https://doi.org/10.3799/dqkx.2021.127



强震区沟道堰塞体失稳模式及其动力学特征

周 超,常 鸣,徐 璐,庞海松,余 斌

成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室,四川成都 610059

摘 要:强震触发的大量崩塌滑坡所形成的松散固体物质堆积于泥石流沟道,容易形成天然堰塞体,在强降雨和上游流体的 冲蚀下极易失稳形成溃决型泥石流.采用自制泥石流试验水槽,通过控制坝体颗粒组成和水动力条件,实施了12组堰塞体失 稳模拟试验,获取了堰塞体的破坏过程、溃口流量和相关力学参数的演化特征.将堰塞体划分为漫顶破坏、滑面破坏、管涌破 坏3种不同失稳模式,并结合堰塞体的颗粒组成结构分析了失稳机理及特征,通过动力学过程分析分别建立了不同失稳模式 下的堰塞体稳定性判别式.研究成果对于溃决型泥石流防治工程的规划设计以及提高泥石流防灾减灾水平具有重要意义. 关键词:堰塞体;失稳模式;动力学特征;临界条件;滑坡.

中图分类号: P642.23 **文章编号:** 1000-2383(2023)08-3115-12 **收稿日期:** 2021-05-13

Failure Modes and Dynamic Characteristics of the Landslide Dams in Strong Earthquake Area

Zhou Chao, Chang Ming, Xu Lu, Pang Haisong, Yu Bin

State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

Abstract: The loose solid materials generated by a large amount of landslides triggered by meizoseismal area fill up the valley or river, which is easy to form a landslide dam. It breaks out and forms outburst debris flow under heavy rainfall and the scouring action of rainfall-runoff. In this study, 12 experiments were designed using the self-made flume to reproduce the failure process of landslide dams with different grain size distributions and hydrodynamic conditions. The failure process, breach discharge, and mechanical parameters are carried out. The landslide dams are divided into three instability modes: overtopping, sliding, and piping. The formation reasons of these three types of dam failure mode are analyzed combined with the grain size distributions of the landslide dams. Based on the dynamic characteristics, landslide dams' stability under different failure modes is established The research results are of great significance for the planning and designing prevention and control projects of the dam-break debris flow and improving the level of debris flow disaster prevention and mitigation.

Key words: landslide dam; failure mode; dynamic characteristic; critical condition; landslides.

0 引言

汶川地震导致西南山区地质地貌更加脆弱,大

量的崩塌、滑坡及松散固体物质堆积在沟道中,为 震后泥石流暴发提供了充足的物源条件,泥石流成 为强震区主要的次生地质灾害类型(常鸣等,

基金项目:国家重点研发计划(No. 2018YFC1505402);国家自然科学基金项目(Nos.42077245, 41521002). 作者简介:周超(1996-),男,硕士生,主要从事工程地质与地质灾害防治方面研究.ORCID:0000-0001-8617-4340. E-mail:zc@stu.cdut.edu.cn

引用格式:周超,常鸣,徐璐,庞海松,余斌,2023.强震区沟道堰塞体失稳模式及其动力学特征.地球科学,48(8):3115-3126. **Citation:** Zhou Chao, Chang Ming, Xu Lu, Pang Haisong, Yu Bin, 2023. Failure Modes and Dynamic Characteristics of the Landslide Dams in Strong Earthquake Area. *Earth Science*, 48(8):3115-3126. 2019; Fan et al., 2019;余斌等, 2020). 当泥石流沟 道中含有一个或多个堰塞体,在强降雨及上游汇流 作用下极易失稳形成溃决型泥石流,并引发流量放 大效应,将对沟口的人民生命财产安全构成巨大威 胁,造成的风险损失远高于一般的泥石流灾害(胡 卸文等, 2016; 崔鹏等, 2021). 而沟道中的堰塞体 失稳模式直接决定了溃决型泥石流的灾变启动机 制及运动过程. 若能预测泥石流沟道中天然堰塞体 的失稳模式及稳定性,就能更合理的计算溃决型泥 石流的流速、流量等特征参数. 因此对泥石流沟道 中堰塞体的失稳模式和动力学特征进行研究,为溃 决型泥石流灾害的防治提供技术支持,具有重要理 论价值和现实意义.

近年来,各国学者针对堰塞体溃坝的研究主要 集中在堰塞体的基本特征及失稳过程(Costa et al., 1988; Dong et al., 2009; 单熠博等, 2020),以及预 测 堰 塞 体 稳 定 性 (Fan et al., 2012; Zhao et al., 2019;石振明等, 2021).在理论研究的基础上,众 多学者也进行了溃坝模型实验. Zhou et al.(2015) 通过实验发现漫顶破坏是堰塞体失稳的主要模式, 而管涌和侵蚀作用一定程度上也会诱发堰塞体失 稳. Zhao et al.(2015)通过模拟漫顶溃坝的数值实 验后得出斜坡侵蚀是水位漫顶后主要的破坏形式. Zhong et al. (2017)以唐家山滑坡坝失稳为实例开展 缩尺试验,认为侵蚀和间歇性作用是堰塞体失稳主 要诱因,刘定竺等(2017)通过物理实验发现堰塞体 溃口展宽随溢流的发展而呈现不同形式,以溯源侵 蚀的结束为时间节点,溯源侵蚀期间为近等宽阶 段,溯源侵蚀结束后为弯曲阶段.付建康等(2018) 通过室内物理实验发现堰塞体漫顶溃坝主要由渗 流、漫顶、冲刷和溃决4个阶段组成.舒安平等 (2019)通过对堰塞体溃决过程模拟研究,提出堰塞 体溃决存在局部型和整体型两种模式.除了室内物 理试验,很多国内外学者也开展了不同尺度的野外 模型试验(Hanson et al., 2005; Morris et al., 2007; Zhang et al., 2009). 然而, 目前研究主要是针 对单一堰塞体开展失稳机理研究,尚未全面考虑到 不同失稳模式下堰塞体所受动力学特征的差异性. 因此综合物理模型试验、动力学原理分析等手段, 针对强震区溃决型泥石流沟道中不同失稳模式下 的堰塞体分别提出临界判别公式十分必要.

