doi:10.3799/dqkx.2025.283

近坝库岸滑坡涌浪溃坝灾害链模型试验方法

杜镇瀚[1,2] 钟启明[3] 周家文[2] 侯文昂[1,4] 张士辰[1,4*]

1. 南京水利科学研究院大坝安全与管理研究所，南京，210024

2. 四川大学水利水电学院，成都，610065

3. 南京水利科学研究院岩土工程研究所，南京，210029

4. 水利部大坝安全管理中心，南京，210029

摘要：近坝库岸滑坡引发的涌浪灾害链具有突发性、链生性、强破坏性等特点，对水工建筑物及下游安全构成严重威胁。通过开展滑坡涌浪溃坝一体化物理模型试验，系统记录涌浪演进、坝体冲蚀及溃决过程的关键数据，揭示了土石坝在涌浪作用下的溃决机制。基于水槽试验数据，建立基于有限体积法的三维精细化数值模型，耦合滑体运动、水流动力与坝料冲蚀模块，验证了数值方法的可靠性。开展多因素数值分析，揭示了滑坡体积、滑落高度、坝体几何形态及滑坡位置等因素对溃坝过程的影响。研究结果表明，在溃坝场景下，涌浪冲击显著加速坝体侵蚀，导致洪峰流量增大、溃决时间提前，呈现出明显的灾害放大效应。研究为近坝库区地质灾害链的风险识别与评估提供了理论依据与模拟方法支撑。

关键词：近坝库岸；滑坡涌浪；溃坝；链生机理；物理试验；数值分析

中图分类号：P642　　**收稿日期：**2025-09-05

Experimental Methodology for Modeling the Disaster Chain of Near-Dam Landslide-Generated Waves and Resultant Dam Breach

Du Zhenhan[1,2] Zhong Qiming[3] Zhou Jiawen[2] Hou Wenang[1,4] Zhang Shichen[1,4*]

1. Department of Dam Safety Management, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing,210024, China;

2. College of Water Resource and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

3. Department of Geotechnical Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;

4. Dam Safety Management Center of the Ministry of water Resources, Nanjing, 210029, China

Abstract: The disaster chain initiated by near-dam reservoir landslides, characterized by its abrupt onset, cascading nature, and severe destructive potential, poses a significant threat to hydraulic structures and downstream safety. This study presents integrated physical model tests simulating landslide-generated impulse waves and subsequent dam breaching. Key data on wave evolution, dam erosion, and the breach process were systematically recorded, revealing the failure mechanisms of earth-rock dams subjected to wave impact. Leveraging the experimental data, a refined three-dimensional numerical model was developed using the Finite Volume Method. This model couples modules for landslide motion, hydrodynamics, and dam material erosion. The reliability of the numerical model was validated against the experimental results. A parametric study was then conducted to investigate the influence of key factors, including landslide volume, fall height, dam geometry, and landslide location, on the breaching process. The results demonstrate that wave impact significantly accelerates dam erosion, leading to an increased peak discharge and an advanced breach timeline, highlighting a clear disaster amplification effect. This study provides both a theoretical foundation and an advanced simulation methodology for the risk identification and assessment of cascading geological hazards in near-dam reservoir areas.

Key words: Near-dam reservoir bank; Landslide-generated wave; Dam breach; Disaster chain mechanism; Physical model testing; Numerical analysis

---

基金项目：国家重点研发计划青年科学家项目（2022YFC3080100）；国家自然科学基金-联合基金重点项目（U22A20602）；南京水利科学研究院研究生学位论文创新基金项目（Yy725009）

作者简介：杜镇瀚(1998—)，男，博士研究生，主要从事库区地质灾害链生机理及风险评估研究。E-mail: zhdu@nhri.cn。
ORCID: https://orcid.org/0009-0000-5589-5364。
通信作者：张士辰（1977—），男，教高，主要从事库区地质灾害风险评估研究。E-mail:sczhang@nhri.cn。

0 前言

高坝大库多建于高山峡谷区，在地震、暴雨频发的极端气候影响下，水库水位频繁变动，导致近坝库岸滑坡灾害事件频发。不同于一般山体滑坡，滑坡体或巨岩块失稳高速滑入库区可能引致巨型涌浪，其库区涌浪链式影响往往超过滑坡灾害本身，对库区周边造成灾难性后果，甚至摧毁或严重影响水工建筑物（Evers et al., 2019; Du et al., 2025）。如1963 年意大利瓦伊昂水库发生巨型滑坡，滑坡体积超过 2.7 亿 m^3，引发涌浪高达 150m，对岸爬高达235m，导致水库直接报废，下游 3000 余人死亡（Semenza and Ghirotti, 2000; Ghirotti and Stead, 2013）；2023 年，印度锡金喜马拉雅山地区发生了 $14.7\times10^6\,m^3$ 的冰碛岩块崩塌，崩塌体入水后产生 20 多米高的涌浪，在冰川上爬高后仍高达 15m，涌浪剧烈侵蚀冰碛坝，直接导致冰碛坝溃决，剧烈的溃坝洪水进而引发下游 Teesta III 土石坝破坏，此次链式灾害造成 100 余人死亡或失踪（Sattar et al., 2025; Singh et al., 2024）。随着雅鲁藏布江下游、澜沧江等一系列梯级水电站纳入发展规划和建设，灾害链风险的严重危害与工程建设发展之间矛盾日益突出，因此探究滑坡涌浪溃坝灾害链生机理迫在眉睫。

研究库区滑坡涌浪灾害链生过程的方法有很多，实验室物理模型试验以及数值模拟兼顾经济性和实用性，最适合在实践中使用（Heller and Ruffini, 2023）。物理模型试验对于揭示灾害产生、演化及影响机制具有重要意义，主要考虑滑坡体参数（长、宽、厚、体积、密度、质量、入水速度、倾角等）及库区参数（水深、水槽形状、滑坡体位置等），研究最大涌浪高度、涌浪类型、衰弱规律及传播机制等（彭铭等，2025a；黄波林等，2025；陈世壮等，2023）。随着近些年来计算流体力学的高速发展及计算机硬件的迭代升级，大量的学者采用不同的数值方法来研究滑坡涌浪产生机理、传播规律，如离散单元法(DEM) (Tang et al., 2009)、光滑粒子流体动力学 (SPH) (彭铭等，2025b)，以及 DDA-SPH (Wang et al., 2017)、DEM-SPH (Su et al., 2024; 2025)等耦合方法。

近坝库岸滑坡涌浪溃坝致灾机理复杂，涉及到工程地质学、岩土力学、水力学等多学科交叉问题，是典型的地质-水工灾害链（彭铭等，2025；杜镇瀚等，2025）。与一般地质滑坡相比，库区滑坡涌浪不仅与滑坡入水动能相关，还受库区边界条件及形状多样性影响，涌浪在库区出现前后浪、多向浪融合叠加的现象（Hu et al., 2022），呈现典型的强激励、多频次、非线性、非恒定特征，极易对水利工程造成不规则的周期性破坏（Heller and Ruffini, 2023；Peng et al., 2021）。尤其对于土石坝而言，在受到多次涌浪冲击侵蚀后，将可能引发漫顶溃决，且相比于常规洪水漫顶，涌浪冲击作用可能加剧冲蚀过程，加速洪峰流量的到达时间，进一步放大灾害。目前关于涌浪对坝体作用的研究多集中于对刚性坝的冲击荷载作用（Evers et al., 2019），针对涌浪冲刷作用下土石坝的强冲蚀失稳机制的研究相对较少，Peng et al. (2019、2021) 开展了水槽试验研究了涌浪对堰塞坝稳定性和溃决机理，但忽略了滑坡体入水的传播及库区涌浪衰弱过程的影响，并且土石坝与堰塞坝在颗粒级配组成以及坝体尺寸特征上存在着明显的差异 (Zhong et al., 2021) 。

