

DOI: 10.11779/CJGE202111021

尾矿管涌溃坝模式及下泄冲击特性试验研究

吴帅峰¹, 严俊¹, 蔡红¹, 肖建章¹, 杜继芳², 刘传鹏³

(1. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100048; 2. 山东工商学院管理科学与工程学院, 山东 烟台 264005; 3. 中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083)

摘要: 为分析尾矿管涌溃坝的演化规律, 理清溃坝机理, 揭示尾砂流下泄冲击特性, 采用现场大型物理模型试验方法对尾矿库管涌溃坝全过程进行试验研究。结果表明: 管涌形成冲刷通道, 进而出现上部塌落、侧向冲刷的溃坝模式, 溃口的发展经历了通道扩大、纵向下切和横向扩展3个过程, 并基于此提出了7阶段的溃坝过程; 尾砂流下泄速度随距离呈对数型衰减, 并基于幂函数形式提出了涵盖冲击速度、密度、埋深的3参数的冲击力模型; 尾砂流在坝体近端呈现下切冲刷, 远端呈现沉积的特征, 在弯道处由于流向转变的过程呈现外侧冲刷掏蚀, 内侧沉积淤积的特性, 并基于此提出了尾矿坝防护的建议。以上研究成果为尾矿库的防灾减灾提供理论基础。

关键词: 尾矿库; 管涌; 溃口发展; 下泄冲击; 沉积特性

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2021)11-2134-08

作者简介: 吴帅峰(1988—), 男, 河南登封人, 高级工程师, 博士后, 主要从事大坝岩土工程与冲击动力学等方面的研究。E-mail: wusf@iwhr.com。

Experimental study on dam break mode of tailing piping and discharge impact characteristics

WU Shuai-feng¹, YAN Jun¹, CAI Hong¹, XIAO Jian-zhang¹, DU Ji-fang², LIU Chuan-peng³

(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China; 2. School of Management Science and Engineering, Shandong Technology and Business University, Yantai 264005, China; 3. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: In order to analyze the evolution law of tailing pipe break, clarify the mechanism of tailing dam break, and reveal the impact characteristics of tailing flow, a large-scale physical model test method is used to study the whole process of piping break of a tailing reservoir. The results show that the scour channel is formed by piping, and then the dam break mode of the upper collapse and lateral scour occurs. The development of the breach has gone through three processes: channel expansion, longitudinal undercutting and transverse expansion. Based on this, a 7-stage dam break process is proposed. The tailing flow velocity decays logarithmically with distance, and the 3-parameter impact force model including impact velocity, density and buried mode is as follows: the depth is proposed based on the power function form, and the dam break tailing flow presents undercutting erosion at the near end of the dam body and deposition at the far end. Due to the change process of flow direction at the turning point, it presents the characteristics erosion at the outer side and deposition at the inner side. Based on this, some suggestions for protection of tailing dams are put forward. The above research results may provide theoretical basis for disaster prevention and mitigation of tailing ponds.

Key words: tailing reservoir; piping; breach development; discharge impact; sedimentary characteristic

0 引言

尾矿库是矿山企业排放弃渣的辅助生产设施, 其运行安全不仅关系到矿山生产运行, 更关系到坝下人民群众生命财产和环境安全^[1-2]。建国以来有统计的尾矿库溃坝事故有38起^[3-4], 造成巨大的生命、环境损失。由于重视程度的不足, 在2001年—2008年, 尾

矿库事故呈上升趋势, 于2008年到达高峰, 其中溃坝事故居首, 占事故数的58%, 2008年发生襄汾尾矿溃坝事故后, 国家高度重视尾矿库安全管理^[5-6], 致使该

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0804607); 国家自然科学基金项目(U19A2049)
收稿日期: 2021-01-19

类事故逐渐减小, 但仍时有发生。

目前, 国内外学者对尾矿库溃坝机理、尾砂下泄沉积演进等方面有一定的探索并取得了一定的规律性成果。在模型试验方面, Hanson 等^[7]总结了美国农业部农业研究所的 7 次漫顶溃坝试验, 提出 4 阶段的溃口发展过程, 建立了溃口发展与堤坝材料间的相关性。Hassan 等^[8]开展了 3 种类别的溃坝模型试验, 针对溃口发展和溃口流量过程评价了 7 个溃口计算模型的适用性, 提出了溃口宽度的修正建议。Alonso 等^[9-10]、Gens 等^[11]以 Aznalcollard 大坝溃决为实例, 从现场试验观测、坝体破坏条件和下泄演进 3 个角度对溃坝的机理和过程进行研究, 基于孔隙水压力变化过程提出了渐进式材料侵蚀破坏模式, 重现了坝体滑坡过程的数值计算。Lobovsky 等^[12]采集了溃坝水流的对下游结构物的动压力, 提出了冲击力的计算模型。在数值计算方面, Zandarin 等^[13]以古巴某尾矿库溃坝为例, 采用水土耦合有限元方法模拟了溃坝诱因, 指出低渗透性坝体内的毛细水是影响稳定的关键因素, 提出将毛细水测定引入到安全监测范畴。钟启明等^[14]提出了均质坝溃坝“陡坎”移动的数学模型, 建立了溃坝过程的数值计算方法, 通过溃口流量过程和溃口形态验证了模型的合理性。Aureli 等^[15]在溃坝下泄冲击里的数据基础上, 建立了三维 SPH 冲击力模型, 率定了模型的参数敏感性并应用到相关预测上。Yuan 等^[16]利用 Fluent 软件建立从砂流运动速率、冲孔力和相应的埋砂深度等方面分析了尾砂流的演进特征, 得出了下游各断面的压力分布规律。阮德修等^[17]、Blight 等^[18]以泥石流冲击力的计算方法, 通过修正相关参数, 模拟了尾矿下泄冲击过程, 给出了冲击力与流速、埋深等参数的相关性。

