

DOI: 10.11779/CJGE20241046

# 混凝土面板堆石坝漫顶溃坝机理研究

赵鲲鹏<sup>1</sup>, 陈生水<sup>1,2,3</sup>, 钟启明<sup>\*1,2,3</sup>, 邓 垦<sup>1</sup>, 宋智通<sup>1</sup>

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210029; 3. 水利部水库大坝安全重点实验室, 江苏 南京 210029)

**摘 要:** 混凝土面板堆石坝漫顶溃坝牵涉到复杂的水-土-结构耦合作用机制, 本文通过水槽模型试验, 基于水沙动力学、土力学和材料力学理论及方法, 研究了面板坝漫顶溃决过程中坝体纵、坡面溃口的发展过程, 揭示了溃口形态和溃口洪水流量的演变机制。总的来说, 面板坝漫顶溃坝表现为堆石料的连续性冲蚀、溃口边坡间歇性失稳和悬空面板多次折断的耦合过程。在纵断面方向, 下游坝坡堆石体溃口在漫顶水流作用下经历了尾部下切—陡坎溯源—侧壁坍塌—全断面冲刷—上冲下淤—河床稳定的过程, 其间伴随面板的间歇性折断破坏; 在坡面方向, 溃决主要体现在堆石体溃口形态的演化, 经历了溯源侵蚀—侧侵剥蚀—溃口边坡失稳坍塌, 最终形成“八字形”溃口。溃口持续扩展引发的悬空面板间歇性折断导致溃口流量曲线呈现多峰特征, 峰值大小可作为主、次要破坏程度的重要依据。研究结果为面板坝漫顶溃坝过程预测模型的建立与灾害风险评价提供了试验依据。

**关键词:** 混凝土面板堆石坝; 漫顶溃坝; 堆石料冲蚀; 面板折断; 溃坝机理

中图分类号: TV641

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2025)10-2036-09

**作者简介:** 赵鲲鹏(1988—), 男, 博士后, 主要从事高面板坝溃坝过程模拟理论与方法研究。E-mail: kpzhao@nhri.cn。

## Study on overtopping-induced breach mechanisms of concrete-face rockfill dams

ZHAO Kunpeng<sup>1</sup>, CHEN Shengshui<sup>1,2,3</sup>, ZHONG Qiming<sup>1,2,3</sup>, DENG Zhao<sup>1</sup>, SONG Zhitong<sup>1</sup>

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing 210029, China; 3. Key Laboratory of Reservoir Dam Safety, Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** Overtopping failure of concrete-face rockfill dams involves a complex water-soil-structure coupling mechanism. Through flume model experiments and based on the theories and methods of water-sand dynamics, soil mechanics, and material mechanics, this study investigates the development process of the dam body's breach in both the longitudinal and slope surface directions during the overtopping failure of concrete-face rockfill dams. It also reveals the evolution mechanisms of breach morphology and breach hydrograph. In general, the overtopping failure of a concrete-face rockfill dam is a coupled process that includes continuous erosion of rockfill materials, intermittent instability of the breach slope, and multiple fractures of the suspended face slabs. In the longitudinal direction, under the action of overtopping flow, the breach development in the rockfill materials mainly undergoes tail cutting of the breach, head-cut retrogressive erosion, side slope collapse, full cross-section erosion, upstream erosion and downstream deposition, and river bed stabilization, accompanied by intermittent fractures of the face slabs. In the cross-sectional direction, the breach process is primarily characterized by retrogressive erosion, lateral erosion, and instability of the breach side slope, ultimately resulting in a splayed breach. The intermittent fractures of the suspended face slabs, caused by the continuous expansion of the breach size, lead to the multi-peak characteristics of the breach hydrograph, with the peak values serving as important indicators for assessing the primary and secondary degrees of failure.

**Key words:** concrete-face rockfill dam; overtopping-induced dam breach; erosion of rockfill materials; fracture of face slab;

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (U22A20602, 52109094); 江苏省卓越博士后基金项目 (2024ZB613); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目 (Y324004, Y324006); 中国博士后科学基金第 18 批特别资助项目 (2025T180866) This work was supported by Key Program of National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. U22A20602, 52109094), Jiangsu Excellent Postdoctoral Fellowship (Grant No. 2024ZB613), Fundamental Research Funds for Central Public Welfare Research Institutes (Grant Nos. Y324004, Y324006), The 18th Batch of Special Funding from the China Postdoctoral Science Foundation (Grant No. 2025T180866).

收稿日期(Received): 2024-10-21 修回日期(Revised): 2025-03-11 接受日期(Accepted): 2025-03-13 网络出版日期(Online): 2025-03-14

\*通信作者 (E-mail: qmzhong@nhri.cn)

## 0 引言

混凝土面板堆石坝在水网工程建设和实现“双碳”目标的背景下发挥着重要作用。但近年来, 超标准洪水、地质灾害、地震等自然灾害频发, 加之大坝设计和施工缺陷, 以及日常运维中的问题, 导致面板坝存在着溃坝风险。如 1993 年沟后面板坝<sup>[1]</sup>、2005 年 Upper Taum Sauk 面板坝<sup>[2]</sup>及 2023 年 Teesta III dam 面板坝<sup>[3]</sup>等溃坝案例均对下游人民生命财产安全造成了巨大威胁。但无论何种致灾因子, 面板坝的最终溃决模式均表现为漫顶。因此, 深入研究面板坝在漫顶工况下的溃坝过程, 揭示其溃坝机理, 对溃坝风险评估和应急预案编制具有重要意义。

目前, 国内外对于溃坝机理的研究主要针对均质土坝, 具有代表性的如欧盟 IMPACT 项目(坝高 6.0 m)<sup>[4]</sup>、美国农业部(坝高 2.3 m)<sup>[5]</sup>和南京水利科学研究院(坝高 9.7 m)<sup>[6]</sup>开展的大尺度均质土坝漫顶溃坝模型试验。然而, 面板坝一般由粗粒土和防渗面板组成, 其与均质土坝在材料和结构上存在显著差异。沟后面板坝溃坝后, 为了探寻其溃坝原因, 国内开展了一系列相关的试验研究, 试验研究主要围绕堆石体冲蚀特性和面板结构的破坏<sup>[7-9]</sup>。随后, 陈生水<sup>[10]</sup>利用土石坝溃坝离心模型试验系统, 再现了面板坝的漫顶溃坝过程; Li 等<sup>[11-12]</sup>开展了止水系统完好和失效情况下的面板坝漫顶溃坝试验, 对漫顶和渗透水流共同作用下的面板坝溃坝机理进行了研究。然而, 由于面板坝漫顶溃坝过程涉及水流、堆石料和面板结构的复杂耦合作用, 当前关于堆石体形态演化机制的研究尚不充分。此外, 现有的溃坝试验大多采用素混凝土或钢丝石膏板作为防渗面板, 未充分考虑面板结构破坏时的力学特性以及水-土-结构的耦合作用机制。

