不同条件下泥石流堰塞坝的溃决过程

曹春然[1,2], 陈华勇[1,3], Robin Neupane[1,2], 李慧斌[1,2], 阮合春[1,2]

(1. 中国科学院 山地灾害与地表过程重点实验室/中国科学院水利部 成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041; 2. 中国科学院大学, 北京 100000; 3. 中国科学院 青藏高原地球科学卓越创新中心, 北京 100101)

摘 要: [目的] 对不同因素作用下的泥石流堰塞坝溃决过程进行试验研究,为泥石流堰塞坝的灾害防治和灾后重建等提供科学支撑。[方法] 开展了不同来水流量、坝体形态、黏粒含量、坝高和初始含水量条件下的溃决试验。将漫顶溃决过程分为 4 个阶段:坡面侵蚀过程、陡坎侵蚀过程、下切和侧向侵蚀过程和衰退过程。此外,分析了泥石流堰塞坝坝体破坏机理,并给出下游坡面泥沙起动临界条件的计算式。[结果] 溃决流量与来水流量之间呈非线性正相关;溃决洪峰流量随着背水坡坡度增加而增加;溃决洪峰流量随着坝高的增加而迅速增加,泥石流堰塞坝坝体黏粒含量与溃决洪峰流量之间整体呈现负相关;溃决洪峰流量随着土体初始含水量的增加而缓慢降低,但变化的范围不大。[结论] 在泥石流堰塞坝溃决的不同因素中,坝高和黏粒含量影响最大,来水流量次之,背水坡度和初始含水量影响最小。

关键词: 泥石流; 堰塞坝; 洪峰流量; 溃决机理; 起动临界条件

文献标识码: A **文章编号**: 1000-288X(2020)03-0027-08 **中图分类号**: P642.23

文献参数: 曹春然, 陈华勇, Robin Neupane, 等. 不同条件下泥石流堰塞坝的溃决过程[J]. 水土保持通报, 2020, 40(3): 27-34. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2020.03.005; Cao Chunran, Chen Huayong, Robin Neupane, et al. Process of debris flow dam break under different conditons [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(3): 27-34.

Process of Debris Flow Dam Break Under Different Conditons

Cao Chunran[1,2], Chen Huayong[1,3], Robin Neupane[1,2], Li Huibin[1,2], Ruan Hechun[1,2]

(1. *Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface Processes, CAS/ Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, Chengdu, Sichuan* 610041, *China*; 2. *University of Chinese Academy of Science, Beijing* 100000, *China*; 3. *CAS Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100101, *China*)

Abstract: [Objective] To provide scientific support for the disaster prevention and reconstruction of debris flow dams, an experimental study on the process of debris flow dam break under different factors was conducted. [Methods] Dam failure tests were carried out under different inflows, dam shapes, clay contents, dam heights, and initial water contents. The breaking process was divided into four stages: slope surface erosion process, scarp erosion process, lateral erosion process, and decline. The failure mechanism of the debris flow dam was analyzed, and the formula for calculating the critical opening condition for the downstream slope sediment was obtained. [Results] There was a nonlinear positive correlation between the outburst discharge and the inflow water flow. The peak discharge of the outburst increased with the slope degree of the backwater slope. The outburst peak discharge increased rapidly with the increase in the height of the dam, and there was a negative correlation between the clay content and the outburst flow. The peak discharge of the outburst flow decreased slowly with the increase in the initial water content of the soil, but the range of variation was not large. [Conclusion] Among the different factors of debris flow dam break,

收稿日期: 2019-11-07 **修回日期**: 2020-01-02

资助项目: 国家自然科学基金项目"气候变化条件下高山区特大泥石流灾害链动力过程与风险分析"(41520104002),"冰滑坡涌浪及其作用下的冰湖溃决机理研究"(41771045); 中国科学院前沿科学重点研究项目(QYZDY-SSW-DQC006); 中科院山地所'一三五'方向性项目(SDS-135-1701); 中国铁路总公司科技研究开发计划课题(2017G008-F); 中科院创新促进会(2017425)

第一作者: 曹春然(1995—),男(汉族),河南省信阳市人,硕士研究生,主要从事堰塞湖溃决方面的研究。Email: cchunran@126.com。

通讯作者: 陈华勇(1982—),男(汉族),四川省广汉市人,博士研究生,研究员,主要从事堰塞湖溃决机理及泥石流工程防治等方面的研究。Email: hychen@imde.ac.cn。

dam height and clay content have the greatest influence, followed by incoming water flow, backwater slope and initial water content have the least influence.

