

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20210726001

堰塞坝溃决机理与溃决过程模拟技术研究综述*

刘嘉欣¹, 钟启明^{2,3}, 陈亮¹, 单熠博²

(1. 河海大学土木与交通学院, 江苏南京 210098; 2. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏南京 210024;
3. 水利部水库大坝安全重点实验室, 江苏南京 210029)

摘要: 堰塞坝是自然作用的产物, 在世界范围内广泛分布, 具有坝体形态不规则、结构和材料组成复杂且高度非均匀等特点, 在上游来流冲刷、渗流潜蚀等外荷载作用下极易发生溃决, 对下游人民生命财产安全造成极大的威胁。为了对堰塞坝开展风险评估和应急处置, 学者们围绕堰塞坝溃决机理与溃决过程模拟技术开展了大量的研究工作。通过梳理国内外的研究进展, 基于物理模型试验总结了堰塞坝溃决过程的不同阶段, 分析了坝体形态、颗粒组成、上游来流量、涌浪等因素对溃决过程的影响; 从参数模型、基于溃决机理的简化和精细化数学模型等3个方面综述了堰塞坝溃决过程数值模拟技术的研究进展, 并介绍了国际上常用的溃坝模拟商业软件; 探讨了目前在试验设计、数据收集和软件开发方面存在的问题, 建议了未来研究的方向和重点。总体来说, 对于堰塞坝溃决机理与溃决过程的模拟还处于起步阶段, 目前的物理模型试验和数值分析技术均存在较多简化或假设, 未来应充分考虑堰塞坝材料的宽级配和随机特性, 以及坝体结构的分层特征。

关键词: 堰塞坝; 溃决机理; 溃决过程; 物理模型; 数值模拟

中图分类号: TV122.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)03-0638-15

Review on the Simulation Technologies of Breach Mechanism and Breaching Process of Landslide Dam

LIU Jiixin¹, ZHONG Qiming^{2,3}, CHEN Liang¹, SHAN Yibo²

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Department of Geotechnical Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China;
3. Key Laboratory of Safety of Reservoir Dams, Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China)

Abstract: Landslide dams are the product of natural action, which are widely distributed around the world. Due to the irregular shape, complex structure, and high non-uniform material composition, landslide dams are highly prone to fail under the action of erosion by upstream inflow and seepage flow, and other external loads, which pose great threats to the safety of people's life and property in the downstream area. In order to conduct risk assessments and emergency treatments of landslide

* 收稿日期: 2021-07-26; 修回日期: 2021-10-08

基金项目: 长江水科学研究联合基金重点支持项目(U2040221)、中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(Y320005)资助

作者简介: 刘嘉欣(1997—), 女, 硕士研究生。主要从事堰塞坝溃决机理与数值模拟方面的研究。

E-mail: LiuJiixin0214@163.com

通讯作者: 钟启明(1981—), 男, 正高级工程师, 博导, 博士。主要从事土石(堰塞)坝风险评估理论与防控方法的研究。

E-mail: qmzhong@nhri.cn

dams, scholars have carried out numerous research works on the simulation technologies of breach mechanisms and breaching processes of landslide dams. By combing the research progress around the world and based on the physical model tests, the different stages of the landslide dam breach process are summarized. Furthermore, the effects of dam shape, material composition, upstream inflow, surge, and other factors on the dam breach process are analyzed. Simultaneously, the research progresses of numerical simulation technologies of landslide dam breach processes are reviewed, which include three aspects, such as parametric models, physically-based simplified and detailed models; in addition, this paper briefly introduces the commercial software for dam breach simulation. The existing problems in the design, data collection, and software development of the model test are discussed. The directions and emphases for future research are also suggested. In general, the simulation of the breach mechanism and process of the landslide dam is still in the initial stage. There are many simplifications or assumptions in the current physical model tests and numerical analysis techniques; in the future, the wide gradation and random characteristics of dam material, as well as the layered characteristics of landslide dam structure should be fully considered.

Keywords: landslide dam; breach mechanism; breach process; physical model test; numerical simulation

引 言

堰塞坝是指在一定条件下,由于地震、降水、火山喷发引起的山崩、滑坡、泥石流、熔岩等阻塞山谷、河道所形成的堆积体^[1]。堰塞坝在世界范围内广泛分布,有文献记载的有1700余处。依据成因的不同,通常可将堰塞坝分为熔岩堰塞坝、崩塌堰塞坝、滑坡堰塞坝、泥石流堰塞坝和冰碛堰塞坝5类^[2];其中,约90%的堰塞坝由地震和降水形成^[3],且崩塌和滑坡形成的堰塞坝占绝大多数^[4]。堰塞坝的寿命从几分钟到几千年不等^[5],D. Y. Shen等^[3]通过对352座有寿命统计数据的堰塞坝进行分析发现,29.8%的堰塞坝在形成后1天内发生溃决,68.2%的堰塞坝在形成后1个月内发生溃决,84.4%在形成后1年内溃决。另外,学者们通过统计发现^[1,6-7],漫顶、渗透破坏和边坡失稳是堰塞坝的3种主要破坏模式,其中漫顶溃决的案例占比超过90%,渗透破坏溃决的案例占比约5%。

堰塞坝的溃决可能会带来巨大灾难。2008年5月12日,汶川发生8.0级地震形成257座堰塞坝,其中唐家山堰塞坝体积最大,对下游北川、绵阳等地居民的生命财产安全造成威胁^[8](图1);2018年

10~11月,四川省与西藏自治区交界的白格村同一位置连续发生两次滑坡,完全堵塞金沙江,溃决后淹没多条交通线路,造成交通中断,云南省丽江、大理等4个州市11个县(市、区)5.4万人受灾,直接经济损失达74.3亿元^[9](图2)。

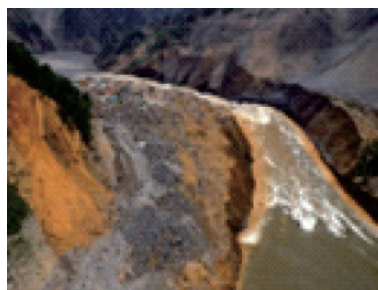


图1 唐家山堰塞坝溃决过程

Fig.1 Tangjiashan landslide dam and breach process



图2 白格第二次堰塞坝及溃决过程

Fig.2 The second Baige landslide dam and breach process

堰塞坝与人工土石坝相比在几何特征、坝体结构、颗粒组成等方面均有不同^[5,10]；堰塞坝大多存在于山谷之间，坝体形状不规则，沿河流运动方向大多较人工土石坝长，坡度较缓，且坝顶凹凸不平；堰塞坝由各向异性的岩石和土壤材料组成，压实性不足，力学性质存在差异，坝体颗粒级配较土石坝更加宽泛；由于没有泄流通道，堰塞坝大多在不断上涨水位的作用下发生漫顶溃决。

由于堰塞坝的寿命往往十分短暂，溃决后对下游群众的生命财产带来极大威胁，堰塞坝的风险评估受到极大重视，其中溃决机理与溃决过程的模拟技术尤为重要^[7]。本文以崩塌和滑坡这两种最普遍成因导致的堰塞坝为研究对象，对现有的堰塞坝溃决机理试验技术和数值模拟方法的研究现状进行总结论述，并提出未来的发展方向，为后续研究提供一定的参考或借鉴。

1 堰塞坝溃决机理与溃决过程影响因素分析

溃坝研究可追溯到19世纪中期的法国，早期的研究主要针对瞬时溃坝洪水的模拟分析^[11]。20世纪90年代以来，各国的研究重点转到了坝体溃决机理和溃决过程的研究上，但主要针对的是人工填筑的土石坝，比较有代表性的是欧盟的IMPACT(Investigation of ExtreMe Flood Processes And UncertainTy)项目(最大坝高6.0 m)^[12]、美国农业部(最大坝高2.3 m)^[13]和南京水利科学研究院(最大坝高9.7 m)^[14]开展的大尺度土石坝溃坝模型试验，深入研究了坝体几何形状、筑坝材料特性、溃决模式等因素对溃口流量过程和溃口形态演化规律的影响。

堰塞坝的溃决涉及复杂的水土耦合作用。由于堰塞坝通常位于交通不便的高山峡谷中，溃决时间短、流量大，原型资料搜集难度较大，且具有不确定性。为更好地揭示堰塞坝的溃决机理，国内外学者开展了大量的物理模型试验，探究堰塞坝的溃决过程，以及不同的影响因素对堰塞坝溃口演化规律和流量过程的影响。