基于现有面板坝溃坝数值模型的研究基础<sup>[13-14]</sup>, 采用物理模型试验的方式进一步深化对其溃坝机制的认识。明确堆石料冲蚀与面板断裂的循环破坏机制, 揭示流量-时间曲线中的多峰值现象, 得到溃口流量与堆石体冲蚀及面板折断之间的规律, 建立堆石体溃口形态的多值函数表达式。旨在为进一步优化面板坝溃坝数学模型, 为提高面板坝溃坝计算精度提供理论支撑。

## 1 试验材料及方法

混凝土面板堆石坝溃坝模型试验是复杂的水-土-结构耦合过程, 需建立相关物理量的相似关系, 选择合适的试验材料, 设计科学的试验方法。

### 1.1 相似准则

一般水工模型试验遵循的基本相似准则为几何相似、运动相似、动力相似<sup>[15]</sup>, 但在溃坝模型试验中, 溃口水流流速较大, 主要作用力为重力, 其它作用力影响甚微, 因此依据弗劳德相似准则设计模型试验。

定义模型坝与原型坝的长度、宽度、高度和面板厚度等几何尺寸之比为长度比尺  $\lambda_L$ :

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

式中:  $L_m$  为模型的尺寸;  $L_p$  为原型的尺寸。

模型和原型时间比尺  $\lambda_T$  与长度比尺关系为

$$\lambda_T = (\lambda_L)^{1/2} \quad (2)$$

模型和原型流速比尺  $\lambda_v$  和流量比尺  $\lambda_Q$  与长度比尺关系为

$$\lambda_v = (\lambda_L)^{1/2} \quad (3)$$

$$\lambda_Q = (\lambda_L)^{5/2} \quad (4)$$

力的比尺  $\lambda_F$  与长度比尺关系为

$$\lambda_F = (\lambda_L)^3 \quad (5)$$

### 1.2 试验材料

钢筋混凝土防渗面板实际厚度通常为几十厘米, 在面板坝溃坝过程模型试验中, 根据相似准则, 面板厚度仅为几毫米。由于使用原型材料难以满足试验中的材料力学性能相似。因此, 如何科学地选择替代材料进行模拟成为溃坝模型试验中的关键问题。

基于力的比尺, 面板重力比尺  $\lambda_{F(G)}$  为

$$\lambda_{F(G)} = \frac{\rho_m g_m}{\rho_p g_p} \left( \frac{L_m}{L_p} \right)^3 = \frac{\rho_m}{\rho_p} (\lambda_L)^3 \quad (6)$$

式中:  $\rho_m$  和  $\rho_p$  分别为模型和原型面板的密度;  $g_m$  和  $g_p$  分别为模型和原型重力加速度。

另外, 溃坝时面板一般以折断破坏为主, 因此面板弯曲时受力比尺  $\lambda_{F(P)}$  为

$$\lambda_{F(P)} = \frac{C_m A_m}{C_p A_p} = \frac{C_m}{C_p} (\lambda_L)^2 \quad (7)$$

式中:  $C_m$  和  $C_p$  分别为模型和原型面板的弯曲强度;  $A_m$  和  $A_p$  分别为模型和原型面板的截面面积。

模型试验时面板的替代材料需满足重力比尺相似和弯曲时受力比尺相似。本试验设计了面板基体材料的配合比, 并测试了其基本力学性能, 面板材料配比见表 1, 其中水灰重量比值为 0.85:1。面板内布置了 3×1 根 0.3 mm 竹筋替代钢筋, 并测试了竹筋的拉伸强度和面板的弯曲强度(如图 1), 满足试验要求。



表 1 面板材料配比

Table 1 Proportion of face slab materials		
配料	含量	主要作用
石膏	45%	主料
重质碳酸钙	35%	增重
白水泥（325）	15%	增强
羟丙基甲基纤维素醚	2%	快速浸润、防止结团
硫酸亚铁	0.5%	加快石膏凝固硬化
聚丙烯酰胺	0.5%	防水剂
NSJF-2 胶粉	2%	提高强度,减少收缩率

本文模型试验以沟后面板坝溃坝案例为基础，为了研究的普适性，开展面板堆石坝漫顶溃坝概化模型试验，坝体填筑材料由碎石组成，且不考虑堆石料的分区。填筑料由 5~600 mm 和小于 5 mm 两组粒径构成，质量分数分别为 77%，23%。由于水槽尺寸限制，模型试验的最大粒径为 20 mm。基于《水电水利工程粗粒土试验规程：DL/T 5356—2006》，使用相似级配法和等量替代法获得了模型材料的级配曲线，其不均匀系数和曲率系数与原型坝相近（图 2）。

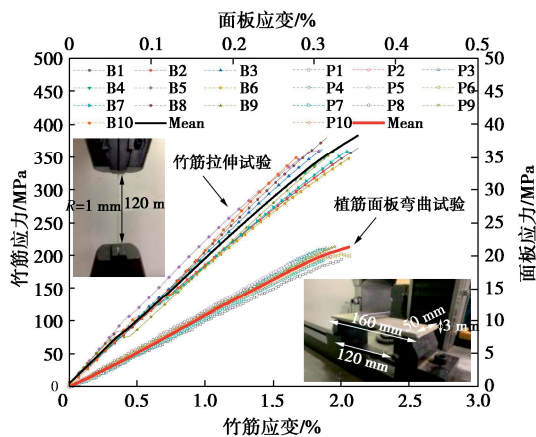


图 1 面板基本力学性能测试

Fig. 1 Basic mechanical property tests of face slabs

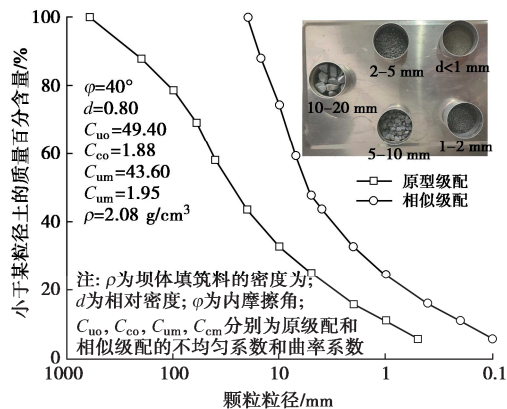


图 2 坝料颗粒级配

Fig. 2 Particle gradations of dam materials

1.3 试验仪器和方法

试验使用的溃坝模型试验系统主要由供水系统、水槽和尾水系统组成(如图 3)。水槽高 1 m、宽 0.3 m、长 6 m，通过内径 50 mm PVC 管与供水系统连接。给

