

堰塞坝溃口演化研究进展

张新华,薛睿瑛,王明,邓晴

(四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室,四川成都 610065)

摘要:近年来,随着全球气候变化与人类活动影响,极端天气现象与自然灾害频发.其中,由地震、暴雨、洪水等诱发的山体滑坡、崩塌或泥石流堵塞河道所形成的堰塞坝(湖)时有发生.堰塞坝因坝体材料构成复杂、结构松散,往往会在短时期内发生溃决,溃决洪水会对下游沿途两岸的工矿企业、城镇、农田、道路、建筑物等造成严重威胁与破坏.目前,溃坝洪水研究的重点和难点仍然是溃口的形成与演化问题,虽然通过大量研究已经取得了不少研究成果,但是,溃口演变机理仍然是未被解决的世界性难题.为此,将着重从溃坝原型观测、物理模型试验、溃口经验公式、溃口数值模拟等方面系统梳理了国内外在溃口演化机理研究上取得的进展,并针对研究中存在的不足提出了今后的研究方向和重点,以便为后续的堰塞坝溃口演化研究提供一定的参考或借鉴.

关键词:堰塞坝;溃口;溃坝模型;模型试验

中图分类号:TV12

文献标志码:A

文章编号:2095-4271(2020)01-0085-07

Research progress on the breach – evolution of natural dams

ZHANG Xin – hua, XUE Rui – ying, WAGN Ming, DENG Qing

(State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, P. R. C.)

Abstract: In recent years, with the impact of global climate change and human activities, extreme weather and natural disasters occur frequently. Among them, landslides, collapses or debris flows caused by earthquakes, rainstorms, floods and so on often block up rivers by the formed natural dams. Because of the complex material composition and loose structure of the natural dam, the dam often breaks in a short period of time after its formation. The flood due to the dam break can cause a serious threat and damage to the industrial or other enterprises, towns, farmland, roads and buildings along the banks of the river downstream. Currently, the most important and difficult problems in the studies on the flooding due to the natural dam – breaks are still on the formation and evolution of the dam breaches. Although a lot of research results have been achieved, the evolution mechanism of dam break is still an unsolved problem world – widely. Therefore, this paper will focus on the research progress of the evolution mechanism of dam break from the aspects of prototype observation, physical experiment, empirical formula study, numerical simulation study and so on. In addition, the future research direction and focus in view of the shortcomings in the research are put forward, so as to provide some reference for the subsequent research on the evolution of dam breaks.

Key words: natural dam; breach; dam – break model; physical experiment

堰塞坝是由地震、降雨、火山喷发、冰碛物融化等诱发的山体滑坡、崩塌或泥石流堵塞河道所形成的堆

积物.从国内外文献对堰塞坝诱因的统计分析,由地震、降雨诱发的堰塞坝占绝大多数,在中国更是

收稿日期:2019-10-10

作者简介:张新华(1965-),男,教授,博士研究生导师,研究方向:水力学与河流动力学,水资源与水环境. E – mail: xhzhang@scu.edu.cn

通信作者:邓晴(1993-),女,汉族,博士研究生,研究方向:水力学及河流动力学. E – mail: 912186918@qq.com

基金项目:国家重点研发项目课题(2018YFC1505004);国家自然科学基金(51579162,51879174)

占到了91%,其中53%由地震形成,38%由降雨形成。此外,根据堰塞坝的地质成因,可将堰塞坝分为滑坡型堰塞坝、崩塌型堰塞坝和泥石流型堰塞坝。其中滑坡型堰塞坝最为常见^[1-2]。2008年5月12日在汶川大地震中形成的唐家山堰塞坝为典型的滑坡型堰塞坝,老虎嘴堰塞坝为典型的崩塌型堰塞坝^[3];2010年8月在甘肃舟曲形成的堰塞坝为典型的泥石流型堰塞坝^[4-5]。根据堰塞坝的物料组成,可将堰塞坝分为土质型堰塞坝、堆石型堰塞坝和土石混合型堰塞坝。其中,土质型堰塞坝以覆盖层、风化层土料为主,坝体结构密实,如石板沟、红石河堰塞坝^[6];堆石型堰塞坝以巨石、大块石、块石夹杂碎石土料为主,如老鹰岩、小岗剑堰塞坝^[7];土石混合型堰塞坝则兼具土料和块石料,唐家山堰塞坝^[8]就是典型的土石混合型堰塞坝。总体说来,堰塞坝坝体材料以非粘性材料为主。