因此，本研究首先开展滑坡涌浪溃坝一体化物理模型试验，并详细记录影像、水位、流量等数据，系统研究土石坝在滑坡涌浪作用下的冲蚀特性及溃决机理；然后基于物理试验水槽参数进行数值模拟，对流量、水位、侵蚀程度等加以验证，并设计多组数值试验，系统性探讨多因素下滑坡涌浪对土石坝溃决过程的影响；最后在大量物理模型试验与数值模拟基础上，分析滑坡涌浪溃坝灾害链演化特征，研究成果可为近坝库区地质-水工灾害链识别、模拟、评估提供理论支撑。

1 滑坡涌浪溃坝灾害链生机理

1.1 物理模型试验

本文开展的滑坡涌浪溃坝物理模型试验是以山区库岸库区坝体为背景，试验装置由滑槽、水槽、泄流沉沙装置三部分组成，试验装置布置图如图 1 所示。对试验多角度观察，包括滑坡涌浪演进至坝前的传播过程、侧视面涌浪爬高漫顶翻坝冲蚀过程、正视面涌浪漫冲刷下游坝面过程，完全涵盖了滑坡-涌浪-溃坝的全过程的演化发展。

物理模型试验应满足几何相似、运动相似和动力相似条件。选用两河口大坝及其库区的磨古巨型危岩体进行缩尺设计，根据水利部提出的相关规范（SL 99-2012、SL 155-2012、SL/T 165-2019）（中华人民共和国水利部, 2012a; 2012b; 2019），确定试验的相似比(λ = 750)及几何尺寸（表 1）。土石坝材料颗粒级配根据 （郭万里等, 2016）提出的混合法进行缩尺设计（表 2），根据均匀性系数 (C_u=28.4) 和曲率系数 (C_c = 1.86) 保证颗粒分布不均匀且连续，级配良好。将滑坡块简化为刚性矩形块，以获得更好的实验结果，实验中使用的混凝土砌块的干密度为 2200 kg/m^3。并详细记录最大波幅、衰弱至坝前

高度、坡面爬高、过流量、溃口流量过程、溃口冲蚀发展过程等特征参数。

表 1 物理模型试验缩尺设计参数

Table 1 Design parameters for the scaled model test

对象	参数	原型	模型试验
滑体	体积 (m^3)	33000000	0.003
	滑体厚度 (m)	70-780	0.8
	距坝址距离 (m)	3000	1.2
坝体	坝高 (m)	295	0.4
	顶宽 (m)	20	0.03
	上游坡角 ($\tan\beta_1$)	0.667	0.667
	下游坡角 ($\tan\beta_2$)	0.5	0.667

1.2 灾害链生机理

本研究试验主要以水上滑坡的形式模拟，滑体在重力作用下沿斜坡做自由下落运动，由静止状态加速下滑并以恒定角度冲击水面后产生涌浪，涌浪传播通常表现出强烈的非线性特征，并以强非恒定流的形式向坝前演进，至坝前后沿着上游坝坡爬坡并冲蚀上游坝肩处砂石料，在短时间内的多次涌浪翻坝强冲击过程中，上下游坝肩处及坝顶土石料逐渐被冲蚀，下游坝面形成优势通道连通至坝顶形成初始溃口，此时坝顶溃口底部高程低于坝前平均水位，土石坝将发生溃决破坏。灾害链生过程主要可分为两个部分，一是库区滑坡涌浪生成、传播、反射、融合的波浪叠加过程，二是土石坝在涌浪强冲击作用下的侵蚀、溃决过程。

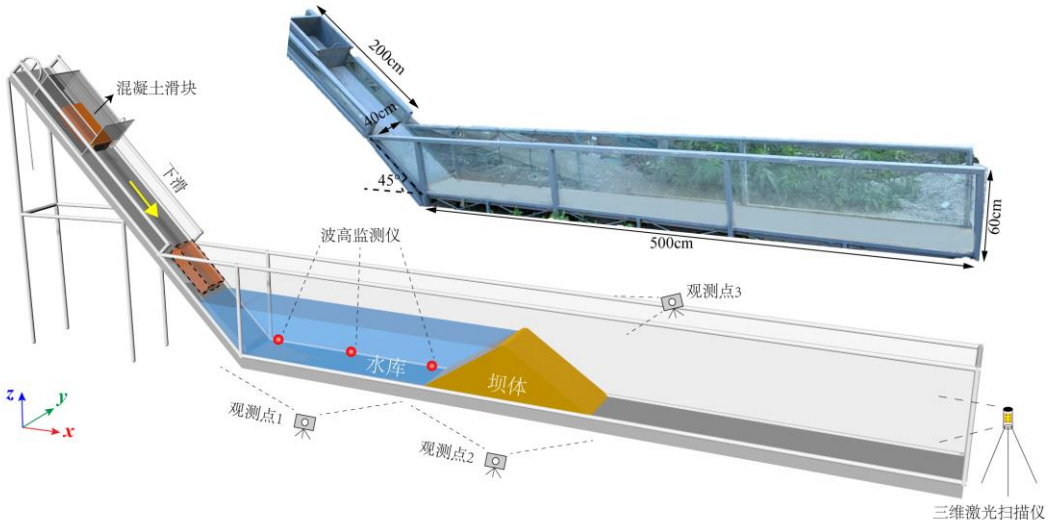

图 1 滑坡涌浪溃坝试验装置

Fig.1 Experimental setup of dam breaching under landslide generated wave

1.2.1 涌浪发展过程

假定滑槽与混凝土滑块之间摩擦系数恒定，则此时滑体在滑槽看作匀加速下滑，当滑块以高速冲击水面时，因自身重量突破了水面张力承受的极限，在水面凹陷出深坑，四周的水迅速聚拢填补凹陷，入水后激起巨大不规则“水舌”，同时矩形滑块挤占水体空间并产生水体推力形成涌浪（图 2a）。涌浪在水平方向运动时，由于水层以及边界存在粘滞力作用，涌浪在传播过程中能量会逐渐消散，对应波幅也在剧烈衰弱，表现出强烈的非线性特征（图 2b~c）。

在首浪传播过程中，次浪同时向坝址处传播演进，该波剖面通常以陡峭的非对称波峰以及波后平坦部分组成，难以保持稳定的流动状态，往往伴随着液面飞溅，传播过程中波幅略小于首浪（图 2d）。而首浪在部分水体漫过坝顶后，首浪剩余水体在自由重力作用下沿着冲蚀后的坝体进行下沉运动形成反推波，并与次浪进行撞击融合，融合后次浪的水体势能减少，对应爬坡作用削弱，漫顶水流减少((图 2e~f))。多次作用后库区涌浪逐渐杂乱，形成多次小型涌浪爬坡漫顶，值得注意的是本阶段的涌浪并不是逐渐减小，而是呈现成组式阶段性下降的趋势。在一段时间的涌浪间撞击融合后，若此时形成溃口且溃口低高小于坝前水位，此时库水沿着溃口逐渐冲蚀，溃口逐渐扩大，库区水位呈现波浪形下降；而若此时并未形成溃口，土石坝仍然保持稳定状态，库区水面逐渐趋向稳定。