水管配备电磁流量计以测量流速，并装有止回阀防止水回流。水槽顶部设有阻水消能板和薄壁堰，以稳定水流并消能。两侧中间位置装有玻璃观测窗以便观察试验现象。溃坝出流通过排水管流入尾水池。

水流漫顶时，使用高清相机拍摄水槽的正面、顶部和侧面，并在上游坡脚处安装水压力传感器。供水系统以 0.3 L/s 的流量蓄水至预定水位，然后停止供水，待坝体浸润线稳定后，以 0.6 L/s 的流量开始漫顶试验。供水过程中，使用数据采集仪（DM-YB1820）以 10 Hz 频率记录孔压传感器数据，实时采集水位数据，通过计算得出溃口处流量与时间的关系曲线。

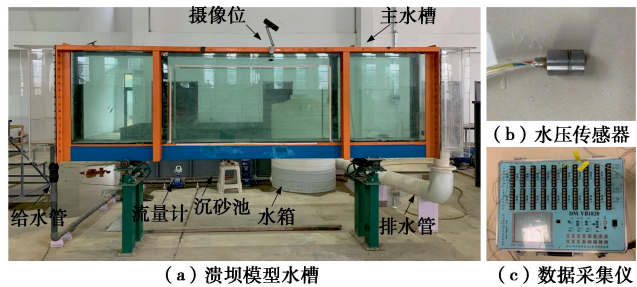


图 3 溃坝模型试验系统

Fig. 3 Dam breach model test system

1.4 模型设计与制作

参考《河工模型试验规程：SL99—2012》和《水工（常规）模型试验规程：SL155—2012》，将原型坝的几何尺寸按照 1：100 的比例进行缩尺。为便观测纵断面的溃决过程，本试验初始溃口设置在模型槽贴近玻璃的位置。模型坝高为 710 mm，上游坡比 1：1.6，下游坡比 1：1.5；面板厚 3 mm，单层竹筋布设于面板中部，单块面板宽 60 mm。根据实际工程中面板的铺设，采用概化的方法，在每块面板上设置了 2 条横缝，将其分为一阶、二阶和三阶面板。在模型坝填筑时，堆石体上游侧共铺设 5 块面板，横向长 300 mm（图 4）。

面板坝模型的制作步骤包括配制堆石料、分层填筑、逐级压实、制作面板、铺装面板和填缝 6 个环节。为防止湿陷，拌合料中含水率为 5%，堆石体的孔隙率控制为 0.2。面板缝隙用防水和高强黏结勾缝剂填充作为止水材料，确保面板间力的传递<sup>[16]</sup>。面板与坝肩一侧的玻璃用强力玻璃胶固定，与纵断面侧玻璃的连接用勾缝剂处理。筑坝完成后，检测坝体并安装调试测试系统（图 5）。

2 面板坝溃坝过程

2.1 纵断面冲蚀

在漫顶溃坝的初始阶段，面板上方的水流逐渐溢出坝顶，溢流水舌冲蚀坝顶和下游坡，动水以薄壁堰

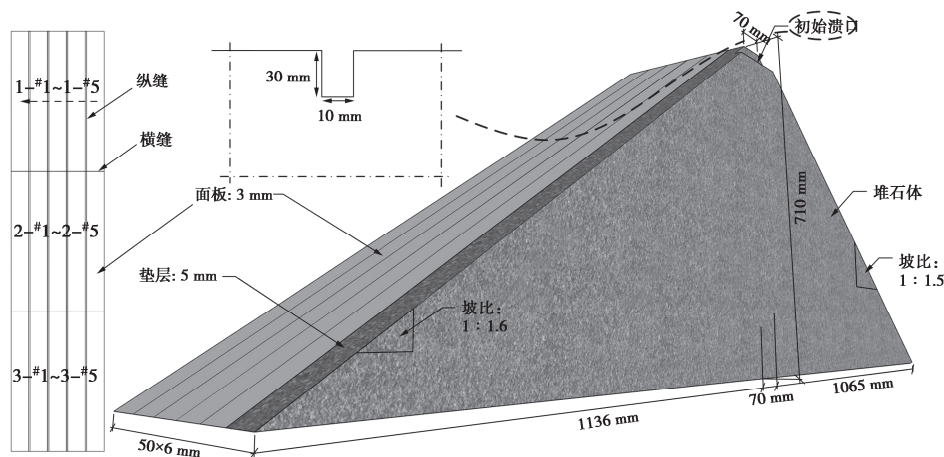


图 4 面板堆石坝模型尺寸

Fig. 4 Model dimensions of concrete-face rockfill dam

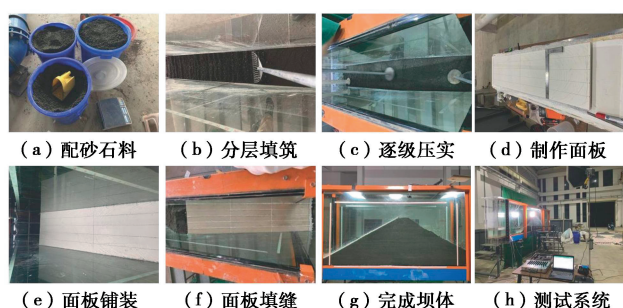
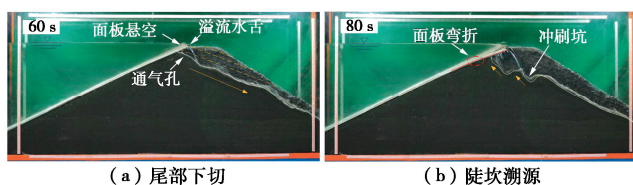


