

## 尾矿库溃坝泥石流运动过程试验研究

赵怀刚<sup>1</sup>,王光进<sup>1,2</sup>,张超<sup>2</sup>,杨春和<sup>2</sup>

(1.昆明理工大学 国土资源工程学院,云南 昆明 650093;

2.中国科学院 武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室,湖北 武汉 430071)

**摘要:**地形是影响尾矿库溃后泥石流演进的重要边界条件,以某尾矿库为背景,开展堆(溃)坝模型试验,探索在山地复杂地形条件下尾矿库溃后泥石流的演进规律。结果表明:溃后泥石流的淹没高度和流速随溃坝时间的变化整体表现为“前期缓慢增长及后期的高速增减,且随着演进距离的增加,淹没高度和流速都明显降低;沟谷弯道至与河道汇合处的淹没高度大于坝址及下游,且出现最大淹没峰值;在沟谷弯道处出现“爬高”和“涡流反射”现象,造成两岸淹没高度差值很大,而在沟谷与河道的连接处,泥石流冲出沟谷淤堵河道;上游沟谷和河道的流速明显大于下游,最大峰值流速出现在沟谷弯道及沟谷和河道连接处。

**关键词:**山地地形;尾矿库;泥石流;流动规律

**中图分类号:** TD926.4;P642.23

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0468-155X(2019)01-0031-07

### 1 前言

随着经济社会的发展,我国已经成为一个矿业大国,12种大宗矿产每年尾矿排放量约为3亿t,除了很小一部分用于矿山充填或者其他综合利用外,其余全都采用构筑尾矿库的方式堆存,使得尾矿库成为金属非金属矿山重大的危险源<sup>[1]</sup>。根据国家安监总局的统计,在我国1.2万座尾矿库中,危库有613座,险库有1265座,病库有3032座,正常库有7745座<sup>[2]</sup>。自2005年以来,我国尾矿库溃坝事故达40多起,特别是2008年山西襄汾新塔矿业公司“9·8”特别重大尾矿库溃坝事故,造成281人死亡,直接经济损失达9619.2万元,社会影响极为恶劣。因此,尾矿库能否安全稳定运行,对矿山生产起着至关重要的作用,坝体一旦失稳破坏,库内的尾砂、泥浆和水就会以泥石流的形式涌出,其高流速、巨大的冲击力和冲击范围会对下游居民的生命财产造成严重威胁,同时也将引发环境灾难。因此,研究尾矿库溃坝过程及溃后泥石流在下游的运动演进规律具有重要的减灾防灾意义。

近年来,国内外学者通过理论分析和数值模拟对溃坝过程进行了深入细致的研究并取得了一系列的成果<sup>[3]</sup>。Hassan等<sup>[4]</sup>研究了坝体材料、库容及库水位等条件对溃坝过程的影响。Sun等<sup>[5]</sup>基于非恒定水流泥沙非饱和非平衡侵蚀理论和相似理论,建立尾矿库物理模型并模拟了尾矿库洪水漫顶溃坝的全过程。Yang等<sup>[6]</sup>通过水槽试验模拟了尾矿库洪水漫顶的破坏过程,并把溃坝过程划分为渗流侵蚀、初始溃口形成、溃口溯源冲刷、溃口发展和溃口重新平衡5个变化阶段。刘磊等<sup>[7]</sup>建立了尾矿库物理模型,对尾矿库溃口及坝体崩塌变化过程、下泄洪水演化过程等进行研究。赵天龙等<sup>[8]</sup>对比分析了土石坝和尾矿坝在溃决机理与溃坝致灾过程的区别和联系,总结了尾矿库在坝体形式、填筑方式、坝料组成和

**收稿日期:**2018-01-18

**基金项目:**中国博士后科学基金项目(2017M613006);国家重点研发计划项目(2017YFC0804600);国家自然科学基金青年项目(41602307);国家自然科学基金面上项目(51741410);国家安全生产监督管理总局重点项目(yunnan-001-2016AQ);昆明理工大学实验室建设与管理研究项目(syyj23)