堰塞坝在坝体形态、材料、结构和工作条件等方面都有其独特性^[1]。在坝体形态方面,堰塞坝体型多不规则,沿河流方向堆积范围明显超过狭窄河谷的宽度,且坝顶一般凹凸不平,存在天然凹槽,因此容易在凹槽处发生漫顶溢流;在坝体材料方面,绝大部分堰塞坝以非粘性材料为主,且坝料级配变化范围广,有的坝料粒径从几十厘米到数米;在坝体结构方面,坝料未经过人工选择和施工碾压,绝大部分堰塞坝结构疏松,不均匀性强,稳定性差,容易发生溃决;在工作条件方面,堰塞坝没有溢洪道等泄洪设施,坝前水位在上游持续来流条件下不断上涨,容易发生漫顶溃决。如上所述,总体来说,堰塞坝的形成具有突发性、高危性,其溃决可能性远远高于人工土石坝,且绝大多数的堰塞坝会在短时间内溃决,对周边区域及下游群众的生命财产安全带来极大的威胁。例如,2018年10月11日和11月03日,西藏自治区昌都市江达县波罗乡境内同一位置发生的两次山体滑坡,堵塞金沙江干流河道,形成白格堰塞坝^[9-12]。其中第二次堵江形成的堰塞湖库容高达7.8亿 m^3 ,在人工开挖泄流槽后,虽然降低了溃决洪水洪峰大小,但对金沙江下游地区仍造成了重大的洪水灾害与经济损失。因此,堰塞坝形成后如何减灾防灾是我国自然灾害防御领域的重点研究课题之一。

为了制定除险减灾策略,减轻或避免堰塞坝溃决造成的生命财产损失,目前国内外学者对于堰塞坝溃决后的灾害研究主要集中在溃口演化机理、溃坝洪水演进模拟以及致灾风险评估分析等三个方面。其中,堰塞坝的溃口演化过程,影响着溃坝洪水出流及下游洪水演进,进而影响致灾后果。同时,溃口演化过程涉及坝体材料和洪水之间复杂的流固耦合交互作用,需要水力学、土力学、泥沙运动力学等多门学科知识进行研究。故溃口演化机理成为目前堰塞坝形成到溃决致灾过程研究中的重点和难点。

目前,对堰塞坝溃口演化机理的研究主要借鉴了土石坝溃口演化机理的研究,包括:溃坝原型观测、溃坝物理试验、溃口经验公式、溃口数值模拟四个方面。此外,根据美国地质调查局研究发现,已发生溃决的堰塞坝中,漫顶导致的溃坝案例约占90%^[13]。故本文着重梳理了漫顶溃决堰塞坝的溃口演变的研究进展,并针对目前存在的问题,提出了未来的研究展望。

1 国内外研究进展

堰塞坝往往发生在交通不便的高山峡谷中,其溃决时间短,流量大,故原型观测往往难以实施,且原型资料的收集主观性强,具有较大的不确定性。因此物理模型试验是现阶段深入研究堰塞坝溃口演化机理较为可行的一种方式,但模型试验费用高、耗时长,使得溃口经验公式及数值模拟也成为重要的研究手段。下面将依次从这三方面进行概述。

1.1 溃坝物理试验

自20世纪50年代开始,国内外一大批学者针对土石坝或堰塞坝溃口演化及溃坝洪水问题开展了一系列溃坝试验,也取得了许多重要研究成果,为制定有效的防灾减灾预案提供了科学依据。目前,溃坝物理试验主要包括室内外水工模型试验、离心模型试验、水槽试验。