本文通过控制颗粒结构及水动力条件两个因素,实施了12组堰塞体失稳物理模型试验,根据堰

塞体的破坏过程,将失稳模式划分为3种模式:漫顶 破坏、滑面破坏及管涌破坏;并总结了堰塞体的破 坏模式和过程,获取了溃口流量和相关动力学参数 的演化特征;结合室内模型试验与动力学特征分 析,建立了强震区沟道堰塞体在不同失稳模式下的 稳定性判别模型.研究成果对溃决型泥石流灾害治 理工程的规划设计及提高泥石流监测预警水平具 有重要指导意义.

1 实验概述

1.1 实验模型及装置

堰塞体失稳物理模型实验平台由实验水槽模型、测试系统、实验物料等构成,见图1.

实验装置:实验装置由水箱、试验水槽及堆积 平台构成.水箱底部为0.7 m×0.7 m的正方形,高 1.2 m,总容积0.588 m³.试验水槽长2.5 m,宽0.4 m,高0.6 m,水槽可根据需要变动坡度,变坡范围5° ~25°.为了在实验过程中便于观测坝体溃决情况, 槽体两侧为透明的钢化玻璃,底部为带花纹的钢化 板,能提供足够的承重力.堆积平台长1.5 m,宽 1.5 m.

测试系统:由含水率传感器、高速摄像机等构成.其中含水率传感器用于测量坝体内部含水率变化,传感器分别埋设在坝高8cm(3处,编号3,4,5)、15cm处(2处,编号1,2);高速摄像机主要记录堰塞体失稳实验的全过程影像资料,分别布置在坝体侧面及正面.

堰塞体物料:选取汶川县羊岭沟①号堰塞体作 为坝体材料,再通过配制形成试验所需物料级配, 图2为羊岭沟堰塞体的分布情况.

1.2 模型相似分析

几何相似方面:选取羊岭沟①号堰塞体为典型 案例,按照几何相似比1:50进行缩尺模型构建,根 据该堰塞体实际尺寸和特征,最终确定坝体长度为 0.8 m,宽度0.4 m.坝体迎水面坡度45°,背水面坡度 30°等角度参数保持不变.

材料相似方面:考虑容重、级配、孔隙率与原型 材料一致,即1:1;粒径比为1:50.

边界条件相似方面:水槽两侧为光滑透明钢化 玻璃,底部为花纹钢板,在坝体与水槽接触部分均 匀涂抹黏土,避免渗流现象,使实验更贴近实际 情况.



图 1 堰塞体失稳物理模型实验系统 Fig.1 Sketch of the landslide dams experimental setup

1.3 模型实验设计

Zhu et al.(2020)通过堰塞体失稳模型实验,发现堰塞体内部渗流是控制堰塞体破坏模式和过程的主要因素之一,而渗流条件主要受堰塞体的粒径分布控制(Jiang et al., 2018; Zhu et al., 2019). Casagli et al.(2003)将堰塞体颗粒划分为基质支撑型和颗粒支撑型,两种类型的主要区别是粗颗粒和 细颗粒的含量,但是粗颗粒和细颗粒是一个相对概念,和水动力条件有关.因此,开展的堰塞体失稳物 理模型实验的两个控制因子为水槽坡度及堰塞体级配:(1)水槽设计坡度依次为5°、9°、11°、13°、15°、 17°;(2)6种实验沙级配的中值粒径分别为1.0 mm、 1.5 mm、2.5 mm、3.3 mm、4.3 mm、6.5 mm,实验方 案见表1.实验土颗粒级配如图3所示.

1.4 实验步骤

先将实验土样进行晒干处理,保证初始含水率为0,根据堰塞体的实际颗粒组成情况,用筛析机筛分出不同粒径的试验土,然后按重量比例均匀混合在一起,达到堰塞坝尺寸要求所需用土约110 kg.将实验物料按预定尺寸堆积,并在固定位置埋设传感器.打开阀门至恒定流量0.25 L/s,与此同时开启含水率传感器和两台高速摄像机进行观测,直到坝体破坏,剩余坝体稳定为止.实验结束后,对实验样品进行称重、烘干处理,并完成颗粒分析试验,最终对全部实验资料进行整理分析.

2 堰塞体失稳模式分析

以上所述的12组模型试验中,堰塞体的失稳模 式可以划分为3种.其中A~E、H表现为漫顶破坏 模式,F、G表现为滑面破坏模式,I、J、K、L表现为管 涌破坏模式,详细的描述如下.

