

彭铭,王开放,张公鼎,等. 2020. 堰塞坝溃坝模型实验研究综述[J]. 工程地质学报, 28(5): 1007-1015. doi: 10.13544/j.cnki.jeg.2020-348
Peng Ming, Wang Kaifang, Zhang Gongding, et al. 2020. Review of model experimental studies on break of landslide dams[J]. Journal of Engineering Geology, 28(5): 1007-1015. doi: 10.13544/j.cnki.jeg.2020-348

堰塞坝溃坝模型实验研究综述*

彭 铭^{①②} 王开放^{①②} 张公鼎^{①②} 马晨议^{①②} 朱 艳^{①②③④}

(①同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092, 中国)

(②同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092, 中国)

(③中船第九设计研究院工程有限公司, 上海 200063, 中国)

(④上海市海洋工程及船厂水工特种工程研究中心, 上海 200063, 中国)

摘 要 堰塞坝是天然形成的坝体, 结构比较松散、稳定性差、渗透作用强, 发生溃决危险性大、概率高、突发性强, 而且破坏可能性高及产生的洪水威胁人们的生命和财产安全, 因此需要系统、全面的研究。作者从单坝溃坝、级联溃坝及堰塞坝处置的溃坝试验进行详细的回顾, 总结及分析了国内外学者在堰塞坝溃坝模型实验取得的成果及局限性, 进一步分析了单坝溃决的颗粒级配、密实度、含水率、沟床坡度等因素, 最后讨论了溃坝因素与溃决模式、溃决特征、溃决流量、溃口演化的关系。基于模型实验相似理论及模型比尺、实验测试手段、堰塞坝处置三个方面, 提出了今后的研究重点。

关键词 堰塞坝; 溃坝; 模型实验

中图分类号: TV12 文献标识码: A doi: 10.13544/j.cnki.jeg.2020-348

REVIEW OF MODEL EXPERIMENTAL STUDIES ON BREAK OF LANDSLIDE DAMS

PENG Ming^{①②} WANG Kaifang^{①②} ZHANG Gongding^{①②} MA Chenyi^{①②} ZHU Yan^{①②③④}

(①Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

(②Ministry of Education Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

(③China Shipbuilding NDRI Engineering Co., Ltd., Shanghai 200063, China)

(④Shanghai Engineering Research Center of Ocean & Shipbuilding Maritime Engineering, Shanghai 200063, China)

Abstract Landslide dam are naturally formed dams with the characteristics of the loose structure, poor stability and strong permeability. Once a landslide dam is formed, its high probability of breaching and the flood caused by its breaching may threaten the safety of people and property in local area. Therefore, a systematic and comprehensive study needs to be conducted to analyze the breaching characteristics of landslide dam. In this article, a detail review from model experimental studies on dam break of landslide dam is conducted. The results and limitations are analyzed and summarized. Moreover, the factors of particle size distribution, compactness, water content and bed slope of single dam break are also analyzed. Finally we discuss the relationship among the dam break factor and the failure mode, the characteristics of dam breaching, peak discharge, and downcutting process.

* 收稿日期: 2020-07-02; 修回日期: 2020-07-27.

基金项目: 国家自然科学基金(资助号: 41877234, 41731283), 上海市青年科技启明星计划(资助号: 20QB1406000).

This research is supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 41877234, 41731283) and Shanghai Rising-Star Program (Grant No. 20QB1406000).

第一作者简介: 彭铭(1981-), 男, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要从事大坝安全与溃坝机理分析. E-mail: pengming@tongji.edu.cn

通讯作者简介: 朱艳(1986-), 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事海岸带水工工程设计与灾害防治. E-mail: zy_tmgc@163.com

On the basis of the systematic analysis of the breaching of landslide dams, it's suggested that further studies of model similarity theory, scaling effect, testing methods and the disposal of landslide dam may be carried out in the future.

Key words Landslide dams; Dam break; Model experiment

0 引言

堰塞坝是由降雨、地震等外力作用诱发崩塌、滑坡、泥石流等斜坡失稳体堆积形成的天然坝体。堰塞坝在全世界范围内频繁发生,我国更是堰塞坝高发区,在全世界范围内 1298 个堰塞坝统计案例中,发生在我国的达 758 个,所占到的比例为 58.4% (Zhang et al., 2016)。其中:最近 20 年来堰塞坝在发生频率上和数量上都呈集中暴发趋势,如 2008 年产生 257 个堰塞湖,包含风险最大的唐家山堰塞坝 (Cui et al., 2009; Peng et al., 2012); 2009 年 8 月台湾莫拉克台风诱发形成 16 个堰塞坝,其中小林村堰塞坝溃决后造成“小林村灭村”(陳昆廷等, 2010); 2008 年至今,汶川震后滑坡松散堆积体在强降雨下重新启动,形成大小数十处堰塞坝。由于堰塞坝主要在降雨、地震等外力作用下形成的,导致其结构比较松散、稳定性差、渗透作用强。因此,在上游持续来水的情况下,极易发生漫顶或管涌破坏,从而造成洪水灾害。如 1786 年四川省泸定—康定发生 7.7 级地震形成一个堰塞坝,溃决后造成 10 万余人的死亡和失踪 (陈建峰等, 2008)。1933 年四川叠溪发生 7.5 级地震形成多个堰塞坝,溃决后造成大量人员伤亡 (邹双凤, 2009; 刘宁等, 2013)。