**作者简介:**赵怀刚(1993-),男,四川成都人,硕士研究生,主要从事矿山岩土灾害防治与治理。E-mail:447572104@qq.com

**通讯作者:**王光进。E-mail:wanguangjin2005@163.com

溃决机制等方面的特点。然而,由于尾矿库造成巨大威胁的原因是溃后泥石流的高流速和巨大的破坏性,因此对于溃后泥石流在下游流动过程中的特性研究显得更加重要。Rico 等<sup>[9]</sup>通过对历史有关尾矿库溃坝事故资料的分析总结,建立了尾矿库几何参数与尾砂流体特性之间的关系,并得到尾矿库总库容、溢出尾矿量与潜在最大流动距离之间的规律。尹光志<sup>[10]</sup>以云南某尾矿库设计资料为依据,通过模型试验研究尾矿库溃坝时砂流的运动规律,从而得到在不同溃坝高度下的泥石流淹没高度及冲击力的变化规律。Zhang 等<sup>[11]</sup>通过 13 组水槽漫顶溃坝模拟试验表明,泥沙峰值速率随坝顶加宽和坝坡变缓而变小,从而延长了泥沙峰值速率到达的时间。敬小非等<sup>[12]</sup>以云南某尾矿库设计资料为依托,基于尾矿库溃决的口门形态,探索了在不同溃口大小条件下的下泄泥浆流动特性。魏勇等<sup>[13]</sup>利用物理模型试验,研究砂流体积分数、溃口形态及下游坡度对溃坝砂流的流动特性及规律的影响。皇甫凯龙等<sup>[14]</sup>建立尾矿坝溃决砂流数值模型,模拟尾矿库溃决后洪水、砂流的运动状况。

综上所述,国内外学者们已经对尾矿库溃坝机理、溃坝过程及下泄泥石流运动规律开展了大量研究。但是,由于我国尾矿库堆筑地点主要在山谷区域,对于在山地复杂地形条件下尾矿库溃后泥石流运动过程中的流动形态和流动速度还缺乏深入系统的研究,因此本文以四川会理某尾矿库为研究对象,通过室内堆(溃)坝的物理模型试验,系统研究在山地复杂地形下尾矿库溃后泥石流的演进规律。从而为尾矿库溃后泥石流运行预测模型的建立及矿山的防灾减灾提供理论依据。

## 2 尾矿库室内堆(溃)坝物理模型试验

### 2.1 试验模型的确定

模型试验需要对原型进行一定的简化,同时保持两者之间主要物理量的相似性<sup>[15]</sup>,因此为了保证试验结果的相对可靠,本文以四川会理某尾矿库为工程背景,建立尾矿库的实体比尺模型。根据设计资料确定模型相似比尺为 1:400,初期坝采用土石混合坝,初期坝模型长 0.4 m,高 0.08 m,上顶宽 0.12 m,下底宽 0.47 m,堆积坝内坡比 1:1.25,外坡比 1:3.125。堆积坝尺寸与初期坝一致,堆积坝一共有四级子坝,堆坝完成后的示意图如图 1 所示,堆坝模型试验的相似比例系数见表 1。



图 1 尾矿库实体模型

Fig.1 Physical model of tailings reservoir

表 1 模型相似参数

Table 1 similarity parameters of the model

相似比关系	长度	位移	体积	面积	渗透系数	重力加速度	重度	孔隙度	流量	时间/渗流
原型	400	400	400 <sup>3</sup>	400 <sup>2</sup>	1	1	1	1	400	400 <sup>2</sup>
模型	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

### 2.2 试验目的及内容

开展了尾矿库室内溃坝模型试验,研究尾矿库在复杂山地地形条件下的泥石流运动特性,从而为山谷型尾矿库溃后泥石流运行预测模型建立及矿山的防灾减灾提供理论依据。试验依据四川会理某尾矿库设计资料,在满足主要几何相似条件下按照 1:400 的比例进行缩放。具体研究内容包括:下泄泥石流在整个沟谷河道下游的流动形态特征;沟谷弯道及沟谷和河道交接地区的泥石流淤积情况;下泄泥石流在不同特征监测点位的淹没高度变化及流速变化。

### 2.3 试验材料

试验材料取自于某矿业公司的尾矿,尾矿砂中值粒径  $D_{50}=0.97$  mm,大于 0.074 mm 的颗粒含量占 69.1%,因此本试验用的尾矿砂偏粗。尾矿砂物理力学性质及颗粒分布曲线分别如表 2 及图 2。