Keywords: debris flow; barrier dam; peak discharge; outburst mechanism; critical opening condition

堰塞坝作为一种常见的自然界灾害,常常是在地震和强降雨等诱发作用下,滑坡、泥石流、冰碛物等堵截河道而形成的天然坝体[1-2]。堰塞坝的类型不同,其危险度和危害特征也不同,根据堰塞坝的物质来源可分为:滑坡崩塌堰塞坝、火山熔岩堰塞坝、泥石流堰塞坝和冰碛堰塞坝[3]。其中泥石流导致的堰塞坝是我国地质灾害常见类型,在中国西南地区,高山峡谷众多,松散物质丰富,很容易暴发大型泥石流堵江[4]。从长期影响来说,泥石流通过改变河流泥沙而影响该河流的河性。从短期危害来说,泥石流堵河造成湖水位的上涨会对上游的乡镇和道路等各种设施造成淹没灾害,堰塞坝一旦破坏又会产生巨大的泄洪流量,冲毁沿程所有房屋、农田以及各项基础设施,造成严重的损失[5]。例如,从 1919 年到 1968 年半个世纪之间,云南省东川蒋家沟发生 7 次堵断小江事件,最长堵江时间达 48 天,水位抬升 10 m,上游回水十几公里,淹没良田 534 hm^2 多,损失粮食 1.50×10^5 kg 多[6];1953 年西藏波密古乡沟暴发泥石流,大规模黏性泥石流冲出沟口导致帕隆藏布江被堵塞,回水约 10 km,造成 140 余人死亡,大量房屋、农田和森林被毁坏,损失惨重[7-8];1984 年和 1985 年西藏波密县培龙沟连续暴发特大泥石流堵断帕隆藏布江事件,回水约 6 km,最宽处 220 m,最深处 14.3 m,淹没上游 7 km 川藏公路和 80 多辆车,堰塞坝溃决后又冲毁下游 2 km 川藏公路和 5 座桥梁,造成上亿元经济损失[9-10]。2010 年 8 月 7 日,甘肃舟曲县突降暴雨,导致三眼峪、罗家峪暴发特大规模泥石流并堵塞白龙江,形成的堰塞湖使近一半县城被淹,造成上千人遇难和巨大的财产损失[11-12];2010 年 8 月 13 至 14 日局部地区强降雨,四川绵竹清平乡文家沟[13-15],汶川县映秀镇红椿沟[16-17]、烧房沟[18],银杏乡银杏坪沟[19]、高家沟[20-21]等突发大规模泥石流,泥石流堵塞绵远河、岷江河道而形成堰塞湖,导致交通、通信、电力等中断,造成了巨大的人员伤亡和财产损失。因此,深入开展泥石流堰塞坝原型的调查,泥石流堵江以及泥石流坝溃决方面的研究,对提升泥石流堰塞坝的灾害防治和灾后重建等具有十分重要的理论和现实意义。

目前,国内外许多学者对泥石流堰塞坝做了一定的研究,但主要集中在泥石流堵江方面。在性质和规模方面,形成堰塞坝的泥石流多以大规模黏性泥石流为主,黏性泥石流重度较大,也相对均匀,一般呈整体堆积,具有一定的抗冲刷能力;在地形方面,泥石流堰塞坝堵塞的河道、山谷一般比较窄,地形坡度较大。吴积善等[22]针对西藏东南部泥石流暴发状况,分析了形成堰塞坝的主要影响因素,主要包括:支沟泥石流(规模、性质和固体粒径)、主河水流(流量、比降和宽度)和交汇区地形(交汇夹角和坡度)3 个方面。匡尚富等[23]、陈德明等[24]、徐永年等[25]、朱平一等[9]、唐川等[26]和党超等[27]分别建立了相应的泥石流堵江判别公式。但是,对于泥石流堰塞坝溃决过程和溃决机理方面的研究很少。为了研究不同因素对泥石流堰塞坝溃决过程的影响以及溃决机理,本文开展了不同来水流量、坝体形态、黏粒含量、坝高和初始含水量条件下的溃决试验,尝试用试验的方法对泥石流堰塞坝溃决过程进行研究。

1 试验设计

1.1 试验装置

试验装置主要由供水系统、试验水槽和尾料池 3 部分组成(如图 1 所示)。试验水槽长 4 m,宽 0.4 m,高 0.4 m,水槽坡度为 1°,水槽两侧均为透明玻璃,便于观察泥石流堰塞坝溃口演化过程以及坝后溃决洪水特性。1—3 号 4K 高清摄像摄像机分别放在坝体顶部、侧面和下游面,从俯视、侧视和正视 3 个角度观察溃决过程。

