

DOI: 10.11779/CJGE20230291

沥青混凝土心墙坝漫顶溃坝试验与溃坝过程数值模拟

杨 蒙¹, 钟启明^{*1,2}, 林 忠³, 李 宇^{1,4}, 卢洪宁^{1,4}

(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. 南京工程学院计算机工程学院, 江苏 南京 211167; 4. 河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210024)

摘 要: 基于中国新疆射月沟水库溃坝案例资料, 在水槽冲蚀试验系统进行了沥青混凝土心墙坝漫顶溃坝试验, 直观展现了坝壳料冲蚀与心墙折断过程, 发现了抗冲蚀能力强的沥青混凝土心墙对溃坝过程的重要影响。将沥青混凝土心墙坝的漫顶溃坝过程分为 3 个阶段: 坝壳料溯源冲蚀至沥青混凝土心墙裸露; 心墙第一次折断, 溃口流量迅速增大并出现峰值; 心墙发生多次折断直至溃口稳定。在试验成果的基础上建立了模拟溃口流量和溃口形态演化的沥青混凝土心墙坝漫顶溃坝过程数学模型, 模型的特色在于通过冲蚀公式模拟沥青混凝土心墙的裸露长度, 采用力矩平衡法计算裸露心墙的折断时刻、折断长度和折断次数, 从而合理反映了沥青混凝土心墙坝漫顶溃坝时坝壳料与心墙的耦合作用机制。采用建立的数学模型对射月沟溃坝过程进行了反演分析, 计算结果表明重要溃坝参数与实测值误差均在 $\pm 25\%$ 以内, 较好地反映了溃坝过程, 研究成果可为沥青混凝土心墙坝漫顶溃坝过程模拟提供借鉴。

关键词: 射月沟水库; 沥青混凝土心墙坝; 溃坝过程; 模型试验; 数学模型

中图分类号: TV698

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2024)07-1534-07

作者简介: 杨 蒙(1996—), 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: mengyang@nhri.cn。

Model tests and numerical simulation of overtopping-induced breach process of asphalt concrete core dams

YANG Meng¹, ZHONG Qiming^{1,2}, LIN Zhong³, LI Yu^{1,4}, LU Hongning^{1,4}

(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. School of Computer Engineering, Nanjing Institute of

Technology, Nanjing, 211167, China; 4. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on the dam breach case data of Sheyuegou Reservoir in Xinjiang Autonomous Region of China, the model tests on overtopping-induced breach of asphalt concrete core dams are conducted in the flume erosion model test system, and the process of erosion of dam shell materials and bending of core walls is visually demonstrated. It is found that the asphalt concrete core with strong erosion resistance has important influences on dam breach process. The breach process of asphalt concrete core dams due to overtopping can be divided into three stages: retrogressive erosion of dam shell materials, the first fracture of asphalt concrete core until the occurrence of the peak flows, occurrence of multiple fractures of core wall until the stabilization of the breach morphology. Based on the breach model test results, a mathematical model is developed to simulate the breach flow discharge and the breach morphology evolution of asphalt concrete core dams due to overtopping. The highlights of the model are the simulation of the exposed length of asphalt concrete core by soil erosion formula, and the calculation of breaking time, breaking length, and number of breaking time of the exposed core wall by the moment balance method. Therefore, the coupling mechanism between dam shell materials and core wall of asphalt concrete core dams can be reflected reasonably during dam breaching. The mathematical model is used to conduct back analysis of the dam breach process of Sheyuegou Reservoir, and the calculated results show that the relative errors of important breaching parameters are within $\pm 25\%$, which gives a good performance in dam breach modeling. The research results can provide reference for simulation of breach process of overtopping-induced asphalt concrete core dams.

Key words: Sheyuegou Reservoir; asphalt concrete core dam; breach process; model test; mathematical model

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFC3005501); 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)

收稿日期: 2023-04-04

***通信作者** (E-mail: qmzhong@nhri.cn)

0 引 言

据《2020年全国水利发展统计公报》统计^[1],截至2020年底,中国已建成各类水库大坝98566座,其中91.8%是土石坝。沥青混凝土心墙坝以其防渗性能突出,心墙抗变形和抗震性能优越且具有一定的塑性和自愈能力而逐渐得到工程界的青睐,对于缺乏黏土材料的中国西北地区而言,是一种优良的替代坝型^[2]。目前,许多沥青混凝土心墙坝正在建设或规划中,其中不乏百米级的高坝^[3]。国内外针对沥青混凝土心墙开展了诸多研究,对于不同配合比沥青混凝土心墙乃至不同筑坝模式对坝体物理力学特性影响已有了丰富的经验^[4],在正常受拉或弯曲条件下,沥青混凝土心墙渗透性不会有明显的改变^[5],但在长期的服役过程中会出现一定程度的退化^[6]。

由于近年来的气候变化,中国北部和西北部干旱地区极端降雨事件呈增加态势。极端暴雨导致干旱地区径流量激增,入库水量大于设计标准,从而带来溃坝的风险。2000年1月至2022年12月,新疆和内蒙古自治区由于极端暴雨分别引起9起和6起溃坝事故。2018年7月31日,位于新疆维吾尔自治区哈密市的射月沟水库因暴雨而发生坝顶溢流溃坝,造成20人死亡、8人失踪以及巨大的经济损失^[7]。

