据能量守恒定律和动量守恒定律,在后缘水头推力和滑移面扬压力作用下,推导出平推式滑坡在暴雨条件下的滑速计算公式。同时从滑面摩擦因数和水平作用力的角度,分别根据能量守恒定律和动量守恒定律计算地震作用下的滑速,但以动量守恒定律计算时,较难取得准确

表 1 国内外典型滑坡涌浪事故

编号	地点	滑坡规模/ $10^6 \text{ m}^3$	发生时间	水域类型	主要危害
1	秘鲁琼加	0.1	1671 年	湖泊	400~600 人死亡
2	日本九州	535	1762 年	峡湾	超过 15000 人死亡
3	中国长江大挡子滑坡	70	1896 年	河流	堵江,船只受损
4	挪威洛恩湖	0.4	1905 年	湖泊	61 人死亡
5	中国岷江叠溪滑坡	4.0	1933 年	河流	堵江 45 天,死亡 8800 人
6	挪威大峡湾	1.5	1934 年	峡湾	44 人死亡
7	挪威洛恩湖	1.0	1936 年	湖泊	73 人死亡
8	挪威兰峡湾	12	1956 年	峡湾	32 人死亡
9	美国阿拉斯加例图亚海湾	30	1958 年	海湾	2 人死亡
10	意大利庞特塞	20	1959 年	水库	没坝
11	中国柘溪塘岩光滑坡	1.65	1961 年	水库	堵江,涌浪达 21 m
12	意大利瓦伊昂滑坡	240	1963 年	水库	3000 人死亡
13	中国雅砻江唐古栋滑坡	68	1967 年	水库	滞坝后成灾
14	中国云阳宝塔鸡扒子滑坡	15	1982 年	河流	涌浪,险滩严重碍船
15	中国湖北新滩滑坡	30	1985 年	河流	毁船 60 只,死亡 9 人
16	中国西藏易贡滑坡	300	2000 年	河流	下游发生大面积洪水
17	中国湖北千将坪滑坡	24~30	2003 年	水库	失踪和死亡共 24 人
18	中国水布垭大堰塘滑坡	3.0	2007 年	水库	失踪和死亡共 4 人
19	中国云南省荒田滑坡	3.0	2009 年	水库	失踪 14 人
20	中国四川省溪洛渡水库	0.12	2013 年	水库	失踪 12 人

的地震作用时间。秦云等<sup>[8]</sup>为了使滑速计算更为准确、直观,采用不连续变形分析方法(DDA)清楚地模拟、再现了滑坡失稳的全过程,得到了与潘家铮法基本吻合的滑动速度,是一种较为有效的滑速预测方法。

通过进一步的研究,科学人员认为实际工程中水体阻力对滑速的影响相对较大,代云霞等<sup>[9]</sup>基于此对前人提出的经验公式进行修正,并且通过对秭归县下土岭滑坡实例的分析,较直观地反映了考虑水阻力前后的滑坡滑动加速度、速度的变化规律;汪洋等<sup>[10]</sup>针对涉水滑坡问题,根据水下块体的运动阻力试验,结合潘家铮法,在动力学和运动学的基础上求得沿曲线滑动的涉水滑坡的滑动速度公式,为涉水滑坡滑速计算提供依据。

**b. 初始涌浪高度。**初始涌浪高度的确定对滑坡涌浪研究至关重要,要想获得相对精确的解析解,就得尽量通过假设和限定求得相对准确的初始、边界条件。

早在1970年Noda<sup>[11]</sup>就首先假设滑体为刚体,根据能量法求得滑速,随后在单向流的研究基础上,假设水体半无限长,物理模拟了滑坡水平和垂直滑入水中两种极端模式,推导出滑坡入水时初始涌浪高度与水深和滑速之间的经验计算公式。使用能量法计算滑速简化了滑坡运动的中间过程,也避免了周围边界条件和滑坡内部相互作用所产生的干扰,但由于其假设条件过于理想化,导致计算结果误差较大。

潘家铮<sup>[12]</sup>在Noda法的基础上求得位于平行陡壁的滑坡入水速度,并通过引入时间演化概念,在波的反射与叠加基础上求得初始涌浪高度,这与Noda法相比,能够相对较好地反映坡体形态,因此计算结果趋于精确。

但以上方法对水体阻力考虑不足,汪洋等<sup>[13]</sup>应用潘家铮法,在块体水下运动过程中较好地考虑了流场阻力和表面摩擦力,从而使滑坡涌浪高度的计算结果更加精确,并且根据新滩滑坡涌浪实例的计算结果得出滑坡掀起的涌浪高度基本呈先增大后减小的规律。通过进一步研究,汪洋等<sup>[14]</sup>提出了体积涌浪和冲积涌浪(考虑流体阻力)的概念,并分别依据体积守恒定律和牛顿定律求得涌浪高度,最后利用叠加法获得初始涌浪高度。由于汪洋考虑了水下的能量耗散,更好地限制了边界条件,这使涌浪计算结果与实际结果更为相符。王世梅等<sup>[15]</sup>通过理论验证认为,只有滑动入水的滑体部分才会对滑坡涌浪有贡献,并以陈家大院滑坡为例,修正了其重心高度,即仅考虑水上滑体重心与水面的距离,提高了

Noda法的计算精度。代云霞等<sup>[16]</sup>根据已有的潘家铮法和体积守恒定律对重庆市内某一山体崩塌所引发的涌浪问题进行研究,主要对初始涌浪高度、爬坡浪高及传播浪高进行拟合。

### 2.1.2 涌浪传播与爬坡高度预测

涌浪的传播和爬坡涉及复杂的流体波动问题,包括水体的自身波动、叠加、传播和衰减。依据线性波理论,潘家铮<sup>[12]</sup>假设岸线为平行陡壁,计算随传播距离而变化的波浪高度,即通过对失稳体对岸任一点波高和反射波高的叠加求得浪高,计算过程中忽略了能量损失和边界非线性。哈秋龄等<sup>[17]</sup>在潘家铮法的基础上将相位差概念引入到滑坡涌浪的计算中,更好地考虑了前进波和反射波在传播过程中的时间差,从而使该方法能够更为准确地计算前缘宽度较大、地形复杂的滑坡涌浪高度。

