

高坝大库滑坡涌浪灾害链研究综述

陈世壮^{1,2}, 徐卫亚^{1,2}, 石安池³, 闫龙^{1,2}, 许晓逸^{1,2}, 汪华晨^{1,2}, 王环玲^{1,2}

(1. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098;
2. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;
3. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122)

摘要:对高坝大库滑坡涌浪灾害链相关研究成果和发展趋势进行综述,概述了水库区典型滑坡涌浪实例,从水库滑坡分类、滑坡失稳诱发因素、滑带强度参数确定、滑速计算及运动演化规律、滑坡涌浪产生及传播模拟技术、涌浪与水工建筑物相互作用等方面对已有研究现状进行总结归纳,对各类研究方法的适用性和局限性进行了评述,并对目前存在的研究难点、关键技术以及下一步亟待解决的问题做出了展望。

关键词:水库滑坡;失稳诱发因素;滑带;滑速;涌浪灾害链;综述

中图分类号:P642.22 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2023)03-0083-11

Review of hazard chain of landslide surge for high dams and large reservoirs//CHEN Shizhuang^{1,2}, XU Weiya^{1,2}, SHI Anchi³, YAN Long^{1,2}, XU Xiaoyi^{1,2}, WANG Huacheng^{1,2}, WANG Huanling^{1,2} (1. *Research Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*; 2. *Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*; 3. *PowerChina Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, China*)

Abstract: The research achievements and development trend of hazard chain of landslide surge for high dams and large reservoirs are reviewed. The typical examples of landslide surge disasters in reservoir areas in China are summarized. The research status is reviewed from the aspects of landslide classification, triggering factors, strength parameters of sliding zone, sliding velocity and movement evolution law, landslide surge generation and propagation simulation technology, interaction between landslide surge and hydraulic structures, etc. The applicability and limitation of existing research methods are remarked and the research difficulties, key technologies and problems to be solved are emphatically put forward.

Key words: reservoir landslide; triggering factors of instability; sliding zone; sliding velocity; surge disaster chain; review

我国西南地区水文地质物理环境复杂、工程作用强烈,滑坡地质灾害防治成为高坝大库工程安全和防灾减灾领域十分重要的研究课题。滑坡涌浪作为滑坡失稳滑移运动入水而形成的次生灾害,其产生的破坏可能远超滑坡灾害本身,经常造成大量人员伤亡、经济损失,甚至是灾难性后果。1963年10月9日,意大利Vajont水库由于蓄水诱发近坝区左岸约2.7亿m³体积的岩土体失稳,产生的涌浪在对岸爬高约235 m,漫过坝顶超过100 m,摧毁下游Longarone镇,共计2 000余人死亡^[1];1985年6月12日,长江三峡库区新滩北岸约3 000万m³滑坡体涌入长江,滑速为25~28 m/s,产生涌浪高达54 m,

导致10人死亡,8人受伤,2人失踪^[2];2007年6月15日,清江水布垭库区大堰塘滑坡,约300万m³的滑坡体滑入水库中,产生的涌浪在下游20.8 km水布垭大坝处的爬高达4 m左右^[3];2009年7月20日,受连日降雨影响,位于澜沧江小湾水电站上游约7.5 km处的荒田滑坡体突发滑坡,入江方量约100万m³,产生超过30 m的巨浪,造成14人失踪^[4]。表1汇总了我国水库区典型滑坡涌浪实例。

滑坡涌浪主要包括滑坡失稳、滑移、涌浪产生、传播(包括近场和远场传播)以及对水工金属结构冲击等阶段,它是一个涉及工程地质学、滑坡动力学、岩土力学、流体力学等多个学科的复杂流固耦合

基金项目:国家自然科学基金(51939004);中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司科技项目(KY2021-ZD-03)
作者简介:陈世壮(1997—),男,博士研究生,主要从事水工岩石力学与防灾减灾研究。E-mail:szchen@hhu.edu.cn
通信作者:徐卫亚(1962—),男,教授,博士,主要从事水工岩石力学与防灾减灾研究。E-mail:wxyu@hhu.edu.cn

表 1 我国水库区典型滑坡涌浪实例

滑坡名称	年份	发生位置	滑坡规模/万 m ³	主要危害	主要诱因
塘岩光滑坡	1961	柘溪库区	165	21 m 涌浪,死亡 40 余人,涌浪传至坝前 3.6 m,漫顶	水库蓄水
唐古栋滑坡	1967	楞古库区	68 000	形成滑坡坝	
鸡扒子滑坡	1982	三峡库区	1 500	涌浪、碍航	降雨
新滩滑坡	1985	三峡库区	3 000	>54 m 涌浪,死亡 12 余人	降雨
链子崖滑坡	1992	三峡库区	75	碍航	降雨、人为活动
千将坪滑坡	2003	三峡库区	2 400	>30 m 涌浪,堵江,死亡 14 人,失踪 10 人	水库蓄水、降雨
大堰塘滑坡	2007	水布垭库区	300	>50 m 涌浪,下游 20.8 km 水布垭大坝处涌浪爬坡仍高 4 m 左右,死亡 1 人,失踪 6 人	水库蓄水、降雨
龚家方滑坡	2008	三峡库区	38	31.8 m 涌浪	水库蓄水
荒田滑坡	2009	小湾库区	100	失踪 14 人	降雨
黄桥滑坡	2010	小湾库区	380	46 m 涌浪	库水位骤降
黄坪滑坡	2012	溪洛渡库区	12	>20 m 涌浪,失踪 12 人	水库蓄水
唐家溪滑坡	2014	柘溪库区	16.8	3 人死亡,失踪 9 人	降雨
红岩子滑坡	2015	三峡库区	23	5~6 m 涌浪,死亡 2 人	库水位骤降、降雨

过程。现有试验模拟技术与工程实际存在差距,对于滑坡涌浪全过程特征分析预测很难精准把握,灾害风险防控仍需进一步深入系统研究,存在诸多亟待解决的问题。本文从水库滑坡分类、滑坡失稳诱发因素、滑带强度参数确定、滑速计算及运动演化规律、滑坡涌浪产生及传播模拟技术、涌浪与水工建筑物相互作用等方面对已有研究现状进行归纳总结,剖析水库滑坡涌浪的研究要点,以期为高坝大库滑坡涌浪灾害链研究提供技术支撑。

1 水库滑坡分类及失稳诱发因素

滑坡工程地质特征与涌浪特征存在必然联系,为了揭示涌浪特征及传播规律,需对水库滑坡进行分类。根据滑坡体与库水的相对位置可分为水上滑坡、部分淹没式滑坡和水下滑坡 3 类。例如:金沙江白鹤滩库区王家山滑坡、澜沧江黄登-大华桥库区大华滑坡前缘剪出口在库水位以下,即为部分淹没式滑坡;GS 水电站近坝区梅里石滑坡则为水上滑坡,同时具有高位远程特征。根据滑坡岩土体特征可分为岩质滑坡和土质滑坡,岩质滑坡以倾倒体、变形体和崩塌体为主,如雅砻江两河口水电站近坝区磨古倾倒体为岩质滑坡;周家滑坡、争岗滑坡则为土质滑坡,其滑体由崩积土、坡积土、砾石土等组成。根据滑体下滑速度可分为极缓慢滑坡、很缓慢滑坡、缓慢滑坡、中速滑坡、迅速滑坡、很迅速滑坡以及极迅速滑坡共 7 类。此外,结合滑体垂直位移和水平位移比值的关系将滑坡分为短程和远程滑坡,当滑体重心位置的垂直位移与水平位移之比小于 0.6 时,该滑坡为远程滑坡,其余均为短程滑坡。其中,高速远程滑坡由于其巨大破坏性,吸引了国内外学者的注意,例如白格滑坡、易贡滑坡等。