由此可见,堰塞坝的形成具有突发性,以及同一地区可能多次形成堰塞坝,如 2018 年形成的两次金沙江堰塞坝,而且溃坝造成的危险性极大 (许强等, 2018; 冯文凯等, 2019), 世界各国对堰塞坝的处置都给予很高的重视。尤其是 2008 年汶川地震以来,各国学者分别从统计分析、实验研究、数值分析进行详细广泛的研究。由于堰塞坝溃决时间段不确定、溃决的地点相对较为偏远、堰塞坝形成的地质条件复杂,进行实测观察危险性较高,因此原型观察与统计分析难以取得堰塞坝主要的信息; 虽然计算机发展迅速,有关学者建立相关的数学模型进行分析溃坝过程,但是需要原型溃坝实验资料进行标定,局限性较大,一般为模型实验的补充。为了揭示堰塞坝溃坝的溃决机理、模拟坝体的物理力学性质、获得坝体内主要的参数规律,为堰塞坝处置提供一定的理

论基础及相关建议,国内外许多的学者进行了大量的溃坝模型实验。现有的学者主要从单坝溃决、级联溃决及堰塞坝处置的模型实验进行研究,其中主要对单坝溃决的颗粒级配、密实度、含水率、沟床坡度的因素进行分析,为接下来的溃坝物理模型实验提供很好的探究方向。

1 单坝溃决的影响因素试验研究

关于溃决问题的研究,19 世纪的法国开始进行模型试验的探究,美国、德国、奥地利等也有相应的研究,但只是进行相应的直观的观察,没有准确的监测技术 (牛志攀等, 2019)。20 世纪中期,美国进行了土石坝的水槽实验,得到不同坝体材料的冲刷速率 (王光谦等, 2015)。随后,奥地利的学者对堆石坝的溃决进行了大量的实验,得出:上述试验的溃决时间比尺基本一致,而对于相同的护坡,坡度减缓时,冲开坝坡的临界水头将显著增加 (谢任之, 1993)。随着溃坝问题造成人员伤亡和财产损失,为了进一步研究溃决机理问题,欧盟进行了 IMPACT 项目,其中包括 5 次坝高 4~6 m 的模型实验及 22 组模型几何比尺为 1:7.5~1:10 的室内试验,主要研究了溃坝因素 (坝体的形状、坝体的材料、材料的性能) 与溃口模型、溃决特征、溃口的演化、坝体冲刷的关系 (Hanson et al., 2002; Morris et al., 2005; 李云等, 2009)。

以上进行土石坝溃决问题的研究,对堰塞坝溃决问题研究有一定的借鉴意义。但是堰塞坝是松散堆积、颗粒分布不均匀、结构更加不稳定,没有土石坝的一些工程防护措施。因此,为了更加了解堰塞坝的溃决模式、机理、溃口的发展等问题,有关学者通过溃坝的物理模型实验、统计分析及数值模拟等方法,得出堰塞坝的溃决与入湖流量、坝体的几何形状、物质组成和岩土结构、库容大小、被堵河道的几何形状等因素有很大的关系。为了更加深入地了解各个因素对于堰塞坝溃决影响程度,学者针对某一因素开展了物理模型实验,笔者进行简要的整理、总结及评述。

1.1 颗粒级配对溃坝的影响

由于堰塞坝形成的特殊性,堰塞坝的材料变化范围比较大,一个坝体的材料粒径从几米的巨石到几微米的黏土都有分布;坝体的渗透特性及岩土体结构的不同会导致溃决机理的差异,从而得到不同的溃决模式;堰塞坝的组成材料的空间差异性使得各个部分发生破坏的时间不同。其中:堰塞坝的粗颗粒材料对堰塞坝的抗侵蚀的能力有较大的影响,颗粒级配则影响坝体的渗透性。因此,坝体的基本组成结构特征对溃决过程有着显著影响,相关的学者进行的探究也较多。

考虑到坝体材料的不同,国内外学者对土石坝及土堤坝进行了初探。Visser(1998)和 Schmocker et al.(2009)探究了坝体材料对土堤坝溃口演变过程的影响;张健云等(2009)考虑了土石坝黏粒含量;Zhang et al.(2011)采用两种粒径相差较大的砂样进行了土石坝的溃坝模型实验。后面的学者有通过控制坝体材料颗粒级配的 D_{50} 进行了相关的实验,主要有 Coleman et al.(2002)所选用的颗粒 D_{50} : 0.5、0.9、1.6、2.4; Rozov(2003)选用的颗粒的 D_{50} 取值为 0.34 mm; Chinnarasri et al.(2003)所选用的两种非黏性泥沙颗粒的 D_{50} 取值为 0.36 mm 和 0.86 mm。

基于以上学者在土石坝及堤坝的初探,有关学者对堰塞坝的颗粒进行溃坝模型实验。为了研究颗粒级配对堰塞坝的影响,张婧等(2010)设置了 7 组不同的中值粒径 D_{50} (1.5~3 mm)研究其溃坝特征,得出随着颗粒级配增大,峰值流量出现短暂的增大,会随着粗颗粒的增多,峰值流量减少,主要是由于“扰流掀沙”现象所引起的。张健楠等(2014)考虑到级配对堰塞坝的影响,通过 C_U 、 D_{50} 控制颗粒级配进行了 16 组实验,得到临界溃决流量随着 D_{50} 增大而增大;在中值粒径一定的情况下,随着不均匀系数的增大,临界的峰值流量逐渐减少的趋势,并拟合了临时流量与 C_U 、 D_{50} 之间的关系。王道正等(2016)为了研究颗粒级配对堰塞坝的影响,引入 D_{50} 作为颗粒级配指标,进行了 3 组 D_{50} 为(5.4~9.2 mm)的溃坝实验,得到了随着平均粒径增大,峰值流量变小、溃口发展缓慢、溃决历时变长,渗透系数增大;拟合了平均粒径与渗透系数的函数关系曲线,得出颗粒级配对堰塞坝的溃决特征没有很大的影响。付建康等(2018)进行两组不同的颗粒级配溃坝模型实验,探究其对堰塞坝溃决过程的影响,得