基于非线性波理论,李未等<sup>[18]</sup>通过分析冲击波和稀疏波的性质得到流速-水深曲线,并根据浅水波控制方程和空间位置坐标,得出击波和稀疏波的相互作用关系,从而计算水平匀速滑坡的涌浪生成与传播过程,但到目前为止,该方法仍停留在简单的理论研究上,只针对简化的河床约束条件,且只能计算模拟一维河道模型。汪洋等<sup>[19-21]</sup>根据明渠非恒定流的连续性方程和运动方程得出涌浪的衰减规律和叠加传播规律,并以新滩滑坡为例,首先计算研究了滑坡涌浪的全过程,探讨了滑坡涌浪的影响因素;结合水动力学和流体力学理论,分急剧衰减和缓慢衰减2个阶段来考虑涌浪传播过程,并认为急剧衰减阶段呈指数衰减,而缓慢衰减阶段主要受明槽水流的沿程水头损失影响,最后,根据斜坡坡角和爬坡方位角等因素给出涌浪爬坡系数关系式。殷坤龙等<sup>[22]</sup>对汪洋等<sup>[19-21]</sup>提出的方法进行了深入的探讨,并以该方法为基础,计算、分析了清江水布垭库区大堰塘滑坡涌浪的全过程,与实际调查和监测结果拟合较好,是一次较为成功的工程应用。

## 2.2 数值分析法

滑坡涌浪是以滑坡入水点为圆心,波浪向四周推进,并经过反射、干涉叠加不断形变,从而构成不稳定流状态,为简化计算,研究人员常将其假设为单向流问题,并通过圣维南原理进行边界限制,进而得到基本求解方程<sup>[12]</sup>。

周剑华<sup>[23]</sup>应用一维数学模型、二维数学模型及混合数学模型,基于经典的圣维南原理,利用有限差分法对水库滑坡涌浪灾害进行数值模拟。袁银忠等<sup>[24]</sup>采用线性函数插值法进行方程离散,采用有限单元法对滑坡涌浪方程进行求解。严骏龙<sup>[25]</sup>从非恒定流方程出发建立数值模型,并利用有限元法离

散求解滑波涌浪。姜治兵等<sup>[26]</sup>在前人研究的基础上对滑坡的产生和传播进行探讨,通过建立水深积分方程,利用非规则网格有限体积法模拟滑波涌浪过程,研究认为在数值模拟计算中,不仅需要考虑滑波体的体积守恒(即对水体的侵占效应),还需要考虑其水平动量作用。Liu 等<sup>[27]</sup>基于 LES 数值模拟模型,通过 VOF 法观测自由面和岸线的变形移动,并结合模型试验得出楔形体滑入规则矩形水体引发的波浪爬壁及回落规律。

随着计算流体力学的发展,基于 N-S 方程, Tinti 等<sup>[28]</sup>应用有限元模型,模拟了一维和二维水下滑坡的能量传播特征。任坤杰等<sup>[29]</sup>推导出了适用于滑波涌浪模拟的弱可压缩水方程,并在非规则网格有限体积法和显式 MacCormack 法基础上离散求解,研究发现采用平面二维和垂面二维数学模型相结合的方法可减小能量横向扩散。宋新远等<sup>[30-32]</sup>以 Fluent 流体计算软件为依托,耦合空气流和水流,根据 N-S 方程,以二维非定常分离隐式 PISO 算法,求解自由面水平速度、自由液面变化以及流场变化。Biscarini<sup>[33]</sup>利用计算流体力学,结合 RNG  $k-\varepsilon$  湍流闭合法通过 Fluent 软件计算求解 N-S 方程,模拟了滑波体冲击水体激发涌浪并传播的全过程。刘霞等<sup>[34]</sup>利用 Fluent 软件平台,提出了边界造波的数值方法,并成功实现了二阶 Stokes 波的数值模拟,能够很好地模拟弱非线性波浪。在此基础上,刘霞等<sup>[35]</sup>采用动网格模型模拟了刚性滑块垂直入水过程,并可以扩展至模拟任意形状的刚性滑块自由入水过程。徐娜娜<sup>[36]</sup>以新滩滑坡为例,利用 Fluent 软件建立二维有限元计算模型,分析了该滑波体入水所引起的最大涌浪高度、对岸最大爬坡高度、不同时刻的自由液面形态以及不同时刻的流场动压力分布。

随着基础学科的不断进步和发展,一些新型数值计算方法逐渐兴起。罗超<sup>[37]</sup>鉴于前人的研究成果,在固定笛卡儿坐标系下,以复杂自由面下非定常、不可压缩黏性流体的 N-S 方程为基础,建立多物体相对运动的两相流模型,并通过切削网格法、大涡模拟、流体体积法求得物体在水中的运动响应,从而精确模拟滑波涌浪的产生、发展和传播过程。杜小弢等<sup>[38]</sup>为了解涌浪波动过程,基于无网格划分的 SPH 法建立了滑波涌浪数值模型,该模型适用于求解波浪的大变形及破碎过程,且避免了繁琐的单元划分。袁晶等<sup>[39]</sup>采用动网格技术建立了可变网格下的平面二维水库滑波涌浪数值模型,该方法模拟结果与实测值吻合较好,但对于复杂的滑体涌浪,由于其形态不规则,网格划分相对复杂,因此计算方程相对难以建立,求解困难较大。徐文杰<sup>[3, 40]</sup>基于解

决复杂流体-固体之间相互作用的目的,实现了滑波涌浪的 CEL 算法,并通过该方法对滑波涌浪的多个影响因素进行了探讨。

而对于三维涌浪的危害研究,赵兰浩等<sup>[41]</sup>通过空间三维数值模拟方法,模拟了土质岸坡在地震作用下失稳、滑动到掀起初始涌浪的全过程,反映了滑波体、库水以及空气三者之间的强烈耦合作用,但该方法仍然处于理论研究阶段,尚未应用于工程实践中。徐波等<sup>[42-43]</sup>利用流体三维有限差分软件 FLOW3D,假设库底为水平面,有效模拟了广阔库水域中滑波崩落所掀起的涌浪过程,研究了不同时刻的自由液面和流场变化,并给出了高度、坡角和块体体积对涌浪的影响规律。周桂云等<sup>[44]</sup>在浅水控制方程的基础上,选用直线“V”字形断面河道,利用数值模拟方法复演三维滑波涌浪的传播过程,研究表明涌浪产生后波浪表现为向四周推进并不断衰减,浪高降幅随传播距离的增加逐渐变小,在约 1.5 km 以内浪高降幅最明显。