对于土石坝(均质土坝、黏土心墙坝、混凝土面板堆石坝)溃坝机理和数值模拟,国内外学者们进行了一系列不同尺度的物理模型试验,提出了相关的溃坝模型^[8],但关于沥青混凝土心墙坝的溃坝模型试验和数值模拟方法尚未见报道。由于沥青心墙与黏土心墙不同的物理力学特性,有必要针对沥青混凝土心墙坝的漫顶溃决机理进行深入研究,揭示沥青混凝土心墙坝的破坏规律及过程,建立溃坝数学模型,为科学评估该类大坝漫顶溃坝洪水风险提供理论和技术支持。

本文以新疆射月沟溃坝案例为原型,首先利用水槽冲蚀试验系统开展溃坝模型试验,明晰沥青混凝土心墙坝的漫顶溃坝过程;在此基础上建立可考虑心墙破坏过程、溃口形态变化和溃决洪水流量过程的数学模型,并采用射月沟溃坝案例验证模型的合理性。

1 射月沟水库溃坝事件调研

射月沟水库大坝为沥青混凝土心墙坝,心墙共有3层,每层厚度为40 cm,位于水库上游;大坝上、下游坡比(垂直/水平)分别为1:2.25和1:2,坝顶高程为1496.65 m,最大坝高41.15 m,坝顶长403 m,宽6 m;坝料最大粒径为300 mm,粒径小于5 mm和0.1 mm的坝料分别占30%~40%和5%左右;水库总库容为 $6.78 \times 10^6 \text{ m}^3$,正常蓄水位为1492.53 m,设计

洪水位为1494.57 m,校核洪水位为1496.43 m。

2018年7月31日1:00至13:00,射月沟流域发生特大暴雨,基于坡面面积法,图1为射月沟水库大坝典型断面示意图。结合图1现场洪水痕迹调查,射月沟水库入库峰值流量达到 $1848 \text{ m}^3/\text{s}$,远超该水库 $537 \text{ m}^3/\text{s}$ 校核洪水。通过对射月沟水库进行实地勘察,结合溃坝时日击者录制的溃坝过程视频^[7],对溃坝过程进行反演分析,得到溃坝过程的时间线如下:①2018年7月31日01:00,射月沟流域出现降雨;②06:25,水库水位上升至1491.4 m,入库流量约为 $30 \text{ m}^3/\text{s}$;③07:12,水库水位上升至1492.5 m,对应的入库流量为 $476 \text{ m}^3/\text{s}$,此时溢洪道开始泄流;④09:10,水位高于防浪墙顶开始发生漫溢;⑤10:00,左坝肩出现初始溃口,并在纵、横向方向迅速发展;⑥10:25,洪峰出现,峰值流量约为 $6700 \text{ m}^3/\text{s}$;⑦11:00,水库基本放空,溃坝过程结束。图2为射月沟水库溃坝后溃口的最终形态。

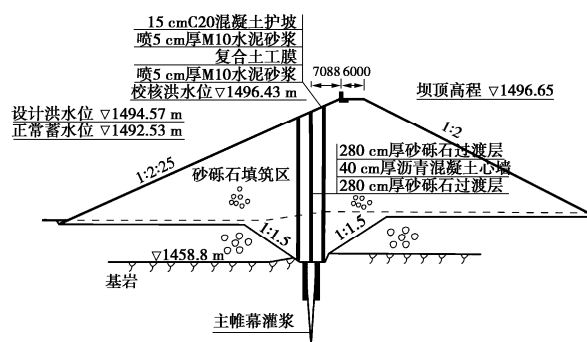


图1 射月沟水库大坝典型断面示意图

Fig. 1 Schematic diagram of typical cross section of dam of Sheyuegou Reservoir

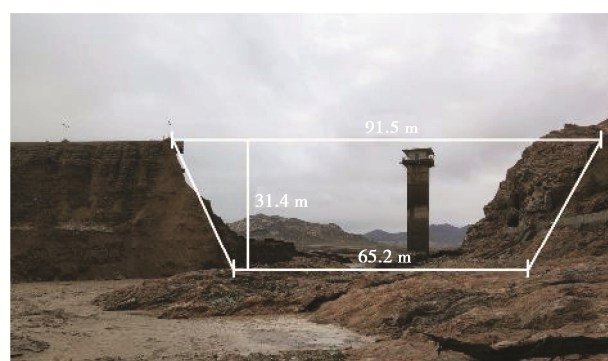


图2 射月沟水库溃口最终形态

Fig. 2 Final breach morphology of Sheyuegou Reservoir after dam breaching

根据现场视频,射月沟水库大坝溃决过程可概括如下:①初始冲坑出现(图3(a))。下游坝坡土体受到冲刷,在坡面上出现初始冲坑。②溯源冲蚀(图3(b)~(c))。初始冲坑出现后,冲坑以上部分坝坡坡角逐渐增大,直至接近垂直,并向上游发展。③初始溃口出现(图3(d))。当溯源冲蚀发展至上游水库