图 2 库区滑坡涌浪传播状态

Fig.2 Propagation of landslide generated wave in the reservoir area

1.2.2 涌浪作用下土石坝溃决发展过程

涌浪溃坝溃口形成往往具有很大的不确定性，一般会出现一个或者多个溃口和优势冲蚀通道，在溃口形成前，涌浪冲刷整个下游坝面，整个下游坝面存在位移差，但此时由于过流量较小，冲刷强度较弱；而当形成溃决优势通道后，水流将优先冲刷优势通道，优势通道逐渐扩大并贯穿至坝顶溃口，部分优势通道首先形成溃口，此时漫顶水流对坝体进行持续强冲刷直至完全溃坝。从图 3 可发现，涌浪冲击作用下土石坝溃决主要分为三个阶段（图 4）：涌浪爬高漫顶阶段（I）、涌浪冲击侵蚀阶段（II）、常规漫顶侵蚀阶段（III）。

在涌浪爬高漫顶阶段（I），此时坝顶高程高于坝前水位，涌浪冲刷上下游坝肩及坝顶，主要集中于涌浪波谷以上，对于波谷以下坝体冲蚀效果不明显。坝体仍然保持一定的结构性，起着较大的挡水作用，此阶段呈现间歇性、脉冲式过流特征，单波涌浪过流量较少，对坝体冲蚀较慢，坝顶高程逐渐下降。一旦坝顶高程小于坝前平均水位时，此时坝前水位将漫过坝体，溃坝来到涌浪冲击侵蚀阶段（II），水流变为持续性漫顶，但其动力来源仍是库区残余涌浪的非恒定、强紊动冲击，呈现非常规土石坝漫顶溃决。单波过流量剧烈增加，对坝体冲蚀也更为剧烈，但对上游坝坡的冲刷基本停滞，沿着冲蚀后的上游坡溯源冲刷直至冲蚀起点，主要表现为下游坝体的持续性冲蚀，但这阶段仍然保持涌浪溃坝的特征，是涌浪特征与持续水流共同主导的快速冲蚀期。当库区残余涌浪能量充分耗散，水面趋于平静，溃坝来到常规漫顶侵蚀阶段（III），水流动力转为由坝前稳定水头驱动的恒定漫顶流，随着溃口的逐渐扩大，溃口流量急剧增加，水流加速对下游坝壳料进行溯源冲刷，涌浪的冲击特征完全消失，溃口流量达到峰值，溃决过程在形态和动力上与常规漫顶溃坝无异。

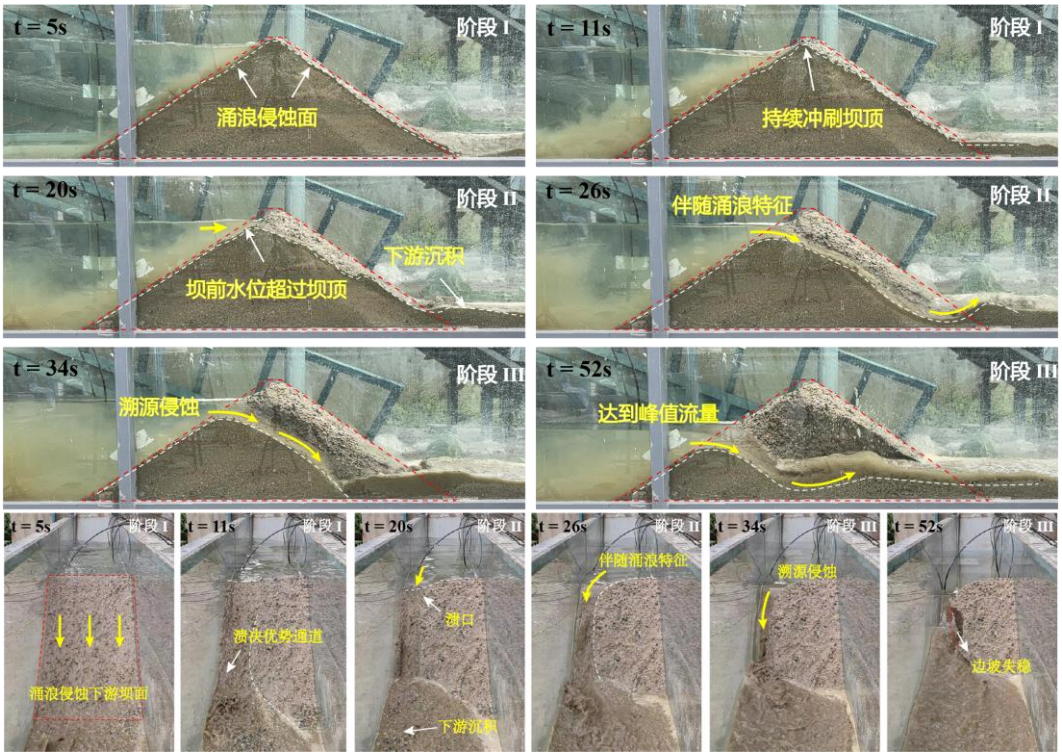

图 3 涌浪作用下土石坝溃决过程

Fig.3 Process of dam break induced by landslide generated wave

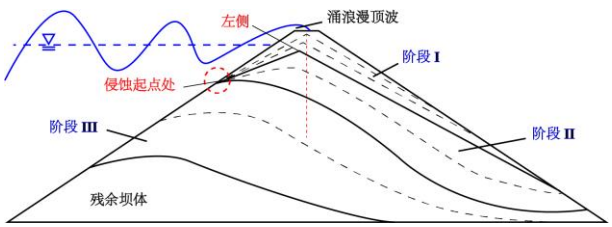

图 4 滑坡涌浪作用下土石坝溃决过程

Fig.4 Breaching mechanism of earth-rock dams under waves

2 近坝库岸滑坡涌浪溃坝数值模拟

数值模拟技术能够较好的模拟流固耦合下流体物理运动过程，可以节省大量人力、物力资源，脱离时间、空间与周期的约束，具有较强的可重复性，可作为补充现场调研及实验数据的重要工具（Sabeti and Heidarzadeh, 2022; Rauter et al., 2021）。本次研究旨在物理模型验证的基础上，开展数值试验补充样本数据，进一步探究灾害链生机理及多因素影响机制。

2.1 灾害链数值模拟

2.1.1 数值方法

研究采用基于有限体积法的 FLOW-3D 软件平台进行数值模拟，该算法将三维雷诺平均 Navier-Stokes（RANS）方程与流体体积法（VOF）结合来描述不可压缩流体的运动状态，使得模型可以较好地模拟自由表面流体运动（Pourshahbaz et al., 2022）。研究选择湍流重正化群模型（RNG *k-ε*）模拟滑坡激起涌浪传播及土石坝溃决水流的湍流特征。采用一般运动物体模型（GMO）来模拟滑块入水碰撞及流固耦合过程。通过悬移质和推移质输运方程来计算坝料的冲蚀和沉积过程。数值方法主要包含三个模块：水动力模型、滑体运动模型、坝料冲蚀模型，计算流程图如图 5 所示。