### 2.3 物理模拟法

物理模拟法是一种直观、可靠的涌浪研究手段。依据不同的角度可分为不同类别:根据模型精度和规模可分为简化模型试验和原型模型试验;根据失稳体的性状可分为整体(块体)模型试验和散体模型试验;根据试验目的可分为验证或预测评价涌浪灾害实例、总结归纳试验公式、讨论影响因素、研究波浪性态 4 个类别。

简化模型试验多用于探究涌浪的影响因素,常对模型进行了较大程度的概化,使其趋于简便,从而易于操作,如庞昌俊<sup>[45]</sup>假定滑波厚度大于水深,在矩形水槽里进行了不同坡度、质量、速度的 210 组二维斜滑波涌浪试验,一定程度上阐明了滑速、水深和滑体下滑坡度对滑波涌浪高度的影响;而原型模型试验则是根据实际的涌浪灾害,根据相似理论按照一定比例尽可能恢复和重现原地形、失稳体形态、水体流态、河道形状等,原型模型试验的前期准备工作相对复杂,但最能反映实际情况。

整体模型试验主要应用于研究刚体入水引发的涌浪问题,如代云霞<sup>[46]</sup>通过室内整体模拟试验,分析了滑波涌浪的形成机制、传播规律以及影响因素的敏感性;而散体模型试验则主要模拟碎裂严重的滑波、变形体,甚至碎屑流、泥石流等,如 Fritz 等<sup>[47]</sup>通过大量散体模型试验建立了散体滑波最大涌浪高度与滑速、厚度、水深等因素的关系式;任坤杰等<sup>[48]</sup>利用相似理论,根据正交试验方法,针对某散体滑波设计模型试验,对不同滑波体体积、落差、接纳水体水深、滑动面倾角、散体粒径等因素进行滑波涌浪研

究,通过统计学分析发现,散体滑坡初始涌浪高度的主要影响因素依次为滑坡体体积、滑动面倾角、散体粒径、受纳水体水深、落差,通过进一步的量纲分析和回归分析给出了散体滑坡体的初始涌浪高度经验公式。为了更好地说明滑坡体形态对涌浪的影响,以及整体模型和散体模型模拟结果的差异,叶耀琪<sup>[49]</sup>和吴佳壕<sup>[50]</sup>根据相似理论,采用这两种模型分别模拟了小浪底水库近坝址区滑坡和小湾水电荒田滑坡所产生的滑坡涌浪情况,结果表明针对同一失稳滑体,散体模型在模拟过程中将增大滑体入水形态宽度,致使散体模型涌浪高度大于整体模型涌浪高度;任坤杰等<sup>[51]</sup>以某水库滑坡为工程背景,对整体滑坡和散体滑坡的初始涌浪形态及其控制性因素进行研究,分别给出了整体滑坡体和散体滑坡体的初始涌浪高度经验公式。

从试验目的来看,验证或预测评价涌浪灾害实例类所占比例最大,其次分别为总结归纳试验公式类、讨论影响因素类和研究波浪性态类,单纯的以讨论影响因素和研究波浪性态为目的的研究成果较少<sup>[51-52]</sup>。

验证或预测评价涌浪灾害实例,即针对某一具体工程,依据原型模型试验模拟再现其灾害全过程,从而对涌浪高度的计算结果进行校准,对已提出的公式进行验证,对已发生的灾害进行拟合,对未发生的灾害进行预测评估。如陶孝铨<sup>[53]</sup>通过建立1:220的李家峡I号、II号滑坡体物理模型,观测了滑坡对岸涌浪高度、对岸水浪爬高、坝前涌浪高度、涌浪波对坝体产生的推力、涌浪翻越坝顶水量。余仁福<sup>[54]</sup>建立1:500的龙羊峡水库近坝段滑坡涌浪模型,模拟滑坡涌浪的灾害过程,得到生活区涌浪爬高高程,并结合监测资料建立未来滑坡的破坏预警标准。赵根等<sup>[55]</sup>通过1:100的围堰倾倒模型试验,测得了围堰倾倒时的涌浪特性、传播规律,并预测了围堰爆破时将产生的涌浪高度。王育林等<sup>[56]</sup>以长江链子崖滑坡为例,评估了危岩体崩滑对航道的影响,发现滑坡涌浪高度将随流量、滑体入江体积和流速的不同而变化,同时受到流速、地形和河道形状的影响。RISIO等<sup>[57]</sup>建立了三维滑坡涌浪物理模型,试验发现波浪总是先出现波峰后出现波谷,且波峰波动范围小于波谷,而最大浪高往往出现在第2个或第3个波。胡小卫<sup>[58]</sup>以三峡工程库区某滑坡为例,在相似理论的基础上建立物理模型,研究山区河道型水库滑坡特性,不足之处在于模型精度不高,是在统计学基础上指定滑体形态,并假定河流为静水、河道为矩形。黄锦林<sup>[59]</sup>根据相似理论对鹅公带古滑坡体激起的涌浪过程进行了物理模拟,提出对于