总结相关研究, 溃坝过程的研究多集中在土质水坝上, 溃坝下泄演进也以水流为主要物质, 下泄冲击作用也仅考虑了水的作用, 而尾矿坝的特异性在于库内填料和筑坝材料是相一致的, 溃坝形式、过程和下泄演进均与水坝溃决区别较大^[19-21], 下泄冲击即与水坝溃决冲击不同, 也与泥石流冲击有所差异^[22-23]。对此, 垄待提出针对细粒尾矿料筑坝的溃决发展模式及模型, 开展尾砂流的下泄演进规律, 获取下泄冲击特性。本文以某金属矿尾矿料为材料, 建立了库容约 2600 m³, 坝高 5 m, 坝长 20 m 的尾矿库溃坝模型试验。采用无人机、高速摄影等手段采集了溃坝发展过程, 下游设置动应力、流速仪等传感设备, 采集尾砂流冲击力数据, 提出溃口演化、冲击作用和尾砂流冲刷沉积规律。

1 尾矿库溃坝模型试验

1.1 试验目的及预期

尾矿库溃坝及下泄冲击试验是根据相似理论构建尾矿库物理模型, 在库内注水, 模拟排水不畅的不利工况, 使坝体浸润线提升、饱和, 在薄弱处形成管涌, 模拟管涌发展形成溃坝的物理过程, 对溃坝全过程进行监测, 测得下泄尾砂流在不同速度下的应力时程曲线和冲刷沉积数据, 揭示尾矿库管涌溃坝机理、尾砂流冲击特性及冲刷沉积特征。

1.2 尾矿库模型设计

本试验模型选址地为广东省大宝山矿槽对坑尾矿库库区内, 矿区范围 9.53 km², 是典型的大型铁、铜、铅、锌等多种重金属硫化物综合性矿场。为便于模型库内补充水源, 且溃坝试验所产生的尾砂流直接排于库内, 不对库区安全造成影响, 将筑坝模型选在槽对坑尾矿库的库尾, 其平面如图 1 所示。

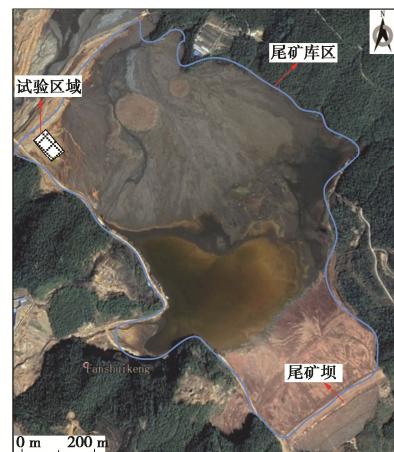


图 1 试验区域设置

Fig. 1 Test area

利用此尾矿砂填筑的模型库, 顶部长、宽分别为 26, 20 m, 库底部长、宽分别为 20, 16 m, 库内深度为 5 m, 总库容约 2100 m³。库内堆放尾矿砂厚度为 3 m, 以模拟尾矿库存料并作为溃坝后尾砂流的来源, 空余高度 2 m 用于注水浸润坝体, 引导溃坝的发生。坝体高 5 m, 长 22 m, 顶宽 1 m, 坝内坡比 1:0.75, 外坡比 1:1, 模型设计及实体如图 2, 3 所示, 库容水位关系如图 4 所示。

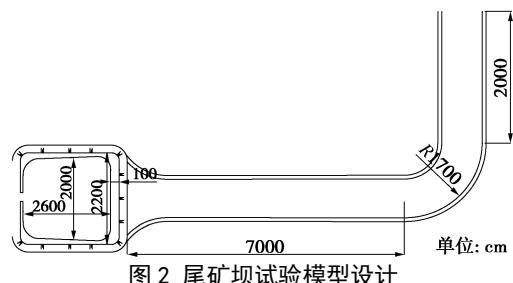


图 2 尾矿坝试验模型设计

Fig. 2 Model design of tests on tailing dam



图3 尾矿坝实体模型

Fig. 3 Physical model for tailing dam

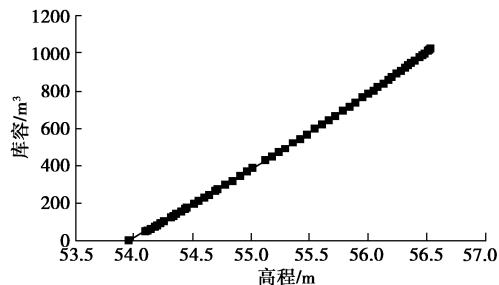


图4 库容水位曲线

Fig. 4 Curve of water level

本试验主要关注于尾矿坝的溃坝过程分析溃口演化规律,分析下泄尾砂流冲击特征及影响因素,阐述尾砂流冲砂沉积规律,因此不再考虑相似比尺问题,且本模型试验较大,可反映实际尾矿坝的溃决特性。