图 5 面板堆石坝模型填筑过程

Fig. 5 Construction process of concrete-face rockfill dam model

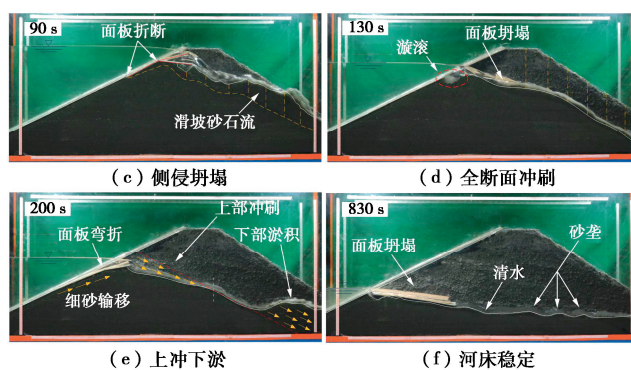
流的形式推动坝顶堆石料的运动, 堆石料启动后以悬浮质和推移质的形式向下游输移形成陡坎, 陡坎发生溯源冲蚀导致面板端部逐渐悬空, 同时下游坝顶尾部发生下切 (如图 6 (a))。水流的持续冲刷在面板下侧形成空洞, 面板悬臂端由于水流、水压和自重的共同作用发生弯曲和变形 (如图 6 (b))。由于悬空长度的增加, 面板发生折断, 溃口流量突然增大, 导致堆石料侵蚀加剧, 并发生溃口边坡失稳 (如图 6 (c))。相邻面板发生折断, 冲蚀进一步加剧, 溃口处形成全断面冲刷形态 (如图 6 (d))。随着流速逐渐减小, 堆石料开始在溃口处淤积, 并向坝前推进, 形成上冲下淤的状态 (如图 6 (e))。随着库水位的下降, 水流冲刷能力减弱, 最终形成一个稳定的溃口 (如图 6 (e))。

面板坝漫顶溃坝纵断面溃口演化过程可分为以下阶段: 尾部下切, 陡坎溯源, 侧侵坍塌, 全断面冲刷, 上冲下淤和河床稳定。



(a) 尾部下切

(b) 陡坎溯源



(c) 侧侵坍塌

(d) 全断面冲刷

(e) 上冲下淤

(f) 河床稳定

图 6 面板堆石坝漫顶溃坝纵断面溃口演化过程

Fig. 6 Breach evolution process in longitudinal section of concrete-face rockfill dam

## 2.2 坡面冲刷

在漫顶溢流的作用下, 水流浸润坝顶堆石区, 形成了“V”字形的初始溃口 (如图 7 (a))。堆石料在自身重力和水动力作用下发生运动, 漫顶水流将大量泥沙带走, 形成了固液两相流。随着冲蚀加剧, 固体和液体的高浓度混合物逐渐形成泥石流 (如图 7 (b))。由于面板坝堆石料的颗粒级配良好、密实度高, 内摩擦角大, 抗剪强度较高, 受侧侵和下切作用影响, 堆石体在重力作用下局部失稳, 产生局部倾斜和坍塌; 在剥蚀作用下, 堆石体由滑动型坍塌转变为流动型坍塌 (如图 7 (c))。堆石料在水动力条件下向下游输移, 经过消能和冲刷坑的阻滞作用, 大颗粒沉积在坝脚处, 形成单侧堆积扇; 随着一阶面板的折断, 水流迅速下泄, 下游水位骤增, 堆积区的土体含水量增加或饱和, 抗剪强度降低, 随着下游水位下降, 堆积区失去顶托力的同时承受渗流压力而发生坍塌 (如图 7 (d))。随着二阶面板的折断和库水下泄, 下游床面逐渐淹没; 洪峰消退后, 高浓度的挟沙水流减速, 细粒料在坝脚处沉积, 形成沉积区 (如图 7 (e))。水流减缓, 含沙