1.1 堰塞坝溃决过程模型试验

针对堰塞坝开展的大尺度溃决模型试验尚不多见，常见的堰塞坝溃决机理与溃决过程物理模型试验主要包括水槽模型试验和离心模型试验^[7]。虽然土石坝的研究成果对堰塞坝溃决问题的研究有一定借鉴意义，但堰塞坝结构复杂、颗粒分布不均匀等特征不容忽视^[2]。堰塞坝的溃决是在非恒定流作用下的非线性坝料冲蚀过程，国内外研究人员试图通过模型试验将溃决过程划分为不同的阶段。Y. Yang等^[15]开展了考虑渗流影响的堰塞坝漫顶溃决水槽模型试验，但仅考虑了颗粒组成较为均匀的堰塞坝，通过模型试验将堰塞坝的溃决过程划分为5个阶段：渗透冲蚀→初始溃口形成→溯源冲刷→溃口纵、横向展宽→河道重新平衡。赵天龙等^[16]基于南京水利科学研究院自主研发的溃坝离心模型试验系统^[17-18]，通过调节离心加速度，利用离心机的“时空放大效应”，开展了堰塞坝漫顶溃决离心模型试验，通过试验将堰塞坝的溃决过程划分为5个阶段：下游坡冲蚀→冲槽下切→冲槽侧壁淘刷→溃口失稳坍塌→下游坝坡粗化。G. G. D. Zhou等^[19]基于水槽模型试验，开展了漫顶水流作用下堰塞坝纵断面溃口演化规律的研究，并将堰塞坝漫顶溃决过程划分为3个阶段：“陡坎”冲蚀→冲蚀加速→冲蚀衰减。Q. M. Zhong等^[20]基于“11·03”白格堰塞湖实际泄流案例，将堰塞坝的溃决过程划分为4个阶段：均匀冲蚀→溯源冲蚀→沿程冲蚀→溃口稳定。X. H. Zhu等^[21]通过水槽模型试验研究了漫顶水流作用下堰塞坝纵断面形态的演化过程，提出可将堰塞坝的溃决过程分为4个阶段：初始时期→“陡坎”冲蚀→加速冲蚀→河床再平衡。

虽然不同的模型试验将堰塞坝的溃决过程分为了不同的阶段，但整体来说，各模型试验都发现了堰塞坝的溃决存在着初始阶段、加速阶段和稳定阶段，也揭示了“陡坎”或溯源冲蚀的机理，并且当溯源冲蚀发展到堰塞坝下游坡顶部后均发现了加速冲蚀的现象^[19,21]。

1.2 堰塞坝溃决过程影响因素分析

近年来，国内外学者围绕堰塞坝形态、坝料物

理力学指标、河道水动力条件、初始溃口形态等影响因素开展试验,通过对溃口演化规律和溃口流量过程进行分析,获取了很多关于堰塞坝溃决机理的有益认识(表1)。

表1 堰塞坝溃决影响因素分析

Table 1 Analysis of influence factors of landslide dam breach

序号	影响因素	作者	试验组数	试验结论
1	坝坡 坡比	张婧等 ^[22]	11	坡度越大,溃口峰值流量越大,峰值流量出现时间越滞后,溃口下切、展宽速率越快
		C. Gregoretti 等 ^[23]	168	下游坡角 $\leq 7^\circ$ 时,漫顶破坏以表层冲刷为主;下游坡角在 $7^\circ \sim 25^\circ$ 时,漫顶破坏以溯源冲刷为主
		X. G. Jiang 和 Y. W. Wei ^[24]	5	坡度越大,溃口峰值流量越大,峰值流量出现时间越提前,溃口下切速率越大,残余坝高越少
		X. H. Zhu 等 ^[21]	2	下游坡角减小,溯源冲刷的速率降低
2	坝高	J. S. Walder 等 ^[25]	13	溃口峰值流量随初始坝高的增大而呈线性增加
		X. H. Zhu 等 ^[21]	3	坝高越大,溃口峰值流量越大,峰值流量出现的时间越提前
3	颗粒 级配	张婧等 ^[22]	11	不均匀系数越大,溃口峰值流量越小,峰值流量出现时间越滞后,溃口下切、展宽速率越慢
		王道正等 ^[26]	3	平均粒径越大,溃决历时越长,溃口峰值流量越小,溃口峰值流量出现时间越滞后,溃口宽深比越小,溃口均为倒梯形
		X. H. Zhu 等 ^[27]	11	依据不同粒度含量可划分坝体类型,分别决定了破坏时的模式和特征
4	初始 含水率	刘杰等 ^[28]	5	初始含水率增加,溃口峰值流量先增后减,溃口峰值流量出现时间提前,溃口平均展宽率先增后减,最终溃口宽度加宽;“陡坎”上移速率加快
		蒋先刚和吴 雷 ^[29]	7	初始含水率越大,溃口峰值流量增大,溃口峰值流量出现时间越提前,溃口宽深比先增后减,残余坝高降低
5	密实度	S. C. Chen 等 ^[30]	64	松散材料的溃口峰值流量更大,溃口形态变化呈阶段性发展
		赵高文等 ^[31]	5	密实度越大,溃口峰值流量越小,溃口峰值流量出现时间越滞后;密实状态的溃口失稳模式为重力崩塌,属于土的受拉破坏;松散状态的溃口边坡失稳为剪切破坏
6	河道 坡比	X. G. Jiang 和 Y. W. Wei ^[24]	5	河道坡度越大,溃口峰值流量越大,溃口峰值流量出现时间越提前,溃口宽深比先增后减,残余坝高降低
		X. H. Zhu 等 ^[21]	7	水槽梯度和下游相对水槽坡度相加决定坝顶破坏阶段和破坏过程;河道坡度越大,溃口峰值流量越小,溃口峰值流量出现时间越提前
		刘晓邦等 ^[32]	7	随沟床坡度的增加溃口峰值流量逐渐减小,峰值流量到达时间先提前后推迟
7	上游 来流量	Z. X. Cao 等 ^[33]	28	入流量增大加快堰塞坝的溃决进程
		杨阳和曹叔 尤 ^[34]	7	入库流量越大,洪峰越早越“尖瘦”,溃口展宽速率越大
		蒋先刚等 ^[35]	6	来流量的加大提高侵蚀率曲线斜率,使侵蚀率曲线向瘦高型发展
		G. G. D. Zhou 等 ^[19]	4	入流量越大,溃口峰值流量越大

续表

序号	影响因素	作者	试验组数	试验结论
8	初始溃口形态	赵万玉等 ^[36]	3	泄流效率由高(溃口流量增长率高或溃口洪水到达时间短)到低依次为:倒三角断面、复式(上部为倒梯形,梯形底部接倒三角形)断面、倒梯形断面
		T. L. Zhao等 ^[37]	3	复式断面在初期泄流效率高、峰值流量较小,残留堰塞坝高度较小,下泄库容较大,且溃口流量过程线呈“矮胖型”
9	涌浪	M. Peng 和 Q. L. Jiang ^[38]	6	堰塞坝稳定性由 ΔH (有效水位与有效坝高之差)决定, $\Delta H < 0$ 时,坝体稳定; $\Delta H > 0$ 时,坝体破坏;破坏起始段侵蚀速度比无涌浪时快
		M. Peng 和 C. Y. Ma ^[39]	9	总侵蚀量和破坏时间随平均粒径增加而减少;随涌浪波高的增加,峰值流量和平均侵蚀率增加

由表1可以看出,堰塞坝溃决影响因素主要包括堰塞坝形态(坝高、坡比)、颗粒组成、初始含水率、密实度、上游来流量、河道坡比、初始溃口形态和涌浪等。总的来说,堰塞坝下游坡度越大,溃口峰值流量越大,且下游坡比会影响堰塞坝的破坏形式,但其影响并非简单的线性关系,而是存在一定界限值,目前对界限值的探究还不够深入;堰塞坝高度越大,上游堰塞湖的库容随之增大,水动力条件增强,溃口的峰值流量将会增大,峰值流量到达时间是否会提前取决于前期的溃口扩展速率;当堰塞坝材料级配良好时,坝体形态更加稳定,溃口峰值流量相对较小,抵达峰值流量的时间相对滞后,溃决历时相对较长,溃口流量过程线较为平缓;坝体的初始含水率越高,溃口峰值流量越大,峰值流量出现时间越提前,冲蚀速率越快,但现有的研究存在一定的争议,且缺少高含水率条件下的研究;堰塞坝坝体材料越密实,抗冲蚀能力越强,溃口峰值流量越小,峰值流量出现的时间也相对滞后,且对边坡失稳形式有一定的影响;河道坡比的增加有利于冲蚀加剧,因此峰值流量增大,峰值流量出现时间提前,但现有研究因试验入流量条件和渗流作用的影响而存在一定的争议;当堰塞坝上游来流量增大时,会加剧溃决进程,提高冲蚀速率,使溃口峰值流量增大,流量过程线更加趋于“尖瘦”型;初始溃口形态的设置主要是在应急泄流时考虑的问题,在相同开挖量的条件下,复式泄流槽的处置方式可以有效地增加泄流量,并使得溃口流量过程相对平缓;与自然漫顶条件相比,涌浪的冲击会加快堰塞坝破坏进程,峰值流量会随浪高的增高而增大,加快侵蚀速率。