出了颗粒级配不良,坝体堆积不稳,容易发生管涌破坏;级配良好的坝体材料,发生漫顶破坏及坝体底部最先发生位移及位移量最大。管圣功(2108)选定了 4 种典型级配(级配连续、细粒为主、中间缺失,粗颗粒为主)的材料进行大尺寸的堰塞坝模型实验的研究。得出了级配中间缺失发生了管涌现象;粗颗粒及细颗粒为主的堰塞坝溃决时间相对其他级配溃决时间较短。

从上述学者对坝体材料的研究,颗粒的级配影响着堰塞坝的溃坝模式及溃决时长,随着粗颗粒的增加,峰值流量变低,溃决历时变长。但是,没有比较全面地探究级配区间范围如何影响着溃坝的模式、溃决的峰值流量及溃口的发展。

1.2 密实度对溃坝的影响

不同密实度的堰塞坝的存在时间有很大的区别,比如唐家山堰塞坝和银洞子沟滑坡堰塞坝都是似层状结构,堰塞坝的溃口边坡都相对较陡,两者的堰塞坝稳定性较好。因此,有必要单独研究密实度对溃坝的侵蚀性的影响。

邓明枫等(2011)进行两组水槽实验探究松散状态和弱固结状态的堰塞坝的溃口发展特征。得到了弱固结的堰塞坝的峰值流量较小及持续时间长;松散状态的堰塞坝的溃口为宽深型,而弱固结的则为窄深型。因此,我们可以选择将开挖泄流槽的位置设置在较大石块或者密实的坝体部分。为了进一步分析坝体的物质组成对溃坝的影响,邓明枫等(2011)通过设置三基准组、密度组和级配组研究堰塞坝溃坝的 6 个阶段,揭示了坝体密度主要影响颗粒间的剪切作用,溃口宽度随着密度增大变得更窄;坝体的颗粒级配通过孤粒运动影响溃坝的侵蚀效果,级配越粗,溃口趋于呈现“浅宽”类型,形成倒梯形溃口。赵高文等(2018)设计两组密实度不同的工况,探究密实度不同的堰塞坝的漫顶溃决特征,探究得到:密实状态的堰塞坝溯源侵蚀过程比较明显,形成多级侵蚀陡坎,侵蚀曲线的曲率较大;松散状态的堰塞坝的溃口横向上表现为剪切破坏,而密实的堰塞坝表现为溃口边坡为悬空的类型,受到拉张破坏;密实状态的堰塞坝表现为峰值流小,持续时间长,这意味着对堰塞坝进行密实处理,可以有效地防止堰塞坝的溃决。

密实度对溃坝模型的影响较少,密实度较大的堰塞坝峰值流量变小,溃决小,溃口流量持续时间长,溃口发展主要在坝后坡,形成的边坡较陡。因

此,后续的溃坝模型实验应该进行分层压实,这样才能更合理地进行真实堰塞坝的模拟。

1.3 含水率对堰塞坝溃决的影响

含水量主要影响堰塞坝材料的侵蚀性和物理状态。当含水量较低时,坝体材料内部有较大的基质吸力,抗剪强度变大;当含水量较高时,土颗粒之间的结合水之间的作用力减弱,基质吸力变弱,坝体材料的抗剪强度变小。因此含水率是影响堰塞坝溃坝的重要因素。

有关学者较早地对堤坝进行了相关的探讨,Hunt et al. (2005)进行了3个大型土质路堤测试拓宽的速率实验,得到含水量对水坝前的路堤溃坝的展宽速率有较大的影响,并进行相应的拟合方程。同样的Al-Riffa (2014)进行不同含水量下堤坝溃坝的实验,主要讨论堤坝破坏过程中孔隙水压力的影响。

对于堰塞坝的研究有以下学者。Cao et al. (2011a,2011b)通过把含水率转化成压实度,进行28组溃坝模型实验,并没有单独考虑含水率对堰塞坝溃坝的影响。Jiang et al. (2019)在2.06%~4.67%的初始含水率下进行了水槽实验,主要探究不同含水量的堰塞坝的渗透破坏特征及溃坝的过程,并没有单独探究含水率对溃坝过程的影响。之后,蒋先刚等(2019)进行了5种(0.3%~10.3%)初始含水量的漫顶溃坝模型实验,得出了平均侵蚀率、峰值流量随着含水率的增大而增大;溃决历史、残余坝高随着含水率的增大而减少;研究发现,在含水量高于7.8%时,堰塞坝的侵蚀速率显著增加。刘杰等(2019)进行了5种(2.97%~19.59%)含水量的水槽实验,探究出了随着含水量的增加,溃决历时越短,溃坝过程中形成的陡坎越快及溃口宽度越大;当含水量为5.50%时,此时的峰值流量达到最大,对堰塞坝的影响较大。

从以上的文献看出,含水率对于堰塞坝是一个重要的因素,许多学者将其作为影响因素之一进行分析,并没有单独对其进行系统的研究。其中:含水量对峰值流量的影响,前面学者得到了不同的结论,因此,我们要通过相应的实验来探究含水量对堰塞坝影响的一般规律,为堰塞坝快速评估与数值模拟提供一个参数及理论依据。