2.1 漫顶破坏模式

漫顶破坏模式可以概括为漫顶溢流一溃口连 通一快速下切一坝体稳定4个阶段.上游水流启动, 堰塞体上游水位逐渐升高至漫顶状态,水流漫顶溢 流开始堰塞体冲刷堰塞体下游坡面,最开始在坝顶 和下游坡面的过渡区冲刷,如图4a;过渡区被冲刷 后,向上游方向成溯源侵蚀,向下游形成冲刷下切, 形成小型冲沟,并以下切为主,横向扩展较小,如图 4b;一旦溯源冲刷至坝后水体处,溃口连通,堰塞体 后水体开始下泄,溃口此时向两个方向同时快速扩 展,即横向展宽,纵向下切,同时溃口两侧土体发生 破环,出现陡坎和坝坡失稳现象,如图4c;随着坝后 水位的降低,流速流量逐渐减小,最终流体的剪切 应力逐渐减小趋近于坝体颗粒的抗剪强度,坝体重 新稳定,如图4d.

在实验过程中,记录了坝体内部含水率和流量 的变化情况.图 5a为含水率传感器的变化情况,含 水率变化的顺序是3→4→1→2,5号传感器无明显 变化.说明坝体内水位缓慢升高,初始渗流以水平 为主(3号和4号传感器率先变化).随着水位的升 高,坝体上部的含水率传感器开始变化(1和2号).



图 2 羊岭沟堰塞体分布图 Fig.2 Distribution map of landslide dams in yangling gully



Fig.3 The grain size distribution of the flume tests.

而5号传感器没有任何变化,说明整个试验过程中 坝体内部渗流都未到达5号传感器所在位置(堰塞 体底部前端).在*t*=400 s左右,所有含水率传感器 读数均下降至初始状态,此时堰塞体已经发生了 失稳.

图 5b 为流量的变化情况,漫顶溢流阶段,水流 溢流冲刷堰塞体坡面,坝后水位无变化,坡面侵蚀 带走了部分堰塞体表面颗粒,此时下泄流量略多于 入流量;溃口连通后,堰塞体后水体开始下泄,流量 陡增;溃口处断面流量到达峰值之后,流量逐渐减 小,直至坝体稳定.整个试验过程中,溃口流量并非 连续增加或连续下降的,而是呈现出波动性.由于 水流的侧蚀和下蚀以及坝坡失稳堵塞沟道后再次 溃决,导致的溃口形状突变会引起溃口流量的突 变,所以往往一次较高流量峰值伴随着一次流量的 下降.

2.2 滑面破坏模式

滑面破坏模式可以概括为渗流浸润-前兆滑动-多级滑动-坝体稳定4个阶段.此类天然堰塞

试验编 坝高 坝长 水槽坡 $D_{50}(mm)$ $C_{\rm U}$ 号 (cm) (cm) 度(°) 20 80 1.5 13.3 5 А 7 В 20 80 1.5 13.3 С 80 1.5 13.3 9 20 D 20 80 1.5 13.3 11 E 20 80 1.5 13.3 13 F 20 80 1.5 13.3 15 G 20 1.5 13.3 80 17 80 16.7 Н 20 1.0 11 I 20 80 2.523.4 11 J 20 80 3.3 17.2 11 Κ 20 80 4.323.6 11 I. 20 80 6.5 16.0 11

表1 堰塞体失稳模型实验参数表

Table 1 Experimental parameters of landslide dams

体透水系数较大,且强度极弱,当坝体内水位上升后,使得坡体自重增加,同时在坡体的饱和部分,因 渗透水的浮力作用,颗粒间的摩擦阻力降低,如图 6a;坡体前半部分沿着某一薄弱滑动面滑动,滑动面 呈近似圆弧形,如图 6b;当坡体前半部分滑动后,后 半部分因失去支撑从而沿着坝顶向下延伸的一个 圆弧形滑动面滑移,并堆积于坡脚,总体呈现牵引 式滑动,如图 6c;多次滑动后降低了堰塞体的整体 高度,坝后蓄水倾泻而出,与失稳后的堰塞体混合 形成溃决型泥石流,如图 6d.

在实验过程中,记录了坝体内部含水量和流量 变化.图7a为含水率传感器的变化情况,含水率变 化的顺序是3→4→5→1→2.说明坝后蓄水期间部 分细颗粒沿渗流路径运移,在坝体下部迅速形成了 一个完整的渗流通道.随着水位的升高,坝体上部 的含水率传感器开始变化(1号和2号).在*t*=500 s 左右,所有传感器位置的含水率同时发生了不同幅 度的下降,而后又迅速恢复为正常水平,紧接着在*t*



图4 漫顶破坏过程及示意图(D组)

Fig.4 Experimental process of the landslide dam failure due to overtopping inexperment D





Fig.5 Variation of water content and discharge of the landslide dam failure due to overtopping inexperment D a. 含水率变化曲线;b. 溃口流量变化曲线



Fig.6 Experimental process of the landslide dam failure due to sliding inexperment F



图 7 滑面破坏下的含水率及流量变化曲线图(F组)

Fig.7 Variation of water content and discharge of the landslide dam failure due to sliding inexperment F a. 含水率变化曲线;b. 溃口流量变化曲线

=515 s左右再次下降后保持稳定.从实验过程可 以看出,这与两次滑坡发生的时间恰好吻合.

图 7b 为流量的变化情况,由于滑面破坏发生迅速,从开始溃坝时刻开始,流量在漫顶后3 s 就到达峰值,紧接着逐渐减小,直至和入流量相等.流量在衰减过程中出现小幅度的波动,是由于溃坝过程中仍会发生小规模边坡失稳导致堵塞一溃决现象.