溃坝模拟试验需满足几何、重力、坝体材料和水动力条件等相似条件^[40]。上述模型试验大多无法满足重力相似(除了离心模型试验),几何相似受

试验仪器限制,无法完整等比例缩尺,坝体材料通常以实际案例为参考,进行等比例缩小或等量替换,目前颗粒粒径较大的宽级配堰塞坝溃决试验开展较少。受到比尺效应的影响^[41],试验结果与实际情况相比会存在一定误差,在后续的研究中还需开展野外大尺度堰塞坝溃决试验,并在相似理论的研究上有所突破。

2 堰塞坝溃决过程数值模拟技术

数值模拟是用来分析溃坝过程的常用手段,目前常见的土石坝溃坝过程数学模型分为3类^[42]:参数模型、基于溃决机理的简化数学模型和基于溃决机理的精细化数学模型。参数模型大多基于溃坝数据采用回归分析或机器学习的方法,建立经验公式对溃决参数(如溃口峰值流量、溃口最终尺寸和溃坝历时)进行预测。基于溃决机理的简化数学模型一般假设溃口形状(倒三角形、矩形、倒梯形),分别采用堰流或孔流公式模拟溃口流量过程,采用冲蚀公式模拟坝料的冲蚀,有些模型还可考虑溃口边坡的稳定性,与参数模型不同,简化数学模型可模拟溃口的发展过程和溃口流量过程。为了描述溃坝过程中的水土耦合作用,出现了一些基于浅水假设、以非平衡坝料输移理论为基础的精细化溃坝数学模型。随着计算机技术的发展,也出现应用HEC-RAS、FLOW-3D、FLUENT等商业软件对数学模型进行求解,用来对坝体溃决全过程进行模拟反演。

目前,溃坝数学模型大多针对土石坝,专门用于模拟堰塞坝溃决的数学模型较少。M. Peng 和 L. M. Zhang^[5]通过对比发现,若直接将人工土石坝预测模型应用于堰塞坝,将会低估溃决时间,高估溃口尺寸和峰值流量,因此,需开发堰塞坝溃决专属

预测模型。近年来由于地震、极端暴雨等事件频发,堰塞坝灾害日趋引起广泛关注,关于堰塞坝溃决过程数值模拟技术的研究也日渐深入。

2.1 参数模型

1985年,J. E. Costa^[43]基于10例堰塞坝溃决案例,首次采用回归方法提出了3个预测溃口峰值流量的计算公式,在这些表达式中,溃口峰值流量通

过堰塞坝高度、堰塞湖体积或两个参数的组合进行预测。随后 S. G. Evans^[44]、J. E. Costa 和 R. L. Schuster^[1]、J. S. Walder 和 J. E. O'Connor^[45]又陆续提出了预测堰塞坝溃口峰值流量的计算公式。进入21世纪后,随着堰塞坝溃决案例信息的统计资料日趋详尽,参数模型考虑的因素也逐渐增多,并逐渐由单参数转变为多参数,计算结果也更加准确。国内外常见的堰塞坝溃决参数模型见表2。

表2 堰塞坝溃决参数模型

Table 2 Parametric models of landslide dam breaching

序号	作者	案例数	表达式
1	J. E. Costa ^[43]	10	$Q_p = 6.3H_d^{1.59}$ $Q_p = 672V_1'^{0.56}$ $Q_p = 181(H_dV_1')^{0.43}$
2	S. G. Evans ^[44]	29	$Q_p = 0.72V_1'^{0.53}$
3	J. E. Costa 和 R. L. Schuster ^[1]	12	$Q_p = 0.0158(PE)^{0.41}$
4	J. S. Walder 和 J. E. O'Connor ^[45]	18	$Q_p = 1.6V_0^{0.46}$ $Q_p = 6.7d_d^{1.73}$ $Q_p = 0.99(d_d \cdot V_0)^{0.40}$
45			<p>精细化方程: $\frac{Q_p}{g^{\frac{1}{2}}H_d^{\frac{5}{2}}} = \left(\frac{H_d}{H_r}\right)^{-1.417} \left(\frac{H_d}{W_d}\right)^{-0.265} \left(\frac{V_d^{\frac{1}{3}}}{H_d}\right)^{-0.471} \left(\frac{V_1^{\frac{1}{3}}}{H_d}\right)^{1.569} e^{a_1}$</p> <p>简化方程: $\frac{Q_p}{g^{\frac{1}{2}}H_d^{\frac{5}{2}}} = \left(\frac{H_d}{H_r}\right)^{-1.371} \left(\frac{V_1^{\frac{1}{3}}}{H_d}\right)^{1.536} e^{a_2}$</p>
13			<p>精细化方程: $\frac{B_f}{H_r} = \left(\frac{H_d}{H_r}\right)^{0.752} \left(\frac{H_d}{W_d}\right)^{0.315} \left(\frac{V_d^{\frac{1}{3}}}{H_d}\right)^{-0.243} \left(\frac{V_1^{\frac{1}{3}}}{H_d}\right)^{0.682} e^{a_3}$</p> <p>简化方程: $\frac{B_f}{H_r} = \left(\frac{H_d}{H_r}\right)^{0.911} \left(\frac{V_1^{\frac{1}{3}}}{H_d}\right)^{0.271} e^{a_4}$</p>
5	M. Peng 和 L. M. Zhang ^[5]		<p>精细化方程: $\frac{b_f}{H_r} = 0.004\left(\frac{H_d}{H_r}\right) + 0.050\left(\frac{H_d}{W_d}\right) - 0.044\left(\frac{V_d^{\frac{1}{3}}}{H_d}\right) +$</p> <p>10 $0.088\left(\frac{V_1^{\frac{1}{3}}}{H_d}\right) + a_5$</p> <p>简化方程: $\frac{b_f}{H_r} = 0.003\left(\frac{H_d}{H_r}\right) + 0.070\left(\frac{V_1^{\frac{1}{3}}}{H_d}\right) + a_6$</p>
21			<p>精细化方程: $\frac{D_f}{H_r} = \left(\frac{H_d}{H_r}\right)^{0.882} \left(\frac{H_d}{W_d}\right)^{-0.041} \left(\frac{V_d^{\frac{1}{3}}}{H_d}\right)^{-0.099} \left(\frac{V_1^{\frac{1}{3}}}{H_d}\right)^{0.139} e^{a_7}$</p> <p>简化方程: $\frac{D_f}{H_r} = \left(\frac{H_d}{H_r}\right)^{0.923} \left(\frac{V_1^{\frac{1}{3}}}{H_d}\right)^{0.118} e^{a_8}$</p>