（1）水动力模块

本研究采用 RANS 方程模拟三维不可压缩流体的运动状态，同时引入流体体积与单位体积比值 V_F 来描述流体与坝料的自由流动界面，其连续性方程与动量方程可表示为：

$$\frac{\partial \rho_w}{\partial t}V_F + \frac{\partial}{\partial x}\rho_w u A_x + \frac{\partial}{\partial y}\rho_w v A_y + \frac{\partial}{\partial z}\rho_w w A_z = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{1}{V_F}\left(u_j A_j \frac{\partial u_i}{dx_j}\right) = -\frac{1}{\rho_w}\frac{\partial P}{\partial x_i} + g_i + f_i \quad (2)$$

式中：ρ_w 为水的密度；t 为时间；u, v, w 分别为 x, y, z 方向上的流速；A_x, A_y, A_z 分别为 x, y, z 方向上过流面积占比；u_i 为 i 坐标轴下的流速矢量；P 为压强；g_i 为 i 方向上的质量加速度；f_i 为 i 方向上的黏性加速度。

（2）滑体运动模块

滑坡入水过程是复杂的流固耦合问题，本次研究中在连续性方程和 VOF 输运方程中添加源项，以解释移动物体对流体位移的影响，对于不可压缩流体可表示为：

$$\nabla \cdot (\boldsymbol{uA}) = -\frac{\partial V_F}{\partial t} + \frac{S_m}{\rho} \quad (3)$$

式中：S_m 为流体的物理量源项。相比于静止障碍问题中的连续性方程，$\partial V_F/\partial t$ 可看作一个额外的源项。当使用控制体积法时，该源项仅存在于运动物体边界周围的网格单元内，可表示为：

$$\frac{\partial V_F}{\partial t} = -\frac{S_o}{V_c}u_o \cdot \boldsymbol{n} \quad (4)$$

式中：V_c 指网格单元体积；$S_o, u_o, \boldsymbol{n}$ 分别为网格单元内运动物体的表面积、速度、单位法向量。研究中将运动物体边界的切向速度引入动量方程中的剪切应力项，即在流体剪切应力项中考虑了运动物体切向应力不为零的情况。

（3）坝体侵蚀模块

土石坝溃决过程中，土石料随着水流运动而变动。在水流中土石料可分为推移质和悬移质，两者在不同水动力条件下可以互相转换，运动形式上主要可分为泥沙沉降运动、泥沙夹带运动和推移质输移运动。如何准确预测坝料冲刷过程对模拟溃决流量过程至关重要，坝料质量守恒定律可表示为：

$$\Phi\frac{\partial z}{\partial t} = \left(\frac{\partial q_{bx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{by}}{\partial y} + D - E\right) \quad (5)$$

式中：z 为底部高程；Φ 为最大堆积分数；q_{bx} 和 q_{by} 分别为 x, y 方向上单宽体积推移质输移率；D, E 分别为不同向下粒径沉降速率以及向上夹带速度的加权求和值。

在夹带运动中，可由下式确定土石料由推移质转移到悬移质的转变速率（Mastbergen and Van Den Berg, 2003）：

$$E = \alpha n_s d_*^{0.3}(\theta - \theta_{cr})^{1.5}\left[g\left(\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}\right)d_{50}\right]^{0.5} \quad (6)$$

式中：E 为向上夹带速率；α 为不同坝料的夹带系数；n_s 为溃口底床的法向矢量；d_*为无量纲粒径参数；θ 为无量纲希尔兹数；θ_{cr} 为修正临界希尔兹数；ρ_d 为坝料密度；g 为重力加速度；d_{50} 为坝料中值粒径。

在沉积运动中，悬移质的沉降速率可表示为有效沉降速率与悬移质浓度的乘积：

$$D = \frac{v_f}{d}[(10.36^2 + 1.049d_*^3)^{0.5} - 10.36]c \quad (7)$$

式中：D 为向下沉降速率；v_f 为流体的运动黏

度；c 为不同粒径悬移质浓度。

推移质冲蚀率对土石坝侵蚀过程及溃决流量过程都至关重要，Meyer-Perter 推移质公式具有较好的预测精度（梅胜尧等, 2023），因此用它来计算推移质冲蚀率（Meyer-Peter and Müller, 1948）：

$$q_b = K(\theta - \theta_{cr})^{1.5}\left[g\left(\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}\right)d^3\right]^{0.5} \quad (8)$$

式中：K 为推移质系数；d 为坝料粒径。对于不同坝料，悬移质浓度可用对流-扩散方程表示（Sammah et al., 2020）：

$$\frac{\partial C_s}{\partial t} + \nabla \cdot (u_s C_s) = \nabla \cdot \nabla(\xi C_s) \quad (9)$$

式中：C_s 为不同坝料的悬浮泥沙的质量浓度；ξ 指方向扩散系数；u_s 指悬移质流速。

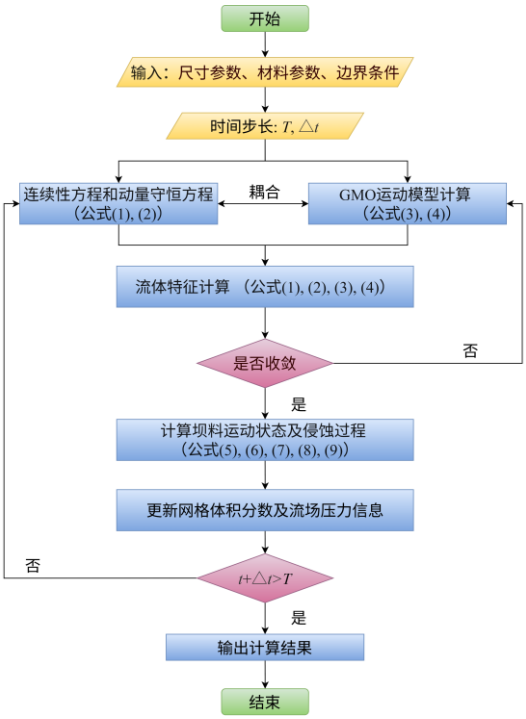

图 5 数值模拟计算流程图

Fig.5 Flowchart of numerical simulation calculation

2.1.2 数值模拟验证

根据水槽试验来设置数值模型几何结构和材料特性，包括滑体模型、土石坝模型、库区模型。在数值模型中，将预设好的土石坝模型置于水槽中，并设置物理试验相同的库水位，随后滑块将在自重作用下沿滑槽自由下滑。当坝体在滑坡涌浪作用下破坏稳定，上游水位不再发生变化视为试验结束。在滑块入水处、河道中间和坝前三个位置设置三个波高记录点，并设置流量采集断面。数值模拟中的材料特征参数根据物理模型确定。水槽试验和数值模拟中，滑块均采用混凝土刚性材质，干密度为 2200kg/m^3；筑坝材料性质设置为物理试验性质相同，包括级配组成、密度及休止角等（表 2）。

表 2 物理模型试验与数值模拟中材料特性

Table 2 Material properties in the physical experiment and numerical simulations.