水位变幅是诱发水库滑坡失稳的重要因素之

一。^[5-6] 水库蓄水初期,原本暴露在空气中的滑坡体被水浸泡软化,导致其抗剪强度大幅降低。同时,对于透水性较差的岩质滑坡,库水对滑坡体前缘阻滑段的浮托作用也加剧了滑坡的变形破坏。大型水电工程在运行期常常存在高达数十米的水位涨落带,库水位骤降时,滑体内孔隙水消散滞后于库水消落,形成不利于抗滑稳定的孔隙水压力和动水压力;库水位骤升时又会迅速抬高滑坡体内的地下水位,降低其阻滑力。例如,2019 年 6 月 10 日,某库区水位调度变幅高达 33 m,由于水位快速消落形成较大的动水压力,诱发近坝库岸共 11 处滑坡复活,造成房屋开裂、地面沉降、公路垮塌等灾害。此外,强震、暴雨、人工扰动等因素也会进一步加剧库区发生滑坡等地质灾害的可能性。区别于一般的滑坡灾害,水库滑坡失稳会造成更为严重的后果,大量滑体滑入库区后,河道的有效过流断面面积减小,很容易形成堰塞坝,导致库水位进一步抬升。堰塞坝一旦溃决,会严重威胁水库的稳定运行及沿岸、下游地区居民的生命财产安全^[7]。更为重要的是,滑坡失稳后高速入水会激起破坏力巨大的涌浪,阻碍沿程航道,传播至坝前时,一方面会对水工金属结构产生强烈的冲击作用,另一方面存在大坝漫顶的风险。尤其对于土石坝而言,漫顶的危害是致命的。

2 滑坡滑带强度参数确定

滑带是滑坡的重要组成部分之一,其强度特性常常控制滑坡的稳定性。滑带强度特性一般用峰值强度、残余强度、滑坡启动强度、完全软化强度以及长期强度等 5 个特征强度指标进行表述。其中,滑坡启动强度是指滑坡整体失稳启动时滑带的平均抗剪强度,它是滑坡稳定性评价和防治设计的重要参数。但滑坡失稳机理复杂且具有瞬发性,难以用常

规测试设备精确测定,因此如何准确地确定滑坡启动强度是滑坡研究长期以来的重点和难点^[8]。一般首次滑动的滑坡,启动强度可能恰为峰值强度;对于老滑坡而言,滑坡经历多次蠕滑渐进破坏造成滑带不同部位的强度由峰值逐步弱化,导致滑带在临滑时强度远小于峰值,甚至接近残余强度^[9]。因此,在实际工程设计中一味地将峰值强度认为是滑坡启动强度是不科学的。1985 年 Skempton^[10]通过环剪试验研究发现,滑带残余强度恰为复活型滑坡的临滑强度,后来 Bromhead 等^[11]也获得了类似的结论,进一步明确了残余强度的重要意义。

残余强度是指滑带以缓慢剪切速度经历足够大位移后所达到的最小稳定抗剪强度,它与滑带的应力历史、初始结构无关,与滑带本身的物质组成、黏粒含量、含石量、含水率、剪切速率等因素有关^[12]。李远耀等^[13]收集和整理了三峡库区地质灾害防治工程中近 400 处滑坡资料,运用 K-S 检验法对 3 308 组滑带抗剪强度参数进行统计分析,统计结果显示,滑带峰值强度呈正态分布,残余强度呈对数正态分布,分布较为集中,离散度较小;峰值平均内摩擦角为 16.8°,峰值平均黏聚力为 12.2 kPa;残余平均内摩擦角为 13.8°,残余平均黏聚力为 8.0 kPa。目前,对滑带残余强度的确定方法主要包括工程类比、室内试验、原位试验、反分析法等^[9]。室内试验方法又分为环剪试验、复剪试验、三轴剪切试验等。其中环剪试验是国内外公认的最适合测定残余强度的试验方法^[14],其优势在于:①可通过无限界面剪切实现较大剪切位移;②试验过程中试样有效剪切面积恒定;③试样可在连续位移条件下进行剪切;④有效解决剪切过程中荷载偏心问题等。滑带在经历长时间长距离剪切后真实变形的破坏规律与常规力学试验结果存在较大差异。除了试验,通常还会对滑带参数进行反分析。郑明新^[15]提出了两种滑带强度参数反算方法:①将滑坡失稳滑动瞬间视为极限平衡状态,将安全系数设为 1 代入极限平衡方程来求解黏聚力 c 和内摩擦角 φ 值;②根据滑坡所处的极限状态取一系列安全系数进行反算。根据 NB/T 10512—2021《水电工程边坡设计规范》及 NB/T 10497—2021《水电工程水库塌岸与滑坡治理技术规程》,变形边坡稳定分析时,宜根据边坡变形破坏程度综合反算强度参数。对于蠕滑和挤压阶段,安全系数介于 1.05~1.00 之间;对于滑动阶段,安全系数介于 0.95~0.99 之间;对于剧滑阶段,滑带强度降低到残余强度,安全系数小于 1.0。邓建辉等^[16]基于强度折减概念,逐步折减滑动面强度参数,使滑动面塑性区完全贯通,此时滑坡处于极限状态,强度

参数即为滑带平均抗剪强度参数。除此之外,研究者还基于试验数据、监测数据采用智能优化算法(遗传算法、粒子群算法)、机器学习算法(神经网络、支持向量机)以及不确定性分析方法(区间、概率、随机场)进行(多)参数反分析,大大缩短计算时间,提高反分析的效率和准确性。

3 滑坡滑速计算及运动演化规律

滑坡滑速计算是涌浪分析的前提,在整个滑坡运动演化过程中尤为重要,其带来的冲击力和能量直接决定了滑坡破坏力的大小。影响滑坡滑速的因素众多,如滑坡质心高度、失稳方量、滑移方向、坡角、滑带力学参数、底滑面动摩擦系数、水阻力、地震加速度等。目前计算滑速的常用经验方法有能量法、潘家铮法、Scheidegger 法等。

能量法是将滑体视为刚体,基于能量守恒定律在下滑过程中将滑体高势能释放转化成高动能。此方法计算简单、概念明确,但忽略了滑体变形能和水阻力的影响。并且滑面多为单一平面,无法反映实际复杂地形情况。潘家铮^[17]将圆弧滑动的滑体垂直条分成若干条块,在水平方向和竖直方向建立控制方程。假定每个条块的水平向加速度相同,计算时不考虑条块间竖向剪力的作用,则有

$$\frac{a_x}{g} = \left[\sum_{i=1}^n (W_i - U_i \cos \alpha_i) \frac{D_i}{W} - \sum_{i=1}^n (D_i \sin \alpha_i + \cos \alpha_i) \frac{c_i}{W} + \sum_{i=1}^n \frac{U_i \sin \alpha_i}{W} \right] / \left(1 + \sum_{i=1}^n W_i \tan \alpha_0 \frac{D_i}{W} \right) \quad (1)$$

其中

$$D_i = \frac{\sin \alpha_i - f_i \cos \alpha_i}{\cos \alpha_i + f_i \sin \alpha_i}$$