续表

序号	作者	案例数	表达式
		14	精细化方程: $\frac{T_f}{T_r} = \left(\frac{H_d}{H_r}\right)^{0.262} \left(\frac{H_d}{W_d}\right)^{-0.024} \left(\frac{V_1}{H_d}\right)^{-0.103} \left(\frac{V_1}{H_d}\right)^{0.705} e^{\alpha_3}$ 简化方程: $\frac{T_f}{T_r} = \left(\frac{H_d}{H_r}\right)^{0.293} \left(\frac{V_1}{H_d}\right)^{0.723} e^{\alpha_{10}}$
6	刘建康等 ^[46]	31	$B_{ave} = 0.367 \left(\frac{V_1}{V_r}\right)^{0.195} \left(\frac{L_d}{\tan \varphi}\right)^{0.337} H_d^{0.5}$ $H_{res} = 1.109 \left(\frac{V_r}{V_1}\right)^{0.065} d_{90}^{0.088} H_d^{0.912}$
		24	全参数模型: $Q_p = 3.130 H_d^{0.120} W_d^{0.302} V_d^{-0.106} V_1^{0.453} e^{\alpha_1}$
		26	三参数模型: $Q_p = 3.130 H_d^{-0.046} V_1^{0.507} e^{\alpha_2}$
		23	全参数模型: $D_f = H_d^{0.840} W_d^{-0.169} V_d^{0.089} V_1^{0.040} e^{\alpha_3}$
		26	三参数模型: $D_f = H_d^{0.875} V_1^{0.016} e^{\alpha_4}$
		11	全参数模型: $B_f = 1.593 H_d + 85.249 \frac{H_d}{W_d} - 3.438 \frac{V_d^{\frac{1}{3}}}{H_d} +$
7	石振明等 ^[47]	11	$15.963 \frac{V_1^{\frac{1}{3}}}{H_d} + \alpha_5$
		11	三参数模型: $B_f = H_d^{0.594} V_1^{0.182} e^{\alpha_6}$
		15	全参数模型: $b_f = -0.006 H_d^2 - 0.047 \frac{H_d^2}{W_d} + 0.017 V_d^{\frac{1}{3}} + 0.047 V_1^{\frac{1}{3}} +$
		16	$\alpha_7 H_d$
		16	三参数模型: $b_f = -0.007 H_d^2 + 0.053 V_1^{\frac{1}{3}} + \alpha_8 H_d$
		12	全参数模型: $T_f = H_d^{0.275} W_d^{-1.224} V_d^{0.439} V_1^{0.232} e^{\alpha_9}$
		12	三参数模型: $T_f = H_d^{-0.425} V_1^{0.236} e^{\alpha_{10}}$

注: Q_p 为溃口峰值流量 (m^3/s); V_d 为堰塞坝体积 (m^3); V_r 为堰塞坝鞍部单宽体积 (m^3); V_1 为堰塞湖体积 (m^3); V_1' 为堰塞湖体积 ($\times 10^6 m^3$); H_d 为堰塞坝高度 (m); W_d 为堰塞坝宽度 (m); L_d 为堰塞坝长度 (m); H_r 为单位高度, 取 1 (m); T_r 为单位时间, 取 1 (h); g 为重力加速度 (m/s^2); φ 为堰塞坝的内摩擦角 ($^\circ$); d_{90} 为小于某粒径的质量分数为 90% 所对应的颗粒粒径 (m); PE 为堰塞湖势能 (J); d_d 为堰塞湖水下降高度 (m); V_0 为堰塞湖下泄水量 (m^3); B_f 为溃口最终顶宽 (m); b_f 为溃口最终底宽 (m); D_f 为溃口最终深度 (m); B_{ave} 为溃口最终平均宽度 (m); H_{res} 为堰塞坝溃决后的残留坝高 (m); T_f 为堰塞坝溃决历时 (h); M. Peng 和 L. M. Zhang 模型中 α 取值参考文献[5], 石振明等模型中 α 取值参考文献[47]

通过表 2 可以看出, 早期的参数模型案例数少, 且仅能计算峰值流量, 评价方式过于单一。随着数据收集手段的精进, 后续堰塞坝参数收集更加详细精准, 逐渐由单参数转为多参数模型, 评价方式更加多元, 准确率也得到提升。总体来说, 在输入参数较为齐全的条件下, M. Peng 和 L. M. Zhang 模型^[5], 石振明等模型^[47]的模型预测精度较高。在应急抢险时, 由于现场条件限制, 可根据能够获取的参数选择相应的模型进行预测。

大量的研究表明, 颗粒组成对堰塞坝的溃决过程有重要影响^[48], 早期的参数模型无法考虑坝料的物质组成, 可考虑的模型一般直接选用坝料的冲蚀率。但堰塞坝的堆积形态和颗粒分布规律各异, 目

前对宽级配材料的冲蚀特征认识也相当有限, 因此参数模型大多采用简化的方法确定冲蚀率, 未来可通过统计学的方法建立坝料物质组成与冲蚀特性的关系确定堰塞坝溃决参数。

参数模型能简单快捷地获得诸如溃口峰值流量、溃口最终顶宽、溃口最终底宽、溃口最终深度、溃口残留坝高和溃决历时等重要溃决参数, 不失为一种高效的评估方法。但其建立依赖原型数据的收集, 数据勘测的准确性将直接影响参数模型, 对勘查技术也有很大的挑战。并且大多数模型无法考虑或简化处理堰塞坝材料的抗冲蚀指标, 无法提供堰塞坝的溃口流量过程和溃口尺寸演化过程, 不能充分考虑堰塞坝的溃决机理和溃决过程。

2.2 基于溃决机理的简化数学模型

国内外学者常用描述土石坝溃决过程的简化数学模型来模拟堰塞坝的溃决过程(如美国国家气象局的NWS BREACH模型^[49]),考虑到土石坝与堰塞坝之间的差异,若采用土石坝的模型可能会带来较大的误差^[5-6]。与土石坝相比,堰塞坝一般分层现象明显,坝体材料的冲蚀特性与颗粒组成有关,且最终溃口深度一般小于堰塞坝鞍部的高度,因此堰塞坝的溃决模型更强调考虑宽级

配材料的冲蚀特性,以及确定残留坝高。2008年汶川地震以后,国内学者更加重视堰塞坝溃决过程的模拟,提出了一系列针对堰塞坝的简化数学模型。比较典型的堰塞坝溃决过程简化数学模型有香港科技大学的DABA(DAm Breach Analysis)模型、中国水利水电科学研究院DB-IWHR(Dam Breach-China Institute of Water Resources and Hydropower Research)模型和南京水利科学研究院DB-NHRI(Dam Breach-Nanjing Hydraulic Research Institute)模型(表3)。

表3 堰塞坝溃决过程简化数学模型
Table 3 Simplified mathematical models of landslide dam breaching

序号	模型	溃口形态		溃口流量	冲蚀公式	力学机制
		横断面	纵断面			
1	DABA ^[50-54]	倒梯形	坡角先增加,后保持不变	宽顶堰公式	基于剪应力的冲蚀公式	考虑坝料冲蚀特性随深度的变化;考虑溃口边坡侧向坍塌
2	DB-IWHR ^[55-58]	倒梯形或曲边倒梯形	坡角保持不变	宽顶堰公式	双曲线型冲蚀公式	预设残留坝高,考虑溃口边坡侧向坍塌
3	DB-NHRI ^[7,59-62]	倒梯形或矩形	坡角逐渐减小	宽顶堰公式	基于剪应力的冲蚀公式	考虑堰塞坝分层特征,可预设残留坝高或基于坝料冲蚀特性确定冲蚀深度;考虑溃口边坡侧向坍塌

基于溃决机理的简化数学模型相较于参数模型能更好地考虑堰塞坝的溃决机理,且计算效率高,可以在较短时间内获得计算时间段内的溃决参数,通过数值模拟能计算得到堰塞坝溃决全过程的溃口演化过程和溃口洪水流量曲线。近年来,各模型已较好地应用于易贡、唐家山、小岗剑等典型堰塞坝溃决洪水的反演分析,并成功应用于白格堰塞坝溃决洪水的预测,溃口峰值流量和溃口宽度等特征参数的计算值与实测结果基本吻合,为堰塞坝应急处置提供了重要科技支撑。

值得注意的是,虽然简化模型可较好地描述堰塞坝的溃决过程,但模型在溃口形状、坝料颗粒特征、溃口流量、溃口边坡稳定性等方面引入了大量人为假定。模型大多选取平均粒径作为坝料的代表性粒径,采用冲蚀公式计算坝料冲蚀率,然后基于假定的溃口形状折算出溃口断面尺寸的增量,且每个时间步长分别计算溃口流量和溃口冲蚀率,因此无法真正考虑堰塞坝的宽级配特征和溃决过程中的水土耦合作用,未能充分反映出堰塞坝的溃决机理。

2.3 基于溃决机理的精细化数学模型

近年来,随着计算流体力学和泥沙科学的发

展,以水动力学和非平衡输沙理论为基础,基于浅水假设和静水压力分布,产生了一系列一维、二维和三维溃坝过程数学模型,此类模型可称为基于溃决机理的精细化数学模型。该类模型主要基于清水或浑水(水土混合物)连续性方程、动量守恒方程、耦合溃口底床变化方程、溃口边坡稳定性判别方程,可更精细地模拟土石坝的溃决过程。依据溃坝模型中所选的输沙模型的种类,可将溃坝模型分为4类^[63]:平衡输沙模型、非平衡输沙模型、两相流模型和两层流模型。