2.3 管涌破坏模式

管涌破坏模式可以概括为管涌一小型崩滑一 溢流侵蚀一坝体稳定4个阶段.随着上游来流的不 断涌入,坝后水位逐渐升高,导致坝体内孔隙水压 力增加,细小的可动颗粒在渗流力的作用下形成管 涌通道,如图8a;而后,堰塞体管涌出口处发生小型 崩滑,降低了堰塞体的整体稳定性,如图8b;坝后水 位上升至坝顶后出现漫顶溢流,堰塞体在坡面水流 的冲刷下形成溃口,同时伴随着强烈的侧向展宽和 下切侵蚀,溃口流量快速增加并到达峰值,如图8c; 随着堰塞体后水量逐渐减小,断面流量到达峰值之 后,流量迅速减小直至趋于稳定,如图8d. 在实验过程中,记录了坝体内部含水率和流量 的变化情况.图9a为含水率传感器的变化情况,含 水率变化的顺序是3→1→4→5→2.随着各点含水 率相继达到峰值后,含水率依次急剧.t=607 s时, 坝体下游表面发生小型崩滑,孔隙水压力和含水率 急剧下降.堰塞坝溃决后,所有含水率传感器读数 均下降至初始状态,此时堰塞体已经发生了失稳.

图 9b 为堰塞体溃决过程中流量的变化情况,当 堰塞体坡面发生崩滑时,管涌通道迅速扩大,流量 逐渐增加,堰塞体稳定性迅速降低导致堰塞体失 稳,此时流量迅速增大,达到峰值流量,而后逐渐降 低直至残余坝体稳定.与漫顶破坏模式相同,整个 试验过程中,溃口流量并非连续增加或连续下降 的,而是呈现出波动性.

2.4 堰塞体结构对失稳模式和过程的影响

堰塞体的渗流是影响堰塞体破坏模式和过程 的重要因素.为了充分考虑渗流对堰塞体破坏模式 和过程的影响,将入库流量保持在较小的情况下, 通过对上述12组试验的破坏模式和破坏过程的初



Fig.8 Experimental process of the landslide dam failure due to piping inexperment K





步分析,发现改变颗粒粒径分布和水动力条件对堰 塞体的破坏模式有显著影响.

依据堰塞坝体材料的级配特点,可将堰塞坝体 材料分为基质支撑型和颗粒支撑型两种结构形式. 基质支撑型的坝体材料,粗颗粒之间的空隙由细颗 粒填充,粗颗粒相互不接触,密实度较高,渗透性较 低;颗粒支撑型的坝体材料,粗颗粒的相互接触形 成骨架,密实度较低,渗透性较高,易发生管涌.一 般将2mm作为划分粗颗粒和细颗粒的界限(Cui et al., 2017). 土体内部稳定性取决于其粗颗粒能否防 止细颗粒的流失. 当细粒材料的含量在一定范围内 时,粗颗粒才可能形成骨架. 如果细粒物质的含量 较多,粗粒物质在细粒物质形成的基质中流动,在 这种情况下,堰塞体的稳定性主要由细颗粒物质 控制.

根据试验结果和堰塞体结构分类,进一步分析 堰塞体粒径分布对破坏模式和过程的影响.实验 I~L中粗颗粒的含量均大于50%,为颗粒支撑型, 因此均形成了渗流通道,表现为管涌破坏.实验 A~H则属于基质支撑型,除实验F、G为滑面破坏, 其余均为漫顶破坏,是由于实验F、G水力梯度更 大,容易形成渗流通道,坝体在土体自重力和内部 渗流力的影响下产生崩滑.

堰塞体失稳过程中常常伴随着溃口两侧的坝 坡失稳,坝坡的抗剪强度可由莫尔一库仑方程 表示:

$$\tau_{\rm f} = c' + (\sigma - \mu) \tan \varphi', \tag{1}$$

式中: τ_i 为抗剪强度(kPa);c'为有效内聚力(kPa); σ 为土体总应力(kPa); μ 为孔隙水压力(kPa); φ' 为有效内摩擦角(°).

随着细颗粒含量的降低,坝坡强度也会随之降低(Lin and Takahashi, 2012).用孔隙内空气压力 (μ_a)与孔隙水压力(μ_w)之差表示基质吸力(ϕ).随着 基质吸力的增加,导致的抗剪强度的增加可用角度 φ^b 来描述.将这一效应代入莫尔一库仑方程,可以 得到:



图 10 漫顶破坏下堰塞体坡面颗粒受力分析图 Fig.10 Stability analysis oflandslide dam due to overtopping

$$\tau_{\rm f} = c' + (\sigma - \mu_{\rm a}) \tan \varphi' + (\mu_{\rm a} - \mu_{\rm w}) \tan \varphi^{\rm b}, \qquad (2)$$

因此,细粒颗粒含量越高,坝体强度越高.考虑到坝体局部区域在溃决过程中存在非饱和物质,在溃口两侧更容易形成较大规模的坝坡失稳.根据实验结果,也可以得出随着细粒颗粒含量的逐渐增加,坝坡失稳次数也随之增加.溃口两侧坝坡失稳堆积于溃口中并堵塞沟道,导致溃坝过程中出现流量多峰现象.