后, 由于坝顶高程突然下降, 初始溃口出现, 漫顶水流汇于溃口, 坝顶其它位置冲蚀结束。④溃口扩展(图 3 (e) ~ (f))。随着漫溢水头增大, 溃口在横向和纵向迅速扩展, 溃口边坡发生失稳, 直至溃口处的水流剪应力小于坝料的临界启动剪应力后, 冲蚀过程停止。

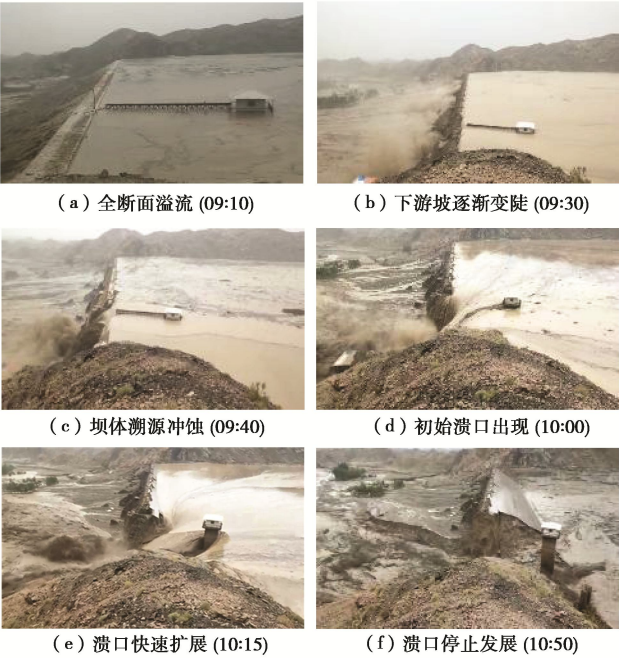


图 3 射月沟水库溃坝过程照片

Fig. 3 Photos of dam breach process of Sheyuegou Reservoir

2 试验设计与过程

由于现场视频中无法观察到沥青混凝土心墙的破坏过程, 因此本次试验以射月沟水库大坝为原型, 再现其漫顶溃坝过程, 重点探究溃口扩展规律和沥青混凝土心墙坝的破坏过程。

2.1 试验模型尺寸的确定

参考《河工模型试验规程: SL 99—2012》和《水工(常规)模型试验规程: SL 155—2012》, 确定试验模型尺寸。由于试验设备限制, 采用变态模型试验进行缩尺。模型平面和垂直几何尺寸按照式(1)和(2)确定:

$$\alpha_L = \frac{L_p}{L_m} \quad , \quad (1)$$

$$\alpha_h = \frac{h_p}{h_m} \quad . \quad (2)$$

式中: L_p 和 L_m 分别为原型和模型平面尺度; h_p 和 h_m 分别为原型和模型水深。

根据重力相似准则, 可以推求流速比尺为

$$\frac{\alpha_u^2}{\alpha_h} = 1 \quad . \quad (3)$$

式中: α_u 为流速比尺。

连续率相似准则为

$$\frac{\alpha_Q}{\alpha_L \alpha_h \alpha_u} = 1 \quad . \quad (4)$$

式中: α_Q 为流量比尺。

2.2 水槽冲蚀试验设备

试验采用的水槽冲蚀设备主要由供水系统、变坡水槽和尾水系统组成(如图 4)。水槽高 1 m, 宽 0.3 m, 长 6 m, 通过 PVC 管(内径 50 mm)与供水系统相连, 由电磁流量计持续供水, 并装有逆止阀防止模型蓄水时水压导致的回流。水槽两侧装有钢化玻璃, 方便试验现象观测。试验模型被冲蚀后, 水流挟裹泥沙进入到尾水池, 经沉淀后材料可循环使用。

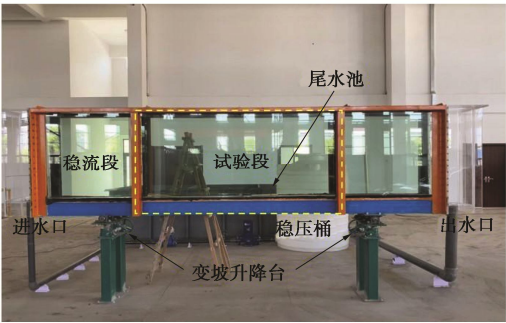


图 4 水槽冲蚀试验系统示意图

Fig. 4 Schematic diagram of flume erosion model test system

2.3 试验设计

基于水槽尺寸, 确定模型参数(见表 1)。以射月沟水库大坝现场采样级配为标准进行缩尺, 试验粒径最大为 20 mm, 用等量替代法得到模型试验坝料级配(如图 5), 试验中水槽呈水平状。

表 1 模型试验参数设定

Table 1 Parameters for model tests

| 坝高/m | 坝顶宽/m | 上/下游坡比 |
|--------|--------|--------------------------|
| 0.6 | 0.1 | 1 : 2 |
| 心墙高度/m | 心墙宽度/m | 入流量/(L·s ⁻¹) |
| 0.53 | 0.01 | 0.83 |