平衡输沙模型主要是一维或二维浅水方程与Exner方程结合的数学模型。这类模型采用清水浅水方程描述水流运动,采用Exner方程描述溃口底床的变化过程。Exner方程假设坝料运动速度远小于水流速度,冲蚀过程以推移质为主,并采用包含水流特征参数的经验公式直接评估推移质冲蚀率。

非平衡输沙模型中假定水流为浑水,采用含浑水密度的浅水方程描述水流运动过程。假定冲蚀过程包含推移质运动和悬移质运动两部分,推移质与悬移质交互过程由经验公式确定。将实际冲蚀率折算成浑水的体积浓度,通过浑水流量与体积浓

度计算冲蚀过程。

两相流模型假定固相颗粒在液相自由水流中移动,固相颗粒的体积浓度较低,在液相水流驱动下发生移动,固液两相之间作用较弱。固液两相分别基于连续介质假设建立模型,采用连续性方程和动量守恒方程描述其运动过程,其中固相表现出类似颗粒流的特性。

两层流模型将溃口底床上方的水流假定为两层,分别为上方的清水层和中间的推移质水流层。

每一层都有各自的深度和浓度,清水层与推移质水流层之间存在清水交换,而推移质水流层与溃口底床之间存在土体交换,交换量由经验公式确定。对清水层和含沙水流层分别建立连续性方程与动量守恒方程得到两层流模型。

值得一提的是,目前此类模型大多采用平均粒径代表坝体的粒径,适用于颗粒较为均匀的无黏性土材料坝溃决过程的模拟,国内外部分基于溃决机理的精细化数学模型见表4。

表4 无黏性土坝溃决精细化数学模型

Table 4 Detailed mathematical models of noncohesive dam breaching

序号	模型类型	作者	溃口形态	溃口水流	坝料冲蚀	力学机制	模拟方法
1	平衡输沙模型	R. Faeh ^[64]	二维 Exner 方程	浅水方程	推移质与悬移质公式	溃口侧向坍塌	有限体积法
		C. Swartenbroekx 等 ^[65]	二维 Exner 方程	浅水方程	推移质公式	溃口侧向坍塌	有限体积法
		C. Juez 等 ^[66-67]	一、二维 Exner 方程	圣维南方程与浅水方程	10种不同的冲蚀公式	溃口无侧向坍塌	有限体积法
		K. E. K. Abderrezak 等 ^[68]	二维 Exner 方程	浅水方程	推移质公式	溃口侧向坍塌	有限体积法
		S. Dazzi 等 ^[69]	二维 Exner 方程	浅水方程	推移质公式	溃口侧向坍塌	有限体积法
2	非平衡输沙模型	W. M. Wu 和 S. S. Wang ^[70]	一维非平衡全沙输移方程	广义浅水方程	全沙输移公式	溃口无侧向坍塌	有限体积法
		Z. X. Cao 等 ^[71]	二维非平衡全沙输移方程	广义浅水方程	推移质公式	溃口侧向坍塌	有限体积法
		W. M. Wu 等 ^[72]	二维非平衡全沙输移方程	广义浅水方程	全沙输移公式	溃口侧向坍塌	有限体积法
		M. Guan 等 ^[73]	二维非平衡输沙方程(推移质)	浅水方程(清水)	推移质公式	溃口侧向坍塌	有限体积法
		R. Marsooli 和 W. M. Wu ^[74]	三维非平衡输沙方程	N-S 方程	推移质与悬移质公式	溃口无侧向坍塌	有限体积法与流体体积法
3	两相流模型	G. Rosatti 和 L. Begnudelli ^[75]	二维质量守恒和动量守恒方程(固相)	浅水方程(液相)	水流浓度公式	溃口无侧向坍塌	有限体积法
		S. L. Razavitoosi 等 ^[76]	N-S 方程(固相非牛顿流体)	N-S 方程(液相,非牛顿流体)	—	溃口无侧向坍塌	光滑粒子流法
		C. D. Cristo 等 ^[77]	二维质量守恒和动量守恒方程(固相)	浅水方程(液相)	推移质公式	底床崩塌算法	有限体积法
4	两层流模型	C. Swartenbroekx 等 ^[78]	二维质量守恒和动量守恒方程(推移质)	浅水方程(清水)	冲蚀率公式	溃口无侧向坍塌	有限体积法
		J. Li 等 ^[79]	二维非平衡输沙方程(悬移质)	浅水方程	挟砂率和沉积率经验公式	溃口无侧向坍塌	有限体积法
		F. N. Cantero-Chinchilla 等 ^[80]	一维非平衡输沙方程	圣维南方程	推移质与悬移质公式	溃口无侧向坍塌	有限体积法

上述各种模型在各自理论假设基础上都能模拟溃坝过程中水流流动过程与地形快速变化过程。与简化数学模型相比,精细化数学模型在溃口流量处理上多选用浅水方程,但由于溃坝过程的复杂性,溃决模型在实际应用中还存在一定的困难,其中关键问题之一是选取合适的冲蚀模型,该问题依赖于泥沙理论的发展。其中,平衡输沙模型浅水方程假设溃坝水流总是清水,忽略了挟沙过程对水流动量的影响,不是真正意义的水土耦合模型。非平衡输沙模型计算过程有耦合计算方式,也有非耦合计算方式。

精细化模型能有效地提升数值模拟的精度,但现有模型在应对大尺度溃坝模拟时仍存在计算效率偏低的问题。随着计算机处理能力的加强,部分模型引入GPU加速技术^[81-82]改善溃坝水流计算效率。总的来说,精细化模型能充分考虑溃坝过程中的水土耦合,并可模拟复杂边界条件,是日后堰塞坝溃决过程数值模拟的发展方向。

2.4 代表性商业软件

随着计算机技术和计算方法的迅猛发展,不少流体力学软件被运用于溃坝过程的数值模拟,其中具有代表性的软件有:HEC-RAS、FLOW-3D、FLUENT等。

HEC-RAS软件是由美国陆军工兵团水文工程中研发用来解决水利工程问题的应用软件。该软件可用来模拟漫顶和管涌两种溃坝形式,溃决过程采用D. L. Fread提出的NWS BREACH模型^[49];溃坝洪水下游演进基于连续性方程和动量方程,采用四点隐式有限差分格式对非线性方程进行离散求解,最终可获得溃坝流量过程和溃口变化型态等细节,具有兼容性高、界面友好的优点^[6]。

FLOW-3D常用来进行溃坝模拟。它以连续性方程和不可压缩粘性流体运动的N-S方程为控制方程,采用基于结构化矩形网格的有限差分法和有限体积法进行求解。其特有的FAVOR网格技术极大简化了模型网格的工作量,提高了网格建立的精度和效率。采用VOF方法^[83]追踪自由表面,具有模拟复杂地形,精确处理干湿边界和急缓流交替水流运动的能力。其软件自带的RNGk-ε模型能精细模拟低强度紊流,能较好地模拟溃坝水流复杂流态。

FLUENT也是目前CFD仿真业内功能最全面

的程序之一,基于C语言编写,灵活性和功能性都能满足需求。其控制方程由连续性方程和动量方程组成,用有限体积法离散控制方程,网格可以是结构网格也可以是非结构网格。与FLOW-3D相比^[84],FLUENT采用非结构化网格所得壁面区域计算结果更为合理。

HEC-RAS软件大多应用于溃坝洪水演进,溃决过程模拟模块采用简化中溃决过程模型,无法考虑水土耦合的坝料输移过程;FLOW-3D软件中的坝料冲蚀为平衡输沙模型,水流是清水浅水方程,也不是真正意义的水土耦合模型;FLUENT软件对于流体运动有较好的模拟,但对于水土耦合的冲蚀过程也缺乏合理的模拟手段。

2.5 不同数值模拟技术对比

溃口流量和冲蚀公式是堰塞体溃决过程模拟的关键,为了比较不同的溃口流量计算公式和冲蚀公式的差别,选择宽顶堰公式和浅水方程进行对比分析,并选择几个典型模型的冲蚀公式,如基于水流剪应力的冲蚀率公式(DABA和DB-NHRI模型)、双曲线型冲蚀率公式(DB-IWHR模型)、推移质公式^[65]、全沙输移公式^[72]对比分析。