1) 水工模型试验

从20世纪50年代开始,美国和奥地利学者针对土石坝溃决问题进行了大量的室内外水工模型试验。20世纪90年代,欧美各国也开展了大量溃坝水工模型试验,如美国农业部对均质土坝开展的多组溃坝水

工模型试验以及欧盟支持启动的 IMPACT 项目. 其中, IMPACT 项目针对土石坝进行了 22 组室内小比尺模型试验, 试验针对不同坝体几何形状(坝坡、坝顶宽)、筑坝材料(均质非黏性、均质黏性)、坝体材料性能(粒径级配、压实程度、含水量)、初始溃口位置、溃决模式(漫顶、管涌)等影响因素进行了多组试验, 并取得了丰富的研究成果^[14]. 90 年代之后, 欧美学者通过对 IMPACT、DSIG 等项目资助的溃坝试验及溃坝实例进行观测, 提出了新的土石坝漫顶溃坝的溃决机理——“陡坎”冲蚀. 与此同时, 日本土木研究所也进行了大量的土石坝溃坝试验研究, 也得到了上述试验类似的研究结果. 进入 21 世纪, 国内也开展了大量的溃坝试验研究, 如 2008 年南京水利水电科学研究所张建云、李云等^[15]利用安徽省滁州废弃的大洼水库, 针对均质坝的不同溃决方式和流量工况开展了大尺度溃坝现场试验.

2) 离心模型试验

溃坝离心模型试验, 是利用离心机提供的离心力模拟重力, 使模型在离心力场中的应力状态与原型在重力场中的应力状态一致, 并按照相似准则, 用相同材质的土体制成模型^[16]. 曼彻斯特大学^[17]在 1972 年利用研制的一套水流控制系统, 研究了浮力对堤防的破坏作用. 近年来, 中国水利水电科学研究所王秋生^[18]与南京水利科学研究所^[19-20]分别研制了溃坝离心模型试验系统, 对土石坝的溃决机理和溃决过程进行了深入的研究, 为建立溃坝数学模型奠定了良好的试验基础.

3) 水槽试验

早在 20 世纪中期, 国外一些学者便对漫顶溃坝展开了水槽试验研究. 大量学者通过预设溃口, 对不同地质成因、材料、入流量、底坡等影响因素下的溃口演化及其下泄流量进行了研究分析, 得出溃口演化过程包括溃口展宽、溃口下切、溃口溯源侵蚀三个过程, 同时溃口演化过程可分为不同的阶段, 且在不同的阶段上述三种过程对溃口演化的贡献不同等结论. Yang F. G. 等^[21]通过水槽试验认为溃口演化过程存在以溯源冲刷为主的阶段, 并以泥沙休止角的大小向上游侵蚀发展. 蒋先刚等^[22]发现来水流量及背水坡坡度的

加大都会增加相应时刻的溃决流量及侵蚀率, 同时将溃口下切过程分为溃口缓慢发展、溃口迅速发展、形成稳定河床三个阶段. 蒋先刚等^[23]探究底坡对溃口发展阶段、溃口下切、溃口展宽、溃决流量等的影响. 刘定竺等^[24]设计了 6 组水槽实验, 研究了不同坝高、坝后坡比、位置的溃口展宽过程, 并以溯源侵蚀结束为时间节点, 将溃口展宽分为近等宽阶段与弯曲阶段, 将断面展宽模式分为线性模式和突变模式. 李建华, 黄尔等^[25]开展水槽试验发现堰塞坝的溃口下切、溃口展宽平均速率最大值与坝顶长度、坝顶开槽宽度、坝体粗沙含量呈反相关关系; 而与堰塞坝坝后坡度呈正相关关系; 上游入库流量与溃决过程初始时段下切平均速率呈正相关关系, 与展宽平均速率最大值呈反相关关系等. 杨阳、曹叔尤^[26]根据推导的模型试验比尺指标确立的相似准则, 设计完成水槽试验, 并对水槽试验的合理性进行验证, 将堰塞坝溃决分为 5 个阶段, 并得到了溃口发展变化及溃口流量方面的相关结论. 王道正等^[27]开展了不同颗粒级配条件下堰塞坝溃决特征试验, 发现平均粒径越大, 坝体整体抗冲刷能力越强, 溃口发展速度越慢, 坝体越稳定, 溃决洪峰流量越小, 达到洪峰流量的时间也相对滞后, 但其缺乏定量的分析研究. 总体来说, 此前开展的大量溃坝水槽试验, 还缺乏对不同材料特性、不同位置下堰塞坝溃口特性的研究, 并且缺乏对试验设计准则、试验结果是否适用于原型等方面的研究.