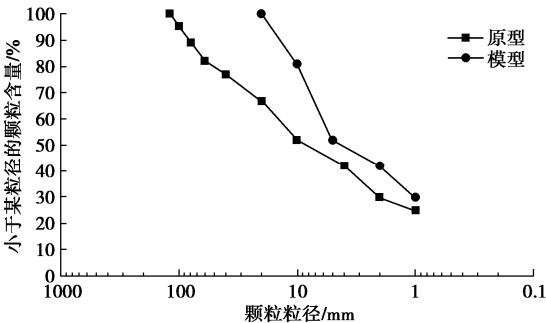


图 5 试验坝料级配曲线

Fig. 5 Grain-size distribution curves of dam materials for model tests

坝料经完全晾晒、烘干后分为 5 个粒径组, 分别为 <1 mm, 1~5 mm, 5~10 mm, 10~20 mm。土料相对质量密度为 2.73, 初始含水率为 5%, 采用击实

锤分层击实, 模型压实度为 86.9%, 孔隙率为 27%。为了便于观察试验发展过程, 在钢化玻璃侧开设初始倒梯形溃口(溃口顶宽 50 mm, 底宽 30 mm, 高 40 mm)。射月沟心墙为 3 层 40 cm 沥青混凝土心墙, 主要为防渗功能, 相距较近, 故在试验过程中将其按照缩尺比例在坝轴线上游 20 cm 处合并为一层 1 cm 厚心墙。心墙采用沥青冷补料制成, 沥青标号为 70 号, 具体指标见表 2。

表 2 沥青混凝土性质

| Table 2 Properties of asphalt concrete | | | | | |
|--|---------------|------------|---------|-------------|-------------|
| 密度/ (g·cm ⁻³) | 骨料最大 粒径/mm | 水稳定 性/% | 黏附 性 | 初期强 度/kN | 成型强 度/kN |
| 2.2 | 8 | 88 | 5 级 | 4.5 | 8.8 |

2.4 试验过程

试验按照如下步骤依次进行: ①根据目标级配, 按照粒径组称取质量并混合, 在混合时均匀加入水使之达到 5% 含水率。②在心墙位置前后放置两块 0.6 mm 厚镀锌板, 镀锌板在心墙锤制过程中起固定作用。模型按 10 cm 每层分层锤制。③模型击实完成后, 为避免水流遮蔽无法观察心墙, 在坝顶一侧开挖初始泄流槽, 以使试验单侧冲刷, 观察心墙破坏过程。④在上游坝址处安装并固定孔压传感器, 连接数据采集系统, 在模型开设溃口一侧安装并固定相机。⑤打开数据采集系统、水泵和电磁流量计, 供水系统以 0.83 L/s 的流量恒定来流, 达到上游蓄水位时关闭水泵饱和和上游坝体, 之后开启水泵开始试验。⑥当坝体不再继续破坏, 孔压计所测数据稳定视为试验结束, 关闭供水系统和数据采集系统, 保存试验数据, 对试验后的模型坝体进行记录, 清理水槽。

3 试验结果及分析

对试验数据进行整理, 基于试验数据及试验过程记录, 分别从溃口演化过程和溃坝流量过程进行分析。

3.1 溃口演化过程

沥青混凝土心墙坝漫顶溃坝模型试验现象与射月沟水库溃坝过程现场观察结果类似, 但本次分析关注溃坝现场无法观察到的沥青混凝土心墙的破坏过程。试验发现: 下游坝坡发生溯源冲蚀后心墙逐渐裸露形成悬空面, 由于沥青混凝土抗冲蚀能力强, 在漫顶水流冲蚀作用下悬空长度持续增加(如图 6 (a), (b)); 当上游土压力和水压力超过心墙的承受能力后, 心墙发生破坏(如图 6 (c)); 随后在上游激增水头的作用下, 溃口持续发展, 心墙裸露并发生第二次折断, 在整个溃坝试验过程中, 心墙会发生多次折断, 直至溃口水流无法继续冲蚀土体, 溃口趋于稳定, 溃坝结束(如图 6 (d))。综上所述, 可将沥青混凝土心墙坝的

漫顶溃坝过程分为 3 个阶段: 坝壳料溯源冲蚀至沥青混凝土心墙裸露; 心墙第一次折断, 溃口流量迅速增大并出现峰值; 心墙发生多次折断直至溃口稳定。溃口形态演化过程如图 7 所示。