式中: a_x 、 W_i 、 U_i 、 c_i 、 f_i 、 α_i 分别为每个条块的水平加速度、重量、受到的孔隙水压力、底面黏聚力、摩擦系数和平均坡度; α_0 为前后条块底面中间连线坡度; n 为条块个数; g 为重力加速度; W 为滑体总重量。

再根据运动学公式计算出各条块在滑动距离 ΔL 后的滑速:

$$v = \sqrt{v_0^2 + 2a_x \Delta L} \quad (2)$$

式中: v 为滑体滑速; v_0 为初速度; ΔL 为滑动距离。

潘家铮法一般适用于滑坡坡度较缓、滑体近似做水平滑动时的滑速计算,但其忽略了滑动过程中各条块间相互碰撞所引起的能量损失,在实际计算结果上会造成一定误差。汪洋等^[18]等探究了水下滑坡运动规律,将地面运动的末状态作为水下运动的初始状态,引入流场阻力和黏滞阻力求得涉水滑坡的滑速计算公式。1973 年 Scheidegger^[19]考虑了

滑体体积效应,总结出滑体体积与等效摩擦系数之间的关系:

$$\lg \varphi_e = -0.15666 \lg V + 0.62419 \quad (3)$$

式中: φ_e 为等效摩擦系数; V 为滑体体积。

再利用均匀化的等价摩擦系数可计算滑体滑速:

$$v = \sqrt{2g(S_v - \varphi_e S_h)} \quad (4)$$

式中: S_v 为滑体下滑竖向距离; S_h 为滑体下滑水平向距离。

上述方法多以理论推导为主,都进行了不同程度假设,具有一定局限性。实际上,滑坡体不同区域由于受力的不均匀性具有不同加速度,而且滑动过程中底滑面动摩擦系数并非恒定,计算所采用的动摩擦系数一般是根据实际工程地质判断选取的经验值,它与上述的滑坡启动强度相关、但并非同一数值。滑体高速滑行与滑面之间存在刮铲效应,尤其是远程高速滑坡,同时伴随能量损耗,这也增加了动摩擦系数的取值难度。滑坡体还可能发生崩解、破碎,无法维持整体形态,因此单纯使用理论推导无法准确掌握滑坡运动演化规律。随着计算机技术的不断发展,越来越多的数值模拟方法受到研究者的青睐。目前常用方法有颗粒流离散元法、块体离散元法、非连续变形分析法、滑坡-碎屑流动力模拟法、有限体积法、物质点法等。此外,还有许多学者将 GIS 技术引入到滑坡运动过程模拟中,为滑坡运动演化全过程研究拓展了新思路^[20-21]。

4 滑坡涌浪产生及传播模拟技术

滑坡涌浪特征计算主要包括首浪高度、涌浪爬高的计算与沿程传播规律的研究,一般受滑坡体入水速度、入水体积、入水角度、形态特征以及水库地形、河道宽度、最大水深等因素的影响。同时,涌浪在传播过程中会被岸坡吸收、反射,且波与波会产生叠加,这都使涌浪特征发生变化。目前,对于涌浪特征的计算和浪高的预测主要分为经验公式、物理模型试验、数值模拟 3 类^[22-23]。

4.1 经验公式

经验公式是最为简单便捷,也是最早被用来研究涌浪特征的方法。Noda^[24] 将滑坡入水时的运动状态等效为垂直入水和水平入水两类,基于线性化重力表面波理论,得到涌浪浪高在非线性区域的理论近似解,并将该方法应用于 1958 年发生在 Alaska 的 Lituya 湾滑坡涌浪灾害评估。潘家铮^[17] 基于刚体极限平衡理论建立运动方程,采用条分法计算滑坡速度,进一步构建符合库岸滑坡工程实际的计算模型,同时基于波浪产生及传播理论,结合非线性波

的反射与叠加原理,对对岸以及距离滑坡发生位置任意点处的最高涌浪进行预测。汪洋等^[25] 将初始涌浪细分为体积涌浪和冲击涌浪两部分,前者由滑体体积产生,后者由滑体速度产生,从明渠非恒定流的连续性方程和动量方程出发,采用流体力学摄动法简化后得出涌浪的衰减规律。殷坤龙等^[26] 将涌浪衰减分为急剧衰减和缓慢衰减两个阶段,急剧衰减阶段涌浪的衰减符合指数衰减规律,涌浪以环状传播为主;缓慢衰减阶段符合明槽水流的沿程水头损失规律,涌浪以平行传播为主。徐卫亚等^[27] 基于分叉河道的分流比理论,综合斜条分法和水阻力影响等经典滑速分析方法,提出了一种适用于复杂分叉河道的涌浪远场传播计算方法。黄波林等^[28] 则在缓慢衰减阶段的涌浪计算中引入局部水头损失,弥补了天然河道和规则水槽试验存在的差异。谭海等^[29] 从滑坡稳定性、失稳运动演化过程、涌浪灾害链 3 个角度对金沙江上游某库区滑坡进行了系统研究。Slingerland 等^[30] 通过量纲分析将滑体长度、宽度、厚度、密度及最大速度作为预测公式的主要输入参数,提出了一套符合工程实际的涌浪预测公式。水科院法^[31] 基于加拿大麦卡坝、美国利贝坝、奥地利吉帕施坝和柘溪塘岩光滑坡涌浪观测成果,认为库岸滑坡滑速和体积是影响涌浪高度的最主要因素。综上,大多经验公式针对滑体、水体以及地形做出了不同程度的假设,计算结果往往与实际存在较大差异,有时甚至相差超过一个数量级,难以解决复杂的滑坡冲击水体问题,只能粗略估算涌浪特征,仅用于初期评估。

4.2 物理模型试验

物理模型试验是一种较为直观、可靠的涌浪研究手段,许多经验公式都是基于物理模型试验数据统计拟合而得到的。表 2 为国内外典型滑坡涌浪物理试验模型。

根据模型精度和规模可分为概化模型和原型模型,概化模型多针对滑坡涌浪机理研究,原型模型以解决某单一实际工程问题为主。根据滑体形状可分为刚体和可变形滑体模型,刚体模型试验一般被用来模拟岩质滑坡整体失稳滑动,而可变形滑体模型则充分考虑滑坡体的变形效应。1837 年 Russell^[32] 首次通过物理模型试验对滑坡涌浪进行研究。Wiegel^[33] 建立二维水槽模型,探究了刚性滑体沿平面滑落产生的涌浪特性。Monaghan 等^[47] 研究了块体沿曲面滑入水中的涌浪特征,通过改变块体的初始位置可得到不同入水速度。滑体形态模拟是涌浪模型试验的关键,Ataie-Ashtiani 等^[48] 分别对刚性滑体和可变形滑体进行了 120 次室内试验,充分考虑