1.2 溃口经验公式

溃口经验公式研究主要是通过对历史溃坝资料运用统计学方法进行回归分析, 建立土石坝及堰塞坝溃口展宽、溃口侧边坡(溃口形状)、溃决时间等参数的经验公式, 这些公式结构相对简单, 可以对堰塞坝的溃口演变过程进行快速评估. 但是, 经验公式的建立通常需要大量的实测数据为基础, 由于收集到的资料有限, 经验公式具有一定的局限性, 且其一般不能反映溃口随时间的演化过程, 只能反映溃口的最终形状.

国内外学者提出了大量的溃口经验公式, 国外有 Johnson (1976)、Singh (1982、1988)、Froehlich (1987、1995)、美国联邦能源委员会 (FERC) (1987)、美国农

垦局(1988)、Von Thun 等(1990)、Walder(1997)等提出的经验公式,国内有铁道科学研究所、黄河水利委员会、谢任之等提出的经验公式^[28]。此外,刘建康等^[29]还建立了滑坡泥石流堰塞坝的溃口形式预测模型,分别建立了堰塞坝坝高 H 、坝长 B 、库容 W 、坝体鞍部单宽体积 V 、内摩擦系数 $\tan\varphi$ 以及上限粒径 D_{90} 共 6 个因子与溃口形式(平均宽度 b_c 和残留高 H_d) 之间的经验关系式,并与其他计算公式的计算结果进行对比,发现其结果更合理准确。徐耀、张利民^[30] 在国外溃坝案例数据库基础上,结合相关领域研究成果,对不同溃决形式的土石坝溃口发展规律进行了总结归纳。邓鹏鑫等^[31] 基于 MIKE11 水动力学模型和谢任之之逐渐溃经验公式,对溃口演变进行分析。总体来说,基于土石坝溃坝提出的经验公式是否适用于堰塞坝以及如何修订还需进一步探究。同时,需要更新现有的历史溃坝数据库,对现有的经验公式进行修订和适用性探究。

1.3 溃口演变数值模拟

溃坝的发生、发展和溃决程度等受诸多因素影响,模拟难度非常大。尽管如此,近些年溃口演变模拟仍取得了相当大的进展。目前,关于溃口演变的数值计算模型大体上可以分为三类:基于参数或泥沙输移理论的溃坝模型^[32-33]、二维水沙运动模型、基于土坡稳定理论的溃口模型。

1) 基于参数或泥沙输移理论的溃坝模型

溃坝模型通常可分为两大类。第一类称为基于溃口最终宽度、溃口最终底高程、溃口历时等的参数模型,通过简单的时变过程来模拟溃口的演变过程,即已知或假设溃口最终发展形态,通过假定溃口变化是线性或非线性变化来模拟溃口的演变过程,如 FREAD 系列的 DAMBRK 模型^[34]。第二类模型称为基于物理过程的模型,结合泥沙输移方程模拟实际溃口演变过程和溃坝洪水过程,如 Cristofano 模型^[35] (1965)、H - W 模型^[36] (1967)、BRDAM 模型^[37] (1981)、LOU 模型^[38] (1981)、P - T 模型^[39] (1981)、NOGUEIRA 模型^[40] (1984)、BEED 模型^[41] (1989)、FREAD 系列的 BREACH 模型^[42-43] 以及最新提出的陡坎冲刷模型^[44] 等。目前应用较广的是 BREACH 模