模型库选用原尾矿砂作为填筑材料,该库为,以铜矿为主的多金属沉积尾矿砂,尾矿砂颗粒分曲线如图5所示,从曲线中可以看出, $D_{50}=0.12 \text{ mm}$, 小于 0.075 mm 的颗粒含量占 26%, 属于细粒尾矿砂, 在土的类别上属黏性土, 渗透系数为 $2.89 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$, 属低渗透性。该尾矿砂因其含有选矿剂, 具有较高的天然强度, 表观性状为在天然含水量下经压实后有较高的强度, 黏结性也很好, 当浸水后选矿剂溶于水中, 整体呈浆状, 不再具有强度。模型填筑完毕后再坝体各位置采集试样获取基本物理参数如表1所示。

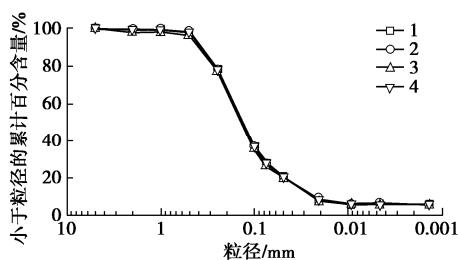


图5 尾矿砂颗粒分曲线

Fig. 5 Grain-size distribution curve of tailings

从坝体 8 个典型位置的力学性质可得坝体材料的平均摩擦角为 56.43° , 平均黏聚力为 32.78 kPa , 反映该材料在天然含水率下具有较好的强度。

表1 坝体各位置取样物理力学性质

Table 1 Physical and mechanical properties of sampling at each position of dam body

取样位置	含水率 /%	密度 / $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	干密度 / $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	摩擦角 / $(^\circ)$	黏聚力 /kPa
左坝肩	8.06	1.66	1.53	57.97	31.66
坝顶	9.57	1.69	1.55	50.21	32.45
右坝肩	6.65	1.75	1.64	61.44	36.06
左坝坡中	7.03	1.72	1.61	55.98	30.71
坝坡中	4.36	1.70	1.63	59.94	32.72
右坝坡中	6.53	1.67	1.57	57.27	30.90
左坝脚	6.29	1.82	1.71	58.09	35.27
右坝脚	5.84	1.79	1.69	57.97	31.38

1.3 监测布置方案

(1) 溃口演化及下泄过程记录

为监测溃口发展规律和坝体变形, 在坝体坡面设置 50 cm 边长的正方形网格, 为捕捉初始溃决流速, 在渠道内设置 100 cm 边长正方形网格, 网格配合 3 台高帧率摄像及共同构成记录系统。如图 6 所示。



图6 溃口演化及下泄过程记录网格

Fig. 6 Record grids of breach evolution and discharge process

(2) 尾砂流下泄冲击记录

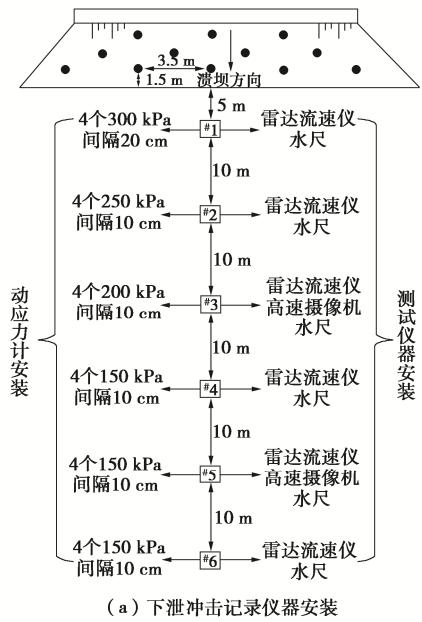
为测得下游不同距离处的溃坝下泄流速和冲击作用, 在渠道内安装 6 根钢结构立柱作为承载设置, 其中 #1 立柱高, 安置于距离坝址 5 m 处, 其余 5 根立柱高 1.5 m , 以 10 m 的等间距安装于下游渠道内, 立柱根部安装 4 枚动应力计, 上部安装雷达流速仪, 侧边安装水尺。在坝体上安装 12 支渗压计用于获取坝体浸润线变化规律。整体安装简图如图 7 所示。