表 2 典型的滑坡涌浪物理试验模型

研究者	年份	模型尺寸/m			滑体材料	滑坡模拟系统	主要测试系统
		长	宽	高			
Russell ^[32]	1837	6.1	0.3			重锤垂直落水	
Wiegel ^[33]	1955	18.3	0.9	0.61	钢板块体	自重下滑	电阻式波高仪
Noda ^[24]	1970	32.0	0.3	0.61	块体	自重下滑	
Heinrich ^[34]	1992	20.0	0.55	1.50	三角块体	自重下滑	
Walder 等 ^[35]	2003	3.0	0.285	1.0	空心矩形尼龙箱	滑动箱自重下滑	高速摄像机
Fritz 等 ^[36]	2004	11.0	0.5	1.0	散粒体	气动装置	粒子图像测速仪 (PIV)
Panizzo 等 ^[37]	2005	12.0	6.0	0.8	刚性矩形体	滑动箱自重下滑	加速度计、波高仪
Heller 等 ^[38]	2011	11.0	0.5	1.0	散粒体	气动装置	激光距离传感器 (LDS)、PIV
Mohammed 等 ^[39]	2012	48.8	26.5	2.1	砾石散粒体	气动装置	PIV、波高仪
任坤杰等 ^[40]	2011	24.5	5.5	1.2	碎石散粒体	自重下滑	高速摄影机、波高仪
殷坤龙等 ^[41]	2012	1 : 200 河道模型			散粒体	液压传动装置	高速摄影机、波高仪
黄波林等 ^[42]	2013	1 : 200 河道模型			散粒体	电动传动装置	高速摄影机、波高仪、姿态仪
Xue 等 ^[43]	2018	10.0	0.6	1.0	细砂、粗砂、碎石	电动传动装置	测速仪、波高仪
韩林峰等 ^[44]	2018	1 : 70 河道模型			混凝土块散粒体	自重下滑	高速摄影机、波高仪
邓成进等 ^[45]	2019	1 : 280 河道模型			混凝土块散粒体	滑动箱自重下滑	水工数据采集系统
吴长虹等 ^[46]	2022	5	0.75	1.2	散粒体	自重下滑	高速摄影机、表面流速场测算软件

了河岸坡脚、水深、滑动速度、滑体几何形状等因素的影响。Heller 等^[49]指出三维模型涌浪比二维模型衰减更快,涌浪特征存在较大差异性。为了准确预测涌浪特征,Panizzo 等^[37]开展了大量三维模型试验研究。Miller 等^[50]在研究散粒体坍塌入水产生涌浪的过程中,发现并不是所有的散粒体都对首波产生贡献。利用这一特点,试验中滑体可采用有效质量,即对首波有贡献的滑体的质量,很大程度上减轻了试验工作量。Fritz 等^[36]根据弗劳德相似准则,采用气动装置加速散粒体材料,实现了单个动态滑动参数的精确控制,分析了影响涌浪的 4 个因素:滑体质量、滑体速度、水深和滑体厚度。同时利用数字粒子图像测速仪 (PIV) 和激光距离传感器 (LDS) 获得滑坡涌浪的瞬时速度场,解决了涌浪产生过程的流体动力学问题。殷坤龙等^[41,51]通过物理模型试验探究了不同因素 (滑体长度、宽度、厚度、滑速、水深和河岸坡脚) 对近源区水舌特征量和首波高度的影响,分别采用方差法和回归法拟合得到计算水舌高度、长度的经验公式,并以白水河滑坡、大堰塘滑坡和千将坪滑坡为例进行了验证。黄波林等^[42]以 1 : 200 比尺构建了三峡水库龚家方滑坡涌浪大型物理相似试验模型,揭示了涌浪在传播过程中波的追逐、叠加及反射波叠加等相互作用规律,精细地刻画了河道内涌浪传播和爬高衰减率的差异性。总的来说,物理模型试验受模型比尺限制,较大的模型成本高、操作难度大;而较小的模型,尺寸效应往往又被忽略,导致试验结果与实际存在一定偏差。

4.3 数值模拟

相较于物理模型试验,数值模拟不受空间、成本、周期等因素的限制,可以输出任意测点的计算结

果。从力学模型的角度来看,滑坡涌浪的数学描述可分为流体力学理论和水波动力学理论。流体力学理论就是基于 Navier-Stokes (N-S) 方程直接对所有水质点进行计算,具有最高的计算精度,使用三相流模型可以考虑滑坡涌浪过程中土-水-气的耦合效应,但会带来很大的计算量。水波动力学理论则认为滑坡涌浪满足或大致满足线性或非线性浅水方程、Boussinesq 方程、势流方程等波浪理论公式约束,具有计算量小、耗时短的优点。根据 Yavari-Ramshe 等^[52]对目前滑坡涌浪分析中数学模型运用情况的统计结果,无论是对刚性还是可变形滑坡,浅水方程依旧是应用最为广泛的控制方程。基于以上理论,发展起来的常用模型包括 MOST 模型、FUNWAVE 模型、COMCOT 模型、TUNAMI 模型、CTSU 模型、SWAN 模型以及 GEO-WAVE、MIKE21、Delft-3D、FLOW-3D、FLUENT 等软件。黄波林等^[53]基于水波动力学 GEO-WAVE 模型开发了滑坡涌浪灾害快速评价系统软件,对三峡库区红岩子滑坡进行涌浪风险分析。彭辉等^[54]基于 FLOW-3D 模拟了弯曲河道型库岸滑坡涌浪传播过程及其与下游水利设施-大坝相互作用。孟永东等^[55]提出了基于 Delft-3D 软件水动力学数值模拟的滑坡堰塞体上游水位壅高过程仿真分析方法。

滑坡与库水以及空气之间的流固耦合过程是滑坡涌浪数值模拟中特别重要的一环。Sakai 等^[56]提出了耦合的离散单元法-粒子半隐式解法 (DEM-MPS)。Zhao 等^[57]采用离散单元模拟颗粒系统,通过求解局部平均的 N-S 方程来模拟流体流动,最后交换滑坡体和水之间的阻力、浮力和虚拟质量力等相互作用力来实现计算流体力学 (CFD) 和 DEM 耦

合。肖莉丽等^[58]完善了 Tsunami Squares 模型在滑坡涌浪模拟中的理论,并与物理模型试验结果对比验证。TS 方法避免了复杂的网格化、求解微分方程和干湿边界处理等问题,可达到滑坡运动和涌浪产生及传播的无缝耦合。Lorig 等^[59]将滑坡体看成刚性块体,使用 UDEC 模拟滑坡的运动过程,用低质量的刚性块体来构建包裹滑块前部的膜,通过在膜的水平和竖直方向施加静水力和动水力来实现库水对滑坡运动影响的模拟。Wang 等^[60]用耦合的非连续变形分析方法-光滑粒子流体动力学方法 (DDA-SPH) 计算滑坡涌浪的产生过程,采用 Mikola 等^[61]提出的 Penalty Force 模型计算块体和流体颗粒之间的作用力。徐文杰^[62]基于 DEM 和 SPH 算法,开展面向 GPU 并行加速的 SPH-DEM 耦合分析方法研究,开发形成了 CoSim 软件的流-固耦合模块,重现了 Vajont 滑坡“运动-涌浪-漫顶”灾害链全过程。谭海等^[63]采用颗粒 DEM 模拟散粒体滑坡的运动,采用光滑粒子流体动力学 SPH 模拟滑坡入水后涌浪的产生及其在近场的传播特征,同时引入浮力和拖曳力实现 DEM 模块和 SPH 模块之间的耦合。毛佳^[64]建立 CFD-DEM-浸入边界法 (IBM) 数值模拟理论,提出流固耦合系统交错迭代格式,开发相应的并行计算程序,CFD-DEM-IBM 数值模拟系统采用 IBM 传递流体和固体之间的相互作用力,突破带自由水面的移动边界流固耦合问题的关键技术,可有效模拟岩质滑坡涌浪过程中强烈的流固耦合作用。