型和 BEED 模型。

此外,国内有大量学者对上述模型进行改进优化。李景远等^[45] 在 Breach 模型的基础上,引入土坡稳定公式以及清水条件下的河道冲刷公式作为溃口演变控制的新条件,建立了 Breach 溃口改进模型,并应用于 JP 水库。杨忠勇等^[46] 将 De Ploey 提出的陡坎侵蚀模型与 DAMBRK 模型结合,提出一种新的溃口计算方法,计算结果表明,溃口发展过程是高度非线性的,若将其作为线性处理,可导致最大溃口出流量的计算值偏低。

2) 二维水沙运动模型

为反映堰塞坝坝体形成过程中河床变形与水流之间的相互作用,一些学者采用平面二维水沙耦合数值模型,分析堰塞坝漫顶溃决过程中坝体的冲刷机制,模拟堰塞坝下泄流量与库内水位的变化过程,如王光谦等^[47] 以唐家山堰塞坝漫顶溢流为例,采用平面二维水沙模型分析了堰塞坝漫顶溃决过程中坝体的冲刷机制及泄流过程等。余明辉,张小峰^[48] 采用平面二维水沙模型模拟堤防溃口展宽过程,为堰塞坝溃口的数值模拟提供一定借鉴。

3) 基于土坡稳定理论的溃口模型

基于土坡稳定理论的溃口模型主要包括以滑动面分析法(简化 Bishop 法、圆弧滑面法、直线滑面法)和楔形体分析法计算溃口演化的两种方法。前者主要包括陈祖煜院士等^[49] 提出的基于 EXCEL - VBA 的溃坝溃口及洪水分析模型,该模型主要采用了堰流公式、冲刷公式、水量平衡公式对溃坝溃口及洪水过程进行模拟。后者主要包括陈生水等人提出的溃口模型^[50],该模型分别采用高速水流泥沙输移理论、溃口边坡稳定性分析法、楔形体受力平衡分析法来计算溃坝水流对溃口的纵横向连续冲蚀、间歇性横向扩展、突发性崩塌所引起的扩展;并且根据流量平衡理论,建立下游坝体冲槽和坝顶溃决发展过程中的相互影响。

另外,大量学者对上述模型进行了改进。黄金池^[51] 通过大量的水槽试验,将高强度水流非平衡冲刷公式引入溃口展宽模块,同时在溃口下切、溃口展宽的基础上考虑了坝坡溯源冲刷,在三维尺度上建立

了一个堰塞坝逐渐溃决演化模型,更加全面地模拟了堰塞坝溃口演化过程.钟启明,陈生水等^[52]在模型中引入能反映坝体材料级配、密实度、强度、水流速度的泥沙输移公式对模型进行改进,同时引入与水流方向垂直的附加作用力来考虑粗、细颗粒间的相互作用,并用唐家山堰塞坝进行了验证.何利君,杨兴国^[53]认为水流冲蚀堰塞体过程中溃口逐渐下切和展宽应以土力学中的土体抗滑稳定理论为基础,模拟溃口边坡发生间歇性失稳坍塌,并提出了计算溃口深度的数学模型,以唐家山堰塞坝为例进行了验证.王琳等^[54]通过考虑流固耦合作用机制,改进了已有的溃决洪水分析 DB-IWHR 模型,建立了考虑引流槽开挖措施的堰塞坝溃决机制分析方法,并将该方法应用于红石岩堰塞坝案例分析.王立辉等^[55]应用溃坝水动力理论、泥沙运动力学原理和边坡稳定性理论等研究成果构建了溃坝溃口发展与溃口流量计算模型,并对福建省某水库进行应用分析.

2 研究展望

目前,尚不能快速准确的预测溃口演变过程.本文针对堰塞坝溃口演化机理研究方面的不足,从原型观测、溃坝物理试验、溃坝数值模拟等几方面提出几点建议和展望,以便为今后堰塞坝溃坝溃口研究提供一定的借鉴.