(3) 摄像系统

通过架设高帧率摄像机，并配合各立柱侧边的测量水尺记录溃坝泥石流到达该处的时间、淹没高度及泥深变化情况。其中#3立柱顶端安置一枚高速摄像机，捕捉溃坝正视图像及#2立柱水位过程；渠道侧边安置1台摄像机，捕捉#1立柱水位过程；全景摄像头安置于#5—#6立柱中间位置的渠道上，用于捕捉#4—#6立柱水位过程。无人机悬空正拍摄初始演进过程及溃口发展情况。

坝顶约 1 m 位置处的尾矿砂仅放置而不进行压实, 使得该处的渗透系数大于其他部位, 以确保能发生渗漏通道。在蓄水过程中, 水面距坝顶 0.4 m 时, 即淹没预制薄弱点 0.6 m, 发生渗漏现象, 此时模型库内蓄水高度为 1.6 m。

从发生管涌现象到溃坝完结历时约 25 min, 可将溃坝过程分为 7 个阶段, 如图 8 所示: ①在管涌位置坝体内侧土料被流水带出, 外部形成小孔洞, 内部空洞直径大于外部; ②管涌通道贯通后迅速发展, 并向下切割, 下部形成的冲刷通道逐渐大于原始管涌通道; ③坝体自下而上呈“八”字形跌落, 当原始管涌通道扩大到上方自重大于摩阻力时, 上部坝体脱落, 并被溃坝水流带走, 形成贯通坝体的溃口; ④下游坝坡出现初始冲坑, 随后形成“陡坎”并逐渐发展为近似直立状; ⑤“陡坎”向坝体上游发展, 并保持直立, 同时溃口的宽度和深度也不断发展, 直至“陡坎”发展到上游库内尾矿料顶面; ⑥溃口边坡发生失稳坍塌, 且内侧边坡先于外侧边坡坍塌; ⑦当水流的冲蚀能力小于土体的抗冲蚀能力时, 溃坝过程停止。