3 堰塞体失稳判别式构建

3.1 漫顶破坏模式

通过试验观测及野外调查,堰塞体发生漫顶溢 流之后,由于强烈的溯源侵蚀及冲刷下切,冲沟迅 速扩宽,最后导致堰塞体失稳.这一阶段的定量分 析表明,发生漫顶溢流后,部分堰塞体材料在坡面 水流作用下开始移动,启动颗粒物质受力如下:水 下的重力 W',坡面的摩擦力f,坡面的支持力N,水 流的拖拽力F_p及上扬力F_v,如图10所示.

颗粒所受水下重力为:

$$W' = \frac{\pi}{6} D^3 (\gamma_s - \gamma_w), \qquad (3)$$

式中:D为颗粒物的直径(m), γ_s 为堰塞体的重度 (kN/m³); γ_w 为水的重度(kN/m³).

坡面物质对启动颗粒的支持力为:

$$N = \frac{\pi}{6} D^{3} (\gamma_{s} - \gamma_{w}) \cos \theta - F_{y}.$$
⁽⁴⁾

堰塞体表面颗粒一般比较松散,内聚力很低,因此不考虑颗粒间的内聚力.坡面摩擦力为:

$$f = \left[\frac{\pi}{6} D^{3} (\gamma_{s} - \gamma_{w}) \cos \theta - F_{y}\right] \tan \varphi, \qquad (5)$$

式中: θ 为堰塞体坡面倾角(°); φ 为堰塞体有效内摩 擦角(°).

拖拽力为:

$$F_{\rm D} = C_{\rm D} \pi D^2 \frac{\gamma_{\rm w} v_{\rm c}^2}{2g},\tag{6}$$

式中: $C_{\rm D}$ 为阻力系数,取决于物体形状和雷诺数,参 考杰缅季夫的实验,取0.712,无量纲;g为重力加速 度,取9.8 m/s²; v_c 为漫顶流体流速(m/s),采用强震 区泥石流临界启动流速公式(张惠惠, 2011):

$$v_{c} = F(1+\epsilon)^{\frac{1}{2}} (f\cos\beta - \sin\beta)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{d}{k}\right)^{\frac{1}{3}} h^{\frac{1}{6}}, \quad (7)$$

式中:v_c为启动流速(m/s);ε为床面泥沙颗粒相对荫 暴度系数,取值为0~1,无量纲;f为床面砂粒间的 摩擦系数,取值为0.63,无量纲;β为床面与水平面 的夹角(°);d为颗粒粒径(m);k为糙率尺寸,应考虑 床沙的组成,根据床沙级配中的代表粒径或其倍数 来确定(m);h为启动水深(m).

堰塞体扬压力为底部水的浮托及静水压力,可 根据扬压力计算公式求解:

$$F_{y} = \frac{1}{2} \gamma_{w} \left(\frac{2}{3} D + D \sin \theta \right) \cos \theta.$$
(8)

将沿坡面向上的阻抗力与沿坡面向下的启动 力比值定义为稳定性系数*K*s,可求得稳定性系数:

$$K_{\rm s} = \frac{\tau_{\rm f}}{\tau_{\rm d}} = \{ \left[\frac{\pi}{6} D^3 (\gamma_{\rm s} - \gamma_{\rm w}) \cos \theta - \frac{1}{2} \gamma_{\rm w} \left(\frac{2}{3} D + \sin \theta \right) \cos \theta \right] \tan \varphi + \frac{1}{2} \gamma_{\rm w} \left(\frac{2}{3} D + D \sin \theta \right) \cos \theta \sin \theta \} / \left[C_{\rm D} \pi D^2 \frac{\gamma_{\rm w} v_{\rm c}^2}{2 {\rm g}} + \frac{\pi}{6} D^3 (\gamma_{\rm s} - \gamma_{\rm w}) \sin \theta \right].$$
(9)

3.2 滑面破坏模式

主要发生在堰塞体坡度较陡,渗透系数较大时.往往是由于强度降低而产生坝体崩滑,并逐渐向上游逐级扩展造成的.坝体崩滑后会在坡脚下堆积,在来流作用下将会形成溃决型泥石流.因此可以借鉴边坡问题的研究方法来分析堰塞体稳定性.

此类坝体细颗粒含量低,颗粒间粘聚力可忽略 不计,将其视为无粘性土坡,假设堰塞体为各向同 性的、完全浸水的,且不存在渗流作用,在坡面上取 一土单元体,受力分析如图11所示.

因此堰塞体单元的下滑剪切力为:

 $\tau_{d} = \gamma' \sin f \alpha + \gamma_{w} \sin \alpha = \gamma_{sat} \sin \alpha, \qquad (10)$ 式中: τ_{d} 为堰塞体单元的下滑剪切力(kN/m³); γ '





Fig.11 Stability analysis of landslide dam due to sliding

为单元堰塞体自重(kN/m³);α为堰塞体背水面坡度 (°);γ_w为水的重度(kN/m³);γ_{sat}为堰塞体饱和重度 (kN/m³).

阻止堰塞体下滑的力则为单元体与下部土体 的抗剪力,等于单元体自重在坡面法向方向分力引 起的摩擦力,即:

$$\tau_{\rm f} = \gamma' \cos \alpha \tan \varphi \,, \tag{11}$$

式中: τ_{f} 为堰塞体单元的抗剪力(kN/m^{3}); φ 为堰塞体内摩擦角(°).