1) 堰塞坝原型观测及数据库建立.一方面,与堰塞坝溃坝溃口相关的实测资料(如:堰塞坝溃口展宽和溃口下切实测资料)未得到良好的收集和保存,同时,已有的溃口演化实测数据具有很大的主观性和不确定性.另一方面,大多数堰塞坝的勘察条件恶劣,溃决时间短,很难在短时间内获取详细的坝决参数.但准确详细的堰塞坝溃坝资料对溃口机理研究、溃口经验公式的建立以及溃口模型的校准和检验意义重大.上述两个方面使得对堰塞坝溃决等方面的研究受到很大的制约.因此,有必要第一时间采用科学的手段如无人机技术等,对今后发生的堰塞坝进行原型观测,并建立准确详尽的堰塞坝数据库,为今后对堰塞坝溃口演化机理研究提供基础数据支撑.

2) 加强模型试验相似理论研究.除了传统的几何

相似、运动相似、动力相似(主要是重力相似)外,溃坝模型试验还需满足坝体材料相似等.由于溃坝过程涉及水力学、土力学、泥沙运动力学及结构力学等多学科基础理论,现有物理模型试验的相似理论是否能综合反映各种影响还有待进一步探讨,设计的模型无法满足完全满足与原型相似.因此,需要引入泥沙输移相似比尺,进一步完善溃坝试验相似理论,从而开展更符合模型相似律的实体模型试验,提高溃坝试验的精度^[56].

3) 注重多机理耦合研究溃口演化过程.堰塞坝的溃决过程存在水力冲刷、重力坍塌及其他形式的冲决破坏,只有合理的考虑上述现象背后的力学机理,才可能建立起可靠的溃决预测模型.同时,目前对于溃口演化机理的研究考虑不全面,并未抓住堰塞坝的主要特性,如坝料特性和级配,尚不能很好的模拟溃口演化过程,急需结合溃坝试验从机理上对堰塞坝溃口演变进行研究,才能真正解决堰塞坝溃口的演化问题.

4) 建立高强度非恒定水流情况下的非平衡输沙理论.堰塞体溃口演化过程复杂,溃决水流具有很强的非恒定性,但现有的泥沙输移理论基本上是在恒定均匀流条件下建立的,与溃口演变直接相关的泥沙输移理论仍未建立起来.因此,迫切需要建立溃决水流条件下的输沙理论模型.

5) 从三维尺度对堰塞坝溃口演化过程进行研究.目前的研究主要集中在以二维尺度对堰塞坝溃口演化进行研究,较少考虑堰塞坝沿水流方向不同断面的溃口演化特征.下一步需要全面考虑溃口垂直下切、横向扩展、溯源冲刷3种过程,对堰塞坝溃口演化过程进行研究,从而更加真实的模拟溃口演化过程.

6) 加强防灾减灾中的不确定性研究.堰塞坝具有高危性及突发性,且溃坝机理复杂,涉及水土耦合及多学科知识,对溃口演变过程的预测会有较大的不确定性,这对防灾减灾策略的制定及其实际效果将会产生重要影响.因此,应加强对溃口演变中不确定性及其降低措施的研究,提高防灾减灾应急预案及决策过程的可靠性.