(a) 下泄冲击记录仪器安装



(b) #3立柱仪器安装示例

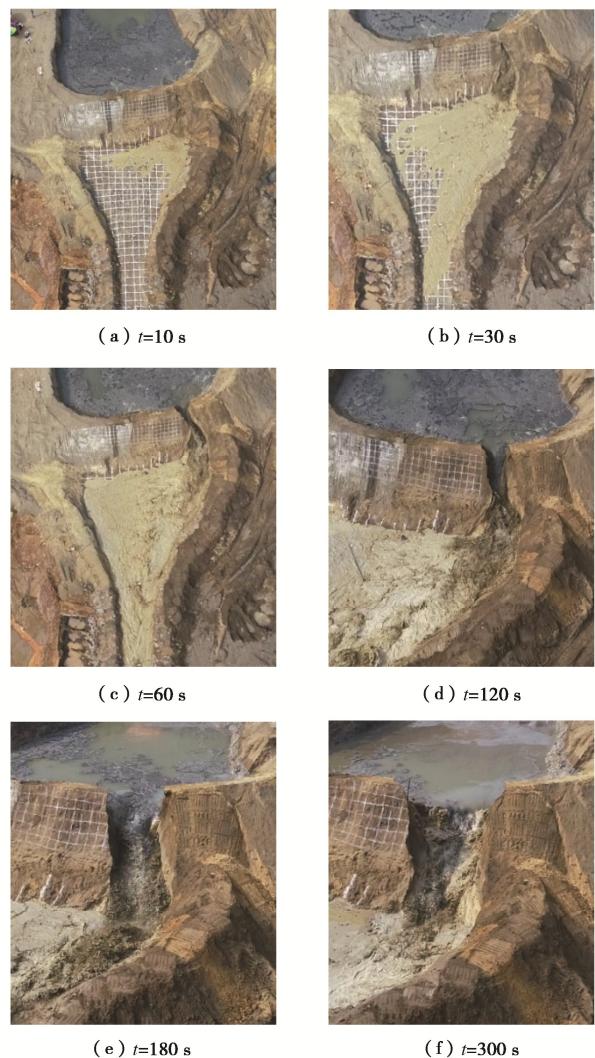


图 7 尾砂流下泄冲击记录仪器安装

Fig. 7 Installation of impact recording instrument for tailing discharge

2 试验结果及分析

2.1 尾矿坝管涌溃坝全过程分析

为实现管涌溃坝模式，在坝体填筑时左侧偏上距

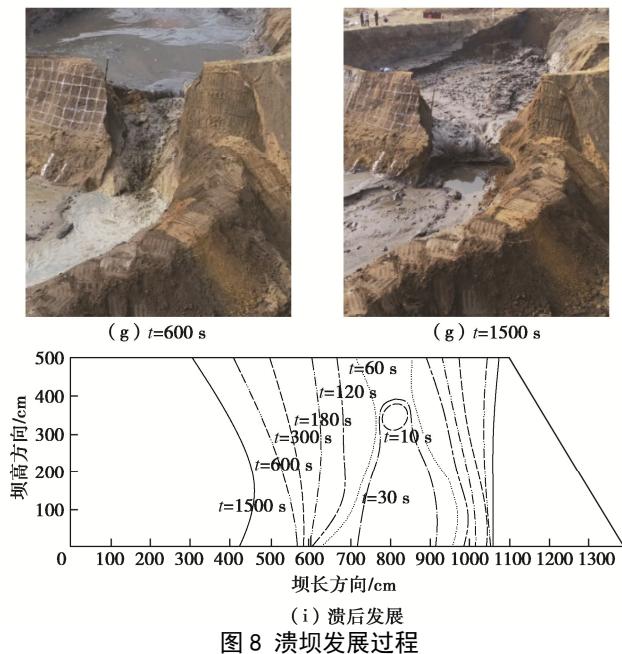


图 8 溃坝发展过程

Fig. 8 Dam break development process

将水位下降过程与时间相关联得出如图 9 所示曲线, 该曲线可显著表示水位下降的 3 阶段特征, 首先是前 240 s 的缓慢下降段, 其次为 240~450 s 的快速下降段, 最后为 450 s 以后的末端平稳段, 前期的缓慢下降段占总溃坝时间的 52%。通过对溃坝的发生条件和过程进行分析, 尾矿库排水条件不利, 液面升高, 坝体浸润线抬升时对其稳定最为不利。

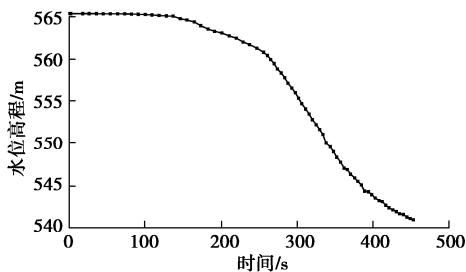


图 9 水位下降与时间关系曲线

Fig. 9 Relationship between water level and time

2.2 尾砂流下泄冲击特性

本次试验溃决点发生在坝体左侧, 因此水流绕过第一根立柱, 经喇叭口汇合聚拢后具备较大流速和冲击力, 第一根立柱所测结果并不反映下泄时程特征, 从第二根立柱分析溃决后尾砂冲击应力时程曲线, 如图 10 所示。

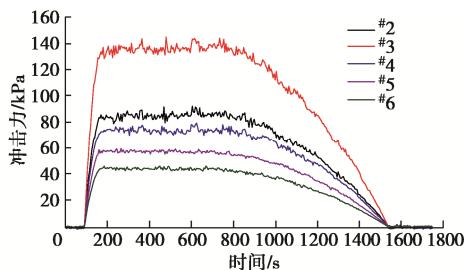


图 10 各位置冲击力时程曲线

Fig. 10 Time-history curves of impact force at each position

由于试验溃口位置偏向坝体左侧, 与渠道中流速监测点相对位置关系并非直接对应的, 下泄物在#2 位置开始汇集, 造成了#2 位置流速相对#3 位置小。#3—#6 位置的最大流速随距离呈指数型衰减, 如图 11 所示。据此可建立流速与冲击力间的相对关系。

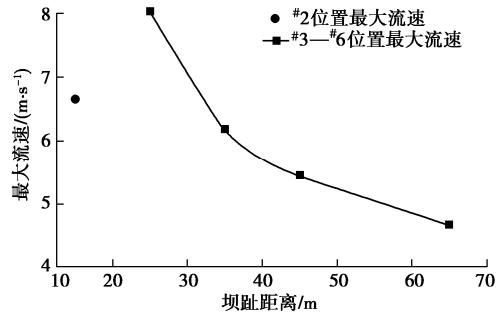


图 11 最大流速随距离的衰减形式

Fig. 11 Attenuation form of maximum velocity with distance

综合分析各立柱位置流速与冲击力关系, 从时程曲线上可看出, 冲击力和流速整体曲线发展形态均包含上升段、峰值段和下降段, 这 3 段在时间上也相互对应, 但下降段流速呈“凹”型下降, 而冲击力呈“凸”型下降, 这与流速与冲击力的非线性关系有关。

为更具体的解构流速与冲击力的关系, 将各立柱的最大冲击力与所对应流速耦合分析, 建立流速大于 4 m/s 时流速与冲击力对应关系, 同时在下降段找出同时刻下流速小于 4 m/s 时流速与冲击力对应关系, 对应关系如表 2 所示, 并绘制对应曲线关系如图 12 所示。

表 2 尾砂下泄流速与冲击力关系

Table 2 Relationship between velocity of tailing discharge and impact force

流速/(m·s⁻¹)	冲击力/kPa
1.62	17.14
1.79	21.69
2.21	19.17
2.60	22.64
3.08	26.58
4.67	44.08
5.44	57.29
6.18	73.96
6.54	85.22
8.03	137.43

尾砂流的冲击力不仅与流速相关, 与密度也直接相关, 采集溃坝过程的尾砂流进行密度测试, 得出平均密度为 1.3 g/cm³, 结合图 12 所示可知, 在此密度下尾砂流的冲击力与流速呈幂函数相关性。拟合关系为

$$f = \frac{1}{2} \times 1.46 \times 1.3^{3.61} \times v^2 + 7.62 \quad (1)$$

式中, 1.3 为下泄尾砂流的平均密度, 7.62 为后缀项, 可理解为与冲刷时的下泄埋深相关。对此可将式(1)抽象为一般化冲击力与冲击速度、埋深、密度的相关模型为

$$f = \frac{1}{2} \alpha \cdot \rho^{\beta} \cdot v^2 + \gamma \cdot \rho g h \quad , \quad (2)$$