1.4 沟床及其坡度对堰塞坝溃决的影响

到目前为止,有关学者对底床坡度对堰塞坝溃

决流量演化特征方面的研究尚处于初级阶段。

刘邦晓等(2020a,2020b)进行了7组沟床坡度(7°~13°)的水槽实验,研究得出当沟床坡度大于9°时,主要削弱了漫顶溃坝过程中以下切侵蚀为主、溯源侵蚀为辅的加速侵蚀阶段;溃决历时随着沟床坡度的增大表现出先减少后增大的非线性关系;当坡度低于11°时,沟床坡度对溃坝的影响大于坝前库容,反之坝前库容对溃坝影响变为关键因素。为了进一步探究溃口的变化,刘邦晓等(2020a,2020b)探究得出在坡度为12°时,边坡失稳的规模达到最大,此时失稳次数最少,呈现出随着坡度的增加,溃口失稳的规模先增大后减少,失稳次数则相反,意味着当坡度低于12°时,坡度较库容为主要的溃决因素;坡度的变化,溃口的展宽历程特征大致相似;溃口峰值流量随着沟床坡度的减小逐渐减少。蒋先刚等(2019)进行了7种底床坡度(1°~13°)的堰塞坝溃决的水槽模型试验,得出随着坡度的增加,溃决历时减少,溃口下切及展宽速率呈现非线性的递增规律;峰值流量、溃口的宽深比随着底床坡度的增加表现为先增加后减少的趋势,且以3°为分界点,意味着在坡度为3°以下时,坡度为溃坝的主要因素,当大于3°时,坡度较库容量等其他因素对堰塞坝溃坝的影响较少。赵高文等(2019)考虑到堰塞坝在横向存在高差,进行了横向坡度约为9°的水槽实验,实验得出溃口的顶宽和边坡高度随着溃坝时间基本上同步变化;随着溃坝时间的进行,溃口处的边坡会逐渐变高,导致堰塞坝发生二次滑坡。因此为了更好地模拟真实的溃坝实验,我们后面需要把堰塞坝的横向坡度也作为影响因素考虑。Zhao et al. (2019)得出侧向侵蚀方向的不同,会导致溃坝过程的溃口发展方式、溃决流量的不同;在进行横向高度差较大的溃坝实验时,会出现次生滑坡的现象,但是次生滑坡的速度比较慢,可以被预测到。

从以上的研究发现,堰塞坝横向坡度的不同,会导致溃坝过程的再次坍塌及溃口发展的不同,因此横向坡度也是溃坝的一个影响因素。两位学者研究不同坡度对溃坝模型实验的影响,但是临界沟床坡度对堰塞坝的敏感程度划分不太一致,因此这方面需要学者进行大量的探究,定量地分析总结其规律。

1.5 堰塞坝的入库流量对溃坝的影响

堰塞坝的入库流量决定着堰塞坝溃决的时间及堰塞坝应急处置的措施与方案。上游来水流量可以通过渗流对堰塞坝的坡脚产生一定的破坏。因此,

坝前的入库流量是堰塞坝溃决的重要因素。

付建康等(2018)通过3组蓄水量(0.0296~0.0536 m³)来研究坝后蓄水量对堰塞坝溃坝模型的影响,得出坝体上游水位一定的情况下,蓄水量越大,溃坝时的峰值流量越大,溃决历时也越长,溃口的展宽及下切的速率变大及溃口的横向尺寸也变大。杨阳等(2012)设定4组入库流量(0.6~1.03 L·s⁻¹)验证坝前入库流量 d_0 与 D_{90} 的比值作为溃坝实验水槽指标的可行性,得出此指标很好地揭示了坝体的侵蚀过程—坝前水流与坝体粗颗粒的相互作用。杨阳等(2015)初步考虑到入库流量的影响,进行了入库流量为0.006~0.001 03 m³·s⁻¹的溃坝模型实验,简单的分析得出:随着入库流量的增大,溃坝的峰值到来时间缩短及溃决的洪峰曲线整体变大且更加“尖瘦”,意味着入库流量对堰塞坝溃口的发展有一定的影响。Xu et al. (2013)进行3组堰塞坝上游水流量(0.1~2 L·s⁻¹)的溃坝模型实验,研究发现在较小水流的情况下,堰塞坝只是部分冲刷破坏达到进出水平衡状态,当水流为2 L·s⁻¹时,此时堰塞坝完全溃坝;堰塞坝的坝顶长度随着流量的减少而增大。张健楠等(2014)通过2组水槽实验探究上游流量与溃决流量的关系,得出在初始来水流量较小时,增加入库流量,坝后坡的峰值流量增加比重较少,意味着增大一定的上游流量,对溃坝的峰值流量影响相对于其他因素较小。通过2组水槽实验探究上游流量与溃决流量的关系,得出在初始来水流量较小时,增加入库流量,坝后坡的峰值流量增加比重较少,意味着增大一定的上游流量,对溃坝的峰值流量影响相对于其他因素较小。

从上述学者的研究可以得出:上游来水流量对溃决峰值曲线、溃口发展有一定的影响。虽然有关学者得出进水流量对峰值流量的增加占比很小,这还需要进行多次实验进行验证。

2 梯级堰塞坝溃决特性实验

“5·12”地震引发的堰塞湖,不仅数量多,分布广,而且沿着震区河流呈明显的串珠状分布。但是目前国内外有关堰塞湖的研究工作主要集中在单一堰塞湖的溃决机制及溃决洪水演进方面,对于级联溃坝的模型实验,一般需要进行野外大型实验,操作难度大,串珠状堰塞湖级联溃决的研究较少。