库容较小的狭长河道型水库(河谷截面为“V”字形),滑体入水引发的涌浪主要由体积涌浪和冲击涌浪两部分组成,且体积涌浪所占比例更大,同时发现当滑速相同时,水位相对较低的正常蓄水位所激起的涌浪高于设计洪水位;而当水位一定时,涌浪高度随滑速的增大而增大,而增幅却随水位的增加而降低。黄智敏等<sup>[60]</sup>通过三维物理模拟法模拟了乐昌峡库区松山子滑坡涌浪,为灾害评价和工程设计提供参考依据。殷坤龙等<sup>[61]</sup>建立1:200的大型三维物理模型,预测研究白水河滑坡涌浪灾害的形成及传播衰减过程,提出了最大首浪的概念,即认为携带能量最强、危害性最大的沿滑坡体滑动方向传播的涌浪才为最大首浪,同时提出计算该滑坡最大首浪高度、对岸爬坡浪、沿程传播浪的经验公式。Huang等<sup>[62]</sup>根据弗劳德准则,建立1:200龚家方滑坡物理模型,认为滑体到达水面即表现为岩石碎屑流,同时选取4个水位高度进行模拟试验,为人们了解碎屑岩体突然失稳掀起的涌浪灾害提供依据。

总结归纳试验公式需基于大量模型试验或典型案例进行整理和研究,早在1970年Kamphuis等<sup>[63]</sup>就建立了稳定浪高与滑坡体积和弗劳德数间的无量纲关系式,且认为涌浪的最大高度为初始涌浪,浪高达到稳定所需时间很短,之后浪高呈指数降低,传播速度基本符合孤立波理论。黄种为等<sup>[64]</sup>通过碧口、费尔泽、利贝坝等的涌浪试验资料和柘溪工程观测,给出了涌浪高度与滑坡滑速和滑体体积的模拟试验公式。Ataie-Ashtiani等<sup>[65]</sup>在考虑滑坡多种影响因素敏感性的前提下,由120组模型试验得出涌浪计算公式。Panizzo等<sup>[66]</sup>通过288次三维物理模拟试验,根据量纲分析法得出滑坡涌浪的最大涌浪高度、涌浪周期以及平面斜坡爬壁高度的经验公式。

## 2.4 其他研究方法

为了解决有限元法不易计算求解的问题,刘建秀<sup>[67]</sup>模拟了滑坡附近的线性波,建立了由样条边界元和不可压缩流体的N-S运动方程所组成的解析方程组,并通过对比边界元的离散进行求解,从而得到速度势,该方法适用于解决流体边界层问题,但无法解析求得非线性或复杂边界条件下的涌浪高度。郭洪巍等<sup>[68]</sup>同样应用N-S方程,从数学模型的角度对水库滑坡涌浪问题进行分析,通过滑坡体模型和水流子模型模拟水库滑坡涌浪的发生、发展和衰减全过程,滑坡体段采用质心理论,水体呈静水压强分布且忽略垂向运动。为了使涌浪研究更为快捷,王延平<sup>[69]</sup>应用计算机信息技术,以ATL技术为基础,根据相应计算公式,自主开发计算软件,共包括3个模块:滑速计算模块、初始涌浪计算模块,以及波浪传

播的计算模块。Huang 等<sup>[70]</sup>应用 Geowave 软件对龚家方滑坡失稳激起涌浪的全过程进行了模拟研究,其结果能够较好地考虑河道等因素的影响,研究发现,该工程涌浪高度沿传播方向平均每 100 m 衰减 12 m,而当河道突然变宽时,波浪衰减强烈;Seo 等<sup>[71]</sup>基于完整线性波动方程或线性浅水方程,通过数值积分法和渐进法模拟研究了滑坡形态对边界波形成及衰减过程的影响。

### 3 涌浪预测方法讨论

a. 经验公式法是在数学和力学基础上,结合工程经验与部分物理模拟试验给出的一种简单、快捷的涌浪估算方法,公式选取受限于滑坡失稳模式和水体形态,而且由于涌浪求解的复杂性,各计算方法多需满足一定的假设条件。如国外的经验算法,多假设涌浪为单向流,而实际工程中,除少部分岩土体为垂直崩落,大多失稳滑体表现为沿岸线斜向滑动,而且波浪的波动多为动态变化,不能简单地线性叠加。又如,研究人员多将水域简化为规则体(如矩形等),而实际河道、库区等多为不规则体。再如,部分研究人员为了简化计算方程,假设滑坡涌浪问题为二维平面问题,忽略了滑坡厚度及规模等对滑坡涌浪的影响;也有研究人员引入质心概念或刚体概念,将入水岩土体视为一完整块体,而在实际过程中,其往往会发生形变甚至碎裂,忽略内部参数的影响将会对部分滑坡涌浪的预测造成较大误差。此外,在滑体与水体的作用中,由于流体力学、岩体力学、运动学的复杂性,研究过程中往往对流体黏滞力等阻力影响因素考虑不足。因而认为采用经验公式法计算涌浪连续性较差,不能很好地评价滑坡失稳过程及波浪后期演化对涌浪灾害的影响。

b. 数值分析法是在数学和计算机科学不断发展的基础上逐渐兴起的一种灵活、智能的求解方法,该方法耗资少,历时短,可重复性强,易于控制,且能较好地再现滑坡涌浪全过程。早期数值计算多是在确定滑坡体规模和入水速度之后,将复杂多相流固耦合作用简化为渠道单向流问题,再利用圣维南方程确定边界条件,从而计算求得模拟结果,但是由于其假设条件过于理想化,计算精度往往不高;而随着计算流体力学的发展,数值分析法开始趋向于计算求解初始条件和周围边界条件的数学问题,然而由于实际情况复杂,研究人员常质疑其初始条件和周围边界条件的准确性。因此,目前为止数值模拟方法多作为一种辅助拟合方法,需要采用其他方法进行验证。

c. 物理模拟法多是在相似理论的基础上,对滑

坡体及水体进行按比例复原和再现,该方法可以直接观测水体形态及整个滑坡涌浪形成、传播甚至爬壁过程,是一种相对直观、可靠的研究手段,但是整个试验准备周期长,需要耗费大量的人力物力,而且一般模拟试验多是针对某一案例进行复原模拟,因此只适用于单一案例或现象,通用性差。同时,滑坡涌浪影响因素众多,如何从模型试验中限定、抽象出变化规律是研究的重点和难点,而且对于尺寸效应的影响目前尚不明确,因此确定适合比尺也是模型试验的一个关键点。

d. 其他研究方法是研究人员在前人的基础上提出的一些新型数学方法或模拟技术,能够在一定程度上解决工程实际问题,但目前还没有形成一种完整的体系,需要进一步探索和研究。