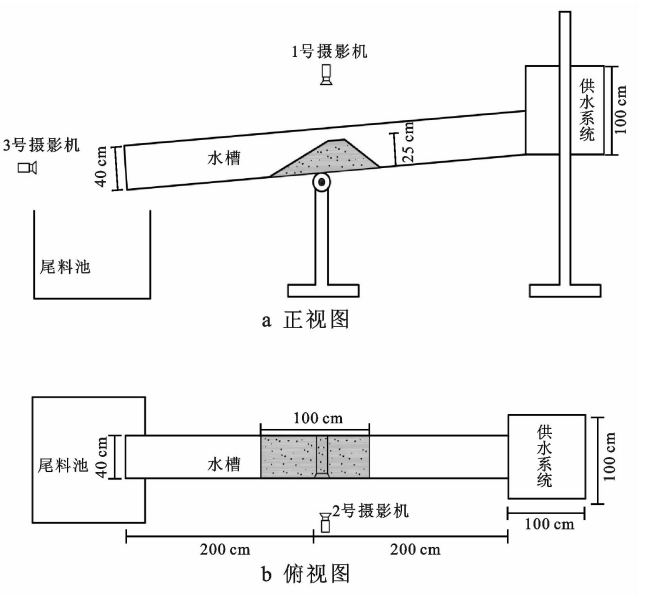


图 1 泥石流堰塞坝试验装置

1.2　试验工况设计

影响泥石流堰塞坝溃决的因素有很多,主要包括坝体自身特征和外部河道水力特征两部分。本研究在野外调查和分析相关文献的基础上,选取来水流量这个水力特征方面的控制因素;选取坝体下游坡角、坝高、黏粒含量、初始含水量 4 个自身特征方面的控制因素进行参数设计。在 2019 年 5 月至 7 月共开展 19 组试验,具体试验参数取值如表 1 所示。

表 1　试验参数

来水流量/(L·s^{-1})	下游坡角/(°)	坝高/cm	黏粒含量/%	含水量/%
0.5	10	15	5	11
1.0	15	20	10	12
1.5	20	25	15	13
2.0	25	30	20	14
—	30	—	30	15

试验材料为 2019 年 4 月取自四川省平武县碓窝沟(32.4409N,104.5371E)的泥石流堆积扇上的泥石流原样土,由于泥石流模拟试验装置的条件限制,剔除土样中直径大于 2cm 的粗颗粒,将剩余土样进行筛分,根据试验中坝体级配需要而重新配置,不同黏粒含量的物料颗粒级配特征见图 2。

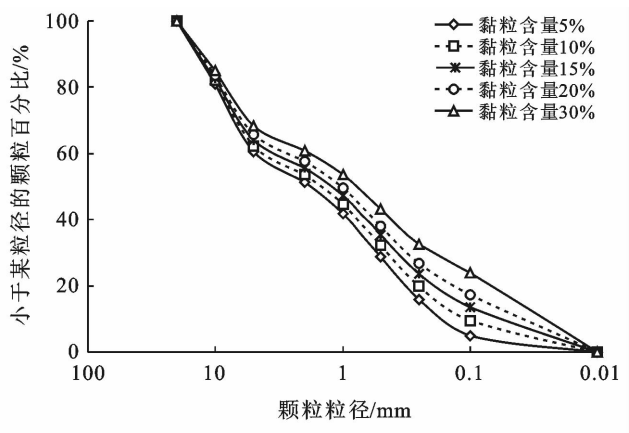


图 2　试验材料颗粒级配特征

2　结果与分析

2.1　侵蚀过程

在试验中,通过观察漫顶溃决时的整个溃决破坏,发现不同条件下的漫顶溃决过程基本一致,总体来看,整个过程大致分为 4 个阶段,现以来水流量为 1 L/s,水槽坡度为 1°,坝体迎水坡和背水坡分别为 30°和 20°,黏粒含量为 15%,坝高 25 cm,含水量为 13%时的堰塞坝漫顶溃决过程为例进行分析。4 个阶段的主要特征解释如下:

(1) 阶段Ⅰ。坡面侵蚀阶段(0～35 s)。即从侵蚀开始(图 3)到侵蚀点移动到 A 点处这个阶段。水流溢流初始溃口后,开始侵蚀溃口底部和溃口侧向斜坡,并挟带少量细小泥沙向下输移。不过由于过流水量较少,水流深度较浅,流速缓慢,水流挟沙能力较弱,而坝体物质黏性较高,抗冲刷能力较强,此时侵蚀量很小,过流后基本为清水。当水流运动到下游坡面顶 A 处后,由于坡度骤然变化,水流势能转化为动能,水流流速加大,侵蚀能力变强,在背水坡面处形成一条较小冲沟。除细小的泥沙外,少量粒径较大的泥沙也被携带向下输移,但由于水流流量较小,下游坡面上较大颗粒会阻碍水流进一步侵蚀,此时水流会以多数小波浪式推移侵蚀,再以少数大波浪式推移侵蚀,最终形成明显陡坎。

(2) 阶段Ⅱ。陡坎侵蚀阶段(35～70 s)(见图 3d,3e)。即从下游坡顶 A 侵蚀到下游坡顶 B 处这个贯穿阶段。随着上游蓄水,坝前水位继续抬升,溃口处水流深度和水流流量进一步增加,侵蚀能力进一步增强,下游坡顶 A 处开始发生侵蚀。同时由于陡坎的高差,陡坎下方会出现冲蚀坑。

(3) 阶段Ⅲ。下切和侧向侵蚀阶段(70～105 s)。即溃口快速扩展,溃决流量快速增加阶段。随着溯源侵蚀的陡坎后退到上游坝顶 B 处,坝体被贯穿,下切侵蚀变的十分容易。溃口降低后导致溃口处水流深度和流速突然增大,侵蚀能力突然增强,反过来进一步降低溃口高度。在这个过程中,由于溃口降低导致溃决流量的突然增大,侧向侵蚀迅速增加,溃口反过来进一步增大。该阶段,溃口斜坡物质在水流侧蚀作用下以块状坍塌入溃口,发生频率较低,溃口形状类似梯形。

(4) 阶段Ⅳ。衰退阶段(105～145 s)。即水流和坝体趋于稳定阶段。溃口增大后,坝前水位快速下降,溃决流量逐渐减小,水流侵蚀能力也逐渐变弱,坝体中的细小颗粒和少量粗颗粒被水流挟带至下游,其余粗颗粒沉积下来。细小颗粒被挟带走后,粗颗粒在溃口出形成一层粗化层,保护下面颗粒物质不被冲刷。此时,水流的冲刷能力和粗化层的抗冲刷能力达到新的平衡,溃决过程结束。

2.2　溃口演化特征

泥石流堰塞坝溯源侵蚀包括坡面侵蚀阶段和陡坎侵蚀阶段。溯源侵蚀过程中溃口底部变化规律可以通过坝体侵蚀过程线来分析不同阶段的特征。同样以来水流量为 1 L/s,水槽坡度为 1°,坝体迎水坡和背水坡分别为 30°和 20°,黏粒含量为 15%,坝高25 cm,含水量为 13%时的堰塞坝漫顶溃决过程为例进行分析。

从图 3 中可以看出坡面侵蚀阶段(阶段Ⅰ)溃口

发展很慢，尤其是溃决发生到 35 s 时，下游坝顶 A 处还未出现明显侵蚀。从下游坡顶 A 处至坡面中部是最大侵蚀发生区，侵蚀模式由小波浪式推移质挟沙运动，到大波浪式推移质挟沙运动，最后形成陡坎。

溃口下切和侧向侵蚀阶段是坝体侵蚀最快的阶段，溃决流量迅速增加至最大的阶段。从图中我们可以发现 70 s 之前坝体溃口正视图变化较小，坝体主要以溯源侵蚀为主，是一个水流逐渐贯通至上游的过程。水流贯通至迎水面后，坝体变薄，下切侵蚀变的更加容易。随着水流下切，溃口处水深和溃决流量快速增加，侵蚀能力快速增加，快速下降的溃口反过来也进一步加速溃决流量，这是一个相互促进的过程。图中 70 s 至 105 s 之间溃口侧向侵蚀十分迅速，在 35 s内基本完成侧向侵蚀过程。