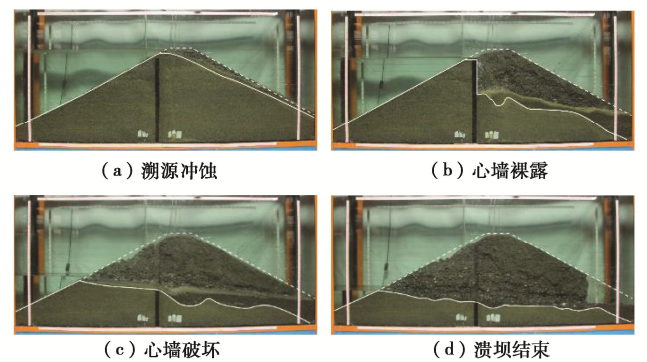


图 6 溃坝试验各阶段溃口形态

Fig. 6 Breach morphologies at each stage during model tests

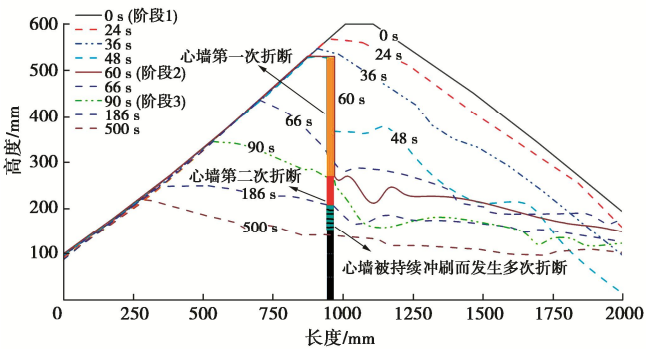


图 7 溃口形态演化过程

Fig. 7 Evolution process of breach morphology

3.2 溃坝流量过程

孔压传感器以 10 Hz 的频率记录数据, 通过换算获得试验过程中的溃口流量过程曲线(如图 8)。从图 8 中可以看出, 当 $t = 0$ s 时, 上游水位达到初始溃口处, 上游水位继续抬升后, 水流开始漫顶。随着溃口的下切, 溃口流量逐渐增大, 对下游坝坡的冲蚀加剧, 心墙下游侧裸露, 并在 $t = 40$ s 时达到第一个峰值后, 随后由于心墙的挡水作用, 上游水位逐渐下降。 $t = 60$ s 时, 心墙无法抵挡上游水压力 and 土压力而发生第一次折断(裸露长度 23 cm); 溃口流量继而陡增, 并在 $t = 66$ s 达到峰值; 之后漫顶水头下降, 溃口流量减小, 当 $t = 130$ s 时, 心墙开始裸露, 并在 $t = 150$ s 发生第二次折断(裸露长度 5 cm); 随后, 下游残余坝坡在漫顶来流作用下发生持续冲刷, 心墙也发生多次折断, 但折断长度远小于前两次, 直至溃坝结束。

4 溃坝数学模型与验证

基于射月沟溃坝案例调查和溃坝模型试验成果, 建立了一个可模拟溃口流量和溃口形态演化的沥青混凝土心墙坝漫顶溃坝过程数学模型。模型考虑溃坝过程中的坝壳料冲蚀过程和溃口形态的演化, 并基于上

游水、土压力的共同作用模拟心墙的受力状态,通过力矩平衡分析对裸露心墙是否破坏进行判断,确定裸露心墙的折断时刻、折断长度和折断次数,并采用射月沟水库溃坝案例对模型的合理性进行验证。

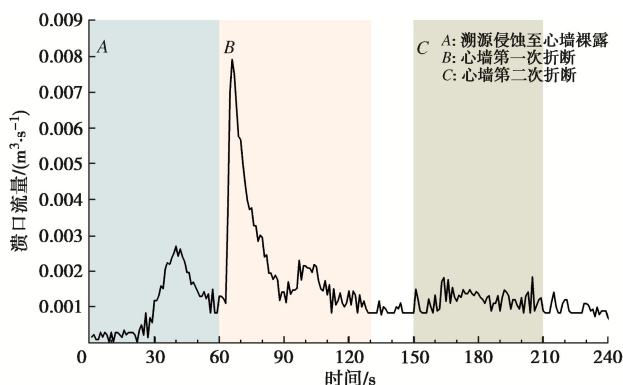


图8 溃口流量过程线

Fig. 8 Breach hydrograph during model tests

4.1 数学模型

数学模型主要包括 5 个部分:溃口流量计算,初始冲坑位置确定,坝体纵断面溃口发展模拟,坝体横断面溃口发展模拟,心墙破坏过程分析。

(1) 溃口流量计算。溃坝过程是一个库水位动态变化的过程,并保持出、入水量的平衡。

$$A_s \frac{dz_s}{dt} = Q_{in} - Q_b - Q_{spill} \quad (5)$$

式中: A_s 为水库库面面积; z_s 为水位; t 为时间; Q_{in} 为入库流量; Q_b 为溃口流量; Q_{spill} 为溢洪道出流量。

漫顶水流流量采用宽顶堰流量方程表示^[9]:

$$Q_b = k_{sm} (1.7B_b H^{1.5} + 1.1mH^{2.5}) \quad (6)$$

式中: k_{sm} 为尾水修正系数^[10]; B_b 为溃口底宽; m 为溃口边坡坡比(水平/垂直); H 为溃口处水深, $H = z_s - z_b$, 其中 z_b 为溃口底部高程。

(2) 确定初始冲坑位置。漫顶水流在流经下游坝坡时其流速逐渐增大至定值,此流速最大位置即为初始冲坑位置^[11],用下式进行表示:

$$l_n = \frac{2.5(Fr_n^2 - 1)d_n}{\tan \beta_0} \quad (7)$$

式中: l_n 为下游坝顶顺坡至初始冲坑的距离; Fr_n 为弗劳德数; d_n 为下游坝坡的水流深度; β_0 为下游坡角。

(3) 坝体纵断面溃口发展模拟。漫顶水流对坝顶和下游坡进行冲蚀,坝料冲蚀率可表示为^[12]

$$E = k_d (\tau_b - \tau_c) \quad (8)$$

式中: E 为坝料冲蚀率; k_d 为坝料冲蚀系数,通过试验量测^[13]或经验公式求取^[14]; τ_b 为溃坝水流剪应力, τ_c 为坝壳料临界启动剪应力,通过希尔兹曲线确定^[15]。