涌浪特征分析中,另一个重要问题是对流体自由表面的准确描述。常用的方法包括 VOF 方法^[65-66]、Level Set 方法^[67-68]和 SPH 方法^[69-70]。1981 年,Hirt 等^[71]提出了追踪自由液面的 VOF 方法。VOF 方法虽然具有质量守恒性,但是一方面需要复杂的界面重构技术,另一方面由于体积函数的不连续性,不能准确计算界面的法线方向和曲率。1988 年,Osher 等^[72]提出了 Level Set 方法的雏形,即 Hamilton-Jacobi 方程,Sussman 等^[73]进行了完善。Level Set 方法在捕捉自由面方面更简单有效,但是

在指示函数对流和初始化过程中会遭受质量损失。Olsson 等^[74-75]为了改进 Level Set 方法的守恒性,引入 Heaviside 函数,提出了 CLS 方法。虽然 CLS 方法能够保证守恒性,但是界面的法向及曲率对微小的扰动更加敏感。1994 年,Monaghan^[76]首先提出 SPH 方法,采用光滑质点模拟连续的流体介质,适合模拟高速滑坡引起的大型涌浪。湛正刚等^[77]采用光滑粒子流体动力学方法对 RS 堆积体的灾变机理进行探究。总之,数值模拟方法既可以解决微观问题,如能量的传递、波的形成、水质点的运动等,也可以解决如波高、传播范围等宏观计算,不失为一种好的研究方法。

4.4 研究方法讨论

表 3 总结了上述典型研究方法的优势与不足。经验公式是一种在理论分析基础上,结合工程经验和物理模型试验结果给出的一种简单、快捷的涌浪估算方法。但通常需做出大量假设来简化模型,难以分析复杂滑坡冲击水体过程。物理模型试验多是在相似理论的基础上,对滑坡体及水体按比例复原和再现,是一种相对直观、可靠的研究手段。但其常受模型比尺限制,较大的模型成本高、操作难度大;而较小的模型,尺寸效应往往又被忽略,导致试验结果与实际过程存在较大偏差。此外物理模型试验多针对单一案例进行模拟,通用性较差。数值模拟方法具有耗资少、历时短、可重复性强、能较好地再现滑坡涌浪全过程等优点。但往往受算法限制,存在假设条件过于理想化、计算精度不高等难点,加之影响滑坡涌浪特征的因素众多,导致计算参数、初始条件和边界条件难以把控。

5 涌浪与水工建筑物相互作用

近坝库区发生滑坡涌浪常对水工建筑物 (大坝、闸门) 安全造成威胁。1959 年意大利 Pontesei 拱坝库区约 300 万 m³ 的滑坡引发的漫顶涌浪高达 20 余米^[1]。1961 年柘溪水电站大坝上游右岸山体滑坡,造成约 165 万 m³ 的岩土体以 20 m/s 的速度涌

表 3 滑坡涌浪典型研究方法的优势与不足

分类	研究方法	优势	不足
经验公式	E. Noda 法 ^[24]	基于波浪传播解析理论	滑坡入水模式仅有两种
	潘家铮法 ^[17]	符合真实滑坡运动状态、工程应用广泛	远场传播计算无法考虑河道形状特征
	Slingerland 和 Voight 法 ^[30]	计算参数简单	未考虑滑坡实际运动状态
	水科院法 ^[31]	易于计算,包含远场特征	公式工程案例资料拟合
物理模型试验	二维水槽模型试验	易于操作	模型过于简单
	刚体模型试验	适用于岩质滑坡整体失稳	试验结果可能偏大
	可变形滑体模型试验	适用于土质滑坡缓慢失稳	不易还原滑坡失稳机理和运动过程
数值模拟	SPH 法	开源软件易于进行特定二次开发	远场传播时涌浪易发生非物理衰减
	SPH-DEM 耦合法	解决了滑体离散元模拟问题	排斥力过大时,滑体和水体脱开形成间隙
	FLOW-3D	易于建模计算,模拟结果与实际贴近	滑体视作牛顿或非牛顿流体

入库库,漫过正在施工的溢流坝段坝顶的涌浪高度为3.6 m^[78]。因此,在研究涌浪本身特征变化的同时,还应充分考虑涌浪荷载对水工建筑物的影响。目前,涌浪对水工建筑物冲击作用方面的研究相对较少,研究方法以物理模型试验和数值模拟为主。

大坝及闸门承受的水压力由静水压力和涌浪形成的动水压力组成,涌浪形成的动水头与库水流速、涌浪高度、冲击速度、波动频率和水工建筑物结构形式密切相关。1996年 Ramsden^[79]在0.610 m×0.396 m×36.6 m波浪水槽中进行了室内试验,研究了孤立波与垂直挡墙的相互作用。Evers等^[80]在其试验数据的基础上拟合得到静水压力和波浪组合所产生的水平作用力 F_H :

$$F_H = \left(1 - \frac{3a}{2h}\right)^{1/6} \frac{\rho_w g (2a + h)^2}{2} \quad (5)$$

式中: a 为波幅; h 为静水深度; ρ_w 为水的密度。

黄锦林^[81]采用经验公式和物理模型试验研究了库区滑坡涌浪对直立坝的影响规律,提出了涌浪冲击坝前压力的计算模型。邓成进等^[45]将物理模型试验得到的涌浪数据作用于坝体,分析了涌浪反复震荡对坝体的危害性。彭辉等^[54]研究发现涌浪高度和动水头的波动性基本一致,分析得出最大动水头小于涌浪高度水头且沿水深有一定程度的折减,折减系数随坝高呈现先增后减趋势。李静等^[82]探讨了滑坡体宽度、入水速度以及库区水深等因素对滑坡涌浪波高、坝面冲击压力及分布形式的影响。沈智敏^[83]基于Workbench软件平台对库区不同断面特征情况下的滑坡涌浪和坝体响应机制进行了数值模拟。张婕^[84]通过实测数据探究了滑坡涌浪作用于直立式码头面板底部上托力的表现形式、时程变化规律及其主要影响因素。Attili等^[85]利用Solids4Foam探究了不同形态的孤立波冲击直立坝或拱坝的三维效应,并提出了相应的涌浪爬高经验公式。

6 研究展望

a. 滑坡入水产生涌浪过程中滑体、水体以及空气三相耦合研究仍是难点,同时还会涉及滑坡单元体形变及损伤破裂等问题,故有必要进一步开发能更全面反映多相、多物质相互耦合作用的数值模型。

b. 滑带力学参数取值是滑坡涌浪特征分析的先决条件,应根据实际工程需求,建立一套适用于不同类型滑坡运动的滑带力学参数取值体系,对滑坡关键性参数取值进行综合判断、合理评估。除此之外,运用宏观力学参数对数值模拟过程中的微观力学参数进行准确有效标定,得到适用的数值计算参