量减少, 残余坝高趋于稳定, 软弱淤积区在冲刷作用下发生局部塌陷直至稳定 (如图 7 (f))。

面板坝漫顶溃坝坡面溃口演化过程可分为以下阶段: 溯源侵蚀, 侧侵剥蚀, 溃口边坡失稳坍塌, “八字形”溃口形成。

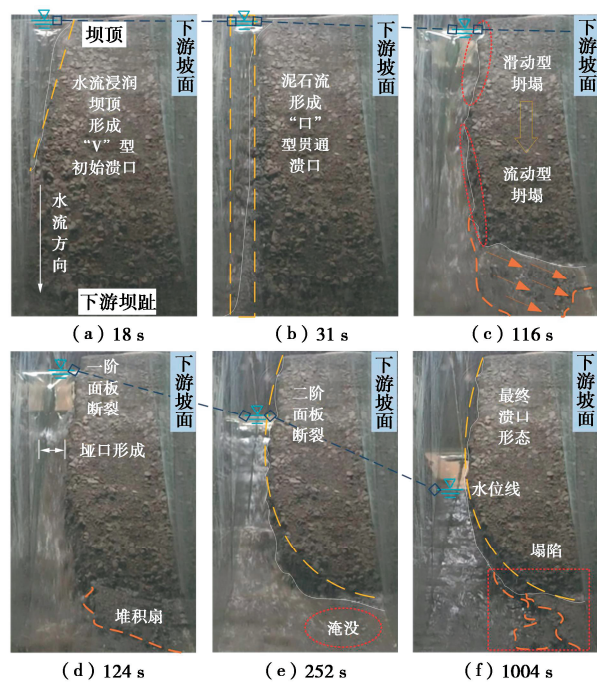


图 7 面板堆石坝漫顶溃坝坡面溃口演化过程

Fig. 7 Breach evolution process in slope surface of concrete-face rockfill dam

2.3 面板折断

在面板坝漫顶溃坝过程中, 随着下游坝坡堆石料的冲蚀, 受压区的每块面板经历了多阶段的破坏 (图 8)。

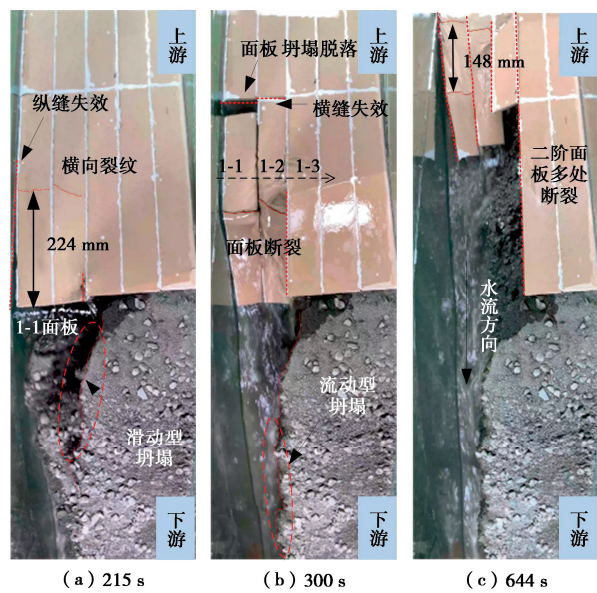


图 8 面板折断过程

Fig. 8 Fracture processes of face slabs

溃坝初期, 渗流作用和漫顶水流对堆石体的冲蚀导致 1-1 面板纵缝开裂, 随着面板底部坝料的侵蚀, 面板悬臂端发生弯曲, 竖缝发生裂缝; 随着坝料侧向侵蚀加剧, 1-2 面板逐步脱离原有支撑, 形成悬空状态, 并与 1-1 面板共同承受荷载; 侵蚀进一步发展, 1-1 面板承受的剪应力超限, 导致横向裂缝的形成 (如图 8 (a))。动水压力分布不均使得 1-2 面板中部发生斜向裂缝, 坝顶堆石料受到水流浸润, 导致堆石区发生坍塌, 面板被挟沙水流冲刷运移 (如图 8 (b))。内部应力增加使得 1-3 面板的纵缝错台, 部分面板脱落, 溃口流量急剧增大; 堆石料的下切导致面板端部失去支撑, 面板在动水压力和自重作用下, 弯矩增大, 进一步加剧面板的破坏; 由于各面板弯曲变形不协调, 纵缝开裂加剧, 渗流现象进一步加重, 导致堆石料的侵蚀加速; 水流冲击和纵缝渗流力的相互作用, 使得堆石料侵蚀和面板破坏的过程加速 (如图 8 (c))。

3 试验结果与分析

混凝土坝通常表现为瞬时溃决<sup>[17]</sup>, 而均质土坝的溃决则需要经历土体颗粒的冲蚀过程<sup>[18]</sup>。面板坝则综合了混凝土坝和均质土坝的溃决特征, 在水流作用下, 其溃决过程包括堆石料冲蚀和刚性面板折断的交替作用。这使得面板坝的溃口扩展过程较均质坝展现出更复杂的特点, 表现为具有时间历程的流体-颗粒-结构耦合破坏特征。

3.1 纵断面溃决模式分析

面板坝是一种结合堆石体和面板结构的特殊坝型, 其纵断面的溃决形态演化过程, 不仅涉及坝料侵蚀, 而且涉及面板的结构性破坏, 其纵断面的溃决形态演化则更为复杂。在堆石体被冲蚀与悬臂面板折断的循环演进过程中, 漫顶水流通过堆石颗粒间的缝隙进入坝体内部流动, 抗剪强度降低的堆石体在水流的作用下侵蚀和剥落。在坝体溃决过程中, 面板逐级增加横向裂缝并向上游扩展, 悬臂端所承受的动水压力超过极限抗弯强度 21.37 MPa 后, 展现为多段间歇性断裂 (如图 9)。其中, 阶段 I, 堆石料侵蚀, 面板失效弯折; 阶段 II, 堆石体坍塌、面板逐级折断; 阶段 III, 面板垮塌至堆石区上冲下淤。面板坝漫顶溃坝表现为堆石料冲蚀与面板断裂的循环型溃决模式。

总之, 相比均质坝, 加筋面板在面板坝溃坝过程中, 通过受拉筋保持部分破碎面板的连接, 减缓了水流对下游堆石体的冲刷速率, 使得溃坝的过程变得更加渐进和复杂。这种机制显著影响了堆石体的稳定性, 从而改变了溃坝的整体破坏特征。



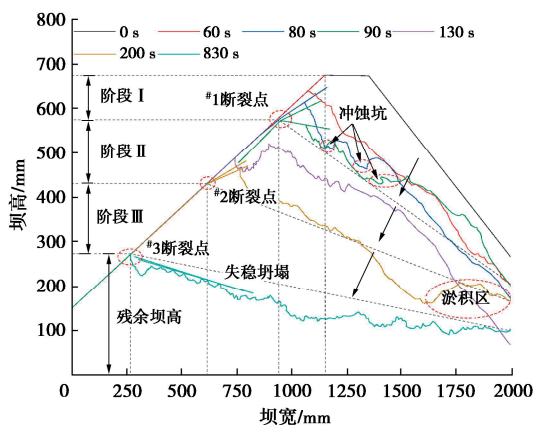


图 9 面板坝漫顶溃决过程中纵断面形态演化

Fig. 9 Morphology evolution in longitudinal section during concrete-face rockfill dam breach process

### 3.2 坡面溃口形态分析

面板堆石坝坡面溃口形态演化主要体现在 3 个时序阶段的形态特征：倒三角形，长方形，八字形。

(1) 初始溃口形成阶段：溃坝后 181 s 时，水流冲刷坡面堆石体，形成倒三角形。

(2) 溃口拓展阶段：溃坝后 311 s 时，水流集中冲刷倒三角形溃口的尖端部位，导致该区域坝料被强烈侵蚀，使溃口底部的宽度显著增加；坡面中部的堆石体经历了水流的剥蚀，逐渐演变为滑动型坍塌；由于坝顶处保持溯源侵蚀，最终形成长方形溃口。

(3) 溃口快速发展至稳定阶段：溃坝后 1161 s，在长方形溃口的进一步冲刷过程中，长方形直角区域对水流切应力影响较大，加速了该区域坝料的侵蚀，直角边缘渐变为弧状，使应力分布更加均匀，从而消除应力集中现象；长方形溃口中部区域受到的侵蚀相对较小，侵蚀速率较慢，保持了较好的结构，形成了相对稳定的堰口；在上游侵蚀和下游沉积的共同作用下，河床淤积，展现出更明显的泥沙堆积区，坡面溃口最终形成稳定的“八”字形结构（如图 10）。