对象	参数	物理试验	数值模拟	单位
滑体	密度	2200		kg/m^3
	表面摩擦系数	—	0.007	—
坝体	比重	2650		kg/m^3
	体积分数	64		%
	颗粒粒组	0–0.5; 0.5–1; 1–2; 2–4; 4–10		mm
	各粒组比例	15; 15; 15; 20; 35		%
	推移质系数	—	9; 8; 7; 6; 5	—
	夹带系数	—	0.02	—
	临界希尔兹数	0.035; 0.04; 0.045; 0.05; 0.055		—
	内摩擦角	30; 32; 35; 38; 42		

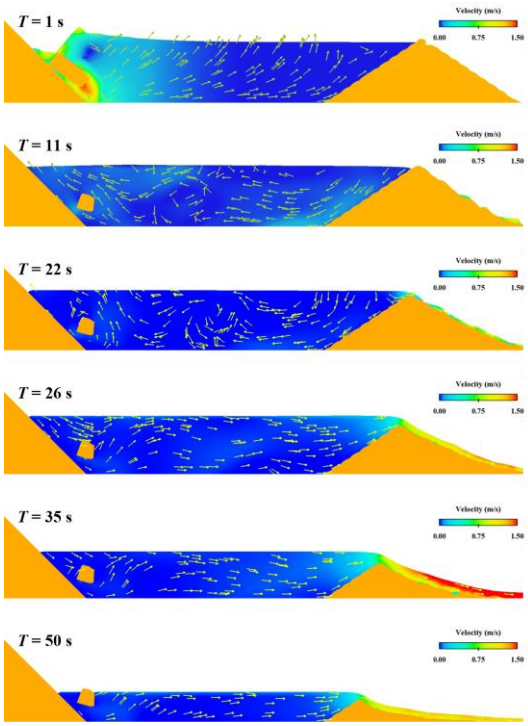

图 6 滑坡涌浪溃坝灾害链数值模拟过程

Fig.6 Variation diagram of surge propagation vector in the reservoir area

图 6 展示了滑坡涌浪溃坝灾害链演化过程，与水槽试验模拟发展过程相似，滑块高速滑入后迅速挤占水体空间产生水体推力形成涌浪，涌浪在传播过程中能量逐渐消散，波幅逐渐衰弱。相比于自然漫顶溃决，库区紊流特征明显，尤其在坝前爬坡时，在坝前形成有较大流速的破波水流，涌浪的冲击荷载直接作用于坝顶处，剧烈冲蚀上游坝面砂石料。

伴随着涌浪特征，溃口和漫顶水头的逐渐扩大，溃决流量呈现阶梯型增大特征。随着涌浪在库区逐渐融合消散，冲击特征消失，溃决过程类似常规漫顶。

图 7a)展示了坝前水位变化图，滑坡涌浪产生、演进及衰弱过程与实测结果趋势相似，在多次衰弱后将存在误差，但此时涌浪特征逐渐消失，对整体溃决过程影响较小。图 7b）对比了试验与模拟计算的流量过程，结果发现流量过程吻合度较高，峰值到达时间相近，峰值流量仅相差 4%。从上分析可以发现，模拟的水位数据、溃口流量、发展过程等物理过程特征与水槽试验结果吻合较好，表明滑坡涌浪引致土石坝溃决过程可以通过本研究方法进行数值模拟。

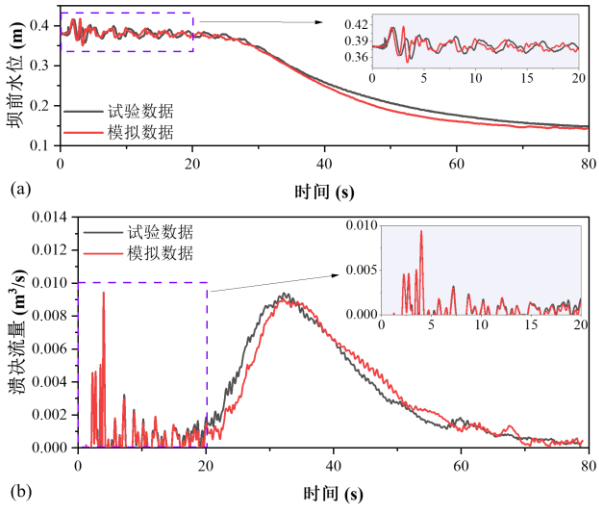

图 7 物理试验与数值模拟溃决流量及坝前水位数据对比

Fig.7 Comparison of breach flow and upstream water level between physical experiment and numerical simulation

2.2 多因素数值试验

库区滑坡灾害链的影响因素众多，本研究设计了多组不同影响参数的数值试验（表 3），主要考虑滑坡体体积（V_s）、滑坡高度（H_s）、坝顶宽度（W_d）、坝前坡角（β）、滑坡距坝址距离（D_s）等因素，系统性探讨多因素下滑坡涌浪对土石坝溃决过程的影响，图 8 展示了各影响因素下数值试验流量过程。

土石坝的几何形状对于溃决过程至关重要，因为它本质上起着抵抗水流侵蚀和冲击的作用。坝顶宽度对库区涌浪传播及衰弱过程及初始阶段的涌浪翻坝流量影响较小，主要体现在坝体快速溃决阶段。与顶宽不同的是，坝前坡角还影响涌浪爬坡抬升作用及库区融合过程，但都是通过增加纵轴线长度来抵抗水流侵蚀。从图 8a-b）可以发现，土石坝坝前坡角越小、坝顶宽度越大，坝体抵抗涌浪冲击能力越明显，洪峰流量到达时间越长，洪峰流量越小，洪水灾害程度越小。

从图 8c）可以发现，滑坡位置距坝址越远，涌浪传播至坝前需要的时间越久，首浪的翻坝流量基本相似，但后续翻坝流量随距离的增加而减小；由于模拟中距离的增加同样伴随着库容的增加，因此在溃坝过程上主要表现为库容越大，洪峰流量到达时间越短，洪峰流量越大。

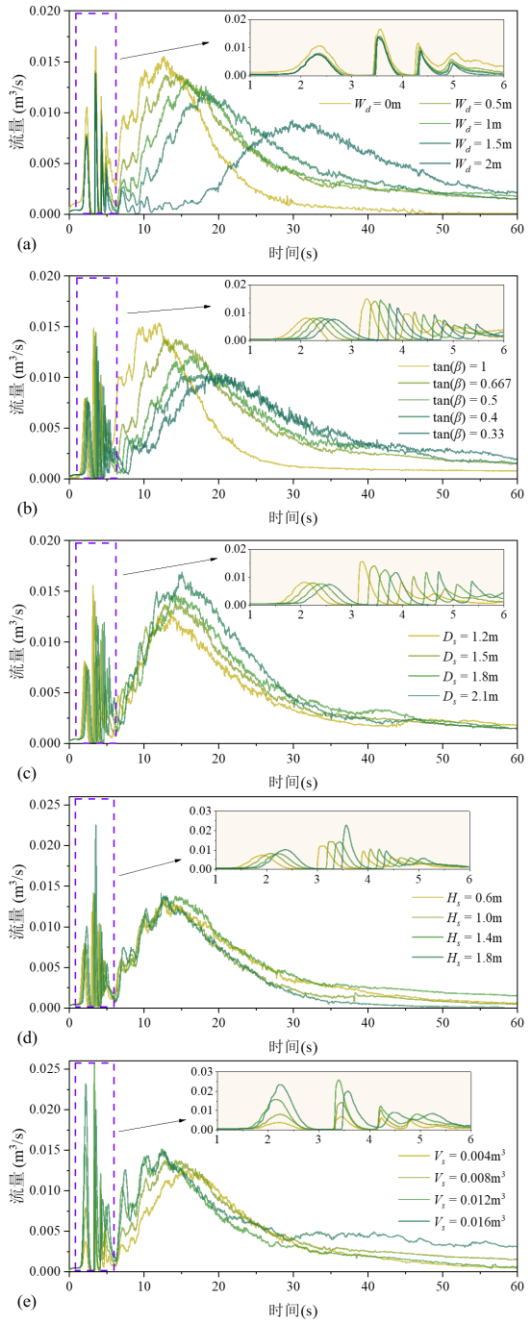

图 8 各影响因素下数值试验结果

Fig. 8 Discharge process of earth-rock dam breach under various influencing factors