式中, α , β , γ 为待定系数项, ρ 为下泄尾砂流的密度, v 为下泄冲击速度, g 为重力加速度, h 为下泄尾砂流冲击时的埋深。

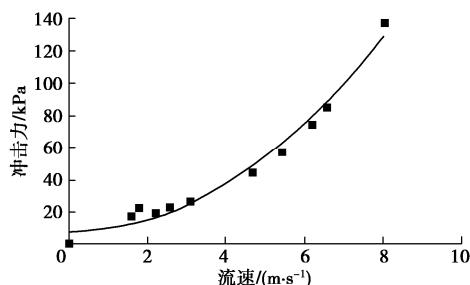


图 12 流速与冲击力对应关系

Fig. 12 Corresponding relationship between velocity and impact force

2.3 尾砂流下泄冲刷沉积特性

坝体溃决后尾砂流在近端产生冲刷作用, 在远端出现堆积, 为分析尾矿库溃坝下泄泥砂在坝址下游的冲刷和沉积规律, 采用无人机倾斜摄影建模方法, 建立溃坝前后的精细地理模型, 水平精度达到 5 mm, 如图 13 所示。



图 13 溃坝前后倾斜摄影地理模型

Fig. 13 Photographical geographical model for slope before and after dam break

利用此模型, 沿渠道内 5, 15, 25, 35, 45, 55 m 和转弯处量测溃坝前后高程变化, 渠道内的坡度为 2%, 在渠道内, 由于流速较大, 水深较深, 造成竖直走向渠道内主要为水流的冲刷下切作用, 且在有立柱阻挡的位置产生更大的激波, 在立柱周围的冲刷更加严重, 冲刷下切深度与流速正相关。渠道内整体冲刷深度如表 3 所示。

表 3 竖直渠道内的冲刷深度
Table 3 Scour depths in vertical channel

距坝址距离 /m	原始高程 /m	冲刷后高程 /m	冲刷深度 /cm
15	561.05	560.79	26
25	560.85	560.59	26
35	560.63	560.39	24
45	560.42	560.18	24
55	560.24	560.01	23

在转弯处, 存在消能效应, 靠近渠道侧壁的一侧为冲刷区, 远离的一侧为沉积区, 冲刷区的形态与弯道形态基本一致, 沉积区呈扇形展开。水流的冲刷作用使得冲刷区渠道围堰被掏蚀, 渠道厚度变薄, 如图 14 所示。

冲刷相对严重的区域位置大致与竖直渠道相垂直, 在流速方向由 0° 转为 90° 的过程中侧向侵蚀效应最大, 如图 15 所示。

该侵蚀效应最大的沿程长度约为 17 m, 即一个转弯半径的长度, 将弯道起始位置定义为沿程长度的 0 m, 利用地理模型量测溃坝前后外侧渠道厚度和底面高程, 定量化的说明冲刷强度, 并绘制冲刷特征与弯道起始距离的关系曲线如图 16 所示, 可看出在弯道处冲刷现象显著, 特别是侧向冲刷, 最大侧向冲刷侵蚀为 1.5 m, 冲刷深度上在弯道处也明显加深。同时, 在阻挡物的底部位置也发生较严重冲刷现象, 该位置产生激波作用, 往往比平顺位置更容易被掏蚀。