表 2 尾矿砂物理力学性质

Table 2 Physical and mechanical properties of tailings sand

相对密度 $G_s$	重度 $\gamma/(KN/m^3)$	含水量 $w/\%$	孔隙率 $n/\%$	固结不排水(cu)剪切试验	
				$C/kPa$	$\varphi/^\circ$
2.76	27.2	38.1	46.9	9.2	22.4

2.4 模型试验装置

自行设计的溃坝试验平台如图 3 所示,包括堆坝模型平台、冲刷沟谷平台、降雨和监测装置。堆坝模型区为 2 m×3 m 的平台,用于构建尾矿库物理模型。冲刷沟谷平台中,沟谷长度为 1 m,河道长度为 1.5 m,冲刷平台为 1.2 m×2.4 m,该平台用来观察泥石流在沟谷河道中的流态、流速变化和淹没高度变化。监测装置主要包括沟谷河道中的水位变化监测装置、水流速监测装置和高速摄像装置。水位监测装置用来监测泥石流在流动过程中的淹没高度变化,水流速监测装置用来监测泥石流运动过程中的流速变化。高速摄像装置用来监测泥石流运动过程中的流态变化情况。自制的模拟降雨设备用来模拟库内降雨。

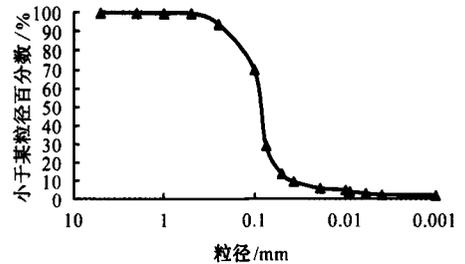


图 2 尾矿砂粒径分布曲线

Fig.2 Particle size distribution of tailings

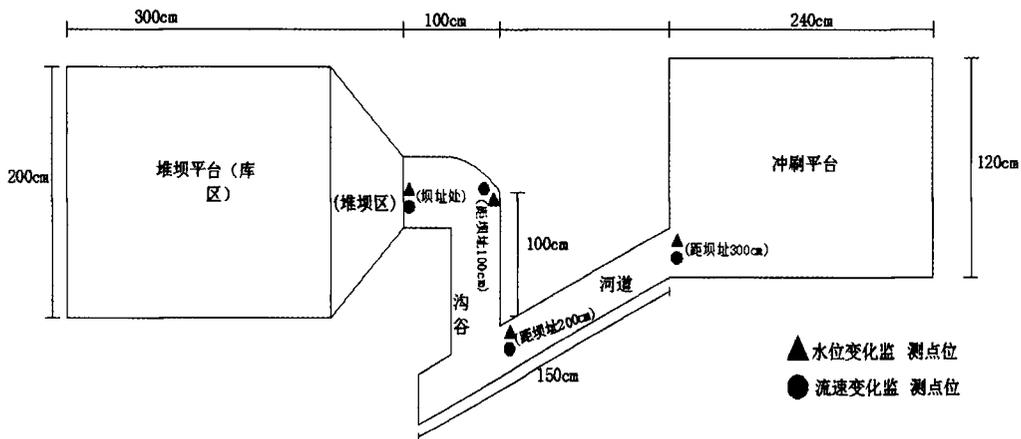


图 3 尾矿库溃坝试验平台示意

Fig.3 Diagram of tailings dam break experimental platform

3 试验结果

3.1 溃坝泥浆流态特性分析

由于尾矿库溃坝后泥石流运动的能量完全来自尾矿库,溃坝初期的泥石流具有流量小、流速慢、淹没高度变化小,甚至没有变化等特点,但随着尾矿库溃口的横向展宽和下切<sup>[16]</sup>,下泄泥石流流量增加,流速、淹没高度和淹没范围在极短时间内达到峰值并影响泥石流的流态特性。从图 4 可以看出:(1)在整个溃坝过程中,淹没高度随溃坝时间的变化整体表现出“缓慢增长—迅速增长到峰值—峰值稳定—迅速减小”四种变化阶段;(2)如图 4(d)所示在下游弯道凸岸侧为螺旋流,而凹岸侧水位抬升,造成两岸淹没高度相差很大及沟谷外侧淹没范围的增加;(3)溃坝后的泥石流大量沉积在上游沟谷和入汇河道处,而下游过多的是洪水淹没。

