

DOI: 10.11779/CJGE2023S10029

# 堰塞坝漫顶溃决离心模型试验研究

张露澄<sup>1</sup>, 钟启明<sup>\*1,2</sup>, 杨蒙<sup>1</sup>, 彭铭<sup>3</sup>, 刘嘉欣<sup>4</sup>

(1. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏南京 210024; 2. 水利部水库大坝安全重点实验室, 江苏南京 210024;  
3. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 4. 维也纳自然资源与生命科学大学岩土工程研究所, 维也纳 1180)

**摘要:** 基于南京水利科学研究院 400g·t 漏坝离心模型试验系统, 利用其高速旋转产生的超重力场的“时空放大”效应, 开展离心模型试验研究了堰塞坝漫顶溃决时的溃口演化规律和溃决机理。首次通过离心模型试验研究了坝高、下游坡比、坝料级配对堰塞坝漫顶溃坝过程的影响。试验结果表明: 堰塞坝漫顶溃坝过程可划分为表层冲刷、溯源冲刷、沿程侵蚀和溃口稳定 4 个阶段; 溃口峰值流量对坝高最为敏感, 平均粒径次之; 达峰时间主要受下游坡比影响, 溃坝后相对残余坝高主要受平均粒径影响。

**关键词:** 堰塞坝; 漫顶; 溃坝过程; 溃决机理; 离心模型试验

中图分类号: TV698 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2023)S1-0197-04

**作者简介:** 张露澄(1995—), 男, 博士研究生, 主要从事土石坝溃坝灾害风险评估方面的研究工作。E-mail: zhanglc@nhri.cn。

## Centrifugal model tests on overtopping-induced breaching of landslide dams

ZHANG Lucheng<sup>1</sup>, ZHONG Qiming<sup>1, 2</sup>, YANG Meng<sup>1</sup>, PENG Ming<sup>3</sup>, LIU Jiaxin<sup>4</sup>

(1. Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China; 2. Key Laboratory of Reservoir and Dam Safety, Ministry of Water Resources, Nanjing 210024, China; 3. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 4. Institute of Geotechnical Engineering, University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna 1180, Austria)

**Abstract:** Based on the 400 g·t centrifugal model test system for dam breaching of Nanjing Hydraulic Research Institute, the centrifugal model tests are carried out to study the breach evolution law and breach mechanism of overtopping-induced breaching of landslide dams by using the “time-space amplification” effect of supergravity field generated by high-speed rotation. The effects of dam height, downstream slope ratio and dam material gradation on the overtopping failure process of landslide dams are investigated by the centrifugal model tests for the first time. The test results show that the breach process of a landslide dam can be divided into four stages, which are surface erosion, retrogressive erosion, erosion along the breach channel, and breach stabilization. Moreover, the peak breach flow is most sensitive to the dam height, followed by the mean particle size. The time to the peak is mainly affected by the downstream slope ratio, and the relative residual dam height after breaching is primarily susceptible to the mean particle size.

**Key words:** landslide dam; overtopping; breach process; breach mechanism; centrifugal model test

## 0 引言

堰塞坝是指在一定的地质与地貌条件下, 由于地震或降雨等引起的山崩、滑坡、泥石流等阻塞山谷、河道所形成的堆积体<sup>[1]</sup>。作为自然过程的产物, 堰塞坝呈现出级配宽泛、形状不规则、结构复杂等特点<sup>[2]</sup>。堰塞坝在世界范围内广泛存在, 特别是近年来极端天气和地质灾害频发, 导致堰塞坝数量显著增多<sup>[3-4]</sup>。与人工填筑坝不同, 堰塞坝是由土壤和岩石在自然不稳定状态下混合而成, 缺少溢洪道或泄流槽<sup>[2]</sup>。因此, 一旦上游持续来流, 堰塞坝的溃决风险远高于人工填筑坝。Shen 等<sup>[5]</sup>对 352 个具有寿命信息的堰塞坝进行