初始冲坑形成后,压实坝料形成的坝坡坡角逐渐变为坝壳料的内摩擦角,坡角增量可表示为

$$\frac{d\beta}{dt} = \frac{(E_1 - E_0 / \cos \beta_0)}{l_n} \quad (9)$$

式中: $d\beta/dt$ 为下游坝坡坡角增量; E_1 为冲坑处的底床冲蚀率, E_0 为坝顶处的冲蚀率。

当下游坝坡达到直立状态后,溃口向上游发展至水库,下游坝坡溯源冲蚀运移速率可表示为^[15]

$$\frac{dx}{dt} = C_T q^{1/3} H_e^{1/2} \quad (10)$$

式中: dx/dt 为下游坝坡运移速率; C_T 为溯源冲蚀系数^[16]; q 为溃口单宽流量; H_e 为直立跌坎高度。

(4) 坝体横断面溃口发展模拟。当下游坝坡溯源冲蚀进入水库后,水头增大,坝轴线处出现初始溃口。随着漫顶水流的连续冲蚀,坝体横断面溃口边坡发生间歇性失稳。

连续冲蚀造成的溃口顶宽和底宽增量可表示为

$$\Delta B_t = \frac{n_{loc} \Delta z_b}{\sin \alpha} \quad (11)$$

$$\Delta B_b = n_{loc} \Delta z_b \left(\frac{1}{\sin \alpha} - \frac{1}{\tan \alpha} \right) \quad (12)$$

式中: ΔB_t 为溃口顶宽增量; ΔB_b 为溃口底宽增量; n_{loc} 为溃口位置参数 ($n_{loc} = 1$ 代表单侧冲蚀, $n_{loc} = 2$ 代表双侧冲蚀); Δz_b 为溃口深度增量; α 为溃口边坡坡角。

溃口宽度和深度发展到一定程度后,溃口边坡可能发生间歇性失稳。在此假设滑动面为平面,当滑动楔形体的驱动力 F_d 大于抗滑力 F_r 时,边坡失稳,可采用极限平衡法分析:

$$F_d = W_s \sin \theta = \frac{1}{2} \gamma_b H_s^2 \left(\frac{1}{\tan \theta} - \frac{1}{\tan \alpha} \right) \sin \theta \quad (13)$$

$$F_r = W_s \cos \theta \tan \varphi + \frac{c_1 H_s}{\sin \theta} = \frac{1}{2} \gamma_b H_s^2 \left(\frac{1}{\tan \theta} - \frac{1}{\tan \alpha} \right) \cos \theta \tan \varphi + \frac{c_1 H_s}{\sin \theta} \quad (14)$$

式中: W_s 为滑动楔形体重量; H_s 为溃口边坡高度; c_1 为坝壳料黏聚力; φ 为坝壳料内摩擦角; γ_b 为坝壳料重度; θ 为溃口边坡失稳后的坡角。

(5) 心墙破坏过程分析。随着下游坝坡溯源冲蚀的发展,下游坝坝壳料被冲刷,心墙发生裸露,裸露长度可表示为

$$l_{core} = \left[(x_{down} - x_{core})^2 + (z_b - z_{down})^2 \right]^{1/2} \quad (15)$$

式中: x_{down} 为下游坝坡与心墙交界点的水平位置; x_{core} 为心墙下游坝肩的水平位置; z_b 为溃口底部高程; z_{down} 为下游坝坡与心墙交界点高程。

采用力矩平衡法模拟心墙发生折断的可能性。当心墙受到向下游推力产生的破坏力矩 M_o 大于心墙黏聚力产生的抵抗力矩 M_r 时,心墙发生折断,破坏力矩和抵抗力矩可分别表示为

表 3 模型输入参数
Table 3 Input parameters of mathematical model

| 坝高/ m | 顶宽/ m | 坝长/ m | 坝壳料 | | | | | | | | 沥青混凝土心墙 | | | |
|----------|----------|----------|----------|-------|-------------|-----------------|---------------|------------------------------|---|-----------------|----------|----------|--------------|---------------|
| | | | 上游坡比 | 下游坡比 | 初始库 水位/m | $d_{50}/$ mm | $c_1/$ kPa | $\varphi/$ ($^{\circ}$) | $k_d/$ ($\text{cm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) | $\tau_c/$ Pa | 高度/ m | 宽度/ m | 与坝轴线 距离/m | $c_2/$ kPa |
| 41.15 | 6 | 403 | 1 : 2.25 | 1 : 2 | 1497.75 | 10 | 0 | 38.8 | 3.0 | 5 | 38 | 2 | -2 | 300 |

$$M_o = F_s \cdot h_k + F_w \cdot \frac{h_k(2h_r - h_k) + h_r}{3(h_r - h_k + h_r)} +$$
$$F_c \cdot \frac{h_k(2h_r - h_k) + h_r}{3(h_r - h_k + h_r)}, \quad (16)$$

$$M_r = 2A_t \cdot C_2 \cdot \frac{h_k(2h_r - h_k) + h_r}{3(h_r - h_k + h_r)} + \frac{1}{2}W_c \cdot L. \quad (17)$$