3.1.1 溃坝泥石流的淹没高度随溃坝时间的变化

如图 5 所示,尾矿库溃坝泥石流下泄全过程约为 180 s,淹没高度在经历约 120 s 后才达到最大峰值淹没高度。从整体上来看,溃坝泥石流淹没高度随着溃坝过程表现出 4 个阶段。第一阶段(漫顶溃坝开始 0~70 s 的时间内)为溃坝初期,由于漫顶水流对坝体具有浸润侵蚀作用,水流的下切力不足以克服尾

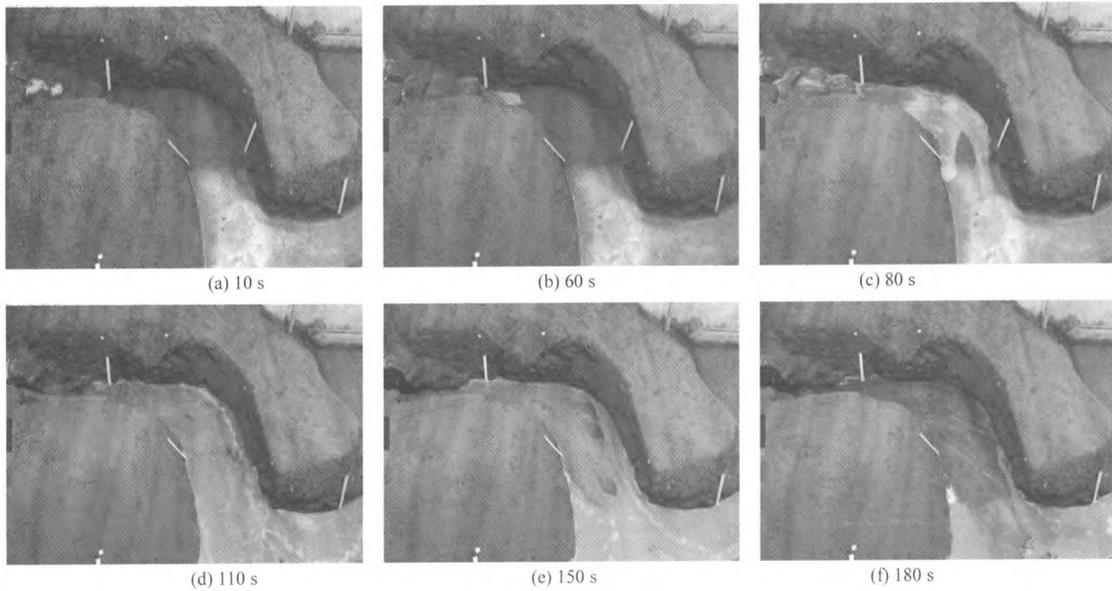


图 4 溃坝泥石流演变过程

Fig.4 Processes of dam break debris flow

砂摩擦阻力,致使溃口变化速率非常小,从而导致漫顶初期下泄水流流量小,泥石流淹没高度在 70 s 的时间内只增长了约 5 cm,表现出缓慢的增长状态。第二阶段(溃坝后 70~100 s 左右)由于前期漫顶水流的浸润侵蚀导致溃口变大,高势能泥石流倾泻而下,使得泥石流龙头流速在 20 s 内开始达到峰值并流过各监测点,淹没高度也随着流量的增加而增大到约 17 cm 左右的淹没峰值状态,其最终淹没高度为第一阶段的 3.4 倍左右。第三阶段(溃坝后 100~140 s)的下游各位置在 100 s 后开始进入最大淹没高度,而上游溃口还在扩大的过程中,流量补充的稳定性造成该阶段的淹没高度稳定在 17 cm 左右的峰值状态并持续大约 40 s,处于峰值稳定的状态。第四阶段(溃坝后 140~180 s)因为上游流量补充的减小造成淹没高度呈现出迅速减小的趋势,淹没高度在 40 s 的时间内从 17 cm 左右的峰值状态逐步降低并稳定在 2 cm 左右,直至断流。其变化时间约为从水流开始到峰值状态的 0.5 倍,淹没高度下降速率大于溃坝泥石流淹没高度的上升速率,表现出迅速减小的状态。