数仍是研究热点。

c. 现有研究多以蠕滑或间歇性滑动滑坡为主,对高危高位高速滑坡涌浪特征及传播规律研究较少。高位滑坡运动机理极为复杂,具有潜在势能高、突发性强、入水速度大等特点,传统试验模拟测试方法不再适用,需进一步加强高危高位滑坡涌浪特征的工程地质类比及判断。如何考虑研究高势能与高动能的转化、滑动过程中能量损耗、滑坡入水速度的精准测试等问题仍是研究难点,基于超宽带追踪及定位技术对滑坡运动演化过程进行研究不失为一种好方法。

d. 应深入研究复合型、组合型滑坡或滑坡群涌浪传播特征和叠加或衰减规律。将库水骤变、强震对滑坡的水动力、地震动力以及涌浪对不稳定堆积体的冲击动力合理等效输入计算模型,可考虑提出一种基于速度控制的滑坡涌浪物理模型试验和数值模拟技术,将外动力因素带来的力学劣化作用等效为滑坡体滑速变化,从而可直观、简便地分析水动力或地震动力作用下的滑坡运动机制。

e. 涌浪沿程传播过程应充分考虑河道断面变化、河道弯曲程度、分汊以及水流速度等因素影响。探究复杂河道地形对涌浪近场波形特征、波幅衰减规律、能量转化过程,远场传播方向、反射波波高以及涌浪周期的影响规律。

f. 滑坡涌浪对近坝区域水工金属结构的冲击压力、对面板坝坝面的拖曳力等流固互馈模拟测试技术的研究较少。大多数研究者将研究重心放在了滑坡入水产生涌浪耦合过程以及涌浪波的传递、叠加、衰减过程中,往往忽视了涌浪荷载与水工建筑物的相互作用和结构优化,需通过物理模型试验、数值模拟、理论推导相结合的方法进一步深入研究。

g. 水下滑坡涌浪灾害隐蔽性强、难以监测,因此需加强水下滑坡涌浪灾害预测预警系统的开发,将不确定性分析理论、数据同化、数据融合等方法应用于库区灾害链分析及风险防控治理工作中具有重要意义。

参考文献:

[1] PANIZZO A, DE GIROLAMO P, DI RISIO M, et al. Great landslide events in Italian artificial reservoirs[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2005, 5(5): 733-740.

[2] 殷坤龙, 姜清辉, 汪洋. 新滩滑坡运动全过程的非连续变形分析与仿真模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(7): 959-962. (YIN Kunlong, JIANG Qinghui, WANG Yang. Numerical simulation on the movement process of Xintan landslide by DDA method[J]. Chinese Journal of

- Rock Mechanics and Engineering,2002,21(7):959-962. (in Chinese))
- [3] 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))
- [4] 石传奇,安翼,杨家修. 滑坡涌浪的三维 SPH 方法模拟及其工程应用[J]. 中国科学:物理学 力学 天文学,2015,45(10):104706. (SHI Chuanqi, AN Yi, YANG Jiaxiu. A SPH based numerical method of landslide induced impulse wave and its application on Huangtian landslide event[J]. Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica,2015,45(10):104706. (in Chinese))
- [5] 周家文,陈明亮,李海波,等. 水动力型滑坡形成运动机理与防控减灾技术[J]. 工程地质学报,2019,27(5):1131-1145. (ZHOU Jiawen, CHEN Mingliang, LI Haibo, et al. Formation and movement mechanisms of water-induced landslides and hazard prevention and mitigation technologies[J]. Journal of Engineering Geology,2019,27(5):1131-1145. (in Chinese))
- [6] 李长冬,龙晶晶,姜茜慧,等. 水库滑坡成因机制研究进展与展望[J]. 地质科技通报,2020,39(1):67-77. (LI Changdong, LONG Jingjing, JIANG Xihui, et al. Advance and prospect of formation mechanism for reservoir landslides [J]. Bulletin of Geological Science and Technology,2020,39(1):67-77. (in Chinese))
- [7] 王环玲,屈晓,徐卫亚,等. 堰塞坝堆积演化过程及开发利用研究进展[J]. 中国地质灾害与防治学报,2021,32(1):84-94. (WANG Huanling, QU Xiao, XU Weiya, et al. Research progress on the evolution and utilization of the barrier dam accumulations [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control,2021,32(1):84-94. (in Chinese))
- [8] WEN B P, AYDIN A, DUZGOREN-AYDIN N S, et al. Residual strength of slip zones of large landslides in the Three Gorges area, China[J]. Engineering Geology,2007,93(3/4):82-98.
- [9] 刘小丽,邓建辉,李广涛. 滑带土强度特性研究现状[J]. 岩土力学,2004,25(11):1849-1854. (LIU Xiaoli, DENG Jianhui, LI Guangtao. Shear strength properties of slip soils of landslides: an overview [J]. Rock and Soil Mechanics,2004,25(11):1849-1854. (in Chinese))
- [10] SKEMPTON A W. Residual strength of clays in landslides, folded strata and the laboratory [J]. Géotechnique,1985,35(1):3-18.
- [11] BROMHEAD E N, DIXON N. The field residual strength of London clay and its correlation with laboratory measurements, especially ring shear tests [J]. Géotechnique,1986,36(3):449-452.
- [12] 任三绍,张永双,徐能雄,等. 含砾滑带土复活启动强度研究[J]. 岩土力学,2021,42(3):863-873. (REN Sanshao, ZHANG Yongshuang, XU Nengxiong, et al. Mobilized strength of sliding zone soils with gravels in reactivated landslides [J]. Rock and Soil Mechanics,2021,42(3):863-873. (in Chinese))
- [13] 李远耀,殷坤龙,柴波,等. 三峡库区滑带土抗剪强度参数的统计规律研究[J]. 岩土力学,2008,29(5):1419-1424. (LI Yuanyao, YIN Kunlong, CHAI Bo. Study on statistical rule of shear strength parameters of soil in landslide zone in Three Gorges Reservoir area [J]. Rock and Soil Mechanics,2008,29(5):1419-1424. (in Chinese))
- [14] SASSA K, FUKUOKA H, WANG Gonghui, et al. Undrained dynamic-loading ring-shear apparatus and its application to landslide dynamics[J]. Landslides,2004,1(1):7-19.
- [15] 郑明新. 论滑带土强度特征及强度参数的反算法[J]. 岩土力学,2003,24(4):528-532. (ZHENG Mingxin. Research of strength characteristic of landslide slip and revised counter calculation method [J]. Rock and Soil Mechanics,2003,24(4):528-532. (in Chinese))
- [16] 邓建辉,魏进兵,闵弘. 基于强度折减概念的滑坡稳定性三维分析方法(I):滑带土抗剪强度参数反演分析[J]. 岩土力学,2003,24(6):896-900. (DENG Jianhui, WEI Jinbing, MIN Hong. 3D stability analysis of landslides based on strength reduction (I): back analysis for the shear strength of slip soils[J]. Rock and Soil Mechanics,2003,24(6):896-900. (in Chinese))
- [17] 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.
- [18] 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))
- [19] SCHEIDEGGER A E. On the prediction of the reach and velocity of catastrophic landslides[J]. Rock Mechanics,1973,5(4):231-236.
- [20] 徐卫亚,胡业凡,吴伟伟,等. 基于云模型和 D-S 证据理论的多源信息融合滑坡安全性评价[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(1):59-66. (XU Weiya, HU Yefan, WU Weiwei, et al. Landslide safety evaluation by multi-source information fusion based on cloud model and D-S evidence theory [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(1):59-66. (in Chinese))
- [21] 余国,谢谟文,胡庆忠,等. 基于 GIS 的库岸滑坡滑速计算方法[J]. 岩土力学,2019,40(7):2781-2788. (YU Guo, XIE Mowen, HU Qingzhong, et al. A method for calculating the three-dimensional landslide speed of