式中： F_s 为溃口漫顶水流作用在心墙顶部的剪切力； F_w 为库水作用在心墙上的水压力； F_c 为上游坝壳料作用在心墙上的土压力； h_k 为心墙折断长度； h_r 为库水位距离心墙破坏面的高度； A_t 为心墙破坏面的横截面积； c_2 为心墙黏聚力； W_c 为破坏面以上心墙的重量； L 为心墙破坏面宽度。

采用按照时间步长迭代的数值计算方法计算溃坝过程中的溃口流量和坝壳料冲蚀，并在每个时间步对心墙是否发生折断进行判断。可输出每个时间步的溃口流量、溃口尺寸、心墙裸露长度以及折断时刻、折断长度和折断次数等溃坝输出参数。

4.2 模型输入参数

射月沟水库大坝于 7 月 31 日 09:10 开始漫顶溢流，并于当日 11:00 左右溃坝结束，本次计算以水流发生漫顶开始计时。根据射月沟水库室内试验^[7]，确定了射月沟水库和坝体的物理力学指标（见表 3）。

4.3 计算结果分析

表 4 比较了射月沟水库溃坝案例溃坝输出参数的计算值和实际值，主要包括溃口峰值流量 Q_p 、溃口最终顶宽 B_t 、溃口最终底宽 B_b 和溃口峰值流量出现时刻 T_p 等关键参数。

表 4 射月沟水库溃坝参数计算值与实测值对比

Table 4 Comparison between calculated and measured breaching parameters of Sheyuegou Reservoir

| 比较项 | $Q_p/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$ | B_t/m | B_b/m | T_p/h |
|------|--|----------------|----------------|----------------|
| 实测值 | 6700.0 | 89.9 | 60.1 | 1.25 |
| 计算值 | 6851.5 | 105.2 | 46.4 | 1.21 |
| 相对误差 | 2.2% | 17.0% | -22.8% | -3.2% |

由表 4 可以看出，溃口峰值流量和及其出现时刻的相对误差在 $\pm 10\%$ 以内，溃口最终顶、底宽相对误差在 $\pm 25\%$ 以内，验证了溃坝数学模型的合理性。

根据计算结果发现，射月沟在溃坝过程中心墙总共折断两次。在 $t = 1.06 \text{ h}$ ，心墙裸露长度为 29.54 m，由于破坏力矩 M_d 大于抵抗力矩 M_r ，心墙发生第一次折断，之后流量迅速增加至 $4965.40 \text{ m}^3/\text{s}$ ； $t = 1.21 \text{ h}$ ，心墙第二次裸露长度达到 8.52 m 时，发生第二次折

断，随后溃坝流量达到峰值 $6851.54 \text{ m}^3/\text{s}$ 。图 9 和图 10 展示了溃口流量过程和溃口形态发展过程的计算值，并与实测值进行了比较。

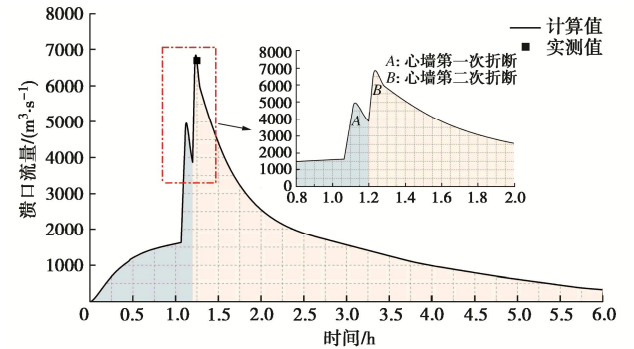


图 9 射月沟水库溃坝计算与实测洪水流量过程

Fig. 9 Calculated and measured breach hydrographs of Sheyuegou

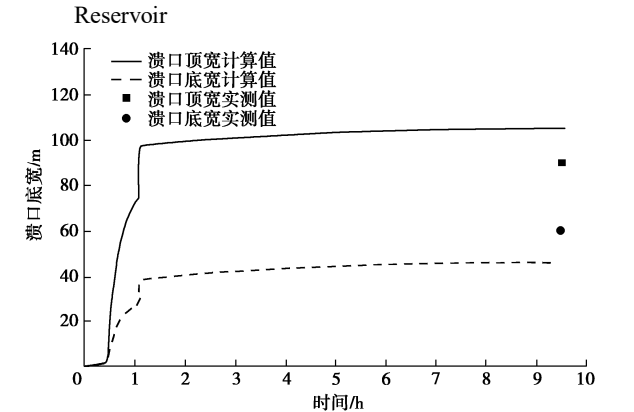


图 10 射月沟水库溃坝计算与实测溃口形态

Fig. 10 Calculated and measured breach morphologies of Sheyuegou Reservoir

计算结果表明，由于沥青心墙抗冲蚀能力强，心墙的折断时刻、折断长度和折断次数对溃坝过程产生重要影响。下游坝料被冲刷发生溯源冲蚀，坝体出现溃口，顶、底宽持续增加。

如图 9 所示，裸露心墙在上游巨大的水、土压力下发生折断，溃口流量陡增，对溃口两侧产生了巨大的剪切力，溃口顶宽和底宽在短时间陡增。随后，心墙下游残留坝壳料被迅速冲刷，心墙很快迎来第二次折断，溃口流量达到峰值，随后漫顶水头逐渐减小，溃口发展至稳定阶段。溃口流量曲线以及溃口形态的演变趋势与现场实测值较为吻合，表明本文的数值模拟方法可以较为准确的模拟射月沟水库的溃决过程。