对比图 5 各特征监测点的淹没高度,整体上在下游 100 cm 和 200 cm 处(沟谷弯道与河道连接处)的淹没高度大于坝址和下游 300 cm 处,其原因在于坝址下游 100 cm 和 200 cm 处位于弯道和沟谷与河道的连接地带,由于泥石流在流动过程中受阻产生的“超高、爬高”现象,使得该处局部范围内的淹没高度整体大于坝址和下游 300 cm 等特征监测点的淹没高度。同时从图 6 看出,泥石流淹没峰值整体走势呈现非线性的发展趋势,上游沟谷地带的淹没峰值高于下游地带,而沿程淹没峰值的最大值也集中在坝址下游 100 cm 到 200 cm 处。这主要是因为上游沟谷地带地形狭窄,沟谷糙率变化、沟谷弯道及河流对岸的阻碍等因素叠加所造成,而当到达下游一定距离后,由于断面宽度增大,地形变缓,致使淹没峰值高度变小。

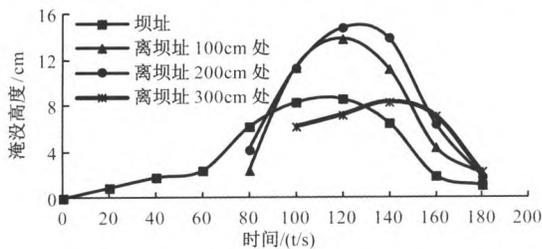


图 5 不同特征监测点的淹没高度随时间的变化

Fig.5 Processes of submerged height

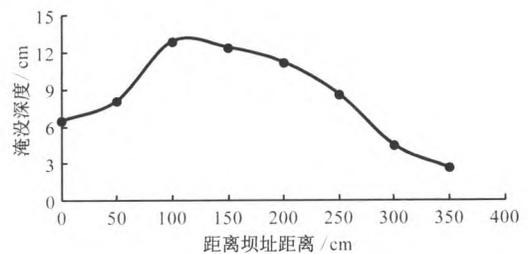


图 6 淹没峰值沿程变化曲线

Fig.6 Processes of submerged peak

### 3.1.2 急弯河道的横向环流和“爬高效应”

溃坝泥石流在弯道内由动能转换为势能的过程中,其速度变化大,使得在沟谷急弯处出现了横向环流和“爬升”现象<sup>[17]</sup>,表现出强烈的超高、冲淤特征,致使弯道两岸的淹没高度相差很大。如图7所示,由于在泥石流到达急弯处时,直线运动的流体受阻而撞击沟壁,在受离心力的作用下,其流动速度急剧下降并转换为切向速度 $v_t$ 产生“超高”现象和法向速度 $v_n$ 产生“爬高”现象,使其弯道凹侧局部的淹没高度会高于内侧凸岸,而在溃坝泥石流爬高后产生反射波,弯道凸侧会表现出强烈的“涡流”现象,产生淤积堆积。而在沟谷出口,泥石流在从沟谷流向河道过程中,其沟谷的地形和坡度变化非常明显,泥石流流出沟谷后在缓坡的地形下向河道对面冲蚀爬升,并向河道上下游扩散,形成“冲积扇”或者“壅堵型堰塞坝<sup>[18]</sup>”堵塞河道。