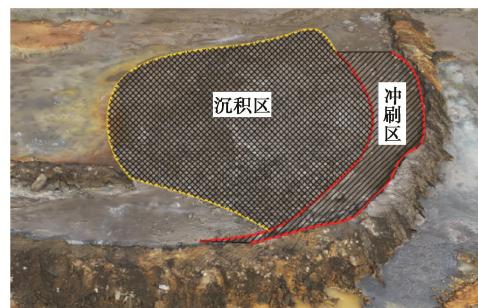


图 14 转弯区冲刷及沉积区划分

Fig. 14 Division of erosion and sedimentary area in turning area

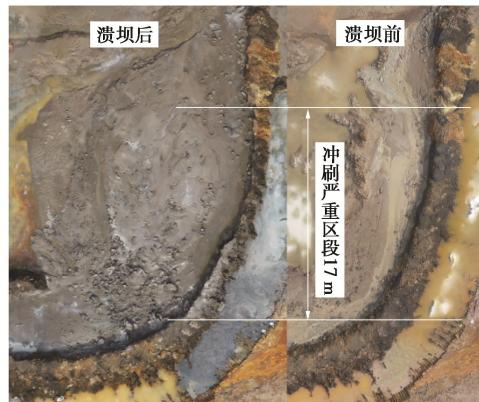


图 15 冲刷严重区域位置

Fig. 15 Areas with severe erosion

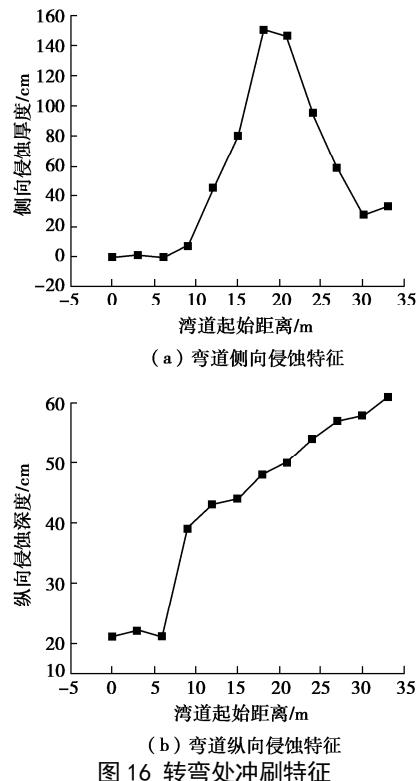


图 16 转弯处冲刷特征

Fig. 16 Erosion characteristics at turning point

从冲刷侵蚀特性上进一步分析可得,溃坝尾砂流的防护设施可设置在下游一定距离处,采用弯道引导泄流方向的形式,在弯道处尾砂流撞击弯道壁并改变流动方向,实现能量耗散,并在内侧设置开放式通道供耗散后的尾砂流沉积,实现整体性的防护。

3 结 论

(1) 尾矿坝管涌溃坝模式属于冲刷掏蚀形成管涌通道,出现上部塌落、侧向冲刷,进而发生溃坝。溃口的发展经历了通道扩大、纵向下切和横向扩展3个过程,并基于此提出了7阶段的溃坝过程。

(2) 尾砂流下泄速度随距离呈对数型衰减形式;根据下泄冲击力与冲击速度间的幂相关性特征,提出了含有冲击速度、密度、埋深的3参数冲击力模型。

(3) 下泄尾砂流在坝体近端呈现下切冲刷的特征,冲刷下切深度与流速正相关;远端呈现沉积特征,特别的,在弯道流向转变的作用下,靠近渠道侧壁的一侧为冲刷区,远离的一侧为沉积区,冲刷区的形态与弯道形态基本一致,沉积区呈扇形展开。

(4) 在弯道处,流速方向由 0° 转为 90° 的过程中侧向侵蚀效应最大,消能也最大,长度约为弯道的转弯半径;根据此特性可在下游一定距离处,采用弯道引导泄流方向的形式进行防护。

参 考 文 献:

[1] SHU Y B, LI P L, LI Z X. Risk assessment regarding tailings

- dam break[J]. Advanced Materials Research, 2012, 433/434/435/436/437/438/439/440: 1864 – 1868.
- [2] KOSSOFF D, DUBBIN W E, ALFREDSSON M, et al. Mine tailings dams: Characteristics, failure, environmental impacts, and remediation[J]. Applied Geochemistry, 2014, 51: 229 – 245.
- [3] 于广明, 宋传旺, 潘永战, 等. 尾矿坝安全研究的国外新进展及我国的现状和发展态势[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(增刊 1): 3238 – 3248. (YU Guang-ming, SONG Chuan-wang, PAN Yong-zhan, et al. Review of new progress in tailing dam safety in foreign research and current state with development trend in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(S1): 3238 – 3248. (in Chinese))
- [4] 梅国栋, 王云海. 我国尾矿库事故统计分析与对策研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2010, 6(3): 211 – 213. (MEI Guo-dong, WANG Yun-hai. Statistic analysis and countermeasure study on tailings pond accidents in China[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2010, 6(3): 211 – 213. (in Chinese))
- [5] 吴宗之, 梅国栋. 尾矿库事故统计分析及溃坝成因研究[J]. 中国安全科学学报, 2014, 24(9): 70 – 76. (WU Zong-zhi, MEI Guo-dong. Statistical analysis of tailings pond accidents and cause analysis of dam failure[J]. China Safety Science Journal, 2014, 24(9): 70 – 76. (in Chinese))
- [6] 门永生, 柴建设. 我国尾矿库安全现状及事故防治措施[J]. 中国安全生产科学技术, 2009, 5(1): 48 – 52. (MEN Yong-sheng, CHAI Jian-she. The current safety situation of tailing reservoir in China and preventive measures[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2009, 5(1): 48 – 52. (in Chinese))
- [7] HANSON G J, COOK K R, BRITTON S L. Observed erosion Processes During Embankment Overtopping Tests[C]// American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2003, Las Vegas.
- [8] HASSAN M, MORRIS M, HASON G, et al. Breach Formation: Laboratory and numerical modeling of breach formation[C]// ASDSO's 21st Annual Conference, 2004, Arizona.
- [9] ALONSO E E, GENS A. Aznalcóllar dam failure. Part 1: Field observations and material properties[J]. Géotechnique, 2006, 56(3): 165 – 183.
- [10] ALONSO E E, GENS A. Aznalcóllar dam failure. part 3: dynamics of the motion[J]. Géotechnique, 2006, 56(3): 203 – 210.
- [11] GENS A, ALONSO E E. Aznalcóllar dam failure. part 2: stability conditions and failure mechanism[J]. Géotechnique,