基于溃决机理的简化数学模型,在计算溃口流量时通常选用宽顶堰流量公式:

$$Q_b = k_{sm}(c_1 b H^{1.5} + c_2 m H^{2.5}) \quad (1)$$

式中, b 为溃口底宽; $H = z_s - z_b$,为溃口处水深, z_s 为库水位, z_b 为溃口底部高程; m 为溃口边坡系数; c_1 和 c_2 为修正系数, $c_1 = 1.7 \text{ m}^{0.5}/\text{s}$, $c_2 = 1.1 \text{ m}^{0.5}/\text{s}$; k_{sm} 为尾水淹没修正系数。

基于溃决机理的精细化数学模型,在计算溃口流量时通常使用据有守恒形式的平面二维浅水方程:

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial f}{\partial x} + \frac{\partial g}{\partial y} = S \quad (2)$$

式中, t 为时间; x 和 y 分别为水平横向坐标和纵向坐标; q 为守恒变量, $q = \begin{bmatrix} \eta \\ hu \\ hv \end{bmatrix}$; f 和 g 分别为 x 方向和 y

方向的通量, $f = \begin{bmatrix} hu \\ huu + \frac{1}{2}gh^2 \\ huv \end{bmatrix}$, $g = \begin{bmatrix} hv \\ hvu \\ hv^2 + \frac{1}{2}gh^2 \end{bmatrix}$;

$$S \text{ 为源项, } S = \begin{bmatrix} 0 \\ -gh \frac{\partial z_b}{\partial x} - S_{fx} \\ -gh \frac{\partial z_b}{\partial y} - S_{fy} \end{bmatrix}; u \text{ 和 } v \text{ 分别为 } x \text{ 方向}$$

和 y 方向的流速; g 为重力加速度; h 为水深; η 为水位; z_b 为底床高程; $\partial z_b / \partial x$ 和 $\partial z_b / \partial y$ 为底床的坡度; S_{fx} 和 S_{fy} 为底床摩擦项。

典型简化和精细化模型中常用的冲蚀公式见表 5。

表 5 典型简化和精细化模型常用冲蚀公式

Table 5 Commonly used erosion formulas in typical simplified and detailed models

冲蚀公式名称	表达式	代表模型
基于水流剪应力原理的冲蚀速率公式	$\frac{d\epsilon}{dt} = k_d(\tau_b - \tau_c)$	DABA、DB-NHRI
双曲线型冲蚀率公式	$\dot{z} = \frac{\Delta z}{\Delta t} = \phi(\tau) = \frac{\tau_v}{a + b\tau_v}$	DB-IWHR
推移质公式	$q_s = \beta \sqrt{g(s-1)d_{50}^3(\tau_* - \tau_{*c})^{3/2}}$	C. Swartenbroekx 等 ^[65]
全沙输移公式	$\frac{\partial(hC_t)}{\partial t} + \frac{\partial(huC_t)}{\partial x} + \frac{\partial(hvC_t)}{\partial y} = -\frac{1}{L}(UhC_t - m_b q_s)$	W. M. Wu 等 ^[72]

注: $d\epsilon/dt$ 为冲蚀速率; k_d 为冲蚀系数; τ_b 为水流切应力; τ_c 为坝料临界剪应力; \dot{z} 为冲蚀率; τ 为剪应力; $\phi(\tau)$ 为冲蚀率和剪应力关系函数; τ_v 为水流剪应力与临界剪应力之差; q_s 为泥沙运输速率; s 为沉积物与水密度比; d_{50} 为平均粒径; τ_* 为河床剪应力, τ_{*c} 为其临界值; q_s 为总负荷泥沙输送能力; $U = (u^2 + v^2)^{0.5}$; C_t 为总负荷沉积物的体积浓度; L 为非平衡适应长度; m_b 为底床曲面坡度系数

通过对比可以看出,简化模型一般假设溃口的形状及其发展规律,宽顶堰公式用于模拟规则断面的流体运动;浅水方程包含连续性方程、动量守恒方程和能量守恒方程,可通过对计算区域网格的离散模拟复杂的流体运动,并可通过引入浓度项考虑挟砂水流的运动特性,在精细化模拟中更具优势。对于冲蚀过程模拟,简化模型常用冲蚀率公式计算溃口底部的冲蚀速率,并通过溃口形状假设确定侧向的发展,计算效率较高,但对于冲蚀机理的描述存在缺陷;推移质公式无法考虑水土耦合效应,假设坝料均以推移质形式运动,与高速溃坝水流作用下的冲蚀特性不符;全沙输移公式能同时考虑推移质和悬移质,通过考虑水流挟砂能力来模拟溃坝过程中水土耦合,更能体现溃坝的机理。

3 结论与建议

(1)近年来,国内外学者在堰塞坝溃决机理的研究方面开展了大量的工作,初步揭示了堰塞坝的溃决机理,分析了不同因素对溃决过程的影响。但目前的模型试验尺度偏小,坝体材料的缩尺效应明显,模型试验时的水动力条件不足,不同学者对各影响因素的认识有差异。仍需围绕不同的影响因素,进一步明细各因素对堰塞坝溃决过程的影响机制;开展大尺度的模型试验,充分考虑堰塞坝的结构特点和材料分布特征对溃决过程的影响。

(2)在现场情况不明的情况下,依靠少量的信息对堰塞坝溃决参数进行快速预测对应急处置具有重要意义,这也是参数模型的生命力所在。准确的堰塞坝基础资料和溃决信息对参数模型的构建及溃坝模型的验证很有必要,目前国内外的堰塞坝数据库中案例的可靠性和信息的完整性有待进一步加强,需进一步研发地球物理探测手段,以便于快速获取堰塞坝结构和材料特征,使预测结果更加精确,对于新发生的案例,应及时调研测量,快速获取第一手信息,对数据库进行及时更新。

(3)堰塞坝的颗粒分布特征和对应的冲蚀特性对于溃决过程的数值模拟至关重要,深刻影响残留坝高、溃口流量过程和溃口尺寸演化规律,因此应根据滑坡体的运动规律,结合河谷形状和滑坡体的母岩特性,研发堰塞坝材料冲刷实验装置,合理预测堰塞坝的堆积形态和颗粒分布特征。精细化模型的发展还存在不足,主要是挟砂水流作用下宽级配堰塞坝冲蚀过程的数学表达,以及如何解决模拟尺度和计算效率的问题。

(4)现有用来进行数值模拟计算的软件多为国外的商业软件,且仅能对地质灾害链中某一环节进行模拟。在后续的研究中要注重开发自主知识产权的计算模拟软件,能够对地质灾害链全过程进行模拟,使灾害展现更为直观,为灾害预测和防治提供支撑。

参考文献:

- [1] Costa J E, Schuster R L. Formation and failure of natural dams [J]. Geological Society of America Bulletin Bull, 1988, 100: 1054-1068.
- [2] 刘宁, 程尊兰, 崔鹏, 等. 堰塞湖及其风险控制[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
Liu N, Cheng Z L, Cui P, et al. Dammed lake and risk mangement[M]. Beijing: Science Press, 2013. (in Chinese)
- [3] Shen D Y, Shi Z M, Peng M, et al. Longevity analysis of landslide dams [J]. Landslides, 2020, 17 (8) : 1797-1821.
- [4] Shan Y B, Chen S S, Zhong Q M. Rapid prediction of landslide dam stability using the logistic regression method[J]. Landslides, 2020, 17(12): 2931-2956.
- [5] Peng M, Zhang L M. Breaching parameters of landslide dams[J]. Landslides, 2012, 9(1): 13-31.
- [6] Zhang L M, Peng M, Chang D S, et al. Dam failure mechanisms and risk assessment[M]. Singapore: John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd., 2016.
- [7] Zhong Q M, Wang L, Chen S S, et al. Breaches of embankment and landslide dams-State of the art review [J]. Earth-Science Reviews, 2021, 216: 103597.
- [8] Cui P, Zhu Y Y, Han Y S, et al. The 12 May Wenchuan earthquake-induced landslide-dammed lakes: distribution and preliminary risk evaluation [J]. Landslides, 2009, 7(6): 209-223.
- [9] Fan X M, Xu Q, Alonso-Rodriguez A, et al. Successive landsliding and damming of the Jinsha River in eastern Tibet, China: prime investigation, early warning, and emergency response[J]. Landslides, 2019, 16(5): 1003-1020.
- [10] 陈生水, 钟启明. 土石坝溃坝数学模型及应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2019.
Chen S S, Zhong Q M. Mathematical model of earth rock dam break and its application [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2019. (in Chinese)
- [11] 谢任之. 溃坝水力学[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1993.
Xie R Z. Dam break hydraulics [M]. Jinan: Shandong Science and Technology Press, 1993. (in Chinese)
- [12] Morris M W, Hassan M A A M, Vaskinn K A. Breach formation: Field test and laboratory experiments [J]. Journal of Hydraulic Research, 2007, 45(Extra Issue): 9-17.
- [13] Hanson G J, Cook K R, Hunt S L. Physical modeling of overtopping erosion and breach formation of cohesive embankments [J]. Transactions of ASAE, 2005, 48 (5): 1783-1794.
- [14] Zhang J Y, Li Y, Xuan G X, et al. Overtopping breaching of cohesive homogeneous earth dam with different cohesive strength[J]. Science China: Technological Sciences, 2009, 52(10): 3024-3029.
- [15] Yang Y, Cao S Y, Yang K J, et al. Experimental study of breach process of landslide dams by overtopping and its initiation mechanisms[J]. Journal of Hydrodynamics, 2015, 27(6): 872-883.
- [16] 赵天龙, 陈生水, 王俊杰, 等. 堰塞坝漫顶溃坝离心模型试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2016, 38(11) : 1965-1972.
Zhao T L, Chen S S, Wang J J, et al. Centrifugal model tests overtopping failure of barrier dams [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(11) : 1965-1972. (in Chinese)
- [17] 陈生水, 徐光明, 钟启明, 等. 土石坝溃坝离心模型试验系统研制及应用 [J]. 水利学报, 2012, 43(2) : 241-245.
Chen S S, Xu G M, Zhong Q M, et al. Development and application of centrifugal model test system for break of earth-rock dams [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(2): 241-245. (in Chinese)
- [18] 陈生水, 徐光明, 顾行文, 等. 土石坝溃坝离心模型试验中水流控制与测量 [J]. 水利学报, 2018, 49(8) : 901-906.
Chen S S, Xu G M, Gu X W, et al. Flow control and measurement in centrifugal model tests for earth-rock dam breaching [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(8): 901-906. (in Chinese)
- [19] Zhou G G D, Zhou M J, Shrestha M S, et al. Experimental investigation on the longitudinal evolution of landslide dam breaching and outburst floods [J]. Geomorphology, 2019, 334: 29-43.
- [20] Zhong Q M, Chen S S, Wang L, et al. Back analysis of breaching process of Baige landslide dam [J]. Landslides, 2020, 17(7): 1681-1692.
- [21] Zhu X H, Liu B X, Peng J B, et al. Experimental study on the longitudinal evolution of the overtopping breaching of noncohesive landslide dams [J]. Engineering Geology, 2021, 288: 106137.
- [22] 张婧, 曹叔尤, 杨奉广, 等. 堰塞坝泄流冲刷试验研究 [J]. 四川大学学报(工程科学版), 2010, 42(5) : 191-196.
Zhang J, Cao S Y, Yang F G, et al. Experimental study on outlet and scour of blocked dam [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2010, 42(5): 191-196. (in Chinese)

- [23] Gregoretti C, Maltauro A, Lanzoni S. Laboratory experiments on the failure of coarse homogeneous sediment natural dams on a sloping bed[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2010, 136(11): 868-879.
- [24] Jiang X G, Wei Y W. Erosion characteristics of outburst floods on channel beds under the conditions of different natural dam downstream slope angles[J]. *Landslides*, 2020, 17(4): 1823-1834.
- [25] Walder J S, Iverson R M, Godt J W, et al. Controls on the breach geometry and flood hydrograph during overtopping of noncohesive earthen dams [J]. *Water Resources Research*, 2015, 51(8): 6701-6724.
- [26] 王道正, 陈晓清, 罗志刚, 等. 不同颗粒级配条件下堰塞坝溃决特征试验研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 2016, 36(5): 827-833.
Wang D Z, Chen X Q, Luo Z G, et al. Experimental research on breaking of barrier lake dam under different grading conditions [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2016, 36(5): 827-833.(in Chinese)
- [27] Zhu X H, Peng J B, Liu B X, et al. Influence of textural properties on the failure mode and process of landslide dams [J]. *Engineering Geology*, 2020, 271: 105613.
- [28] 刘杰, 颜婷, 周传兴, 等. 初始含水率及人工干预对堰塞坝溃决影响试验研究[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2019, 38(3): 60-67.
Liu J, Yan T, Zhou C X, et al. Experimental investigation of landslide dam failure influenced by initial moisture content and manual intervention [J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)*, 2019, 38(3): 60-67.(in Chinese)
- [29] 蒋先刚, 吴雷. 不同初始含水量条件下的堰塞坝溃决机理[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2020, 50(1): 185-193.
Jiang X G, Wu L. Influence of initial soil moisture on breaching mechanism of natural dam[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2020, 50(1): 185-193.(in Chinese)
- [30] Chen S C, Lin T W, Chen C Y. Modeling of natural dam failure modes and downstream riverbed morphological changes with different dam materials in a flume test [J]. *Engineering Geology*, 2015, 188: 148-158.
- [31] 赵高文, 姜元俊, 乔建平, 等. 不同密实条件的滑坡堰塞坝漫顶溃决实验[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(6): 1496-1505.
Zhao G W, Jiang Y J, Qiao J P, et al. Experimental investigation on overtopping failure of landslide dams with different conditions of compactness[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(6): 1496-1505.(in Chinese)
- [32] 刘邦晓, 朱兴华, 郭剑, 等. 不同沟床坡度堰塞坝溃口展宽历程试验研究[J]. *工程地质学报*, 2020, 28(6): 1272-1280.
Liu B X, Zhu X H, Guo J, et al. Experimental research on broadening process of landslide dam under different channel bed slopes. [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2020, 28(6): 1272-1280.(in Chinese)
- [33] Cao Z X, Yue Z Y, Gareth P. Landslide dam failure and flood hydraulics. Part I: experimental investigation [J]. *Natural Hazards*, 2011, 59(2): 1003-1019.
- [34] 杨阳, 曹叔尤. 堰塞坝溃决机理试验研究[J]. *水利学报*, 2012, 43(增2): 60-67.
Yang Y, Cao S Y. Experimental study on breach growth mechanisms of natural barrier dams [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2012, 43(Sup2): 60-67.(in Chinese)
- [35] 蒋先刚, 崔鹏, 王兆印, 等. 堰塞坝溃口下切过程试验研究[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2016, 48(4): 38-44.
Jiang X G, Cui P, Wang Z Y, et al. Experiments investigation on longitudinal breaching of natural dam [J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2016, 48(4): 38-44.(in Chinese)
- [36] 赵万玉, 陈晓清, 高全, 等. 不同横断面泄流槽的地震堰塞湖溃决实验研究[J]. *泥沙研究*, 2011(4): 29-37.
Zhao W Y, Chen X Q, Gao Q, et al. Experimental study of dam-break of earthquake barrier lake with different cross sections of drainage channel [J]. *Journal of Sediment Research*, 2011(4): 29-37.(in Chinese)
- [37] Zhao T L, Chen S S, Fu C J, et al. Influence of diversion channel section type on landslide dam draining effect [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2018, 77(2): 54-62.
- [38] Peng M, Jiang Q L, Zhang Q Z, et al. Stability analysis of landslide dams under surge action based on large-scale flume experiments [J]. *Engineering Geology*, 2019, 259: 105191.
- [39] Peng M, Ma C Y, Chen H X, et al. Experimental study on breaching mechanisms of landslide dams composed of different materials under surge waves [J]. *Engineering Geology*, 2021, 291: 106242.
- [40] 陈生水. 土石坝试验新技术研究与应用[J]. *岩土工程学报*, 2015, 37(1): 1-28.
Chen S S. Experimental techniques for earth and rock-fill dams and their applications [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, 37(1): 1-28. (in Chinese)