Cao(2011a, 2011b)通过试验和数值分析对比了单坝溃决和两坝连续溃决,并作出结论:与单坝

溃决相比,两坝连溃中下游坝的洪峰出现延迟和放大,但由于试验水槽的坡度过小,没有凸显串珠状堰塞湖级联溃决后洪水峰值流量放大这一最显著的流体力学特征,也没有综合分析溃决流量放大,输沙特征变化以及河流演化三者之间的关系。朱兴华等(2012)考虑到野外考察河床演化规律的局限性,进行堰塞湖级联溃决的野外水槽实验,主要探究串珠状堰塞湖级联溃决的流体力学特征以及对河床演化的影响,结果表明堰塞坝级联溃决放大了洪水的峰值流量及河床的纵断面被显著抬升。Niu et al. (2012)通过设置0.8 L·s⁻¹和3.9 L·s⁻¹的流量,进行级联堰塞坝的溃坝模型实验,探讨在不同的流量作用下级联堰塞坝溃坝的特征,得到:在流量较大时,上游坝和下游坝都是漫顶破坏;在流量较小时,上游的坝体在泄流槽流动,下游坝则发生漫顶破坏。Gordon et al. (2015)为了了解级联溃坝机理及引出泥石流的影响规律,在野外进行级联溃坝模型实验。得到漫顶溃坝是级联溃坝的主要模式;级联溃坝加大水流流速和流量,冲刷的颗粒也随之变大。

由于梯级堰塞坝物理模型实验操作难度较大,因此在进行初探实验时,只是定性地描述堰塞坝溃坝的模型,缺少堰塞坝溃决流量的对比等。

3 堰塞坝处置试验

由于大部分堰塞坝存在的时间较短,现阶段处理堰塞坝的方式主要为开挖泄流槽、爆破拆除,引水泄流隧道等。其中:开挖泄流槽的堰塞坝有:唐家山、红石岩、文家坝、肖家桥、石板桥、老鹰岩堰塞坝等;其中爆破处理的有:竹根顶桥、火石沟、六顶沟堰塞坝等。

陈晓清等(2011a, 2011b),赵万玉等(2011)为了调节堰塞坝的峰值流量,通过在堰塞坝冲刷过程中抛投四面的人工结构体来进行调节。得出随着人工结构体的投入,峰值流量减少了1/3~2/3,残余坝高增高了1/6。为了进一步研究优化泄流槽的措施,又进行了泄流槽自然溃决实验、梯形槽堰塞湖溃决实验、三角形槽堰塞湖溃决实验和复式槽堰塞湖溃决实验,结果表明:人工辅助溃决后,峰值流量减小了7.7%~20.1%;排泄效率由高到低依次为:三角型横断面、复式横断面、梯形横断面;溯源侵蚀由强到弱依次为:复式槽、三角形槽、梯形槽。赵天龙等(2017)通过离心模型试验研究,研究梯形、三角形和复式断面3种泄流槽断面型式的漫顶溃坝模型

实验,分析不同除险断面型式对堰塞坝的泄流过程、总泄流量以及泄流后残留坝体几何尺寸的影响规律。试验结果表明,复式断面泄流槽在初期泄流效率高、峰值流量小、是高效的堰塞坝除险处置方法。Xu et al. (2013)考虑坝体的体积、上游流量、不同断面的泄流槽、坝顶的块石因素,进行堰塞坝溃坝模型实验,实验表明:相比于三角形断面,梯形断面有效地降低了峰值流量。

针对堰塞坝处置的优化溃坝实验,主要是探究泄流槽的形状对泄流的流量的影响,且各个断面的泄流效果不太一致。因此,需要我们加强这方面的评价方法及实验,以及探索出更多处置堰塞坝的措施。

4 讨论

根据国内外研究学者的探究,颗粒级配很大程度上影响着溃坝的模式,级配不良很可能发生管涌破坏,峰值流量随着级配良好及密实度的变大而变大,溃口发展缓慢,溃口一般变得窄深型。因此开挖泄流槽的位置选在密度较大及级配良好的位置。坝体的含水量主要影响坝体材料的侵蚀性及抗剪强度,一般随着含水量的增大,其溃决过程基本相似,平均侵蚀率变大,但是峰值流量如何变化,有关的学者没有得到一致的观点,需要进一步的探究。沟床坡度对溃坝的物理模型实验的影响研究相对较少,何种沟床坡度对堰塞坝的敏感程度大于库容,还没有得到一致的结论。另外溃口变化的形式也没有定论,但是对溃坝模型并没有影响。坝前水位即库容决定着堰塞坝溃决时间及处置的措施,探究得到随着库水位及库容的增加,溃决的峰值流量越大、溃口展宽及下切的速率变大。泄流槽的形状不影响堰塞坝溃坝的模式,得出三角形及复式断面的泄流槽能有效降低峰值流量。

5 研究动向及展望

由于世界各国对堰塞坝的稳定性重视的程度不断提高,学者对堰塞坝溃坝的问题研究不断地深入及获取参数的方法不断地增加。溃决物理模型实验从全面研究堰塞坝溃决的特性及机理,再进一步研究某一溃决因素对堰塞坝的影响,不断地定量进行分析,并成为堰塞坝研究的重点。

学者对于堰塞坝溃坝的物理模型的研究起初聚

焦在基本的溃坝特征,之后的研究逐渐扩大到溃坝的机理、溃坝模式、溃口的发展过程、河床演化、溃坝的某一因素的影响及梯级堰塞坝的溃决等内容。堰塞坝溃坝物理模型研究已经处于一定的水平,尤其在溃决机理和溃口的发展方面研究较为成熟,但是对于某一溃决因素的系统研究较少,比如针对沟床的纵横向坡度及动河床的研究。因此,针对溃坝问题的某种因素,完整准确地进行定量的研究,提出一些拟合公式,为进一步的堰塞坝快速评估及数值模拟提供有力的依据。