从图 8 d-e）可以发现，不同滑坡条件将引起库区不同程度的涌浪过程，滑坡体积越大、滑坡高度越高，势能越大，滑动入水动能越大，库区涌浪发展过程更剧烈，从而提供更大的冲击能量，翻坝流量更大。随着能量的逐渐消散，滑坡条件对坝体溃

决过程的影响较小，但仍然呈现一定的规律性：滑坡动能越大，坝体冲蚀效果更明显，洪峰到达时间提前，洪峰流量小幅度增大。

表 3 数值试验工况设置

Table 3 Settings of numerical test conditions

试验	H_s (m)	V_s (m^3)	W_d (m)	D_s (m)	tan(β)
1	1.4	0.004	0.05	1.5	0.667
2		0.008			
3		0.012			
4		0.016			
5	0.6	0.004	0.05	1.5	0.667
6	1				
7	1.4				
8	1.8				
9	1.4	0.004	0	1.5	0.667
10			0.05		
11			0.1		
12			0.15		
13			0.2		
14	1.4	0.004	0.05	1.5	1
15					0.667
16					0.5
17					0.4
18					0.33
19	1.4	0.004	0.05	1.2	0.667
20				1.5	
21				1.8	
22				2.1	

3 滑坡涌浪溃坝灾害链特征分析

3.1 涌浪强冲蚀特征

涌浪演进至坝前在惯性力作用下冲击上游坝面，能量消散主要集中于以下方面：破波时波的反射、克服坝面摩阻力、水质点在土颗粒中的渗流运动、沿着坝面做爬坡运动、冲蚀坝面土颗粒并带动其做功。

一般而言常水位下涌浪破波点多集中于上游坝面，随着涌浪波谷传播至上游坝肩处，上游坝肩前出现水体镂空现象。首浪的下沉水体在坝前与次浪融合后，不同方向水体碰撞，导致动能的相互抵消，水体整体势能减小，波高削弱明显，但由于上游坝肩前出现水体镂空，后浪水体以射流状态冲击上坝面并形成波动水流（图 9a），上部为无边界空间，将在推力作用下沿着上游坝坡运动，整个坝面形成具有较大流速的破波水流，水流通过砂石料孔隙，波压由坝面往坝体内部传递，将剧烈冲蚀上游坝面及坝顶坝肩处砂石料（图 9b），直至漫顶翻坝。

在涌浪入射点处，上游坝面将受到垂直于坡面的波压力 P，但由于水流速度方向与坡面非正交，涌浪破碎后的扩散水流将对土颗粒产生沿着坡面的压力 T_1 和 T_2，同时水流高速冲入土颗粒间间隙将会对其产生向上的浮托力 F_b，并在自身重力 W 作用下在坝面附近水体浮动，此时土颗粒将被涌浪冲散（图 9c），这也是冲击型涌浪冲蚀上游坝面的主要原因。破波后形成的上爬水流同样冲蚀坝面土颗粒，此时坝面土颗粒主要受到水流的沿斜坡的拖拽力 F_d、垂直于坝面的支撑力 F_h、自身重力 W 及颗粒间摩阻力 f 共同作用（图 9d），水体在摩阻力及自重作用下，流速逐渐减小，对坝面冲击程度也逐渐削弱，直至漫顶翻坝。

通过物理试验与数值模拟发现，涌浪的强激励、多频次、非线性及非恒定特征，通过多种机制共同作用，显著加剧了坝体的冲蚀过程。源于滑坡体的巨大动能，涌浪在坝前爬升时具有极高的初始速度和能量。这种强激励转化为对上游坝面的巨大冲击荷载（图 9c），其强度远大于静水压力，它不仅能瞬间冲散并带走表层土颗粒，更能通过孔隙水压力快速传递，扰动坝体内部结构，为后续冲蚀创造优势通道。滑坡通常不是单一事件，会激起一系列连续的波次，这种多频次冲击导致坝体承受反复的加-卸载循环，前序波浪已浸湿坝料、降低其抗剪强度，后续波浪对已松动但未被冲走的土颗粒进行二次侵蚀，反复冲击削弱土颗粒间的咬合作用。涌浪波形陡峭、波峰短暂，导致作用于坝体的水流是高度非恒定的，瞬时水流速度极大，破波时射流对土颗粒的拖拽力远大于恒定流，且非恒定流伴随强烈的紊动和漩涡，其裹挟泥沙的能力更强，并能将冲蚀下来的颗粒快速输运至下游。

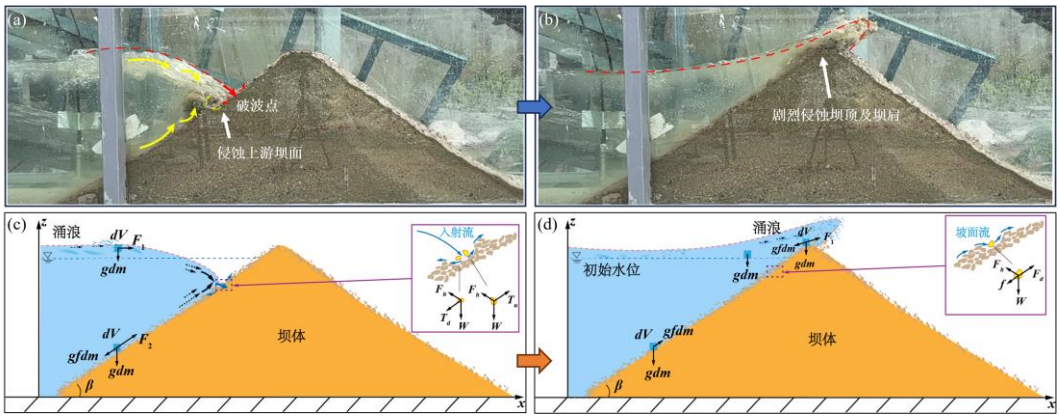

图 9 涌浪强冲击作用下侵蚀特征

Fig.9 Erosion characteristics under wave impact

3.2 溃坝洪水放大效应

溃坝洪水过程可为洪水演进及风险评估提供可靠依据，洪水过程的特征量主要包括洪峰、洪量、洪水历时、洪水过程线形状等，各特征量之间存在一定相关性（Guo et al., 2016），对于洪水应急而言，最重要的是溃决历时及洪峰流量（Qi et al., 2023）。滑坡涌浪引致的土石坝漫顶溃决过程与常规漫顶溃决过程具有较大的差异，为了进一步探究涌浪冲击与自然漫顶溃决之间的区别，在库区尺寸、库容、坝体尺寸、坝体材料相同条件下开展了常规漫顶溃坝数值试验，仅将滑坡涌浪条件改为缓慢入流条件，入流条件为 0.001m^3/s。由于自然漫顶工况存在持续入流，导致其总泄流量略大于初始库容，为了避免缓入流带来的水量差异，保证与涌浪溃坝工况（无持续入流）在同等边界条件下进行对比，以漫顶时刻库区总水量 V_w 作为约束，对参考流量过程 Q_t 进行比例修正，自然漫顶下溃坝流量过程由下式确定：