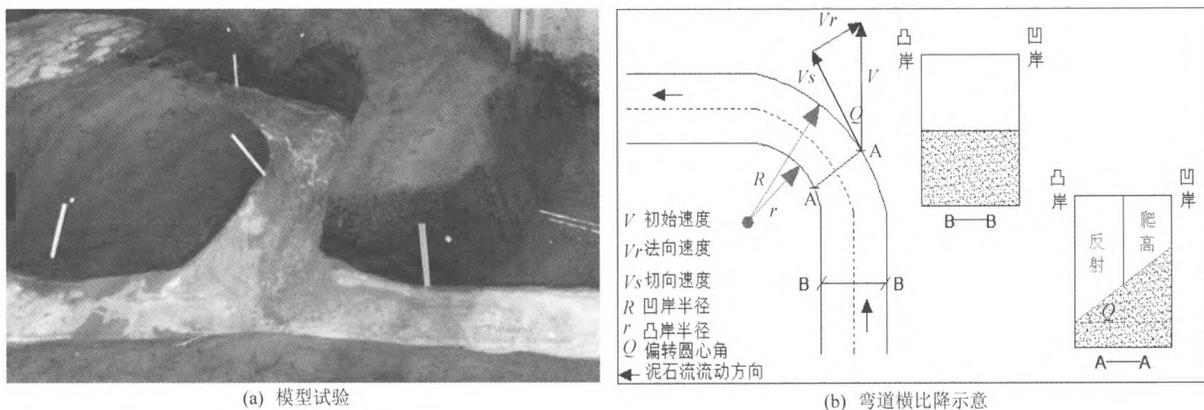


图7 弯道横比降

Fig.7 Transversal slope of water surface at bend channel

### 3.2 溃坝泥浆流速分析

根据试验过程中高速摄像机的记录结果,分析了流速监测点的泥石流流速的变化(图8至图10)。试验过程中采用 $\varphi 20\text{ mm}$ 的塑料泡沫小球进行流速的跟踪,根据小球到达流速监测点的时间及路程计算泥石流运动速度。从图8至图10可以看出,由于坝高等因素使得库内尾矿砂具有一定的初始动能,在溃坝前期在势能转换动能的过程中,尾矿库溃决泥石流在较短时间内以某一个加速度急剧倾泻而下,流过沟谷和河谷地带,流速整体表现出迅速增减的趋势。