- reservoir bank based on GIS [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(7): 2781-2788. (in Chinese))
- [22] 殷坤龙, 张宇, 汪洋. 水库滑坡涌浪风险研究现状和灾害链风险管控实践[J]. 地质科技通报, 2022, 41(2): 1-12. (YIN Kunlong, ZHANG Yu, WANG Yang. A review of landslide-generated waves risk and practice of management of hazard chain risk from reservoir landslide[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(2): 1-12. (in Chinese))
- [23] 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. Review of numerical simulation of landslides and surges in reservoir districts[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36(2): 79-86. (in Chinese))
- [24] NODA E. Water waves generated by landslides [J]. Journal of the Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division, 1970, 96(4): 835-855.
- [25] 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))
- [26] 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))
- [27] 徐卫亚, 秦创创, 张贵科, 等. 基于分流比的复杂分叉河道滑坡涌浪远场传播计算方法[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(3): 20-24. (XU Weiya, QIN Chuangchuang, ZHANG Guike, et al. Calculation method for far-field propagation of landslide surge based on flow diversion ratio of a bifurcated river [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(3): 20-24. (in Chinese))
- [28] 黄波林, 陈小婷, 殷跃平, 等. 滑坡崩塌涌浪计算方法研究[J]. 工程地质学报, 2012, 20(6): 909-915. (HUANG Bolin, CHEN Xiaoting, YIN Yueping, et al. Computing system for impulse wave in reservoir generated by landslide & rockfall [J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20(6): 909-915. (in Chinese))
- [29] 谭海, 王小毛, 徐卫亚. 金沙江上游某库区滑坡稳定性分析及滑速涌浪预测[J]. 武汉大学学报(工学版), 2021, 54(10): 879-886. (TAN Hai, WANG Xiaomao, XU Weiya. Landslide stability analysis and slide velocity and surge wave predictions of a reservoir landslide in the upper reaches of Jinsha River [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2021, 54(10): 879-886. (in Chinese))
- [30] SLINGERLAND R, VOIGHT B. Evaluating hazard of landslide-induced water waves [J]. Journal of the Waterway, Port, Coastal, and Ocean Division, 1982, 108(4): 504-512.
- [31] 钟登华, 安娜, 李明超. 库岸滑坡体失稳三维动态模拟与分析研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(2): 360-367. (ZHONG Denghua, AN Na, LI Mingchao. 3D dynamic simulation and analysis of slope instability of reservoir banks [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(2): 360-367. (in Chinese))
- [32] RUSSELL J S. Report of the committee on waves [C]// Proceedings of the 7th Meeting of British Association for the Advancement of Science. London: John Murray, 1838.
- [33] WIEGEL R L. Laboratory studies of gravity waves generated by the movement of a submerged body [J]. Eos, Transactions American Geophysical Union, 1955, 36(5): 759-774.
- [34] HEINRICH P. Nonlinear water waves generated by submarine and aerial landslides [J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 1992, 118(3): 249-266.
- [35] WALDER J S, WATTS P, SORENSEN O E, et al. Tsunamis generated by subaerial mass flows [J]. Journal of Geophysical Research Solid: Earth, 2003, 108(B5): 2236.
- [36] FRITZ H M, HAGER W H, MINOR H E. Near field characteristics of landslide generated impulse waves [J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 2004, 130(6): 287-302.
- [37] PANIZZO A, DE GIROLAMO P, PETACCIA A. Forecasting impulse waves generated by subaerial landslides [J]. Journal of Geophysical Research, 2005, 110(C12): C12025.
- [38] HELLER V, HAGER W H. Wave types of landslide generated impulse waves [J]. Ocean Engineering, 2011, 38(4): 630-640.
- [39] MOHAMMED F, FRITZ H M. Physical modeling of tsunamis generated by three-dimensional deformable granular landslides [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2012, 117(C11): C11015.
- [40] 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))
- [41] 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))

- [42] 黄波林,王世昌,陈小婷,等. 碎裂岩体失稳产生涌浪原型物理相似试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2013,32(7):1417-1425. (HUANG Bolin, WANG Shichang, CHEN Xiaoting, et al. Prototype physical similarity experimental study of impulsive wave generated by cataclastic rockmass failure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2013,32(7):1417-1425. (in Chinese))
- [43] XUE Hongcheng, MA Qian, DIAO Mingjun, et al. Propagation characteristics of subaerial landslide-generated impulse waves[J]. Environmental Fluid Mechanics,2019,19(1):203-230.
- [44] 韩林峰,王平义. 基于动量平衡的三维滑坡涌浪最大近场波幅预测[J]. 岩石力学与工程学报,2018,37(11):2584-2592. (HAN Linfeng, WANG Pingyi. Prediction of the maximum near-field wave amplitude of impulse waves generated by three-dimensional landslides based on momentum balance [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37 (11) : 2584-2592. (in Chinese))
- [45] 邓成进,党发宁,陈兴周. 库区滑坡涌浪传播及其与大坝相互作用机理研究[J]. 水利学报,2019,50(7):815-823. (DENG Chengjin, DANG Faning, CHEN Xingzhou. Study on the surge wave propagation in the reservoir area and its interaction mechanism with the dam[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50 (7) : 815-823. (in Chinese))
- [46] 吴长虹,江兴元,杨义,等. 散体滑坡涌浪形成与传播的物理模拟试验研究[J]. 长江科学院院报,2022,39(7):52-58. (WU Changhong, JIANG Xingyuan, YANG Yi, et al. Physical modelling on the generation and propagation of surge wave caused by granular landslide [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2022,39(7):52-58. (in Chinese))
- [47] MONAGHAN J J, KOS A, ISSA N. Fluid motion generated by impact [J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering,2003,129(6):250-259.
- [48] ATAIE-ASHTIANI B, NAJAFI-JILANI A. Laboratory investigations on impulsive waves caused by underwater landslide[J]. Coastal Engineering, 2008, 55 (12) : 989-1004.
- [49] HELLER V, SPINNEKEN J. On the effect of the water body geometry on landslide-tsunamis: physical insight from laboratory tests and 2D to 3D wave parameter transformation[J]. Coastal Engineering, 2015, 104: 113-134.
- [50] MILLER G S, TAKE W A, MULLIGAN R P, et al. Tsunamis generated by long and thin granular landslides in a large flume [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans,2017,122(1):653-668.
- [51] 肖莉丽,殷坤龙,王佳佳,等. 基于物理模拟试验的库岸滑坡冲击涌浪[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014,45(5):1618-1626. (XIAO Lili, YIN Kunlong, WANG Jiajia, et al. Impulse wave generated by reservoir landslides based on physical model experiments [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014,45(5):1618-1626. (in Chinese))
- [52] YAVARI-RAMSHE S, ATAIE-ASHTIANI B. Numerical modeling of subaerial and submarine landslide-generated tsunami waves-recent advances and future challenges[J]. Landslides,2016,13(6):1325-1368.
- [53] 黄波林,殷跃平. 基于波浪理论的水库地质灾害涌浪数值分析方法[J]. 水文地质工程地质,2012,39(4):92-97. (HUANG Bolin, YIN Yueping. Method of reservoir geohazard impulsive wave simulation based on wave theory [J]. Hydrogeology & Engineering Geology,2012,39(4):92-97. (in Chinese))
- [54] 彭辉,黄亚杰. 弯曲河道型库岸滑坡涌浪传播及其与大坝的相互作用[J]. 长江科学院院报,2022,39(10):66-71. (PENG Hui, HUANG Yajie. Propagation of landslide surge in curved river channel and its interaction with dam [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2022,39(10):66-71. (in Chinese))
- [55] 孟永东,徐卫亚,田斌,等. 深切峡谷河道滑坡灾害影响的水动力学分析[J]. 岩土力学,2011,32(3):927-934. (MENG Yongdong, XU Weiya, TIAN Bin, et al. Hydrodynamic analysis of river landslide disasters in deep-cut gorge [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32 (3) : 927-934. (in Chinese))
- [56] SAKAI M, SHIGETO Y, SUN Xiaosong, et al. Lagrangian-Lagrangian modeling for a solid-liquid flow in a cylindrical tank [J]. Chemical Engineering Journal, 2012, 200-202: 663-672.
- [57] ZHAO Jidong, SHAN Tong. Coupled CFD-DEM simulation of fluid-particle interaction in geomechanics [J]. Powder Technology, 2013, 239: 248-258.
- [58] 肖莉丽,王佳佳,李枝强,等. 考虑滑体-水体相互作用的滑坡涌浪产生过程动力学模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41 (12) : 2404-2416. (XIAO Lili, WANG Jiajia, LI Zhiqiang, et al. Research on dynamic models of landslide tsunami generation considering slide/water interactions [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41 (12) : 2404-2416. (in Chinese))
- [59] LORIG L J, WATSON A D, MARTIN C D, et al. Rockslide run-out prediction from distinct element analysis [J]. Geomechanics and Geoengineering, 2009, 4 (1) : 17-25.
- [60] WANG Wei, CHEN Guangqi, ZHANG Hong, et al. Analysis of landslide-generated impulsive waves using a coupled DDA-SPH method [J]. Engineering Analysis with Boundary Elements, 2016, 64: 267-277.
- [61] MIKOLA R G, SITAR N. Next generation discontinuous rock mass models: 3-D and rock-fluid interaction [M]// CHEN Guangqi, OHNISHI Y, ZHENG Lu, et al. Frontiers