故堰塞体的稳定性系数K_s为:

$$K_{\rm s} = \frac{\tau_{\rm f}}{\tau_{\rm d}} = \frac{\gamma' \tan \varphi}{\gamma_{\rm sat} \tan \alpha},\tag{12}$$

3.3 管涌破坏模式

管涌破坏一般发生在颗粒支撑型的堰塞体中. 骨架孔隙中的可动颗粒受到的力有:渗流水流的拖 曳力、水下重力、与孔隙壁之间的摩擦力和颗粒之 间的相互作用力.对于堰塞体内部发生的管涌而 言,只有渗透水对可动颗粒的拖曳力为起动力,其 它力都为阻力.且可动颗粒在孔隙壁中移动时,摩 擦力是最大的阻力,而颗粒之间的碰撞力、电场力 等都非常小且十分复杂.假设渗流通道水平,用重 力沿渗流通道向下的启动力抵消颗粒之间的碰撞 力、电场力等阻力,阻止颗粒起动的力以管道之间 的摩擦力为主.

孔隙中单个可动颗粒所受到的摩擦力为:

$$f = \frac{\pi}{6} D^3 (\gamma_{\rm s} - \gamma_{\rm w}) \tan \varphi, \qquad (13)$$

式中: γ_s 为堰塞体的重度(kN/m³); γ_w 为水的重度 (kN/m³); φ 为堰塞体有效内摩擦角(°);D为可动颗 粒的粒径(m),取太沙基控制粒径 d_{15} 为可动颗粒的 最大粒径(吴梦喜,2019).

发生渗流部位的单位体积堰塞体颗粒的渗流 压力为:

$$P = \gamma_{w} i, \tag{14}$$

$$i = \frac{\mathrm{d}h}{\mathrm{d}l} = \frac{h_{\mathrm{w}} + l \sin \eta}{l},\tag{15}$$

式中:*i*为水力梯度,无量纲:*h*_w为坝后堰塞湖水深(m);*l*为堰塞体长度(m);*η*为堰塞体沟床坡度(°).

仅由可动颗粒承受动水压力,单个颗粒所受到 的渗透力为:

$$F_{\rm P} = \gamma_{\rm w} i \frac{\pi D^2}{S},\tag{16}$$

$$S = \frac{6\alpha(1-n)}{d_{\theta k}},\tag{17}$$

式中: S为单位体积堰塞体通道中可动颗粒的表面 积(m⁻¹); α 为颗粒形状系数,无量纲,对于各种砂粒 α =1.16~1.17,对于锐角颗粒 α =1.50~1.67; n为孔 隙率,无量纲; $d_{\theta k}$ 为土体的等效粒径,一般计算方 法为:

$$d_{\theta k} = \sqrt{\frac{2.13k(1-n)^2}{gn^3}},$$
 (18)

式中:k为堰塞体的渗透系数(m/s);n为孔隙率,无 量纲;g为重力加速度,取 9.81 m/s².

由于可动颗粒实际移动路线并非直线,为了更 准确地描述可动颗粒在通道中的运动情况,引入弯 曲度模型(陆高明,2016). 堰塞体中弯曲度为可动 颗粒实际移动路线长度与堰塞体长度的比值,弯曲 度的计算公式为:

$$\tau = 0.75 + \frac{0.25}{\sqrt{1 - \frac{4}{\pi}(1 - n)}} + \frac{\pi - 2}{4}\sqrt{\frac{1 - n}{\pi}}.$$
(19)

引入弯曲度模型后,单位体积堰塞体渗流通道 中可动颗粒的表面积为:

$$S = \frac{6\alpha(1-n)\tau}{d_{\ell k}}.$$
(20)

联立上式得到渗透水流作用在单个颗粒上的 渗透力为:

$$F_{P} = \left[\gamma_{w} i \pi D^{2} \sqrt{\frac{2.13k(1-n)^{2}}{gn^{3}}} \right] / \left\{ 6\alpha (1-n) \left[0.75 + \frac{0.25}{\sqrt{1-\frac{4}{\pi}} (1-n)} + \frac{\pi - 2}{4} \sqrt{\frac{1-n}{\pi}} \right] \right\} . (21)$$

结合式(13)、式(21),得到管涌破坏模式下的 堰塞体稳定性系数*K*s计算公式为:

$$K_{\rm s} = \frac{f}{F_{\rm P}} = \left[\gamma_{\rm w} \frac{h_{\rm w} + l \sin \eta}{l} \sqrt{\frac{2.13k(1-n)^2}{gn^3}} \right] / \{ \alpha \\ (1-n) \left[0.75 + \frac{0.25}{\sqrt{1-\frac{4}{\pi}(1-n)}} + \frac{1}{\sqrt{1-\frac{4}{\pi}(1-n)}} \right] \\ \frac{\pi - 2}{4} \sqrt{\frac{1-n}{\pi}} \left[D(\gamma_{\rm s} - \gamma_{\rm w}) \tan \varphi \right]. \quad (22)$$

4 结论

本文通过控制坝体颗粒结构组成及水动力条件,进行了12组堰塞体失稳模拟实验,将堰塞体的 破坏模式划分为3种,并提出了不同破坏模式下的 堰塞体的稳定性系数计算公式,主要得到以下 结论:

(1)通过实施12组溃坝模拟实验和成果分析, 提出了堰塞体的3种失稳模式,即漫顶破坏模式、滑 面破坏模式、管涌破坏模式.其中,漫顶破坏模式概 括为漫顶溢流一溃口连通一快速下切一坝体稳定4 个阶段;滑面破坏模式概括为渗流浸润一前兆滑 动一多级滑动一坝体稳定4个阶段;管涌破坏模式 概括为管涌一小型崩滑一溢流侵蚀一坝体稳定4个 阶段.