### 4 结语及展望

滑坡涌浪是一种次生灾害,然而其所带来的危害却是巨大的,因此,合理提出一种通用的计算方法具有重大的现实意义。但是,由于该课题是一个包含地质学、流体力学等学科的复杂地质力学过程,目前所得研究成果仍不足以全面透彻阐述滑坡涌浪形成、传播、消散的全部特征及其影响因素,笔者在此依据滑速涌浪灾害的研究现状,对未来的研究主要提出以下展望:

a. 研究滑坡失稳机理及破坏模式对滑坡涌浪的影响。从滑坡失稳破坏、加速运动到入水形成波浪及传播,滑坡涌浪是一个与时间、空间有关的连续性问题,因此,对于滑坡涌浪的研究应该首先从滑坡的失稳机理以及破坏模式开始,并考虑依据滑坡运动轨迹、运动速度、变性特征及速率、滑面形态等来区别研究滑坡涌浪的计算方法;其次,根据滑坡演化形式、可入水方量、入水区域等,建立滑坡涌浪灾害影响范围评估预警系统,为灾害评价提供初始判据,将突发灾害转化成一种可由现场经验定性预估的可遇见性灾害。

b. 明确各影响因素与滑坡涌浪的相关性,建立修正计算方程。滑坡涌浪的影响因素众多,因此,确定各因素与滑坡涌浪高度之间的影响程度至关重要,这有利于完善滑坡涌浪高度的计算公式,促使计算更加准确;同时在精度允许的情况下,根据各影响因素的相关性来简化模型,从而迅速求解。滑坡涌浪爬壁高度的计算方法仍需深入研究,需逐步了解岸坡高度、坡度、地形以及工程构筑物位置和形态等对爬高的影响规律,并通过监测、试验等方法确定波浪对前方障碍物产生的击打力和推覆力值,从而为溃坝等次生灾害预测提供预报依据。

c. 明确滑坡涌浪过程的能量耗散。首先,充分考虑滑体运动过程所受摩阻力,如合理选取动摩擦因数等;其次,滑体滑动过程中,块体往往出现相互间的挤压变形,甚至是碎裂,需在今后的计算中去除该部分的能量损失;再次,考虑空气和液体的两相流影响,考虑空气阻力和水阻力,以及气体与液体自身的黏滞力;同时,对于山区河道等流动性水体,还需考虑动水对涌浪的影响。

d. 对于水上滑坡引起的滑坡涌浪,计算中往往认为滑块入水后即停止运动,因此在计算下落高度时存在误差,而且在用能量法或动量法计算滑速时,研究人员常忽略水下仍处于滑动状态的块体能量,导致计算结果偏大,今后研究中应进一步精确化初始条件。同时需依据滑坡运动的实际路径进行计算,对于滑体水下的持续运动,以及水下滑块对水体的冲击应给予充分的考虑和计算修正。

e. 未来的滑坡涌浪研究不仅需关注表面波浪振荡和水体流场的变化规律,还需考虑水下涡流等现象的形成和变化规律,以及能量耗损;同时还需考虑失稳体冲击、运动、淤积以及波浪沿程行进对河道、水库等地形的再造影响及能量变化,可重点研究水下地形变化对涌浪的影响,以及涌浪高度在水面宽度发生改变和河道出现弯折后的衰减变化规律。

## 参考文献:

[ 1 ] WATTS P, GRILLI S T, TAPPIN D R, et al. Tsunami generation by submarine mass failure II: predictive equations and case studies[J]. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 2005, 131(6):298-310.

[ 2 ] 廖方, 石豫川, 吉锋. 大渡河上游某水电站库区滑坡的危险性评价[J]. *防灾减灾工程学报*, 2006, 26(3):337-342. (LIAO Fang, SHI Yuchuan, JI Feng. Hazard evaluation of landslides at the bank of reservoir of a hydropower station in the upstream of Daduhe River [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2006, 26(3):337-342. (in Chinese))

[ 3 ] 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. (XU Wenjie. Numerical study on factors influencing reservoir surge by landslide[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2012, 20(4):491-507. (in Chinese))

[ 4 ] 王全才. 时间序列分析的一些方法[J]. *工程地质力学研究*, 1997, 1(1):165-174. (WANG Quancai. Some methods of time series analysis [J]. *Engineering Geological Mechanics Research*, 1997, 1(1):165-174. (in Chinese))

[ 5 ] 杨洁. 历史上一些较大规模的滑坡涌浪的比较[J]. *西北水电技术*, 1987, 2(2):13. (YANG Jie. The

comparison of some large-scale landslide surge in history [J]. *Northwest Hydroelectric Technology*, 1987, 2(2):13. (in Chinese))

[ 6 ] 胡杰, 王道熊, 胡斌. 库岸滑坡灾害及其涌浪分析[J]. *华东交通大学学报*, 2003, 20(5):26-30. (HU Jie, WANG Daoxiong, HU Bin. Analysis on reservoir landslides and its surge [J]. *Journal of East China Jiaotong University*, 2003, 20(5):26-30. (in Chinese))

[ 7 ] 刘贵荣, 石豫川. 暴雨和地震触发滑坡滑速计算[J]. *地质灾害与环境保护*, 2007, 18(4):20-22. (LIU Guirong, SHI Yuchuan. Computing velocity of landslide triggered by rainstorm and earthquake [J]. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 2007, 18(4):20-22. (in Chinese))

[ 8 ] 秦云, 姜清辉, 郭慧黎. 滑坡速度预测的计算方法探讨[J]. *岩土力学*, 2008, 29(增刊1):373-378. (QING Yun, JIANG Qinghui, GUO Huili. Discussion on two methods for predicting velocity of landslides[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(Sup1):373-378. (in Chinese))

[ 9 ] 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(增刊1):407-411. (DAI Yunxia, YIN Kunlong, WANG Yang. Discussion on method of landslide velocity calculation and surge prediction[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(Sup1):407-411. (in Chinese))

[ 10 ] 汪洋, 殷坤龙, 刘艺梁, 等. 考虑水阻力的涉水滑坡运动速度计算模型研究[J]. *工程地质学报*, 2012, 20(6):903-908. (WANG Yang, YIN Kunlong, LIU Yiliang, et al. Model test speed model of fording landslide taking into account water resistance [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2012, 20(6):903-908. (in Chinese))

[ 11 ] NODA E. Water waves generated by landslides [J]. *Journal of the Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division*, 1970, 96(4):835-855.