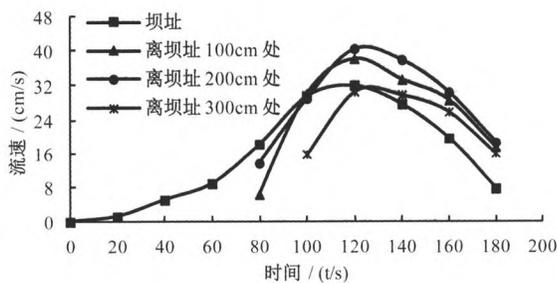


图8 流速变化过程

Fig.8 Processes of flow velocity

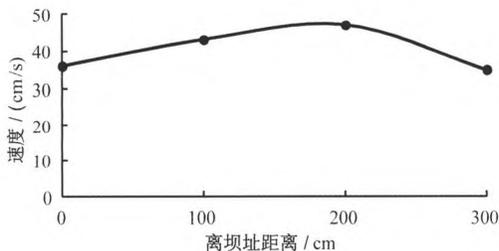


图9 流速峰值沿程变化过程

Fig.9 Processes of flow peak

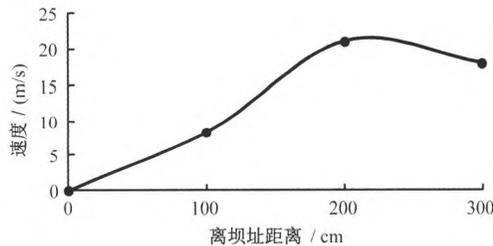


图10 龙头流速沿程变化过程

Fig.10 Processes of flow velocity

#### 3.2.1 泥石流流速随溃坝时间的变化表现为前期流速缓慢和后期高速增减

从图8可以看出不同特征监测点的流速变化非常明显,随溃坝时间的延续,泥石流流速的变化趋势

可概括为前期的缓慢增长和后期的高速增减。溃坝初期,水流对坝体侵蚀时间过长,漫顶水流在向下游流动的同时还在入渗侵蚀坝体内部,造成初期溃口扩展速率非常小,流速增长速率非常缓慢。随着溃口的高速率扩展,库内水流呈加速度倾泻而下,并在极短的时间内到达峰值,并持续稳定很长时间。随后在没有上游来源的情况下水流速度迅速减小并降到最低流速,直至断流。与此同时在下游 100 cm、200 cm、300 cm 处,泥石流流速缺失坝址位置前期的 0~70 s 的缓慢增长阶段,其原因在于当前期溃坝泥石流龙头到达下游各特征监测点位时,上游溃口早已不是漫顶阶段,而表现出溃口迅速变大阶段,所以当龙头到达下游监测点位时,流速已在到达该位置的龙头初始速度的基础上叠加并保持高速增长,这就解释了为什么下游流动的初始速度会高于上游监测点位的初始速度,并且缺少前期缓慢的增长阶段。对比前期和后期的流速变化,在 60~140 s 的溃坝中期,因上游来源补充相对稳定,流经沟谷的泥石流在自身动能能够克服沟谷糙率带来阻力的作用下,使前期的流动速度从约 8 cm/s 增长至 37~40 cm/s 的峰值流速状态,其增长约为前期的 5 倍左右;而后期 40 s 的时间内,在没有上游来源补充的情况下,泥石流经过上游糙率很大的沟谷时消耗了相当能量,致使后期溃坝泥石流在下游由峰值状态下降到 8 cm/s 的状态,下降期间的变化速率约为增长时间的 0.5 倍,流速表现出迅速的下降趋势。分析图 9 可以看出,最大峰值流速出现在距坝址 200 cm 处,其原因在于尾矿库溃坝后泥石流流速的叠加致使下游的峰值速度增大,而在距坝址 200 cm 处的糙率、坡度及地形的变化致使流速变化,所以该点位置成为流速峰值的对应点。然而,全过程的峰值流速始终保持在一定的稳定状态,这种状态的持续是和流量有着密切关系。当尾矿库溃坝后,溃坝泥石流通过整个过流通道的时间非常短暂且流量很大,这就使得流速加快,直到峰值。但随着时间的推移和流动过程的变化,流动速度逐渐变小。

### 3.2.2 泥石流龙头流速在全过程呈现“缓慢增长—迅速增大到峰值”的过程

分析图 10,溃决泥石流在初期 60 s 的漫顶阶段内,水流的浸润侵蚀对坝体造成的影响较小,水流获得的能量不能抵消地形、沟谷糙率带来的阻力,使得龙头流速<sup>[19]</sup>变化非常小;随着坝体的横向展宽和下切,水流流量迅速加大,龙头段流动速度快速提升,达到 21 cm/s 的峰值状态,同时在上游流量补充稳定的情况下,龙头的流动速度稳定在峰值并持续向下游流动。对比龙头沿程流速的变化,距离坝址越近其龙头流速越小,到下游 200 cm 处时,龙头速度达到峰值并稳定在峰值状态,其原因还是在于上游溃口的变大使得流量的增大,造成龙头速度叠加,快速增长到峰值。

## 4 结论

(1)泥石流的淹没高度随溃坝时间的变化整体表现为“缓慢增大—迅速增大—峰值稳定—迅速减小”的变化趋势,不同特征监测点的淹没高度和沿程淹没峰值随演进距离的增加而明显降低,且沟谷弯道与河道连接处的淹没高度大于坝址和下游淹没高度,最大淹没峰值则出现在尾矿库中下游弯道位置。

(2)尾矿库溃决泥石流在沟谷弯道流态变化强烈,在弯道凸岸附近出现涡流现象,产生泥砂堆积,在弯道的凹岸附近出现爬高,引起局部淹没高程的升高甚至冲出沟谷,特别是在沟谷和河道的连接处,大量泥石流因为冲出沟谷淤堵河道,形成雍堵型堰塞坝,堵塞河道形成堰塞湖。

(3)泥石流的流速随溃坝时间的变化整体表现为前期的缓慢性 and 后期的高速增减性,且上游沟谷河道的流速明显大于下游。沿程的峰值流速和龙头流速的最大值都出现在下游的沟谷弯道及沟谷和河道连接位置。

(4)不同特征点的淹没高度和泥石流流速都缺少坝址处前期的缓慢增长阶段,其初始淹没高度和初始流速分别以到达该监测点龙头的淹没高度和流速为初始值开始迅速增长。

### 参考文献:

- [1] 张力霆.尾矿库溃坝研究综述[J].水利学报,2013,44(5):594-600.
- [2] 于广明,宋传旺,潘永战,等.尾矿库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(S1):3238-3248.