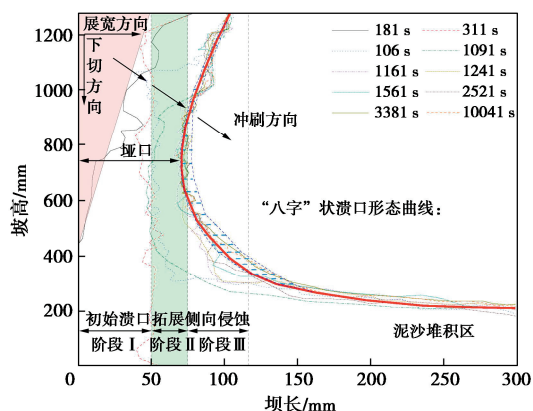


图 10 面板堆石坝下游坡面溃口形态曲线

Fig. 10 Breach morphology curve on downstream slope of concrete-face rockfill dam

溃口形状曲线的数学表达式对数学建模尤为重要，基于多值函数，可拟合出面板坝下游坡面溃口形态曲线，其表达式为

$$\begin{cases} x = \frac{109.2 - 7.36 \times t + 0.184 \times t^2}{1 - 0.03808 \times t + 0.000603 \times t^2} \\ y = 59.13 \times t^{-25.41} - 1738 \times e^{(-21.27/t)} + 1219 \\ t \in [1, 46] \end{cases} \quad (8)$$

坝体下游坡面溃口形态演化过程展示了在水流作用下，坝体边缘的几何形状由于局部冲刷强度的差异而发生变化的演化过程。同样，国内外相关学者开展的均质坝和堰塞体漫顶溃坝模型试验中也出现了类“八”字溃口形态（如图 11）<sup>[19-25]</sup>。坝体下游坡面溃口形态演化过程中，土体性质影响局部冲刷强度，从而改变坝体边缘几何形状，进而影响坝体整体稳定性和安全性<sup>[19-20]</sup>。通过对水流与土石坝界面相互作用的分析，考虑土体的黏性和渗透性等因素<sup>[21-22]</sup>，进一步验证了黏性土能够在水流作用下形成相对规整的溃口，而无黏性土更易因水流的冲刷作用呈现不规则的溃口形态，且溃决速度较快，侵蚀范围较广<sup>[23-25]</sup>。通过本文以及前人研究的对比分析，得出了坝体下游坡面溃口形状的演化规律，揭示了土体性质对坝体溃口形态的影响。

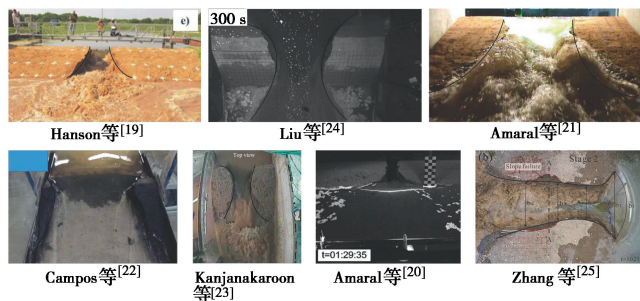


图 11 不同黏性土石坝溃口最终形态

Fig. 11 Final breach morphologies of embankment dams with different cohesions

### 3.3 面板断裂规律与溃口洪水流量过程线特征

随着堆石体的冲刷，一阶和二阶面板出现了多次间歇性断裂现象（如图 12）。在水流切应力的作用下，面板破坏长度由坝顶向坝基逐渐增大，#1 面板断裂 4 次，其断裂长度由坝顶处的 142 mm 增至坝基处的 224 mm，增长了 1.57 倍，#2 和 #3 面板分别断裂 3 次和 1 次，其断裂长度增长倍数分别为 1.3，1.0，由坝顶至坝基的断裂次数和断裂长度增长倍数均呈减小趋势（图 13（a））。由坝中向坝肩（#1~#3）面板的第 3 次断裂长度由 156 mm 增至 446 mm，增长了 2.86 倍，同时，其斜向断裂角度由 47° 增至 75°，同一次第面板的断裂长度和断裂角度均呈增大趋势（图 13（b））。