5.1 模型实验相似理论及模型比尺

堰塞坝溃坝过程与水力学、土力学,泥沙运动等有关。因此,有关学者设计溃坝相似模型理论不仅需要满足几何相似、重力相似,还需要满足材料的相似。但是由于室内条件尺寸的限制,大部分学者仅满足几何相似及重力相似,并且几何相似也只是在堰塞坝的顺河向和坝体的深度做近似的比例。由于涉及多学科的内容,无法完全满足堰塞坝的材料的相似。为了保持坝体材料方面的相似,大部分学者设置等比例的缩小及级配一致。因此,为了更好地展现室内物理模型溃坝实验的特点,重点探讨坝体材料、内部的结构、水流参数对溃坝的定量影响。

由于尺寸效应及相似理论,溃坝模型实验不仅要满足材料相似、渗透性相似及力学相似,还要模拟河道的特性及梯级堰塞坝的情况。因此,需要进行野外大尺寸的模型实验。

5.2 实验测试手段

现有的溃坝仪器有水尺、流量计、流速仪、孔压计、土压计、吸力计及摄像机等设备,同时,数据的采集逐渐发展到计算机的采集、采用示踪粒子追踪技术对溃决水流的测试及三维激光扫描仪对坝身破坏过程的模拟。尽管溃坝试验测试手段及仪器有了较大进步,但是无法满足精准性的要求,比如孔压计、土压力很难准确地测到数据,因此现有的大部分学者进行溃坝的研究主要还是通过摄像机处理溃坝过程。因此,这方面需要深入地进行研究。

5.3 堰塞坝处置

堰塞坝的应急处置主要进行开挖泄流槽,并有许多成功案例。其中:开挖泄流槽不合理,导致溃口流量较大,对下游产生一定的破坏。对于峰值流量过大的问题,有关的学者进行了相应溃坝模型实验

的初探,也取得了一定的成果。但是研究的内容只是关注于泄流槽的截面形状,没有考虑泄流槽内的坡降及泄流槽薄弱点的防护,如何使得不稳定堰塞坝进行薄弱点的加固处置,达到预期的溃决效果,同时通过加固措施使得相对稳定的堰塞湖变成蓄水库,这方面需要进一步的探究。

参 考 文 献

- Al-Riffai M. 2014. Experimental study of breach mechanics in overtopped noncohesive earthen embankments[D]. Ottawa: Ottawa University.
- Cao Z, Yue Z, Pender G. 2011a. Flood hydraulics due to cascade landslide dam failure[J]. *Journal of Flood Risk Management*, 4(2): 104-114.
- Cao Z, Yue Z, Pender G. 2011b. Landslide dam failure and flood hydraulics. Part I: experimental investigation[J]. *Natural Hazards*, 59(2): 1003-1019.
- Chen J F, Shi Z M, Shi Y B. 2008. Analyses of the stability and earthquake response of a barrier lake dam[J]. *Journal of Engineering Geology*, 16(S1): 222-225.
- Chen K Y, Zang Y Z, Guo Y S, et al. 2010. Case analysis of landslide dam formation by Typhoon Morakot[J]. *Journal of the Taiwan Disaster Prevention Society*, 2(1): 43-50.
- Chen X Q, Zhao W Y, Gao Q, et al. 2011a. Experimental investigation and design of artificial structures controlling dam-break floods[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 46(2): 228-234.
- Chen X Q, Zhao W Y, Gao Q, et al. 2011b. Experimental research on effect of man-made structure controlling dam-break flood[J]. *Journal of Mountain Science*, 29(2): 217-225.
- Chinnarasri C, Tingsanchali T, Wongwiset S W, et al. 2003. Flow patterns and damage of dike overtopping[J]. *International Journal of Sediment Research*, 18(4): 301-309.
- Coleman S E, Andrews D P, Webby M G. 2002. Overtopping breaching of noncohesive homogeneous embankments[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(9): 829-838.
- Cui P, Zhu Y Y, Han Y S, et al. 2009. The 12 May Wenchuan earthquake-induced landslide lakes: distribution and preliminary risk evaluation[J]. *Landslides*, 6(3): 209-223.
- Deng M F, Chen N S, Deng H, et al. 2011. Experimental study on the overtopping outburst process and mechanism of the barrier dam[J]. *Journal of Chengdu University of Technology(Science & Technology Edition)*, 38(3): 359-365.
- Deng M F, Chen N S, Hu G S, et al. 2011. Outburst patterns and discharge process for weakly consolidated and loose barrier dams[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 31(1): 11-14.
- Guan S G. 2018. Influence of landslide dam materials on dam failure modes and interaction mechanism of multi-dam cascading breaching[D]. Shanghai: Tongji University.
- Fu J K, Luo G, Hu X W. 2018. Physical model experiment on overtopping overflow failure of landslide dam[J]. *Journal of Jinlin University (Earth Science Edition)*, 48(1): 203-212.
- Fu W K, Zhang G Q, Bai H L, et al. 2019. A preliminary analysis of the formation mechanism and development tendency of the huge Baige landslide in Jinsha river on October 11, 2018[J]. *Journal of Engineering Geology*, 27(2): 415-425.
- Gordon G D, Cui P, Zhu X H, et al. 2015. A preliminary study of the failure mechanisms of cascading landslide dams[J]. *International Journal of Sediment Research*, 30(3): 223-234.
- Hanson G J, Cook K R, Temple D M. 2002. Research results of large-scale embankment overtopping breach tests[R]. Washington. DC: ASDSO Annual Conference.
- Hunt S L, Hanson G J, Cook K R, et al. 2005. Breach widening observations from earthen embankment tests[J]. *Transactions of the ASAE*, 8(3): 1115-1120.
- Jiang X G, Wu L. 2020. Influence of initial soil moisture on breaching mechanism of natural dam[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 50(1): 185-193.
- Jiang X G, Wu L. 2019. Influence of bed slope on breaching process of natural dam[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 38(S1): 3008-3014.
- Jiang X, Wei Y, Wu L, et al. 2019. Laboratory experiments on failure characteristics of non-cohesive sediment natural dam in progressive failure mode[J]. *Environmental Earth Sciences*, 78(17): 538.
- Li Y, Li J. 2009. Review of experimental study on dam-break[J]. *Advances in Water Science*, 20(2): 304-310.
- Liu J, Yan T, Zhou Z X, et al. 2019. Experimental investigation of landslide dam failure influenced by initial moisture content and manual intervention[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Sciences)*, 38(3): 60-67.
- Liu N, Cheng Z L, Cui P, et al. 2013. Dammed lake and risk management[M]. Beijing: Science Press: 83-88.
- Liu X B, Zhu X H, Guo J, et al. 2020. Experiments research on breach broadening process of landslide dam under different channel bed slope[J/OL]. *Journal of Engineering Geology*, <http://kns.cnki.net/kcmsdetail/11.3249.P.20200509.1521.015.html>.
- Liu X B, Zhu X H, Guo J, et al. 2020. Experiments research on longitudinal breaching of barrier lake dam under different channel bed slope[J/OL]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, <http://kns.cnki.net/kcmsdetail/42.1171.TV.20200103.1409.024.html>.
- Morris M W, Fabbri K, Brelen H. 2005. Investigation of extreme flood processes and uncertainty[R]. Brussels: The European Commission.
- Niu Z P, Xu W L, Lin W, et al. 2012. Experimental investigation of cascade landslide dam[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 24(3): 430-441.
- Niu Z P, Chen K T, Zhang X H, et al. 2019. Review of relevant characteristics of landslide dams and dam-break experimental studies[J]. *Journal of Southwest Minzu University(Natural Science Edition)*, 45(6): 646-653.
- Peng M, Zhang L M. 2012. Breaching parameters of landslide dams[J]. *Landslides*, 9(1): 13-31.