统计分析, 发现生存时间小于 1 d 的占 29.8%, 小于 1 个月的占 68.2%, 小于 1 a 的占 84.4%。

漫顶和渗透破坏是堰塞坝最常见的溃坝模式<sup>[4]</sup>, 94%的堰塞坝因漫顶而溃坝, 5%因渗透破坏而溃坝, 1%因坝坡失稳而溃坝<sup>[2]</sup>。因此, 深入研究堰塞坝漫顶

基金项目: 国家自然科学基金区域创新发展联合基金重点项目(U22A20602); 国家自然科学基金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项目(Y320005); 水利部土石坝破坏机理与防控技术重点实验室开放基金项目(YK321001)

收稿日期: 2023-07-06

\*通信作者 (E-mail: qmzhong@nhri.cn)

溃坝过程和溃决机理，对科学高效应急处置，最大限度减少其灾害损失至关重要。

堰塞坝漫顶溃决是一个涉及水土耦合和结构破坏的复杂过程。物理模型试验是研究其漫顶溃坝过程和溃决机理的常用手段，近年来，学者们开展了一系列模型试验，包括大尺度模型试验（坝高>1 m）<sup>[6]</sup>和小尺度模型试验（坝高<1 m）<sup>[7-8]</sup>。小尺度试验模型与原型应力水平差别显著，试验结果往往与实际存在差异，不同学者得到的结论也不一致。虽然大尺度试验的结果更接近原型坝，但试验成本高、周期长、风险难以控制。在高速旋转条件下，土工离心机产生的超重力场具有“时空放大”效应，可以在小尺度模型中产生原型级别的有效应力，同时满足坝体材料、水动力条件等相似准则。因此，离心模型试验可以用于研究由宽级配坝料组成的堰塞坝的漫顶溃决，它能够以较低成本在短时间内再现其漫顶溃坝过程，这对于揭示其漫顶溃决机理和溃坝过程具有重要意义和价值。

本文利用离心模型试验研究了堰塞坝漫顶溃决问题，揭示了溃决机理、溃口演化规律及溃口流量过程，首次通过离心模型试验研究了坝高、下游坡比和坝料级配对堰塞坝漫顶溃坝过程的影响，为堰塞坝漫顶溃坝过程和溃决机理的认知提供了科学参考。

## 1 溃坝离心模型试验系统

以400g·t土工离心机为基础，南京水利科学研究院研制了溃坝离心模型试验系统<sup>[9]</sup>，主要由大流量水流控制系统、专用模型箱、数据采集系统和图像记录装置组成（如图1）。

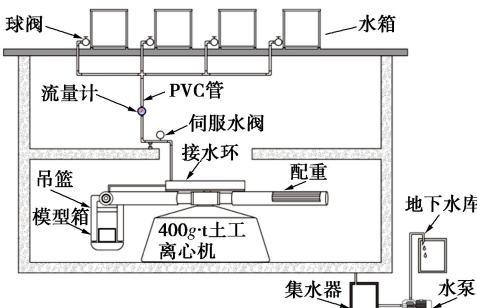


图1 溃坝离心模型试验系统

Fig. 1 Centrifugal model test system for dam breaching

### 1.1 大流量水流控制系统

以与离心机同轴旋转的环形接水环为核心，试验用水由屋顶水箱提供，据试验前设定的供水流量过程，由伺服水阀流量控制系统精确控制上游来水条件，入水口与接水环无硬件接触，输水流量也不受接触限制，实现了从1g重力场到Ng重力场的水流转化。该系统可持续提供足够的溃坝水流，最大流量达50 L/s。

### 1.2 专用模型箱

有效尺寸为1.2 m×0.4 m×0.8 m（长×宽×高）

（如图2(a)），在模型箱下游端嵌入薄壁矩形量水堰，并安装2个孔压传感器（如图2(b)），输出信号为电压信号，可转换为水深，以获得准确的溃口流量过程。溃口流量可根据水深采用下式计算：