$$Q_t{}^* = Q_t \cdot \frac{V_w}{\sum_{t=1}^{n} Q_t} \tag{10}$$

式中：Q_t 指 1 L/s 洪水作用下漫顶流量过程（m^3/s）；V_w 指漫顶时库区总水量（m^3）。

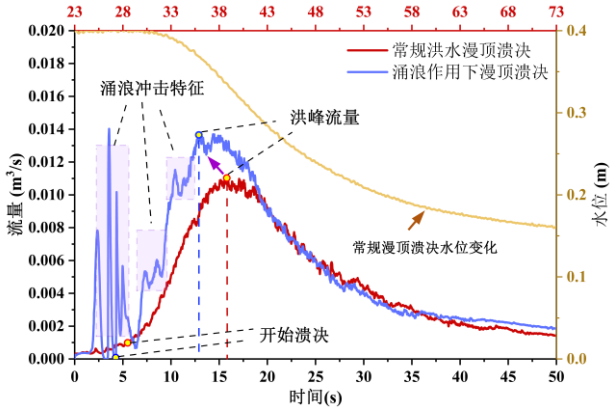

图 10 滑坡涌浪作用下与常规漫顶溃坝流量过程对比

Fig.10 Comparison of breach flow process between landslide generated wave and conventional overtopping failure

图 10 展示了试验 1 及其自然漫顶溃决流量过程线（以漫顶时刻作为初始时间点），在溃坝情景下，涌浪作用下溃坝过程伴随着剧烈的涌浪冲击特征，库区流速变化更大，坝体侵蚀更加迅速，溃决过程更剧烈，这也导致了与自然漫顶溃决相比洪峰流量更大，到达洪峰流量时间更短，风险更大。研究提到的涌浪致溃坝洪水放大效应的结论建立在最终发生溃决的特定情景之上或已触发溃决的事件链中，对于抗冲能力较强或采取了有效防护措施的坝体，短历时涌浪冲击亦可能仅导致短时漫顶而不发生溃决，其风险表征（如最大过水量、漫顶历时、局部冲蚀深度与范围）与应急处置判据需另行评估。

4 结论

近坝库岸滑坡涌浪溃坝灾害链生机理复杂、突发性强且影响机制多样，极易对下游人民生命财产安全造成严重威胁。通过物理模型试验与数值模拟相结合的方法，系统研究了近坝库岸滑坡涌浪致灾机理及土石坝溃决过程，主要包括：（1）开展滑坡涌浪溃坝一体化物理模型试验，涌浪发展具有强非线性和多波叠加特征，前后浪的碰撞融合显著影响涌浪爬高与坝前水流形态；土石坝在涌浪作用下的溃决过程可分为三个阶段：涌浪爬高漫顶阶段、涌浪冲击侵蚀阶段和常规漫顶侵蚀阶段；（2）根据水槽试验参数进行数值模拟，数值模型能较好地复现物理试验中的水流运动与坝体溃决过程，水位与流量数据吻合良好，峰值流量误差仅 4%，表明所建立的耦合模型具有较高的可靠性；在此基础上开展多组数值试验，多因素分析表明，滑坡体积与滑落高度增大、坝顶宽度减小、坝前坡角变陡、滑坡距离坝址越近，均会导致溃决洪峰流量增大、溃决时间提前，灾害风险显著升高；（3）系统分析了近坝库岸涌浪灾害链特征，针对已触发溃决的灾害链情景下，与常规漫顶相比，在涌浪强冲击作用下溃坝具

有洪峰更大、溃决更快、风险更高的特点，而对于“漫而不溃”的情况，风险评估与管控指标应另行界定。研究构建的物理-数值联合模拟方法可为近坝库岸滑坡-涌浪-溃坝灾害链的风险评估与工程防控提供科学依据。

本研究开展的小尺度模型试验存在尺度效应，难以完全复现灾害链物理过程，摩擦和阻力的影响可能会导致能量损失的差异；此外，水槽实验存在一定的边界效应，库区形状采用简化U型截面通道，水与刚性边界相互作用时，流动特性会受到影响，导致其动能的耗散和溢流的侵蚀特性可能会发生变化。涌浪冲击是短历时荷载，而常规漫顶是持续性荷载，本次研究探讨的溃坝流量仅考虑在发生溃决的情景下，但实际上在涌浪短历时荷载冲击下很可能发生漫而不溃，其溢流水量危险性是远没有常规漫顶溃决严重的，仍然需要进一步考虑强荷载作用下土石坝稳定性判别方法。在未来需要进一步考虑更真实的库区、坝体、滑体特征开展大尺度试验，并在数值模拟上提升计算效率与扩大计算规模上深入研究。

Reference

Chen, S., Xu, W., Shi, A., et al., 2023. Review of Hazard Chain of Landslide Surge for High Dams and Large Reservoirs. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 43(03): 83-93(in Chinese with English abstract).

Du, Z.H., Chen, X., Pan, H.Y., et al., 2025. Research Advances on Landslide-Induced Surge and Dam-Break Cascading Disasters near Dams. *China Water Resources*, 2025(3)(in Chinese with English abstract).

Du, Z.H., Zhou, J.W., Zhang, S.C., et al., 2025. Experimental Analysis on Breaching Mechanism of Earth-Rock Dam Induced by Landslide Generated Waves. *Engineering Geology*, 346: 107913. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2025.107913

Evers, F.M., Heller, V., Fuchs, H., Hager, W.H., Boes, R., 2019. Landslide-Generated Impulse Waves in Reservoirs: Basics and Computation (2nd edition) [R]. VAW-Mitteilung, 254.

Ghirotti, M., Stead, D., 2013. Vaiont Landslide, Italy[M]. Netherlands: Springer.

Guo, S.L., Liu, Z.J., Xiong, L.H., 2016. Advances and Assessment on Design Flood Estimation Methods. *Journal of Hydraulic Engineering*, 47(3): 302–314(in Chinese with English abstract).

Guo, W.L., Zhu, J.G., Wen, Y.F., 2016. Unified Description for Four Grading Scale Methods for Coarse Aggregate. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 38(8): 1473–1480(in Chinese with English abstract).

Heller, V., Ruffini, G., 2023. A Critical Review about Generic Subaerial Landslide-Tsunami Experiments and Options for a Needed Step Change. *Earth-Science Reviews*, 242: 104459. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104459.

Hu, Y.X., Li, H.B., Li, C.J., et al., 2022. Quantitative Evaluation in Classification and Amplitude of Near-Field Landslide Generated Waves Induced by Granular Debris. *Ocean Engineering*, 261: 112142. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112142.

Huang, B.L., Yin, Y.P., Li, B., et al., 2025. Research Progress and Challenges of Landslide-Induced Impulse Wave Prevention and Control Engineering Measures. *Journal of Engineering Geology*, 33(1): 159-170(in Chinese with English abstract).