- Rozov A L. 2003. Modeling of washout of dams[J]. Journal of Hydraulic Research,41(6): 565-577.
- Schmocker L, Hager W. 2009. Modelling dike breaching due to overtopping[J]. Journal of Hydraulic Research,47(5): 585-597.
- Visser P J. 1998. Breach growth in sand-dikes[D]. Delf: Delf University of technology.
- Wang D Z, Chen X Q, Luo Z G, et al. 2016. Experimental research on breaking of barrier lake dam under different grading conditions[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engine,36(5): 827-833.
- Wang G Q, Wang Y Q, Liu L, et al. 2015. Reviewed on barrier dam and simulation on dam breach[J]. Yellow River,37(9): 1-7.
- Xie R Z. 1993. Dam break hydraulics[M]. Shandong: Shandong Science and Technology Press.
- Xu F G, Yang X G, Zhou J W, et al. 2013. Experimental research on the dam-break mechanisms of the Jiadanwan landslide dam triggered by the Wenchuan earthquake in China[J]. The Scientific World Journal, 2013(6): 272363.
- Xu Q, Zheng G, Li W L, et al. 2018. Study on successive landslide damming events of Jinsha River in Baige Village on October 11 and November 3, 2018[J]. Journal of Engineering Geology, 26(6): 1534-1551.
- Yang Y, Cao S Y. 2012. Experimental study on breach growth mechanisms of natural barrier dams[J]. Journal of Hydraulic Engineering,43(2): 60-67.
- Yang Y, Cao S Y. 2015. Preliminary study on similarity criteria of the flume experiment on the breach process of the landslide dams by overtopping[J]. Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition), 47(2): 1-7.
- Zhang D W, Huang J C, He X Y, 2011. Experimental study on overtopping breaching of noncohesive homogeneous embankment dams[J]. Advances in Water Science,22(2): 222-228.
- Zhang J N, Yu B, Zhang H H. 2014. Experimental study on the character and mechanism of dam-break[J]. Yellow River,36(10): 48-51.
- Zhang J Y, Li Y, Xuan G X, et al. 2009. Experimental study on overtop failure of homogeneous earth dams with different viscosities[J]. Scientia Sinica(Technologica),39(11): 1881-1886.
- Zhang J, Cao S Y, Yang F G, et al. 2010. Experimental study on outlet and scour of blocked dam[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition),42(5): 191-196.
- Zhang L, Peng M, Chang D, et al. 2016. Dam failure mechanisms and risk assessment || vulnerability to dam breaching floods[M]. Hong Kong: John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd.
- Zhao G W, Jiang Y J, Qiao J P, et al. 2019. Numerical and experimental study on the formation mode of a landslide dam and its influence on dam breaching[J]. Bulletin of Engineering Geology & the Environment,78(4): 2519-2533.
- Zhao G W, Jiang Y J, Qiao J P, et al. 2018. Experimental investigation on overtopping failure of landslide dams with different conditions of compactness[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,37(6): 1496-1505.
- Zhao G W, Jiang Y J, Yang Z J, et al. 2019. Evolutional characteristics of landslide dams under the combination of unidirectional lateral-erosion and undercutting-erosion[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,38(7): 1385-1395.
- Zhao T L, Chen S S, Fu C J, et al. 2017. Centrifugal model tests on section form of drainage channel of barrier dams[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,39(10): 1943-1948.
- Zhao W Y, Chen X Q, Gao Q, et al. 2011. Experimental study of dam-break of earthquake barrier lake with different cross sections of drainage channel[J]. Journal of Sediment Research, (4): 29-37.
- Zhou S F. 2009. Earth dam-break digital simulation model and study of dam-break flood flow[D]. Guangxi: Guangxi University.
- Zhu X H, Cui P, Chen H Y, et al. 2012. Effects of cascade failure of dammed lakes on the evolution of rivers in wenchuan earthquake region[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition),44(4): 64-69.
- 陈建峰,石振明,施裕兵. 2008. 堰塞湖坝体稳定性及地震响应分析[J]. 工程地质学报,16(S1): 222-225.
- 陈晓清,赵王玉,高全,等. 2011a. 人工结构体控制堰塞湖溃决洪峰的试验与设计[J]. 西南交通大学学报,46(2): 228-234.
- 陈晓清,赵王玉,高全,等.2011b. 堰塞湖溃决人工结构体滞洪效果实验研究[J]. 山地学报,29(2): 217-225.
- 陈昆廷,臧运忠,郭玉树,等. 2010. 莫拉克台风引发堰塞湖之案例分析[J]. 中华防灾学刊,2(1): 43-50.
- 邓明枫,陈宁生,邓虎,等. 2011. 堰塞坝漫顶溃决过程与机理试验研究[J]. 成都理工大学学报(自然科学版),38(3): 359-365.
- 邓明枫,陈宁生,胡桂胜,等. 2011. 松散及弱固结堰塞体溃坝形式与流量过程[J]. 水利水电科技进展,31(1): 11-14.
- 冯文凯,张国强,白慧林,等. 2019. 金沙江“10·11”白格特大型滑坡形成机制及发展趋势初步分析[J]. 工程地质学报,27(2): 415-425.
- 付建康,罗刚,胡卸文. 2018. 滑坡堰塞坝越顶溢流破坏的物理模型实验[J]. 吉林大学学报(地球科学版),48(1): 203-212.
- 管圣功. 2018. 坝体材料特性对堰塞坝溃决模式的影响及流域内多坝溃决的相互作用机理研究[D]. 上海:同济大学.
- 蒋先刚,吴雷. 2019. 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,38(S1): 3008-3014.
- 蒋先刚,吴雷. 2020. 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),50(1): 185-193.
- 李云,李君. 2009. 溃坝模型试验研究综述[J]. 水科学进展,20(2): 304-310.
- 刘邦晓,朱兴华,郭剑,等. 2020. 不同沟床坡度堰塞坝溃口下切过程试验研究[J/OL]. 长江科学院院报, <http://kns.cnki.net/kcmsdetail/42.1171.TV.20200103.1409.024.html>.
- 刘邦晓,朱兴华,郭剑,等. 2020. 不同沟床坡度堰塞坝溃口展宽历程试验研究[J/OL]. 工程地质学报, <http://kns.cnki.net/kcmsdetail/11.3249.P.20200509.1521.015.html>.
- 刘杰,颜婷,周传兴,等. 2019. 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),38(3): 60-67.
- 刘宁,程尊兰,崔鹏,等. 2013. 堰塞湖及其风险控制[M]. 北京:科学出版社: 83-88.
- 牛志攀,陈昆廷,张新华,等. 2019. 滑坡堰塞坝坝体溃决机理与溃决