$$Q = m_0 B_w \sqrt{2Ngh} t^{1.5} \quad (1)$$

式中：Q为溃口流量；m<sub>0</sub>为流量系数；B<sub>w</sub>为量水堰宽度；N<sub>g</sub>为离心机加速度；h为水深；t为时间。



图2 模型箱及孔压传感器布置

Fig. 2 Model box and arrangement of pore pressure sensors

### 1.3 数据采集系统和图像记录装置

数据采集系统由转臂上的数据采集模块和地面上的工控机组成，孔压传感器与数据采集系统相连。图像记录装置为分别位于模型箱顶部和侧面的相机。

### 1.4 相似准则

溃坝是典型的水土耦合过程，在使用离心机进行溃坝探究时，需建立应力和溃坝水流的相似准则，推导方法详见文献[9]，常用物理量的相似准则见表1。

表1 常用物理量相似准则

Table 1 Similarity criteria of common physical quantities

物理量	加速度	长度	面积	体积	应力
相似比(模型/原型)	N	1/N	1/N <sup>2</sup>	1/N <sup>3</sup>	1
物理量	孔隙比	密度	质量	流量	时间
相似比(模型/原型)	1	1	1/N <sup>3</sup>	1/N <sup>2</sup>	1/N

## 2 试验设计与过程

选择坝高、下游坡比、坝料级配3个影响因素进行试验设计，利用溃坝离心模型试验系统进行4种工况下堰塞坝漫顶溃决试验，探究溃口形态演化规律、溃口流量过程，以及不同影响因素对漫顶溃坝过程的影响，揭示堰塞坝漫顶溃决机理。

### 2.1 试验设计

基于模型箱尺寸、供水条件及试验用坝料，设定了各工况试验参数（见表2）。以唐家山堰塞坝现场采样的平均级配为原型级配，试验坝料最大粒径设为40 mm，用等量替代法得到模型级配（见图3）。

表2 4种工况参数设定

Table 2 Parameter settings of four conditions

工况	坝高/mm	下游坡比	d <sub>50</sub> /mm
1	250	1:3	5
2	350	1:3	5
3	250	1:5	5
4	250	1:3	1

注：d<sub>50</sub>为级配平均粒径。

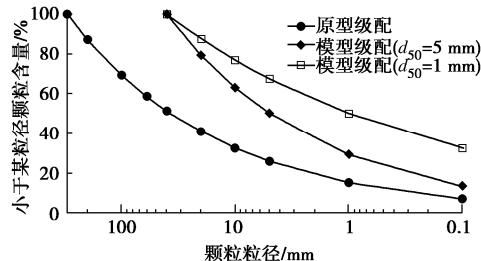


图 3 试验坝料级配曲线

Fig. 3 Grain-size distribution curves of dam materials

坝料经晾晒、筛分后分为 5 个粒径组, 分别为 40~20, 20~10, 10~5, 5~1, <1 mm。土料相对质量密度为 2.75, 试样孔隙率设为 28%, 对应干密度为 1.98 g/cm<sup>3</sup>, 含水率设为 5%。离心加速度设置为 50g。为了便于观察溃口下切和下游坡冲蚀情况, 在模型箱钢化玻璃一侧开设初始溃口, 初始溃口形状为梯形, 顶宽 70 mm, 底宽 30 mm, 高 40 mm。

## 2.2 试验过程

各工况试验按照如下步骤依次进行: ①土样准备; ②模型坝制作; ③离心机配重; ④孔压传感器与相机安装; ⑤溃坝试验; ⑥试验数据测量、记录与保存; ⑦机室清理。

## 3 试验结果及分析

以工况 4 为例分析堰塞坝漫顶溃坝过程与溃决机理, 并基于各工况试验结果, 分别比较坝高、下游坡比和坝料级配对溃坝过程的影响。下文中试验结果均已按照相似准则换算为原型坝的物理量。