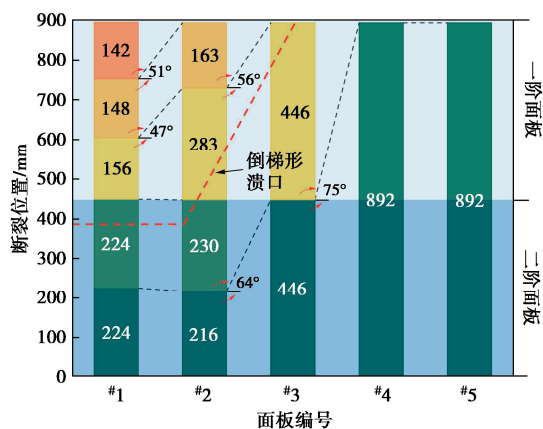


图 12 每块面板断裂位置与长度

Fig. 12 Fracture location and length of each face slab

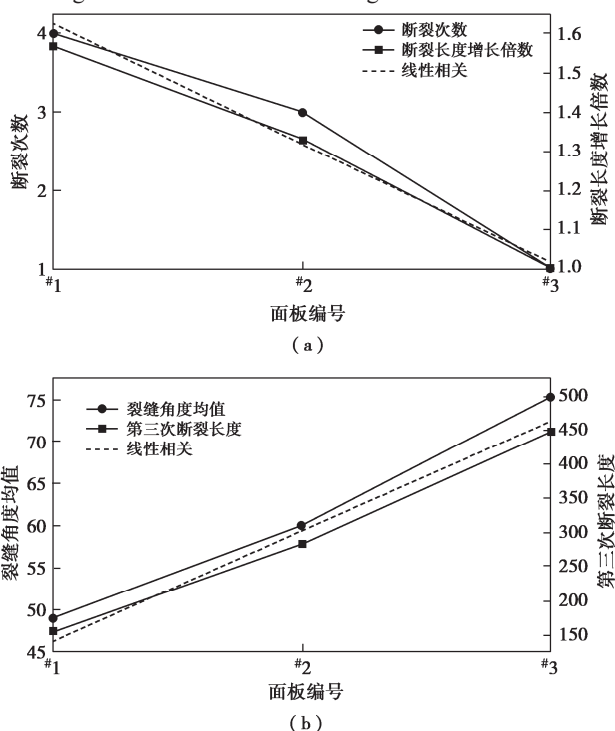


图 13 面板断裂特征参数

Fig. 13 Face slab fracture characteristic parameters

综上可知，面板在溃决过程中，其破坏程度由坝顶向坝基，由坝中向坝肩处逐渐减弱，坝体上游面溃口处的面板以“倒梯形”的分布方式展布（如图 12）。溃口洪水流量过程线不仅可以反映坝料冲蚀程度和溃口发展过程，也是溃坝致灾后果评价的基础。通过分析面板堆石坝的漫顶溃坝过程，可以将溃口流量-时间曲线划分为溃坝初始阶段、主要溃坝阶段、次要溃坝阶段和溃口稳定阶段（如图 14）。在主要溃坝阶段，由于 1-2 面板的折断，溃口出现过一次洪峰，流量达到了 3.45 L/s，这也是整个溃坝阶段的流量峰值；该阶段溃坝持续时间较短，但面板断裂长度较大。在次要溃坝阶段，1-3 和 2-2 面板分别断裂，产生了两个次级洪峰，流量均为 2.30 L/s。加筋面板坝的漫顶溃

决表现出溃口流量攀升与面板折断急剧泄流的循环特征。面板折断情况、溃口尺寸及相应的溃口流量关系见表 2。从中可以看出面板堆石坝漫顶溃坝过程中的水-土-结构耦合作用机制，即溃口流量与坝料的冲蚀和面板的折断呈正相关关系，但随着库水位的下降，这一正相关关系的强度逐渐减弱。与均质土坝相比，面板的结构性破坏特征（折断时刻和折断长度）对溃口流量的突变具有重要影响。

表 2 面板坝漫顶溃坝特征参数

Table 2 Breach characteristic parameters of concrete-face rockfill dam overtopping failure

面板 标号	面板折断情况		溃口尺寸/mm			面板折断后 溃口流 量/(L·s <sup>-1</sup> )
	折断次数	折断长度/ mm	长	宽	高	
1-1	第 1 次	224	51	941	576	6.01
	第 2 次	224	73	786	511	3.02
1-2	第 1 次	216	75	946	581	3.70
	第 2 次	230	77	778	517	1.08
1-3	第 1 次	446	77	778	517	2.30
2-1	第 1 次	156	125	615	431	1.99
	第 2 次	148	131	440	352	1.78
	第 3 次	142	136	267	274	1.38
2-2	第 1 次	283	138	461	362	2.30
	第 2 次	163	142	265	276	1.88
2-3	第 1 次	446	150	267	274	1.57

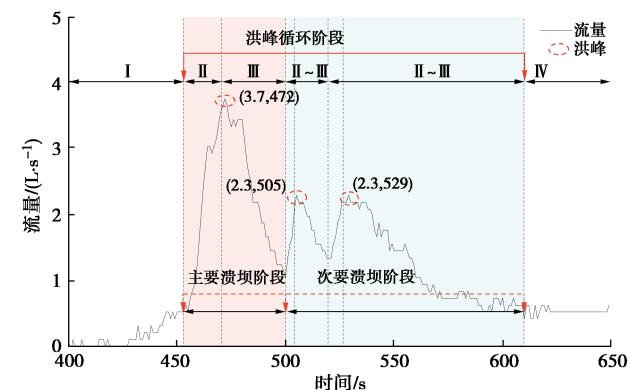


图 14 面板堆石坝漫顶溃坝溃口洪水流量过程线

Fig. 14 Breach hydrograph of concrete-face rockfill dam due to overtopping failure

## 4 结 论

揭示面板堆石坝漫顶溃坝机理对溃坝过程数值模拟和防灾减灾至关重要。本文通过概化缩尺物理模型试验，研究了面板坝在漫顶水流作用下的溃口发展规律和洪水流量演化过程，揭示了面板坝漫顶溃坝过程中的水-土-结构耦合机制。主要得到以下 5 点结论。

(1)对于主要由无黏性压密堆石体和防渗面板组成的面板堆石坝，其冲蚀溃决过程与黏性土和未经过压实的天然堰塞体有明显区别。面板坝漫顶溃坝表现为堆石料的连续性冲蚀、溃口边坡间歇性失稳和悬空

面板多次折断的耦合过程。

(2) 由于有防渗面板的影响,堆石体在纵、坡面表现出不同的冲蚀过程。在纵断面方向,堆石体溃口在漫顶水流作用下经历了尾部下切—陡坎溯源—侧壁坍塌—全断面冲刷—上冲下淤—河床稳定的过程;在坡面方向,堆石体经历了溯源侵蚀—侧侵剥蚀—溃口边坡失稳坍塌,最终形成“八字形”溃口。

(3) 基于相似准则,选择植筋面板代替钢筋混凝土面板,并考虑实际情况在试验中设置纵缝和横缝,研究表明,具有一定抗弯刚度的悬空植筋面板在漫顶水流和自身重力作用下出现多段间歇性折断,断裂程度从坝顶向坝基及从坝中向坝肩逐渐减弱。

(4) 采用量化指标揭示了上游坡面“倒梯形”溃口处面板的断裂演化机制,明晰了下游坝坡堆石体中“八字形”溃口的形成机理,并拟合得出了堆石体溃口形态的多值函数表达式。

(5) 明晰了堆石料冲蚀与面板断裂的循环破坏机制,揭示了流量-时间曲线中的多峰值现象,发现了溃口流量与堆石体冲蚀和面板折断呈正相关关系,面板的结构性破坏特征(折断时刻和折断长度)对溃口流量的突变具有重要影响。

**利益冲突声明/Conflict of Interests:** 所有作者声明不存在利益冲突。All authors disclose no relevant conflict of interest.

**作者贡献/Authors' Contributions:** 赵鲲鹏和钟启明设计研究内容,陈生水和钟启明提供研究指导,赵鲲鹏、邓翌和宋智通完成试验数据分析,赵鲲鹏、陈生水和钟启明参与论文写作和修改。所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。This study was designed by ZHAO Kunpeng and ZHONG Qiming, and supervised by CHEN Shengshui and ZHONG Qiming. The experimental data analysis were conducted by ZHAO Kunpeng, DENG Zhao, and SONG Zhitong. The manuscript was drafted and revised by ZHAO Kunpeng, CHEN Shengshui and ZHONG Qiming. All the authors have read the last version of manuscript and consented for submission.