- 2006, **56**(3): 185 – 201.
- [12] LOBOVSKÝ L, BOTIA-VERA E, CASTELLANA F, et al. Experimental investigation of dynamic pressure loads during dam break[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2014, **48**: 407 – 434.
- [13] ZANDARÍN M T, OLDECOP L A, RODRÍGUEZ R, et al. The role of capillary water in the stability of tailing dams[J]. *Engineering Geology*, 2009, **105**(1/2): 108 – 118.
- [14] 钟启明, 陈生水, 邓 墾. 均质土坝漫顶溃坝过程数学模型研究及应用[J]. *水利学报*, 2016, **47**(12): 1519 – 1527. (ZHONG Qi-ming, CHEN Sheng-shui, DENG Zhao. Research on mathematical model for homogeneous earthen dam breach process due to overtopping failure and its application[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, **47**(12): 1519 – 1527. (in Chinese))
- [15] AURELI F, DAZZI S, MARANZONI A, et al. Experimental and numerical evaluation of the force due to the impact of a dam-break wave on a structure[J]. *Advances in Water Resources*, 2015, **76**: 29 – 42.
- [16] YUAN L W, ZHU N, LI S M, et al. Three-dimensional numerical modeling study on the failure evolution of tailing dam[J]. *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, 2016, **13**(4): 2300 – 2305.
- [17] 阮德修, 胡建华, 周科平, 等. 基于 FLO2D 与 3DMine 耦合的尾矿库溃坝灾害模拟[J]. *中国安全科学学报*, 2012, **22**(8): 150 – 156. (RUAN De-xiu, HU Jian-hua, ZHOU Ke-ping, et al. Simulation of tailings dam failure disaster based on coupled FLO2D and 3DMine[J]. *China Safety Science Journal*, 2012, **22**(8): 150 – 156. (in Chinese))
- [18] BLIGHT G E. Destructive mudflows as a consequence of tailings dyke failures[J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering*, 1997, **125**(1): 9 – 18.
- [19] SONG L, YANG Z X, WANG H, et al. On the seepage stability of a tailing dam in Wushan copper mine[J]. *Advanced Materials Research*, 2012, **594/595/596/597**: 207 – 212.
- [20] RICO M, BENITO G, DÍEZ-HERRERO A. Floods from tailings dam failures[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, **154**(1/2/3): 79 – 87.
- [21] KOCAMAN S, OZMEN-CAGATAY H. Investigation of dam-break induced shock waves impact on a vertical wall[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, **525**: 1 – 12.
- [22] KHALID M S. Dynamic analysis of an upstream, tailings dam[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2013, **99**(1): 209 – 221.
- [23] SONG D, NG C W W, CHOI C, et al. Influence of debris flow solid fraction on rigid barrier impact[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2017, **54**(10): 1421 – 1434.

《岩土工程学报》征订启事

《岩土工程学报》创刊于 1979 年, 是我国水利、土木、力学、建筑、水电、振动等六个全国性学会联合主办的学术性科技期刊。由南京水利科学研究院承办, 国内外公开发行。主要刊登土力学、岩石力学领域中能代表当今先进理论和实践水平的科学的研究和工程实践成果等。报道新理论、新技术、新仪器、新材料的研究和应用。欢迎国家自然科学基金项目及其他重要项目的研究成果向本刊投稿, 倡导和鼓励有实践经验的作者撰稿, 并优先刊用这些稿件。主要栏目有黄文熙讲座、综述、论文、短文、工程实录、焦点论坛、讨论和简讯等。

本刊被《中文核心期刊要目总览》连续多年确认为核心期刊, 并在建筑类核心期刊中位于前列; 本刊被科技部“中国科技论文统计源期刊”(中国科技核心期刊)及“中国科技论文与引文数据库”收录; 本刊被中国科学院“中国科学引文数据库”收录; 本刊被“中国知网”全文收录及“中国学术期刊综合评价数据库”收录; 本刊被“工程索引 Ei Compendex 数据

库”和“日本科学技术振兴机构数据库 JST”等国际数据库收录。本刊网址 (www.cgejournal.com) 全文发布本刊所有刊载文章。

本刊读者对象为土木建筑、水利电力、交通运输、矿山冶金、工程地质等领域中从事岩土工程及相关专业的科研人员、设计人员、施工人员、监理人员和大专院校师生。

本刊为月刊, A4 开, 双栏排版, 192 页, 每月中旬出版, 每期定价 40 元, 全年定价 480 元。

本刊国际标准刊号 ISSN 1000 – 4548, 国内统一刊号 CN 32 – 1124/TU, 国内发行代号 28 – 62, 国外发行代号 MO 0520。欢迎广大读者在全国各地邮局订购, 也可在编辑部订购(不另收邮费)。编辑部订购地址: 南京虎踞关 34 号《岩土工程学报》编辑部; 邮编: 210024; 联系电话: 025-85829534, 85829543, 85829553, 85829556; 传真: 025-85829555; E-mail: ge@nhri.cn。

(本刊编辑部)