[ 12 ] 潘家铮. 建筑物的抗滑稳定和滑坡分析[M]. 北京:水利出版社, 1980:137-155.

[ 13 ] 汪洋, 殷坤龙. 水库库岸滑坡的运动过程分析及初始涌浪计算[J]. *地球科学:中国地质大学学报*, 2003, 28(5):579-582. (WANG Yang, YIN Kunlong. Analysis of movement process of landslide in reservoir and calculation of its initial surge height [J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 2003, 28(5):579-582. (in Chinese))

[ 14 ] 汪洋, 殷坤龙. 水库库岸滑坡引起的初始涌浪计算[J]. *岩土力学*, 2006, 27(增刊2):151-154. (WANG Yang, YIN Kunlong. Calculation of initial surge height triggered by landslide in reservoir [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(Sup2):151-154. (in Chinese))

[ 15 ] 王世梅, 陈勇. 重庆市鲤鱼塘水库陈家大院滑坡涌浪预测[J]. *人民长江*, 2006, 37(8):98-100. (WANG Shimei, CHEN Yong. The surge prediction of

- Chenjiadayuan landslide in Jiyutang reservoir, Chong Qing [J]. *Yangtze River*, 2006, 37(8) :98-100. (in Chinese))
- [16] 代云霞, 汪洋, 殷坤龙, 等. 三峡库区巫山县某崩塌体涌浪调查及计算分析[J]. *武汉理工大学学报*, 2010, 32(19) :71-74. (DAI Yunxia, WANG Yang, YIN Kunlong, et al. Surge survey and calculation analysis of a landslide in Wushan county in the Three Gorges Reservoir [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2010, 32(19) :71-74. (in Chinese))
- [17] 哈秋龄, 胡维德. 水库滑坡涌浪计算[J]. *人民黄河*, 1980, 2(2) : 30-36. (HA Qiuling, HU Weide. The calculation of landslide surge in reservoir [J]. *Yellow River*, 1980, 2(2) :30-36. (in Chinese))
- [18] 李未, 王如云, 刘向阳. 滑坡涌浪的产生与传播波形分析[J]. *浙江水利水电专科学校学报*, 2003, 15(1) :5-7. (LI Mo, WANG Ruyun, LIU Xiangyang. On landslide surge & waveform spreading [J]. *Journal of Zhejiang Water Conservancy & Hydropower College*, 2003, 15(1) :5-7. (in Chinese))
- [19] 汪洋, 殷坤龙. 水库库岸滑坡初始涌浪叠加的摄动方法[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(5) :717-720. (WANG Yang, YIN Kunlong. Perturbation method of superposing initial surge height of landslide along reservoir shoreline [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(5) :717-720. (in Chinese))
- [20] 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.
- [21] 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 Yang, YIN Kunlong. Research on propagation and climb height of surge triggered landslide in reservoir [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(4) :1031-1034. (in Chinese))
- [22] 殷坤龙, 杜娟, 汪洋. 清江水布垭库区大堰塘滑坡涌浪分析[J]. *岩土力学*, 2008, 29(12) :3266-3270. (YIN Kunlong, DU Juan, WANG Yang. Analysis of surge triggered by dayantang landslide in shuibuya reservoir of qingjiang river [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(12) :3266-3270. (in Chinese))
- [23] 周剑华. 水库滑坡涌浪灾害的数值研究[J]. *长江科学院院报*, 2003, 20(2) :7-9. (ZHOU Jianhua. Research on numerical calculation of landslide surge waves in reservoirs [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2003, 20(2) :7-9. (in Chinese))
- [24] 袁银忠, 陈青生. 滑坡涌浪的数值计算及试验研究[J]. *河海大学学报:自然科学版*, 1990, 18(5) :46-53. (YUAN Yinzong, CHEN Qingsheng. Experimental study of slide waves in reservoirs and numerical calculation [J]. *Journal of Hohai University: Natural Sciences*, 1990, 18(5) :46-53. (in Chinese))
- [25] 严骏龙. 水库滑坡涌浪的二维有限元分析方法[J]. *水利学报*, 1983, 1(7) :41-46. (YAN Junlong. Two-dimension finite element method of the reservoir landslide surge [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1983, 1(7) :41-46. (in Chinese))
- [26] 姜治兵, 金峰, 盛君. 滑坡涌浪的数值模拟[J]. *长江科学院院报*, 2005, 22(5) :1-3. (JIANG Zhibing, JIN Feng, SHENG Jun. Numerical simulations of water waves due to landslides [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2005, 22(5) :1-3. (in Chinese))
- [27] LIU P L F, WU T R, RAICHLER F, et al. Runup and rundown generated by three-dimensional sliding masses [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2005, 536(1) :107-144.
- [28] TINTI S, BORTOLUCCI E. Energy of water waves induced by submarine landslides [J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2000, 157(3) :281-318.
- [29] 任坤杰, 金峰, 徐勤勤. 滑坡涌浪垂直面二维数值模拟[J]. *长江科学院院报*, 2006, 23(2) :1-4. (REN Kunjie, JIN Feng, XU Qinqin. Vertical two-dimensional numerical simulation for landslide-generated waves [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2006, 23(2) :1-4. (in Chinese))
- [30] 宋新远. 大型滑坡灾害数值模拟研究[D]. 上海:上海交通大学, 2009.
- [31] 宋新远, 邢爱国, 陈龙珠. 基于 FLUENT 的二维滑坡涌浪数值模拟[J]. *水文地质工程地质*, 2009, 36(3) :90-94. (SONG Xinyuan, XING Aiguo, CHEN Longzhu. Numerical simulation of two-dimensional water waves due to landslide based on FLUENT [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2009, 36(3) :90-94. (in Chinese))
- [32] 宋新远, 邢爱国, 陈龙珠. 二维滑坡涌浪数值模拟研究[C]//袁驷. 第六届全国土木工程研究生学术论坛论文集. 北京:清华大学出版社, 2008:182-187.
- [33] BISCARINI C. Computational fluid dynamics modelling of landslide generated water waves [J]. *Landslides*, 2010, 7(2) :117-124.
- [34] 刘霞, 谭国焕, 王大国. 基于边界造波法的二阶 Stokes 波的数值生成[J]. *辽宁工程技术大学学报:自然科学版*, 2010, 29(1) :107-111. (LIU Xia, TAN Guohuan, WANG Daguo. Numerical simulation of second-order stokes based on wave-generation method of defining inlet boundary conditions [J]. *Journal of Liaoning Technical University: Natural Science*, 2010, 29(1) :107-111. (in Chinese))
- [35] 刘霞, 谭国焕, 王大国. 水库滑坡涌浪的数值模拟[J]. *船舶力学*, 2013(增刊1) :75-83. (LIU Xia, TAN Guohuan, Wang Daguo. Numerical simulation of landslide-induced water waves in reservoir [J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2013(Sup 1) :75-83. (in Chinese))
- [36] 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.
- [37] 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.