- [41] 张红武,刘磊,钟德钰,等.堰塞湖溃决模型设计方法及其验证[J].人民黄河,2015,37(4):1-5,42.
Zhang H W, Liu L, Zhong D Y, et al. Physical model design method and verification on dammed lake break [J]. Yellow River, 2015, 37(4): 1-5, 42. (in Chinese)
- [42] ASCE/EWRI Task Committee on Dam/Levee Breach. Earthen embankment breaching [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 137(12): 1549-1564.
- [43] Costa J E. Floods from dam failures[R]. Washington D C: US Geological Survey, 1985.
- [44] Evans S G. The maximum discharge of outburst floods caused by the breaching of man-made and natural dams [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1986, 23 (3) : 385-387.
- [45] Walder J S, O'Connor J E. Methods for predicting peak discharge of floods caused by failure of natural and constructed earthen dams[J]. Water Resources Research, 1997, 33(10): 2337-2348.
- [46] 刘建康,程尊兰,吴积善.基于经验公式建立的滑坡泥石流坝溃口形式预测模型[J].四川大学学报(工程科学版),2013,45(增2):84-89.
Liu J K, Cheng Z L, Wu J S. An empirical model calculating the breach parameters of landslide and debris-flow dam[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2013, 45(Sup2): 84-89. (in Chinese)
- [47] 石振明,马小龙,彭铭,等.基于大型数据库的堰塞坝特征统计分析与溃决参数快速评估模型[J].岩石力学与工程学报,2014,33(9):1780-1790.
Shi Z M, Ma X L, Peng M, et al. Statistical analysis and efficient dam burst modelling of landslide dams based on a large-scale database [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33 (9) : 1780-1790. (in Chinese)
- [48] 陈生水,陈祖煜,钟启明.土石坝和堰塞坝溃决机理与溃坝数学模型研究进展[J].水利水电技术,2019,50(8):27-36.
Chen S S, Chen Z Y, Zhong Q M. Progresses of studies on failure mechanism and numerical dam failure model of earth-rockfill dam and landslide dam [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50(8) : 27-36. (in Chinese)
- [49] Fread D L. BREACH: An erosion model for earthen dam failure [R]. Silver Spring: National Weather Service, National Oceanic and Atmospheric Administration, 1988.
- [50] Chang D S, Zhang L M. Simulation of the erosion process of landslide dams due to overtopping considering variations in soil erodibility along depth [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2010, 10 (4) : 933-946.
- [51] Peng M, Zhang L M, Chang D S, et al. Engineering risk mitigation measures for the landslide dams induced by the 2008 Wenchuan earthquake [J]. Engineering Geology, 2014, 180: 68-84.
- [52] Shi Z M, Guan S G, Peng M, et al. Cascading breaching of the Tangjiashan landslide dam and two smaller downstream landslide dams [J]. Engineering Geology, 2015, 193: 445-458.
- [53] Zhang L M, Xiao T, He J, et al. Erosion-based analysis of breaching of Baige landslide dams on the Jinsha River, China, in 2018 [J]. Landslides, 2019, 16(10) : 1965-1979.
- [54] Chen C, Zhang L M, Xiao T, et al. Barrier lake bursting and flood routing in the Yarlug Tsangpo Grand Canyon in October 2018 [J]. Journal of Hydrology, 2020, 583: 124603.
- [55] Chen Z Y, Ma L Q, Yu S, et al. Back analysis of the draining process of the Tangjiashan barrier lake [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 141 (4) : 05014011.
- [56] Wang L, Chen Z Y, Wang N X, et al. Modeling lateral enlargement in dam breaches using slope stability analysis based on circular slip mode [J]. Engineering Geology, 2016, 209: 70-81.
- [57] Chen S J, Chen Z Y, Tao R, et al. Emergency response and back analysis of the failures of earthquake triggered cascade landslide dams on the Mianyuan River, China [J]. Natural Hazards Review, 2018, 19(3) : 05018005.
- [58] Chen Z Y, Zhang Q, Chen S J, et al. Evaluation of barrier lake breach floods - insights from recent case studies in China [J]. WIREs Water, 2020, 7(2) : e1408.
- [59] Zhong Q M, Chen S S, Mei S A, et al. Numerical simulation of landslide dam breaching due to overtopping [J]. Landslides, 2018, 15(6) : 1183-1192.
- [60] Zhong Q M, Chen S S, Shan Y B. Prediction of the overtopping-induced breach process of the landslide dam [J]. Engineering Geology, 2020, 274: 105709.
- [61] Shen G Z, Sheng J B, Xiang Y, et al. Numerical modeling of overtopping-induced breach of landslide dams [J]. Natural Hazards Review, 2020, 21(2) : 04020002.
- [62] Mei S Y, Chen S S, Zhong Q M, et al. Effect of grain size distribution on landslide dam breaching-insights from recent cases in China [J]. Frontiers in Earth Science, 2021, 9: 658578.
- [63] Guan M F, Wright N G, Sleigh P A. Multimode morphodynamic model for sediment-laden flows and geomor-

- phic impacts [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2015, 141(6): 04015006.
- [64] Feah R. Numerical modeling of breach erosion of river embankments [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, 133(9): 1000-1009.
- [65] Swartenbroekx C, Soares-Frazaõ S, Staquet R, et al. Two-dimensional operator for bank failures induced by water-level rise in dam-break flows [J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2010, 48(3): 302-314.
- [66] Juez C, Murillo J, García-Navarro P. Numerical assessment of bed-load discharge formulations for transient flow in 1D and 2D situations [J]. *Journal of Hydroinformatics*, 2013, 15(4): 1234-1257.
- [67] Juez C, Murillo J, García-Navarro P. A 2D weakly-coupled and efficient numerical model for transient shallow flow and movable bed [J]. *Advances in Water Resources*, 2014, 71: 93-109.
- [68] Abderrezzak K E K, Moran A D, Tassi P, et al. Modelling river bank erosion using a 2D depth-averaged numerical model of flow and non-cohesive, non-uniform sediment transport [J]. *Advances in Water Resources*, 2016, 93: 75-88.
- [69] Dazzi S, Vacondio R, Mignosa P. Integration of a levee breach erosion model in a GPU-accelerated 2D shallow water equations code [J]. *Water Resources Research*, 2019, 55(1): 682-702.
- [70] Wu W M, Wang S S. One-dimensional modeling of dam-break flow over movable beds [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, 133(1): 48-58.
- [71] Cao Z X, Yue Z Y, Pender G. Landslide dam failure and flood hydraulics. Part II: coupled mathematical modelling [J]. *Natural Hazards*, 2011, 59 (2) : 1021-1045.
- [72] Wu W M, Marsooli R, He Z G. Depth-averaged two-dimensional model of unsteady flow and sediment transport due to noncohesive embankment break/breaching [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2012, 138(6): 503-516.
- [73] Guan M, Wright N G, Sleigh P A. 2D process-based morphodynamic model for flooding by noncohesive dyke breach [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2014, 140(7): 04014022.
- [74] Marsooli R, Wu W M. Three-dimensional numerical modeling of dam-break flows with sediment transport over movable beds [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2015, 141(1): 04014066.
- [75] Rosatti G, Begnudelli L. Two-dimensional simulation of debris flows over mobile bed: Enhancing the TRENT2D model by using a well-balanced Generalized Roe-type solver [J]. *Computers and Fluids*, 2013, 71: 179-195.
- [76] Razavitoosi S L, Ayyoubzadeh S A, Valizadeh A. Two-phase SPH modelling of waves caused by dam break over a movable bed [J]. *International Journal of Sediment Research*, 2014, 29(3): 344-356.
- [77] Cristo C D, Greco M, Iervolino M, et al. Two-dimensional two-phase depth-integrated model for transients over mobile bed [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, 142(2): 04015043.
- [78] Swartenbroekx C, Zech Y, Soares-Frazaõ S. Two-dimensional two-layer shallow water model for dam break flows with significant bed load transport [J]. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 2013, 73(5): 477-508.
- [79] Li J, Cao Z X, Pender G, et al. A double layer-averaged model for dam-break flows over mobile bed [J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2013, 51(5) : 518-534.
- [80] Cantero-Chinchilla F N, Castro-Orgaz O, Dey S, et al. Nonhydrostatic dam break flows. II: One-dimensional depth-averaged modeling for movable bed flows [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, 142 (12) : 04016069.
- [81] Lacasta A, Juez C, Murillo J, et al. An efficient solution for hazardous geophysical flows simulation using GPUs [J]. *Computers and Geosciences*, 2015, 78: 63-72.
- [82] 马利平,侯精明,张大伟,等.耦合溃口演变的二维洪水演进数值模型研究 [J]. *水利学报*, 2019, 50(10) : 1253-1267.
- Ma L P, Hou J M, Zhang D W, et al. Study on 2-D numerical simulation coupling with breach evolution in flood propagation [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2019, 50(10): 1253-1267. (in Chinese)
- [83] Tuck E O. Matching problem involving flows through small holes [J]. *Advances in Applied Mechanics*, 1975, 15: 89-158.
- [84] 郑力,钱忠东,曹志先,等.溃坝水流三维计算模型比较 [J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2009, 42(6): 758-763.
- Zheng L, Qian Z D, Cao Z X, et al. Comparison of computed result for dam over-topping flow with two 3D models [J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2009, 42(6): 758-763. (in Chinese)

(本文责编:赵霞)