### 3.1 溃口演化规律

两台相机记录了工况 4 溃坝过程的视频, 通过对溃口形态和流量演化过程中的突变进行分析, 将堰塞坝漫顶溃决的过程分为 4 个阶段。

阶段 1: 表层冲刷。溃坝初期, 漫顶水流从溃口溢出, 对下游坡进行冲刷。坝体表面细颗粒被水流带走, 形成高浓度挟砂水流, 此阶段溃口变化不明显。

阶段 2: 溯源冲刷。由于下游坡脚处水流流速更大, 初始冲坑在此形成, 在水动力作用下冲坑逐渐向上游发展直至坝顶, 此阶段下游坝坡明显变缓。

阶段 3: 沿程侵蚀。坝顶高程在溯源冲刷结束后突然下降, 溃口水动力条件突然增加, 溃口迅速下切展宽, 并伴随溃口边坡的失稳, 溃口流量出现峰值。

阶段 4: 溃口稳定。随着上游水位下降, 水流冲蚀能力减弱。粗颗粒滞留在下游边坡, 导致边坡粗化, 直至溃口不再发展, 溃口流量趋于稳定。

定义漫顶水流从溃口溢出时为初始时刻, 各阶段选取典型坝体图像(如图 4), 绘制了溃口处坝体纵剖面图(如图 5(a))。

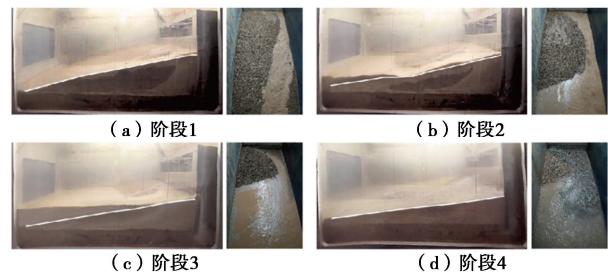


图 4 溃坝各阶段典型坝体图像

Fig. 4 Typical dam images of each stage of dam breaching

### 3.2 溃口流量过程

试验前测定流量系数  $m_0=0.278$ ,  $h(t)$  可由孔压传感器读数得到, 根据式(1)计算得到溃口流量过程。

图 5(b) 描绘了工况 4 原型坝的溃口流量过程。首先, 在溃坝开始的最初几分钟, 流量缓慢增加, 对应阶段 1。其次, 流量迅速增大, 在  $t=9.6\text{ min}$  时达到  $14.0\text{ m}^3/\text{s}$ , 对应阶段 2。随后, 流量增加的速率略有减慢, 在  $t=13.4\text{ min}$  时达到峰值流量  $17.8\text{ m}^3/\text{s}$ , 并迅速下降, 对应阶段 3。最后, 当  $t=38.3\text{ min}$  时, 流量逐渐趋于稳定, 溃口出流量等于入流量, 对应阶段 4。

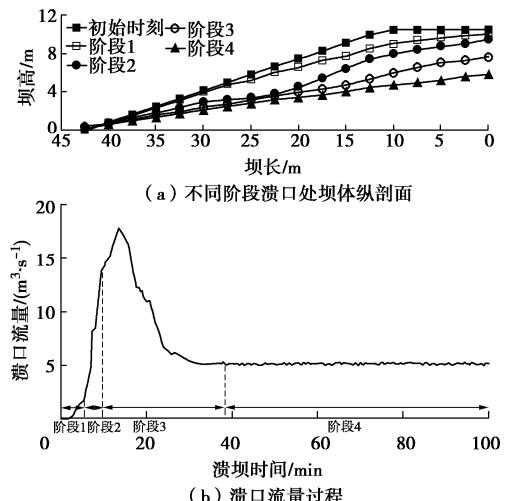


图 5 工况 4 溃口演化过程和溃口流量过程

Fig. 5 Breach evolution process and breach flow discharge process of Condition 4

### 3.3 不同因素对溃坝过程影响

以工况 1 为对照组, 通过改变坝高、下游坡比和坝料级配, 研究不同因素对堰塞坝漫顶溃坝过程的影响。选取峰值流量、达峰时间和溃坝后的相对残余坝高(残余坝高与初始坝高的比值)3 个溃坝参数进行比较分析(见表 3)。

可以看出, 各因素对溃坝参数的影响规律如下: 当坝高增加或坝料平均粒径减小时, 峰值流量显著增大, 达峰时间提前, 相对残余坝高减小; 当下游坡比减小时, 峰值流量减小, 达峰时间明显推迟, 相对残余坝高增大。溃口峰值流量对坝高最为敏感, 平均粒径次之, 达峰时间对下游坡比最为敏感, 相对残余坝高对平均粒径最为敏感。