- [38] 杜小骏,吴卫,龚凯,等. 二维滑坡涌浪的 SPH 方法数值模拟[J]. 水动力学研究与进展: A 辑,2006,21(5): 579-586. (DU Xiaotao, WU Wei, GONG Kai, et al. Two dimensional SPH simulation of water waves generated by underwater landslide [J]. Journal of Hydrodynamics; Ser A,2006,21(5): 579-586. (in Chinese))
- [39] 袁磊,张小峰,张为. 可变网格下的水库滑坡涌浪数值模拟研究[J]. 水科学进展,2008,19(4): 546-551. (YUAN Jing, ZHANG Xiaofeng, ZHANG Wei. Horizontal 2-D flow model with variable grid for simulating surges due to landslide in reservoirs [J]. Advances in Water Science,2008,19(4): 546-551. (in Chinese))
- [40] 徐文杰. 基于 CEL 算法的滑坡涌浪研究[J]. 工程地质学报,2012,20(3): 350-354. (XU Wenjie. CEL Algorithm study of reservoir surge induced by landslide [J]. Journal of Engineering Geology,2012,20(3): 350-354. (in Chinese)).
- [41] 赵兰浩,杨庆庆,李同春. 地震作用下土质库岸边坡失稳运动及初始涌浪数值模拟方法[J]. 水力发电学报,2011,30(6): 104-108. (ZHAO Lanhao, YANG Qingqing, LI Tongchun. Instability movement of soil bank slope and the initial surge numerical simulation method under the earthquake [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2011,30(6): 104-108. (in Chinese))
- [42] 徐波,蒋昌波,邓斌,等. 三维滑坡涌浪的产生及其传播过程的数值研究[J]. 交通科学与工程,2011,27(2): 39-45. (XU Bo, JIANG Changbo, DENG Bin, et al. Three-dimensional numerical simulations of water waves generated by landslides and its propagation process [J]. Journal Transport Science and Engineering,2011,27(2): 39-45. (in Chinese))
- [43] 徐波. 库区滑坡涌浪的产生及其传播过程的研究[D]. 长沙:长沙理工大学,2011.
- [44] 周桂云,李同春,钱七虎. 水库滑坡涌浪传播有限元数值模拟[J]. 岩土力学,2013,34(4): 1197-1201. (ZHOU Guiyun, LI Tongchun, QIAN Qihu. Finite element numerical simulation of water waves due to reservoir landslides [J]. Rock and Soil Mechanics,2013,34(4): 1197-1201. (in Chinese))
- [45] 庞昌俊. 二维斜滑坡涌浪的试验研究[J]. 水利学报,1985,16(11): 54-59. (PANG Changjun. The research on two-dimensional oblique landslide surge test [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1985,16(11): 54-59. (in Chinese))
- [46] 代云霞. 库岸滑坡涌浪计算方法及物理模拟试验研究[D]. 武汉:中国地质大学,2010.
- [47] FRITZ H M, HAGER W H, MINOR H E. Near Field Characteristics of Landslide Generated Impulse Waves [J]. Journal of Waterway Port Coastal & Ocean Engineering,2004,130(6): 287-302.
- [48] 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,2011,42(24): 69-72. (REN Kunjie, HAN Jibin. Experimental research on primary wave height generated by loose earth landslide [J]. Yangtze River, 2011,42(24): 69-72. (in Chinese))
- [49] 叶耀琪. 黄河小浪底水库滑坡涌浪试验介绍[J]. 人民黄河,1982,4(4): 20-24. (YE Yaoqi. The introduction of landslide surge test to Yellow River xiaolangdi reservoir [J]. Yellow River,1982,4(4): 20-24. (in Chinese))
- [50] 吴佳壕. 山区河道型水库库岸坡涌浪灾害研究与预测[D]. 成都:成都理工大学,2011.
- [51] 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. (REN Kunjie, HAN Jibin, LU Hong. Experimental research on primary wave height generated by solid-type landslide [J]. Yangtze River,2012,43(2): 43-45. (in Chinese))
- [52] 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): 295-299. (LI Ying, WANG Pingyi, HU Xiaowei. On calculation of the landslide surge of the river-channel type reservoir in mountainous area [J]. Journal of Chongqing JiaoTong University: Natural Science, 2011,30(2): 295-299. (in Chinese))
- [53] 陶孝铨. 李家峡水库正常运行期的滑坡涌浪试验研究[J]. 西北水电,1994,13(1): 42-45. (TAO Xiaquan. Experimental study of landslide surge during the error-free running period to Liji Xia reservoir [J]. Northwest Hydroelectric Station,1994,13(1): 42-45. (in Chinese))
- [54] 余仁福. 黄河龙羊峡工程近坝库岸滑坡涌浪及滑坡预警研究[J]. 水力发电,1995,21(3): 14-16. (YU Renfu. The research of reservoir bank landslide surge and landslide warning on the Yellow River project [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 1995,21(3): 14-16. (in Chinese))
- [55] 赵根,李学海,吴新霞,等. 三峡三期 RCC 围堰倾倒法拆除涌浪测试模型试验[J]. 爆破,2006,23(3): 1-4. (ZHAO Gen, LI Xuehai, WU Xinxia, et al. Swell test on model for upstream roller compactions concrete cofferdam demolition blasting in the third issue of Three Gorges of Yangtze River Hydro-junction [J]. Blasting,2006,23(3): 1-4. (in Chinese))
- [56] 王育林,陈凤云,齐华林,等. 危岩体崩滑对航道影响及滑坡涌浪特性研究[J]. 中国地质灾害与防治学报,1994,5(3): 95-100. (WANG Yulin, CHEN Fengyun, QI Hualin, et al. The effect of rockfall and landslide on channel and the study on the characteristics of surge generated by landslide [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control,1994,5(3): 95-100. (in Chinese))
- [57] RISIO M D, BELLOTTI G, PANIZZO A, et al. Three-dimensional experiments on landslide generated waves at a sloping coast [J]. Coastal Engineering, 2009,56(5/6):