Mastbergen, D.R., Van Den Berg, J.H., 2003. Breaching in fine sands and the generation of sustained turbidity currents in submarine canyons. *Sedimentology*, 50(4): 625–637. https://doi.org/10.1046/j.1365-3091.2003.00554.x

Mei, S.Y., Zhong, Q.M., Chen, S.S., et al., 2023. Numerical simulation of breach hydrograph and morphology evolution during landslide dam breaching. *Earth Science*, 48(4): 1634–1648(in Chinese with English abstract).

Peng, M., Jiang, Q.L., Zhang, Q.Z., et al., 2019. Stability analysis of landslide dams under surge action based on large-scale flume experiments. *Engineering Geology*, 259: 105191. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105191

Peng, M., Ma, C.M., Chen, H.X., et al., 2021. Experimental study on breaching mechanisms of landslide dams composed of different materials under surge waves. *Engineering Geology*, 291: 106242. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106242

Peng, M., Wang, Y., Ma, C.Y., et al., 2023. Review of risk assessment and prevention for valley landslide disaster chains. *Earth Science*, 1-36[2025-08-18](in Chinese with English abstract).

Peng, M., Zhao, Q.X., Li, S., et al., 2025. Two-phase SPH simulation of granular landslide-tsunamis processes considering dynamic seepage. *Earth Science*, 1-13[2025-10-28] (in Chinese with English abstract).

Pourshahbaz, H., Abbasi, S., Pandey, M., et al., 2022. Morphology and Hydrodynamics Numerical Simulation around Groynes. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 28: 53–61. https://doi.org/ 10.1080/09715010.2020.1830000

PRC Ministry of Water Resources, 2012a. Regulations for River Model Test (SL 99–2012). China Water and Power Press,

Beijing, China(in Chinese).

PRC Ministry of Water Resources, 2012b. Test Regulation for Normal Hydraulic Model (SL 155–2012). China Water and Power Press, Beijing, China(in Chinese).

PRC Ministry of Water Resources, 2019. Regulation for Simulation of Landslide Generated Waves (SL/T 165–2019). China Water and Power Press, Beijing, China(in Chinese).

Qi, B., Du, Z.H., Zhang, S.C., 2023. Study on the Construction of Early Warning System for Reservoir Flood Discharge in China. *Advances in Transdisciplinary Engineering*, 43: 783–790. https://doi.org/10.3233/atde230797

Rauter, M., Hoße, L., Mulligan, R.P., et al., 2021. Numerical Simulation of Impulse Wave Generation by Idealized Landslide with OpenFOAM. *Coastal Engineering*, 165: 103815. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2020.103815

Sabeti, R., Heidarzadeh, M., 2022. Numerical Simulations of Water Waves Generated by Subaerial Granular and Solid-Block Landslides: Validation, Comparison, and Predictive Equations. *Ocean Engineering*, 266(3): 112853. https://doi.org/ 10.1016/j.oceaneng.2022.112853

Samma, H., Khosrojerdi, A., Rostam-Abadi, M., et al., 2020. Numerical Simulation of Scour and Flow Field over Movable Bed Induced by a Submerged Wall Jet. *Journal of Hydroinformatics*, 22(2): 385–401. https://doi.org/ 10.2166/hydro.2020.091

Sattar, A., Cook, K.L., Rai, S.K., et al., 2025. The Sikkim Flood of October 2023: Drivers, Causes, and Impacts of a Multihazard Cascade. *Science*, 387: eads2659. https://doi.org/ 10.1126/science.ads2659

Semenza, E., Ghirotti, M., 2000. History of the 1963 Vaiont Slide: the Importance of Geological Factors. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 59(2): 87–97. https://doi.org/ 10.1007/s100640000067

Singh, A., Anand, V., Durga Rao, et al., 2024. Unveiling the Catastrophic Landslide-Induced Flash Flood in Teesta River, Sikkim: Insight from South Lhonak Glacial Lake. *Landslides*, 22: 837–855. https://doi.org/ 10.1007/s10346-024-02378-7

Su, Z.Y., Kang, X., Ding, X.C., et al., 2026. SPH–DEM modeling of rainfall-induced slope failure in partially saturated soil–rock mixture. *Computers and Geotechnics*, 189: 107635. https://doi.org/ 10.1016/j.compgeo.2025.107635

Su, Z.Y., Wang, S., Li, D.Q., et al., 2024. SPH–DEM modeling overtopping failure of earthfill dams. *Acta Geotechnica*, 19(2): 953-970. https://doi.org/ 10.1007/s11440-024-02258-3

Tang, L., Hu, C., Lin, L., et al., 2009. The Tsaoling landslide triggered by the chi-chi earthquake, taiwan: Insights from a discrete element simulation. *Engineering Geology*, 106 (1–2), 1–19. https://doi.org/ 10.1016/j.enggeo.2009.02.011

Vacondio, R., Mignosa, P., Pagani, S., 2013. 3D SPH numerical simulation of the wave generated by the Vajont rockslide. *Advances in Water Resources*, 59, 146–156. https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2013.06.009

Wang, W., Chen, G.Q., Zhang, Y.B., et al., 2017. Dynamic simulation of landslide dam behavior considering kinematic characteristics using a coupled DDA-SPH method. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 80, 172–183. https://doi.org/ 10.1016/j.enganabound.2017.02.016

Zhong, Q. M., Wang, L., Chen, S. S., et al., 2021. Breaches of Embankment and Landslide Dams-State of the Art Review. *Earth-Science Reviews*, 216: 103597. https://doi.org/ 10.1016/j.earscirev.2021.103597

附中文参考文献

陈世壮, 徐卫亚, 石安池, 等, 2023. 高坝大库滑坡涌浪灾害链研究综述 . 水利水电科技进展, 43(03): 83-93.

杜镇瀚, 陈祥, 潘洪月, 等, 2025. 近坝库岸滑坡涌浪-溃坝链生灾害研究进展 . 中国水利, (03): 50-57.

郭生练, 刘章君, 熊立华, 2016. 设计洪水计算方法研究进展与评价 . 水利学报, 47(03): 302-314.

郭万里, 朱俊高, 温彦锋, 2016. 对粗粒料 4 种级配缩尺方法的统一解释 . 岩土工程学报, 38(08): 1473-1480.

黄波林, 殷跃平, 李仁江, 等, 2025. 滑坡涌浪综合防控工程措施研究进展与挑战 . 工程地质学报, 33(01): 159-170.

梅胜尧, 钟启明, 陈生水, 单熠博, 2023. 堰塞体溃决流量与溃口形态演化数值模拟 . 地球科学, 48(4): 1634-1648.

彭铭, 王悦, 马晨议, 等, 2025. 河谷滑坡灾害链风险评估及防控研究进展 . 地球科学, 1-36[2025-08-18].

彭铭, 赵庆新, 李爽, 等, 2025. 考虑动态渗流的散粒体滑坡-涌浪过程两相 SPH 模拟 . 地球科学, 1-13[2025-10-28].

中华人民共和国水利部, 2012. 河工模型试验规程（SL 99-2012） . 中国水利水电出版社.

中华人民共和国水利部, 2012. 水工（常规）模型试验规程（SL 155-2012） . 中国水利水电出版社.

中华人民共和国水利部, 2019. 滑坡涌浪模拟技术规程（SL/T 165－2019） . 中国水利水电出版社.

作者贡献

杜镇瀚：论文撰写与修改，方法构建，资料收集；

钟启明：审阅与编辑，监督指导；

周家文：监督指导，资金支持；
侯文昂：审阅与编辑；
张士辰：监督指导，审阅与编辑，资金支持。