- of Discontinuous Numerical Methods and Practical Simulations in Engineering and Disaster Prevention. London: CRC Press, 2013: 81-90.
- [62] 徐文杰. 滑坡涌浪流-固耦合分析方法与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39 (7): 1420-1433. (XU Wenjie. Fluid-solid coupling method of landslide tsunamis and its application [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(7): 1420-1433. (in Chinese))
- [63] 谭海, 徐青, 陈胜宏, 等. 基于 DEM-SPH 耦合模型的散粒体滑坡涌浪仿真模拟[J]. 岩土力学, 2020, 41 (增刊 2): 1-11. (TAN Hai, XU Qing, CHEN Shenghong, et al. Numerical modeling of surge caused by granular deformable landslide based on a coupled DEM-SPH model [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41 (Sup2): 1-11. (in Chinese))
- [64] 毛佳. 库岸边坡失稳运动及滑坡涌浪数值模拟方法研究[D]. 南京: 河海大学, 2018.
- [65] MONTAGNA F, BELLOTTI G, DI RISIO M. 3D numerical modeling of landslide-generated tsunamis around a conical island[J]. Natural Hazards, 2011, 58(1): 591-608.
- [66] 司鹏飞, 田利勇. 基于流固耦合方法的滑坡涌浪数值模拟[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40 (6): 28-32. (SI Pengfei, TIAN Liyong. Numerical simulation of landslide-induced impulse waves based on fluid-solid coupling method [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(6): 28-32. (in Chinese))
- [67] 赵兰浩, 李同春, 牛志伟, 等. Level Set 方法求解三维大幅晃动问题的分步有限元法[J]. 水动力学研究与进展, 2006, 21A (4): 433-438. (ZHAO Lanhao, LI Tongchun, NIU Zhiwei, et al. Fractional step FEM for calculation of 3D large amplitude sloshing problem using Level Set method [J]. Journal of Hydrodynamics, 2006, 21A(4): 433-438. (in Chinese))
- [68] YAN J, DENG X, KOROBENKO A, et al. Free-surface flow modeling and simulation of horizontal-axis tidal-stream turbines[J]. Computers & Fluids, 2017, 158: 157-166.
- [69] SHI Chuanqi, AN Yi, WU Qiang, et al. Numerical simulation of landslide-generated waves using a soil-water coupling smoothed particle hydrodynamics model [J]. Advances in Water Resources, 2016, 92: 130-141.
- [70] MANENTI S, WANG Dong, DOMÍNGUEZ J M, et al. SPH modeling of water-related natural hazards [J]. Water, 2019, 11(9): 1875.
- [71] HIRT C W, NICHOLS B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries[J]. Journal of Computational Physics, 1981, 39(1): 201-225.
- [72] OSHER S, SETHIAN J A. Fronts propagating with curvature-dependent speed: algorithms based on Hamilton-Jacobi formulations[J]. Journal of Computational Physics, 1988, 79(1): 12-49.
- [73] SUSSMAN M, SMERKA P, OSHER S. A Level Set approach for computing solutions to incompressible two-phase flow [J]. Journal of Computational Physics, 1994, 114(1): 146-159.
- [74] OLSSON E, KREISS G. A conservative level set method for two phase flow [J]. Journal of Computational Physics, 2005, 210(1): 225-246.
- [75] OLSSON E, KREISS G, ZAHEDI S. A conservative level set method for two phase flow II [J]. Journal of Computational Physics, 2007, 225(1): 785-807.
- [76] MONAGHAN J J. Simulating free surface flows with SPH [J]. Journal of Computational Physics, 1994, 110(2): 399-406.
- [77] 湛正刚, 程瑞林, 孙卫, 等. 水库区大型堆积体灾变分析及对策研究[J]. 岩土工程学报, 2022, 44 (1): 194-200. (ZHAN Zhenggang, CHENG Ruilin, SUN Wei, et al. Disaster analysis and countermeasures of large accumulation in reservoir areas [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44 (1): 194-200. (in Chinese))
- [78] 肖诗荣, 刘德富, 胡志宇. 世界三大典型水库型顺层岩质滑坡工程地质比较研究[J]. 工程地质学报, 2010, 18 (1): 52-59. (XIAO Shirong, LIU Defu, HU Zhiyu. Engineering geologic study of three actual dip bedding rockslides associated with reservoirs in the world [J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(1): 52-59. (in Chinese))
- [79] RAMSDEN J D. Forces on a vertical wall due to long waves, bores, and dry-bed surges [J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 1996, 122(3): 134-141.
- [80] EVERS F M, HELLER V, FUCHS H, et al. Landslide generated impulse waves in reservoirs: basics and computation [M]. 2nd ed. Zürich: Versuchsanstalt für Wasserbau, 2019.
- [81] 黄锦林. 库岸滑坡涌浪对坝体影响研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [82] 李静, 陈健云, 徐强, 等. 滑坡涌浪对坝面冲击压力的影响因素研究[J]. 水利学报, 2018, 49(2): 232-240. (LI Jing, CHEN Jianyun, XU Qiang, et al. Study on the influence factors of landslide surge wave on the impact pressure on dam's surface [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(2): 232-240. (in Chinese))
- [83] 沈智敏. 库区断面特征对滑坡涌浪传播及重力坝响应影响研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2021.
- [84] 张婕. 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, 2016.
- [85] ATILI T, HELLER V, TRIANTAFYLLOU S P. Numerical study of impulse waves impacting dams [C]//Proceedings of the 39th IAHR World Congress. Granada: IAHR, 2022. (收稿日期: 2022-11-21 编辑: 俞云利)