- [58] 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,2011.
- [59] 黄锦林. 库岸滑坡涌浪对坝体影响研究[D]. 天津:天津大学,2012.
- [60] 黄智敏,付波,钟勇明,等. 乐昌峡库区松山子滑坡体滑坡涌浪研究[C]//吴有生. 第十一届全国水动力学学术会议暨第二十四届全国水动力学研讨会并周培源诞辰110周年纪念大会论文集(下册). 北京:海洋出版社,2012:578-584.
- [61] 殷坤龙,刘艺梁,汪洋,等. 三峡水库库岸滑坡涌浪物理模型试验[J]. 地球科学:中国地质大学学报,2012,37(5):1067-1074. (YIN Kunlong, LIU Yiliang, WANG Yang, et al. Physical model experiments of landslide-induced surge in Three Gorges Reservoir [J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences,2012,37(5):1067-1074. (in Chinese))
- [62] HUANG B, YIN Y, WANG S, et al. A physical similarity model of an impulsive wave generated by Gongjiafang landslide in Three Gorges Reservoir, China [J]. Landslides,2014,11(3):513-525.
- [63] KAMPHUIS J W, BOWERING R J. Impulse waves generated by landslide [C]//Proceeding of 12<sup>th</sup> Coastal Engineering Conference. New York, ASCE, 1970: 575-588.
- [64] 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,1983:157-169.
- [65] ATAIE-ASHTIANI B, NIK-KHAH A. Impulsive waves caused by subaerial landslides [J]. Environmental Fluid Mechanics,2008,8(3):263-280.
- [66] PANIZZO A, de GIROLAMO P, RISIO M D, et al. Great landslide events in Italian artificial reservoirs [J]. Natural Hazards and Earth System Science,2005,5(5):733-740.
- [67] 刘建秀. 流体力学滑坡涌浪区的样条边界元法[J]. 黄淮学刊:自然科学版,1994,10(3):35-38. (LIU Jianxiu. Spline boundary element method of the landslide surge in fluid mechanics [J]. Huang Huai Journal,1994,10(3):35-38. (in Chinese))
- [68] 郭洪巍,吴葱葱. 水库滑坡涌浪的数学模型及其应用[J]. 华北水利水电学院学报,2000,21(1):24-27. (GUO Hongwei, WU Congcong. The mathematical model for landslide and its application [J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power,2000,21(1):24-27. (in Chinese))
- [69] 王延平. 滑坡涌浪预测理论研究及计算模型开发[D]. 成都:成都理工大学,2005.
- [70] HUANG B, YIN Y, LIU G, et al. Analysis of waves generated by Gongjiafang landslide in Wu Gorge, Three Gorges Reservoir, on November 23, 2008 [J]. Landslides, 2012,9(3):395-405.
- [71] SEO S N, LIU P L F. Edge waves generated by the landslide on a sloping beach [J]. Coastal Engineering, 2013,73:133-150. (收稿日期:2014-02-20 编辑:骆超)

(上接第84页)

- [4] 严跃成,邱秀云,张翔,等. 两相流分离器泥沙运动轨迹及加速滑移的力学分析[J]. 水利水电科技进展,2011,31(5):27-29. (YAN Yuecheng, QIU Xiuyun, ZHANG Xiang, et al. Mechanical analysis of sediment motion path and accelerated slip on two-phase flow separation device [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2011,31(5):27-29. (in Chinese))
- [5] 赵江涛,侍克斌,李玉建,等. 圆中环沉沙排沙过滤池滤水槽过滤性能试验[J]. 水利水电科技进展,2013,33(5):57-60. (ZHAO Jiangtao, SHI Kebin, LI Yujian, et al. Experimental study on filtration performance of filter tank in circular central sand filter for sand discharging and desilting [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2013,33(5):57-60. (in Chinese))
- [6] 董玉萍,牟献友,文恒. 多级斜板式水沙分离装置试验[J]. 水利水电科技进展,2013,33(5):52-56. (DONG Yuping, MOU Xianyou, WEN Hen. Experimental study on the water-sediment separator with multilevel inclined plates [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2013,33(5):52-56. (in Chinese))
- [7] 左东启. 模型试验的理论和方法[M]. 北京:水利电力出版社,1984.
- [8] ANDERSON J D. Computational fluid dynamics [M]. New York:McGraw-Hill,1995.
- [9] YAKHOT V, ORSZAG S A. Renormalization group analysis of turbulence; I. Basic theory [J]. Journal of scientific computing,1986,1(1):3-51.
- [10] BARKHUDAROV M, DITTER J L. Particle transport and diffusion [R]. Santa Fe:Flow Science, Inc,1994.
- [11] BATCHELOR G K. An introduction to fluid mechanics [M]. Cambridge:Cambridge University Press,1983.
- [12] HINTZE J L, NELSON R D. Violin plots: a box plot-density trace synergism [J]. The American Statistician, 1998,52(2):181-184. (收稿日期:2014-02-15 编辑:熊水斌)