- 实验研究综述[J]. 西南民族大学学报(自然科学版),45(6): 646-653.
- 王道正,陈晓清,罗志刚,等. 2016. 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,36(5): 827-833.
- 王光谦,王永强,刘磊,等. 2015. 堰塞坝及其溃决模拟研究评述[J]. 人民黄河,37(9): 1-7.
- 谢任之. 1993. 溃坝水力学[M]. 山东:山东科学技术出版社.
- 许强,郑光,李为乐,等. 2018. 2018年10月和11月金沙江白格两次滑坡—堰塞堵江事件分析研究[J]. 工程地质学报,26(6): 1534-1551.
- 杨阳,曹叔尤. 2015. 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),47(2): 1-7.
- 杨阳,曹叔尤. 2012. 堰塞坝溃决机理试验[J]. 水利学报,43(2): 60-67.
- 张建云,李云,宣国祥,等. 2009. 不同黏性均质土坝漫顶溃决实体试验研究[J]. 中国科学(技术科学),39(11): 1881-1886.
- 张健楠,余斌,张惠惠. 2014. 堰塞坝溃决特征和机理的试验研究[J]. 人民黄河,36(10): 48-51.
- 张婧,曹叔尤,杨奉广,等. 2010. 堰塞坝泄流冲刷试验研究[J]. 四川大学学报(工程科学版),42(5): 191-196.
- 赵高文,姜元俊,乔建平,等. 2018. 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,37(6): 1496-1505.
- 赵高文,姜元俊,杨宗信,等. 2019. 单向侧蚀与下蚀共同作用下堰塞坝的演化特征[J]. 岩石力学与工程学报,38(7): 1385-1395.
- 赵天龙,陈生水,付长静,等. 2017. 堰塞坝泄流槽断面型式离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报,39(10): 1943-1948.
- 赵万玉,陈晓清,高全,等. 2011. 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,(4): 29-37.
- 朱兴华,崔鹏,陈华勇,等. 2012. 串珠状堰塞湖级联溃决对汶川震区河流演化的影响[J]. 四川大学学报(工程科学版),44(4): 64-69.
- 邹双凤. 2009. 土坝溃坝数值模型和溃坝洪水演进研究[D]. 广西:广西大学.