(2)根据堰塞体的颗粒级配组成将堰塞体结构 分为基质支撑型和颗粒支撑型,不同结构类型决定 了堰塞体失稳的启动机理和溃决过程,由基质支撑 型材料组成的堰塞体多为漫顶溢流破坏,而颗粒支 撑型材料组成的堰塞体均表现为管涌破坏;且细粒 颗粒含量越高,坝体强度越高,坝坡失稳次数随之 减小.

(3)基于堰塞体的3种破坏模式,总结了堰塞体 的溃决机理及特征,通过动力学分析分别建立了不 同破坏模式下的堰塞体稳定性判别式.研究成果对 于溃决型泥石流防治工程的规划设计以及提高泥 石流防灾减灾水平具有重要意义.

References

- Casagli, N., Ermini, L., Rosati, G., 2003. Determining Grain Size Distribution of Material Composing Landslide Dams in the Northern Apennine: Sampling and Processing Methods. *Engineering Geology*, 69 (1): 83-97.
- Chang, M., Dou, X.Y., Tang, C., et al., 2019. Hazard Assessment of Typical Debris Flow Induced by Rainfall Intensity. *Earth Science*, 44(8):2794-2802(in Chinese with English abstract).
- Costa, J. E., Schuster, R. L., 1988. The Formation and Failure of Natural Dams. *Geological Society of America Bulletin*, 100(7): 1054-1068. https://doi.org/10.1130/0016-7606 (1988)100<1054:tfafon>2.3.co;2
- Cui P, Guo, J, 2021. Evolution Models, Risk Prevention and Control Countermeasures of the Valley Disaster Chain. Advanced Engineering Sciences, 53(3):5-18(in Chinese with English abstract).
- Cui, Y. F., Zhou, X. J., Guo, C. X., 2017. Experimental Study on the Moving Characteristics of Fine Grains in Wide Grading Unconsolidated Soil under Heavy Rainfall. *Journal* of Mountain Science, 14(3): 417-431. https://doi.org/ 10.1007/s11629-016-4303-x
- Dong, J. J., Tung, Y. H., Chen, C. C., et al., 2009. Discriminant Analysis of the Geomorphic Characteristics and Stability of Landslide Dams. *Geomorphology*, 110(3/4): 162-171. https://doi.org/10.1016/j.geomorph. 2009. 04.004
- Fan, X.M., Scaringi, G., Korup, O., et al., 2019. Earthquake -Induced Chains of Geologic Hazards: Patterns, Mechanisms, and Impacts. *Reviews of Geophysics*, 57(2): 421– 503. https://doi.org/10.1029/2018rg000626
- Fan, X., Tang, C. X., van Westen, C. J., et al., 2012. Simulating Dam-Breach Flood Scenarios of the Tangjiashan Landslide Dam Induced by the Wenchuan Earthquake. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12(10): 3031-3044. https://doi.org/10.5194/nhess-12-3031-2012
- Fu, J.K., Luo, G., Hu, X.W., et al., 2018. Physical Model Experiment on Overtopping Overflow Failure of Landslide Dam. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 48(1): 203-212(in Chinese with English abstract).
- Hanson, G.J., Cook, K.R., Hunt, S.L., et al., 2005. Physical Modeling of Overtopping Erosion and Breach Formation of Cohesive Embankments. *Transactions of ASAE*, 48(5): 1783-1794.
- Hu, X.W., Han, M., Liang, J.X., et al., 2016. Some Key Problems on Debris Flow in Wenchuan Earthquake Area.

Journal of Southwest Jiaotong University, 51(2): 331-340 (in Chinese with English abstract).

- Jiang, X.G., Wei, Y.W., Wu, L., et al., 2018. Experimental Investigation of Failure Modes and Breaching Characteristics of Natural Dams. *Geomatics*, *Natural Hazards and Risk*, 9(1): 33-48. https://doi.org/10.1080/19475705. 2017.1407367
- Lin, K., Takahashi, A., 2012. Strength Reduction of Cohesionless Soil Due to Internal Erosion Induced by One-Dimensional Upward Seepage Flow. Soils and Foundations, 52(4): 698-711. https://doi.org/10.1016/j.sandf. 2012. 07.010
- Liu, D.Z., Cui, P., Jiang, D.W., et al., 2017. Experimental Study on Breach Broadening Process of Landslide Dam. Science of Soil and Water Conservation, 15(6): 19-26(in Chinese with English abstract).
- Liu, J.F., You, Y., Chen, X.C., et al., 2010. The Characteristics and Countermeasures of Dam-Breaking Debris Flow after Wenchuan Earthquake: A Case Study of the Tangfang Gully in Pingwu County, Sichuan Province. Advanced Engineering Sciences, 42(5): 68-75(in Chinese with English abstract).
- Lu, G.M., Xia, Y.Y., Rui, R., 2016. Improvement of Piping's Critical Slope Ratio Equation Based on the Tortuosity and Chords Model. *Journal of Wuhan University of Technol*ogy, 38(3): 41-47(in Chinese with English abstract).
- Morris, M. W., Hassan, M. A. A. M., Vaskinn, K. A., 2007. Breach Formation: Field Test and Laboratory Experiments. *Journal of Hydraulic Research*, 45(sup1): 9–17. https:// doi.org/10.1080/00221686.2007.9521828
- Shan, Y. B., Chen, S. S., Zhong, Q. M., 2020. A Rapid Evaluation Method of Landslide Dam Stability. *Chinese* Journal of Rock Mechanics and Engineering, 39(9):1847– 1859(in Chinese with English abstract).
- Shi, Z.M., Zhou, M.J., Peng, M., et al., 2021. Research Progress on the Mechanisms and Breaching Flood of Overtopping Failure of Landslide Dams Caused by Landslides and Avalanches. *Chinese Journal of Rock Mechanics* and Engineering, 1–16(in Chinese with English abstract).
- Shu, A.P., Zhu, F.Y., Wang, S., et al., 2019. Starting Processes and Dynamic Characteristics of Dam-Break Debris Flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 50(6): 661-669 (in Chinese with English abstract).
- Wu, M.X., Gao, G.Y., Yang, J.X., et al., 2019. A method of Predicting Critical Gradient for Piping of Sand and Gravel Soils. *Rock and Soil Mechanics*, 40(3):861-870(in Chinese with English abstract).
- Yu, B., Yang, L.Y., Liu, Q.H., et al., 2020. A Precise