## 参考文献:

- [1] ZHONG Q M, CHEN S S, FU Z Z. Failure of concrete-face sand-gravel dam due to water flow overtops[J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2019, **33**(2): 04019007.
- [2] MEI S Y, ZHONG Q M, YANG M, et al. Overtopping-induced breaching process of concrete-faced rockfill dam: a case study of Upper Taum Sauk dam[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2023, **144**: 106982.
- [3] HAQUE S, IKEUCHI K, SHRESTHA B B, et al. Relationship

between residential house damage and flood characteristics: a case study in the Teesta River Basin, Bangladesh[J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2023, **96**: 103901.

- [4] MORRIS M W. Breaching of Earth Embankments and Dams[D]. London: Open University, 2013.
- [5] HANSON G J, COOK K R, HUNT S L. Physical modeling of overtopping erosion and breach formation of cohesive embankments[J]. *Transactions of the ASAE*, 2005, **48**(5): 1783-1794.
- [6] ZHANG J Y, LI Y, XUAN G X, et al. Overtopping breaching of cohesive homogeneous earth dam with different cohesive strength[J]. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 2009, **52**(10): 3024-3029.
- [7] 李君纯. 青海沟后水库溃坝原因分析[J]. *岩土工程学报*, 1994, **16**(6): 1-14. (LI Junchun. Gouhou dam and analysis for causes of the dam failure[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1994, **16**(6): 1-14. (in Chinese))
- [8] 刘杰, 丁留谦, 缪良娟, 等. 沟后面板砂砾石坝溃坝机理模型试验研究[J]. *水利学报*, 1998, **29**(11): 69-75. (LIU Jie, DING Liuqian, MIAO Liangjuan, et al. Model test for dam breach of Gouhou concrete face sandy gravel dam[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1998, **29**(11): 69-75. (in Chinese))
- [9] 李雷, 盛金保. 沟后坝砂砾料的工程特性[J]. *水利水电科学研究*, 2000(3): 27-32. (LI Lei, SHENG Jinbao. Engineering behavior of gravel materials of Gouhou dam[J]. *Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute*, 2000(3): 27-32. (in Chinese))
- [10] 陈生水. 土石坝溃决机理与溃坝过程模拟[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012. (CHEN Shengshui. Failure Mechanism and Simulation of Earth-Rock Dam Failure Process[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2012. (in Chinese))
- [11] LI Y L, QIU W, CHEN Z Y, et al. Experimental study on the process of overtopping breach of concrete-faced sand-gravel dam[J]. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2022, **26**(13): 6334-6353.
- [12] LI Y L, TIAN C, WEN L F, et al. A study of the overtopping breach of a sand-gravel embankment dam using experimental models[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2021, **124**: 105360.
- [13] 陈生水, 曹伟, 霍家平, 等. 混凝土面板砂砾石坝漫顶溃决过程数值模拟[J]. *岩土工程学报*, 2012, **34**(7): 1169-1175. (CHEN Shengshui, CAO Wei, HUO Jiaping, et



- al. Numerical simulation for overtopping-induced break process of concrete-faced sandy gravel dams[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(7): 1169-1175. (in Chinese))
- [14] 钟启明, 沈光泽. 混凝土面板砂砾石坝漫顶溃坝模型研究[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(9): 1591-1598. (ZHONG Qiming, SHEN Guangze. Numerical model for breach of concrete face sand-gravel dams due to overtopping[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(9): 1591-1598. (in Chinese))
- [15] 林海, 聂腾, 周创兵. 均质黏土坝漫顶缩尺模型的相似性优化试验研究[J]. 岩土工程学报, 2023, **45**(增刊 1): 140-143. (LIN Hai, NIE Teng, ZHOU Chuangbing. Similarity optimization of reduced-scale model tests on break of homogeneous clay dam due to overtopping[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, **45**(S1): 140-143. (in Chinese))
- [16] 郇能惠, 王立安, 任强, 等. 高混凝土面板堆石坝接缝止水试验研究和应用[J]. 岩土工程学报, 2025, **47**(1): 30-37. (LI Nenghui, WANG Li'an, REN Qiang, et al. Mechanical properties of new type of joint waterstop for high CFRDs and its application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2025, **47**(1): 30-37. (in Chinese))
- [17] 杨彦龙, 沈海尧, 黄维. 混凝土坝破坏模式及溃口几何参数探讨[J]. 大坝与安全, 2022(3): 1-9. (YANG Yanlong, SHEN Haiyao, HUANG Wei. Discussion on failure modes of concrete dams and geometric parameters of dam break[J]. Dam & Safety, 2022(3): 1-9. (in Chinese))
- [18] 钟启明, 陈生水, 梅世昂. 均质黏性土坝漫顶溃决机理及溃坝过程模拟[J]. 工程科学与技术, 2019, **51**(5): 25-32. (ZHONG Qiming, CHEN Shengshui, MEI Shiang. Breach mechanism and breach process simulation of homogeneous cohesive earthen dam due to overtopping[J]. Advanced Engineering Sciences, 2019, **51**(5): 25-32. (in Chinese))
- [19] HANSON G J, TEJRAL R D, HUNT S L, et al. Internal erosion and impact of erosion resistance[C]// Proceedings of the 30th U.S. Society on Dams Annual Meeting and Conference, California. 2010: 773-784.
- [20] AMARAL S, VISEU T, FERREIRA R. Experimental methods for local-scale characterization of hydro-morphodynamic dam breach processes. Breach detection, 3D reconstruction, flow kinematics and spatial surface velocimetry[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2019, **70**: 101658.
- [21] AMARAL S, CALDEIRA L, VISEU T, et al. Designing experiments to study dam breach hydraulic phenomena[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, **146**(4): 04020014.
- [22] CAMPOS R G D, SALIBA A P M, BAPTISTA M B, et al. Breach parameters for cascade dams' breaks using physical, empirical and numerical modeling[J]. Rbrh, 2020, **25**: e30.
- [23] KANJANAKAROON P, EKKAWATPANIT C, WONGSA S, et al. A comparative study of embankment breach parameters in different breach locations[J]. Journal of Hydro-Environment Research, 2020, **29**: 59-69.
- [24] LIU J, XIAO H, GUO F F. Calculation formula and coefficient analysis of dam breach discharge based on surface velocity[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2023, **94**: 102446.
- [25] ZHANG J Y, FAN G, LI H B, et al. Large-scale field model tests of landslide dam breaching[J]. Engineering Geology, 2021, **293**: 106322.