表 3-4 种工况溃坝参数对比

Table 3 Comparison of dam breach parameters of four conditions

工况	影响因素	峰值流量/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	变化幅度/%	达峰时间/min	变化幅度/%	相对残余坝高/%	变化幅度/%
1	—	11.4		18.9		66.4	
2	坝高	18.6	+62.6	16.1	-14.8	55.4	-16.5
3	坡比	9.5	-16.6	24.5	+30.0	75.2	+13.3
4	级配	17.8	+56.0	13.4	-29.0	47.2	-28.9

注：变化幅度表示与工况 1 相比，各溃坝参数的增量。

下面从坝料冲蚀的角度对上述影响在机理层面上进行分析，坝料的冲蚀率可采用下式计算<sup>[10]</sup>：

$$E = k_d(\tau_b - \tau_c) \quad (2)$$

式中： $E$  为冲蚀率； $k_d$  为冲蚀系数； $\tau_b$  为水流剪应力； $\tau_c$  为坝料临界起动剪应力。

对比工况 1 和 2，当堰塞坝坝高增加时，漫顶水流势能增加，水动力条件增强， $\tau_b$  增大，对下游坡冲蚀作用更强，故  $E$  增大，从而加快了溃坝进程与溃口发展。因此峰值流量增加，峰值时间提前，相对残余坝高减小。

对比工况 1 和 3，当堰塞坝下游坡比减小时，坝料颗粒自重在坝坡方向的分量减小，坝体自身更加稳定， $\tau_c$  增大，漫顶水流重力势能释放转换为动能的过程减缓， $\tau_b$  减小，故  $E$  减小，从而抑制了溃坝进程与溃口发展。因此峰值流量减小，峰值时间延后，相对残余坝高增加。

对比工况 1 和 4，在相同水动力条件下，当堰塞坝平均粒径减小，即坝体材料变细时， $\tau_c$  减小，坝体更容易被冲蚀，故  $E$  增大，从而加快了溃坝进程与溃口发展。因此峰值流量增加，峰值时间提前，相对残余坝高减小。

## 4 结 论

(1) 基于堰塞坝漫顶溃坝过程中的溃口形态和流量演化过程的突变特征，可将溃坝过程划分为 4 个阶段：表层冲刷、溯源冲刷、沿程侵蚀和溃口稳定，并对每个阶段的出现时刻和发展过程进行了界定。

(2) 坝高、下游坡比和坝料级配对堰塞坝漫顶溃坝过程影响较大。当坝高增加或坝料平均粒径减小时，峰值流量增大，达峰时间提前，相对残余坝高减小；当下游坡比减小时，峰值流量减小，达峰时间推迟，相对残余坝高增大。

(3) 溃口峰值流量主要受坝高影响，其次是平均粒径；达峰时间对下游坡比最为敏感，相对残余坝高主要受平均粒径影响。

## 参 考 文 献：

- [1] 钟启明, 陈生水, 王琳. 堰塞湖致灾风险评估技术及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2021. (ZHONG Qiming, CHEN Shengshui, WANG Lin. Risk Assessment Technology and Application of Dammed Lake Disaster[M]. Beijing: Science Press, 2021. (in Chinese))
- [2] 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.
- [3] MEI S Y, CHEN S S, ZHONG Q M, et al. Effects of grain size distribution on landslide dam breaching—insights from recent cases in China[J]. Frontiers in Earth Science, 2021, 9: 658578.
- [4] ZHENG H C, SHI Z M, SHEN D Y, et al. Recent advances in stability and failure mechanisms of landslide dams[J]. Frontiers in Earth Science, 2021, 9: 659935.
- [5] SHEN D Y, SHI Z M, PENG M, et al. Longevity analysis of landslide dams[J]. Landslides, 2020, 17(8): 1797-1821.
- [6] ZHOU G G D, LI S, LU X Q, et al. Large-scale landslide dam breach experiments: Overtopping and “overtopping and seepage” failures[J]. Engineering Geology, 2022, 304: 106680.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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 Shengshui, ZHONG Qiming. Numerical Models for Earth-Rock Dam Breaching and Their Applications[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2019. (in Chinese))
- [10] WAN C F, FELL R. Investigation of rate of erosion of soils in embankment dams[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, 130(4): 373-380.

(编校: 孙振远)