- [ 3 ] 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.
- [ 4 ] Hassan M, Morris M, Hason G, et al. Breach formation: laboratory and numerical modeling of breach formation [C]. ASDSO's 21st Annual Conference. Pointe South Mountain Resort, Arizona, 2004:1321-1337.
- [ 5 ] Sun Enji, Zhang Xingkai, Li Zhongxue, et al. Tailings dam flood overtopping failure evolution pattern [J]. Procedia Engineering, 2012, 28(8): 356-362.
- [ 6 ] Yang Yang, Cao Shuyou, Yang Kejun, et al. Experimental study of breach process of landslide dams by overtopping and its initiation mechanisms [J] Journal of Hydrodynamics, 2015, 27(6): 872-883.
- [ 7 ] 刘磊,张红武,钟德钰,等.尾矿库漫顶溃坝模型研究[J].水利学报,2014,45(6):675-681.
- [ 8 ] 赵天龙,陈生水,钟启明.尾矿库溃决机理与溃坝过程研究进展[J].水利水运工程学报,2015(1):105-111.
- [ 9 ] Rico M, Benito G, Diez-Herrero A. Floods from tailings dam failures [J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 154(1): 79-87.
- [ 10 ] 尹光志,敬小非,魏作安,等.尾矿库溃坝相似模拟实验研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(S2):3830-3838.
- [ 11 ] Zhang J, Guo Z, Cao S, et al. Experimental study on scour and erosion of blocked dam [J]. Water Science and Engineering, 2012, 5(2): 219-229.
- [ 12 ] 敬小非,尹光志,魏作安,等.基于不同溃口形态的尾矿库溃决泥浆流动特性实验研究[J].岩土力学,2012,33(3):745-752.
- [ 13 ] 魏勇,许开立,熊琳,等.尾矿溃坝砂流流动特性及规律模型试验研究[J].中国安全科学学报,2017,27(4):122-126.
- [ 14 ] 皇甫凯龙,廖文景,孙志辉,等.尾矿坝溃决砂流数值模拟研究及应用[J].中国安全科学学报,2015,25(8):171-176.
- [ 15 ] 张东明,郑彬彬,尹光志,等.高浓缩分级尾矿上游法堆坝及模型试验研究[J].岩土力学,2016,37(7):1832-1838+1867.
- [ 16 ] 邓翌,陈生水,钟启明.尾矿库漫顶溃坝数学模型研究与应用[J].岩土工程学报,2017,39(5):932-938.
- [ 17 ] 刘翠容,姚令侃,陈春光,等.基于水沙动力过程的泥石流阻塞大河模式及判据研究[J].水利学报,2012,43(S2):122-127.
- [ 18 ] 刘翠容,姚令侃,陈春光,等.基于水沙动力过程的泥石流阻塞大河模式及判据研究[J].水利学报,2012,43(S2):122-127.
- [ 19 ] 王洋,崔鹏,王兆印,等.泥石流龙头的形成及特征研究[J].水利学报,2017,48(4):473-479.

## Experimental study on processes of debris flow after tailings dam failure

ZHAO Huai-gang<sup>1</sup>, WANG Guang-jin<sup>1,2</sup>, ZHANG Chao<sup>2</sup>, YANG Chun-he<sup>2</sup>

(1. Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

**Abstract:** A physical model experiment of a dam break is conducted to explore the evolution rules of the debris flow after the tailings dam break under the complex terrain condition of the mountain area. Results show that the submerged height of the debris flow is characterized by “slow growth” in early stage and “high speed increase and decrease” in the late stage. the junction between the valley and the river is greater than that of the dam site and downstream, and the maximum submergence peak also occurs at the valley bend. At the bend of the valley, the height difference between the two banks of the gully is very large. In the connection between the valley and the river, the debris flows spread out of the gully and depositing up the channel. Next, the velocity of debris flow shows growth slowly in early stage, and high speed increase and decrease in later stage. The flow velocity in the valley and the river is obviously greater than that in the downstream. A maximum peak velocity appears in the valley bend and the junction between the valley and the river.

**Key words:** mountain terrain; tailings reservoir; debris flow; flow law

(责任编辑:陈绪坚)