Prediction Model on Debris Flows Caused by Runoff Mechanism Based on Channel Width and Particle Size. *Earth Science*, 45(4):1447-1456(in Chinese with English abstract).

- Zhang, H.H., 2011. An Study On Debris Flow Disaster Caused by Flood - Triggering Channel Accumulation in Post -Earthquake Meizoseismal Areas(Dissertation). Chengdu University of Technology, Chengdu: 24-35 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J. Y., Li, Y., Xuan, G. X., et al., 2009. Overtopping Breaching of Cohesive Homogeneous Earth Dam with Different Cohesive Strength. Science in China Series E: Technological Sciences, 52(10): 3024-3029. https://doi. org/10.1007/s11431-009-0275-1
- Zhao, T. L., Chen, S. S., Fu, C. J., et al., 2019. Centrifugal Model Tests and Numerical Simulations for Barrier Dam Break Due to Overtopping. *Journal of Mountain Science*, 16(3): 630-640. https://doi.org/10.1007/s11629-018-5024-0
- Zhao, W. Y., Chen, X. Q., You, Y., et al., 2015. Dam-Break Characteristics of Landslide Dams with Different Types of Open Channel Discharge Sections. *Environmental Earth Sciences*, 74(6): 5331-5340. https://doi.org/10.1007/ s12665-015-4543-z
- Zhong, Q. M., Chen, S. S., Mei, S. A., et al., 2017. Numerical Simulation of Landslide Dam Breaching Due to Overtopping. *Landslides*, 15(6): 1183-1192. https://doi. org/10.1007/s10346-017-0935-3
- Zhou, G. G. D., Cui, P., Zhu, X. H., et al., 2015. A Preliminary Study of the Failure Mechanisms of Cascading Landslide Dams. *International Journal of Sediment Research*, 30(3): 223-234. https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2014.09.003
- Zhu, X. H., Peng, J. B., Jiang, C., et al., 2019. A Preliminary Study of the Failure Modes and Process of Landslide Dams Due to Upstream Flow. *Water*, 11(6): 1115. https://doi. org/10.3390/w11061115
- Zhu, X. H., Peng, J. B., Liu, B. X., et al., 2020. Influence of Textural Properties on the Failure Mode and Process of Landslide Dams. *Engineering Geology*, 271(2): 105613. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105613

附中文参考文献

- 常鸣,窦向阳,唐川,等,2019.降雨驱动泥石流危险性评价.地 球科学,44(8):2794-2802.
- 崔鹏,郭剑,2021.沟谷灾害链演化模式与风险防控对策.工程 科学与技术,53(3):5-18.
- 付建康,罗刚,胡卸文,等,2018. 滑坡堰塞坝越顶溢流破坏的

物理模型实验.吉林大学学报(地球科学版), 48(1): 203-212.

- 胡卸文, 韩玫,梁敬轩, 等, 2016. 汶川地震灾区泥石流若干关 键问题.西南交通大学学报, 51(2): 331-340.
- 刘定竺,崔鹏,蒋德旺,等,2017.堰塞坝溃口展宽过程实验研究.国水土保持科学,15(6):19-26.
- 柳金峰,游勇,陈兴长,等,2010.震后堵溃泥石流的特征及防 治对策研究——以四川省平武县唐房沟为例.四川大学 学报(工程科学版),42(5):68-75.
- 陆高明,夏元友,芮瑞,2016.基于弯曲度与链索模型的管涌 临界坡降比公式改进.武汉理工大学学报,38(3):41-47.
- 单熠博,陈生水,钟启明,2020.堰塞体稳定性快速评价方法研

究.岩石力学与工程学报,39(9):1847-1859.

- 石振明,周明俊,彭铭,等,2021.崩滑型堰塞坝漫顶溃决机制 及溃坝洪水研究进展.岩石力学与工程学报,1-16.
- 舒安平,朱福杨,王澍,等,2019. 溃坝泥石流起动过程及其动 力学特征.水利学报,50(6):661-669.
- 吴梦喜,高桂云,杨家修,等,2019.砂砾石土的管涌临界渗透 坡降预测方法.岩土力学,40(3):861-870.
- 余斌,杨凌崴,刘清华,等,2020.基于沟床宽度与颗粒粒径的 泥石流精细化预报模型.地球科学,45(4):1447-1456.
- 张惠惠,2011. 震后强震区洪水启动沟道堆积物引发泥石流灾 害研究(硕士学位论文). 成都:成都理工大学,24-35.