5 结 论

本文通过对射月沟溃坝案例进行反演分析，揭示

了沥青混凝土心墙的破坏过程。建立了该坝型的漫顶溃坝过程数学模型,分析了溃坝过程中的溃口流量和溃口形态演化规律,并用实际溃坝案例验证了模型的合理性,得到以下 4 点结论。

(1) 通过沥青混凝土心墙坝漫顶溃坝水槽模型试验,并结合射月沟水库溃坝现场观测资料,将溃坝过程分为 3 个阶段:坝壳料溯源冲蚀至沥青混凝土心墙裸露;心墙第一次折断,溃口流量迅速增大并出现峰值;心墙发生多次折断直至溃口稳定。

(2) 基于溃坝模型试验,沥青混凝土心墙发生了 2 次关键性折断,第一次折断长度为 23 cm,第二次折断长度为 5 cm,之后在试验过程中又发生若干次细小的折断,表明沥青混凝土心墙在坝体溃决过程中表现出了挡水作用。

(3) 基于模型试验展现的沥青混凝土心墙多次折断的破坏过程,以及溃坝流量曲线,明晰了抗冲蚀能力强的沥青混凝土心墙对溃坝过程的控制作用;通过对溃坝过程中水压力、土压力的分析,揭示了心墙的破坏机理,发现了裸露心墙折断时刻、折断长度和折断次数的内在联系。

(4) 建立了沥青混凝土心墙坝漫顶溃坝过程数学模型,合理考虑了坝壳料的冲蚀特性和溃口发展规律,并通过力矩平衡法模拟了溃坝过程中心墙的破坏过程;模型计算结果展示了心墙的折断过程,溃口峰值流量 $6851.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 与实测值 $6700 \text{ m}^3/\text{s}$ 仅相差 2.2%,表明本文所提出的数值模拟方法可以较为准确地模拟射月沟水库沥青心墙坝的溃决过程。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国水利部. 2020 年全国水利发展统计公报[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2021. (Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. 2020 Statistic Bulletin on China Water Activities[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2021. (in Chinese))
- [2] 余林. 寒冷地区沥青混凝土心墙坝研究现状分析[J]. 水利规划与设计, 2018(1): 114-118. (YU Lin. Analysis of research status of asphalt concrete core dam in cold area[J]. Water Resources Planning and Design, 2018(1): 114-118. (in Chinese))
- [3] FENG S, WANG W B, HU W H, et al. Design and performance of the Quxue asphalt-core rockfill dam[J]. Soils and Foundations, 2020, **60**(4): 1036-1049.
- [4] 党发宁, 高俊, 任劼, 等. 200 m 级超高沥青混凝土心墙堆石坝的受力可行性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, **38**(增刊 2): 3690-3700. (DANG Faning, GAO Jun, REN Jie, et al. Study on mechanical feasibility of 200 m grade ultra-high asphalt concrete core rockfill dam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, **38**(S2): 3690-3700. (in Chinese))
- [5] ZHANG Y B, WANG W B, ZHU Y. Investigation on conditions of hydraulic fracturing for asphalt concrete used as impervious core in dams[J]. Construction and Building Materials, 2015, **93**: 775-781.
- [6] AKHTARPOUR A, KHODAII A. Experimental study of asphaltic concrete dynamic properties as an impervious core in embankment dams[J]. Construction and Building Materials, 2013, **41**: 319-334.
- [7] YU S, ZHANG Q, CHEN Z Y, et al. Study of the Sheyuegou Dam breach—Experience with the post-failure investigation and back analysis[J]. Engineering Failure Analysis, 2021, **125**: 105441.
- [8] 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.
- [9] SINGH V P. Dam breach modeling technology[M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1996.
- [10] FREAD D L. DAMBREAK: The NWS Dam Break Flood Forecasting Model[R]. Silver Spring: National Oceanic and Atmospheric Administration, 1984.
- [11] ZHONG Q M, CHEN S S, DENG Z. Numerical model for homogeneous cohesive dam breaching due to overtopping failure[J]. Journal of Mountain Science, 2017, **14**(3): 571-580.
- [12] TEMPLE D M. Stability of grass lined channels following mowing[J]. Transactions of the ASAE, 1985, **28**(3): 750-754.
- [13] BRIAUD J L, TING F C K, CHEN H C, et al. Erosion function apparatus for scour rate predictions[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, **127**(2): 105-113.
- [14] WU W M. Computational River Dynamics[M]. Boca Raton: CRC Press, 2007.
- [15] TEMPLE D M. Estimating flood damage to vegetated deep soil spillways[J]. Applied Engineering in Agriculture, 1992, **8**(2): 237-242.
- [16] 梅世昂, 霍家平, 钟启明. 均质土坝漫顶溃决“陡坎”移动参数确定[J]. 水利水运工程学报, 2016(2): 24-31. (MEI Shi'ang, HUO Jiaping, ZHONG Qiming. Determination of headcut migration parameters for homogeneous earth dam due to overtopping failure[J]. Hydro-Science and Engineering, 2016(2): 24-31. (in Chinese))