参考文献

- [1] 任强, 陈生水, 钟启明, 等. 堰塞坝的形成机理与溃决风险[J]. 水利水电科技进展, 2011, 31(5): 30-34.
- [2] 颜婷, 包崇, 刘杰. 自然坝分类及坝体组成特征综述[J]. 四川水泥, 2017, 10: 293.
- [3] 王全才, 王兰生, 李宗有, 等. “5·12”汶川地震区都江堰老虎嘴崩塌体治理[J]. 山地学报, 2010, 28(06): 741-746.
- [4] 余斌, 杨永红, 苏永超, 等. 甘肃省舟曲 8.7 特大泥石流调查研究[J]. 工程地质学报, 2010, 18(04): 437-444.
- [5] 王文甫, 胡振邦. 舟曲泥石流堰塞坝稳定性分析及应急预案研究[J]. 水力发电, 2019, 45(08): 33-35.
- [6] 石振明, 熊曦, 彭铭, 等. 存在高渗透区域的堰塞坝渗流稳定性分析——以红石河堰塞坝为例[J]. 水利学报, 2015, 46(10): 1162-1171.
- [7] 邱炽兴, 李书健. 绵远河小岗剑(上)堰塞湖应急排险处理[J]. 水利水电技术, 2008(08): 36-38.
- [8] 李守定, 李晓, 张军, 等. 唐家山滑坡成因机制与堰塞坝整体稳定性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(S1): 2908-2915.
- [9] 周兴波, 杜效鹄, 姚虞. 金沙江白格堰塞湖溃坝洪水分析[J]. 水力发电, 2019, 45(03): 8-12+32.
- [10] 陈祖煜, 张强, 侯精明, 等. 金沙江“10·10”白格堰塞湖溃坝洪水反演分析[J]. 人民长江, 2019, 50(05): 1-4+19.
- [11] 蔡耀军, 栾约生, 杨启贵, 等. 金沙江白格堰塞坝结构形态与溃决特征研究[J]. 人民长江, 2019, 50(03): 15-22.
- [12] 邓建辉, 高云建, 余志球, 等. 堰塞金沙江上游的白格滑坡形成机制与过程分析[J]. 工程科学与技术, 2019, 51(01): 9-16.
- [13] COSTA J E, SCHUSTER R L. The formation and failure of natural dams[J]. Geol Soc Am Bull, 1988, 100: 1054-1068.
- [14] MORRIS M W, HASSAN M, VASKINN K A. Conclusions and recommendations from the IMPACT Project WP2: Breach formation[EB/OL]. (2005-03-15) [2018-03-01]. <http://www.samui.co.uk/impact-project/wp2-technical.htm>.
- [15] 张建云, 李云, 宣国祥, 等. 不同粘性均质土坝漫顶溃决实体试验研究[J]. 中国科学(E辑: 技术科学), 2009, 39(11): 1881-1886.
- [16] 张利民, 胡定. 高重力场中离心模型的水流控制设备[J]. 成都科技大学学报, 1989(03): 93-97.
- [17] HIRD C C, MARSLAND A, SCHOFIELD A N. The development of centrifugal models to study the influence of uplift pressures on the stability of a flood bank[M]. Garston: Building Research Station, 1978.
- [18] 土石坝溃坝问题的离心模型试验研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院博士后出站报告, 2010.
- [19] 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(02): 241-245.
- [20] 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(08): 901-906.
- [21] YANG F G, ZHOU X Q, LIU X N, et al. Experimental study of breach growth processes in sand dams of quake lakes[J]. Journal of Earthquake and Tsunami, 2011, 5(5): 445-459.
- [22] 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.
- [23] 蒋先刚, 吴雷. 不同底床坡度下的堰塞坝溃决过程研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(S1): 3008-3014.
- [24] 刘定竺, 崔鹏, 蒋德旺. 堰塞坝溃口展宽过程实验研究[J]. 中国水土保持科学, 2017, 15(6): 19-26.
- [25] 李建华, 黄尔, 罗利环. 堰塞坝溃口溃决速率影响因素试验研究[J]. 人民黄河, 2012, 34(8): 8-11.
- [26] 杨阳, 曹叔允. 堰塞坝漫顶溃决与演变水槽试验指标初探[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2015, 47(2): 1-7.
- [27] 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.
- [28] 王乃欣. 土石坝溃决溃口数值模拟与溃坝虚拟现实技术研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2018.
- [29] 刘建康, 程尊兰, 吴积善. 基于经验公式建立的滑坡泥石流溃坝溃口形式预测模型[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2013, 45(S2): 84-89.
- [30] 徐耀, 张利民. 土石坝溃口发展模式研究[J]. 中国防汛抗旱, 2007(S1): 18-21+71.
- [31] 邓鹏鑫, 徐高洪, 徐长江, 等. 堰塞湖逐渐溃决洪水模拟及溃口变化影响分析[J]. 人民长江, 2019, 50(3): 28-33, 39.
- [32] 魏勇, 许开立, 郑欣. 常见溃坝模型综述[J]. 工业安全与环保, 2009, 35(4): 45-46, 60.
- [33] 朱勇辉, 廖鸿志, 吴中如. 国外土坝溃坝模拟综述[J]. 长江科学院院报, 2003(02): 26-29.
- [34] FREAD D L. DAMBRK: The NWS dam break flood forecasting model[R]. Silver Spring: National Weather Service (NWS) Report, NOAA, 1984.
- [35] CRISTOFANO E A. Method of computing erosion rate for failure of earth-fill dams[R]. Denver: Bureau of Reclamation, 1965.
- [36] HARRIS G W, WAGNER D A. Outflow from breached earth dams[R]. Salt Lake City: Department of Civil Engineering, University of Utah, 1967.
- [37] BROWN R J, ROGERS D C. BRDAM users manual[M]. Denver: Water and Power Resources Service, U. S. Department of the Interior, 1981.
- [38] LOU W C. Mathematical modeling of earth dam breaches[D]. Fort Collins: Colorado State University, 1981.

- [39] PONCE V M, TSIVOGLU A J. Modeling gradual dam breaches [J]. Journal of Hydraulic Division (ASCE), 1981, 107(7): 829 - 838.
- [40] NOGUEIRA V D Q. A mathematical model of progressive earth dam failure[D]. Fort Collins: Colorado State University, 1984.
- [41] SINGH V P, QUIROGA C A. Dimensionless analytical solutions for dam breach erosion[J]. Journal of Hydraulic Research, 1988, 26(2): 179 - 197.
- [42] FREAD D L. Breach: An erosion model for earthen dam failures [R]. Silver Spring: National Weather Service (NWS) Report, MA NOAA, 1988.
- [43] FREAD D L. Breach: NWS FLDWAV model [R]. Silver Spring: National Weather Service (NWS) Report, MA NOAA, 1998.
- [44] ROBINSON K M, HANSON G J. Headcut erosion research [C] // Proc. 7th Federal Interagency Sedimentation Conf. . Reno, 2001.
- [45] 李景远,周孝德,吴巍,等. 土石坝漫顶溃决过程数值模拟研究[J]. 水资源与水工程学报,2015,26(04):196 - 199 + 205.
- [46] 杨忠勇,罗铃,杨百银,等. 土石坝溃决过程中溃口发展及溃坝洪水计算方法探讨[J]. 水力发电,2019,45(09):43 - 47.
- [47] 王光谦,钟德钰,张红武,等. 汶川地震唐家山堰塞湖泄流过程的数值模拟[J]. 科学通报,2008(24):3130 - 3136.
- [48] 余明辉,张小峰. 平面二维溃堤水流泥沙数值模拟[J]. 水科学进展,2001(03):286 - 290.
- [49] CHEN Z, MA L, YU S, et al. Back analysis of the draining process of the Tangjiashan Barrier Lake [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 141(4): 1 - 14.
- [50] 陈生水,钟启明,等. 土石坝漫顶破坏溃口发展数值模型研究[J]. 水利水运工程学报,2009(04):53 - 58.
- [51] 黄金池. 堰塞坝漫顶溃口流量变化过程的数值模拟[J]. 水利学报,2008(10):1235 - 1240.
- [52] 钟启明,陈生水,赵联桢,等. 堰塞坝漫顶溃决过程数值模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版),2012,40(4):405 - 411.
- [53] 何利君,陈昊,杨兴国,等. 堰塞坝漫顶破坏溃口深度变化数值模拟[J]. 中国农村水利水电,2012(08):126 - 128 + 131.
- [54] 王琳,李炎隆,李守义,等. 考虑引流槽开挖措施的堰塞坝溃决机制分析[J]. 应用力学学报,2019(10):1 - 8.
- [55] 王立辉,甘贻强,周伯豪,等. 土石坝溃口流量过程分析[J]. 水利水电技术,2014,45(9):55 - 57,61.
- [56] 李云,王晓刚,宣国祥,等. 均质土坝漫顶溃坝模型相似准则研究[J]. 水动力学研究与进展 A 辑,2010,25(02):270 - 276.

(责任编辑:付强,张阳,李建忠,罗敏;英文编辑:周序林)