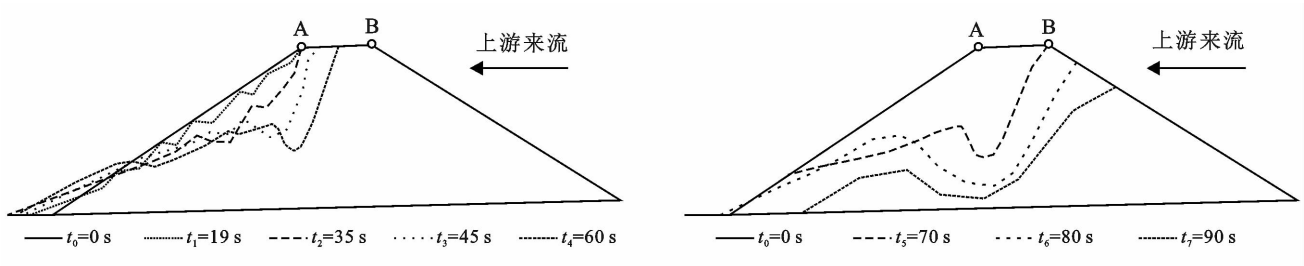


图 3 堰塞坝溃口侵蚀过程线侧视图

由图 4 可知，溃口展宽主要发生在 70 s 至 105 s 之间。在坡面侵蚀过程(0～35 s)重溃口展宽较小，几乎没有变化；在侧向侵蚀过程(70～105 s)溃口在下切的过程中伴随着溃口展宽，侧向侵蚀结束后溃口展宽达到稳定；在衰退阶段(105～145 s)溃口以进一步下切为主，溃口侧向侵蚀较弱，溃口宽度保持稳定。

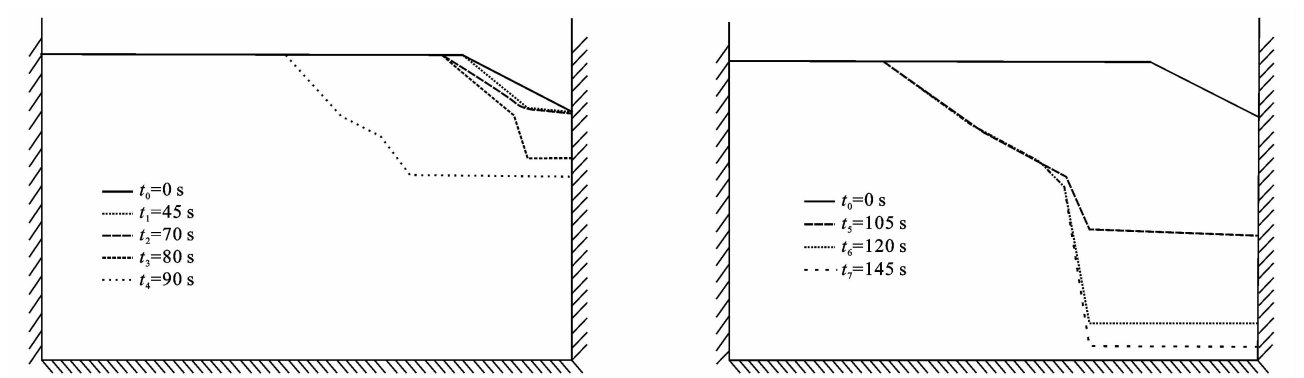


图 4 溃口侵蚀过程线正视图

2.3 不同因素对溃决过程的影响

2.3.1 *来水流量的影响* 来水流量作为影响泥石流堰塞坝溃决的重要因素，导致溃决流量、溃口演化等方面表现出明显差异。图 5a 为背水坡度 20°，坝高 20 cm，黏粒含量 15%，初始含水量 12%，泥石流重度 1.99 g/cm^3，来水流量分别为 0.5，1.0，1.5，2.0 L/s 条件下的溃决流量过程线。从图 5a 中可以看出，流量均随时间呈先增加后减小的趋势，但流量较小时，曲线增加和减小地更慢，呈现出“矮圆”型。随着流量的加大，曲线增加和减小地更快，呈现出“瘦尖”型。同时，随着来水流量的增加，结合图 5b 可知，来水流量与洪峰流量之间呈正相关，但并未呈现线性相关，洪峰流量增加速度随着来水流量增加而增加。来水流量从 0.5 L/s 增加到 1 L/s 时，溃决洪峰流量值增加了 0.6 L/s；来水流量从 1.5 L/s 增加到 2 L/s 时，溃决洪峰流量值增加了 3.4 L/s。

2.3.2 *背水坡坡度的影响* 本试验涉及的泥石流堰塞坝坝体形态主要是指不同的背水坡坡度。图 6a 为来水流量 1 L/s，坝高 20 cm，黏粒含量 15%，初始含水量 12%，泥石流重度 1.99 g/cm^3，背水坡坡度分别为 10°，15°，20°，25°，30°条件下的溃决流量过程线。从图 6a 中可以看出，不同坝型的泥石流堰塞坝溃决流量线的变化趋势相似，但随着背水坡坡度的增加，溃决流量过程线由“尖瘦”型向“矮胖”型转变。图 6b 反映了背水坡坡度与洪峰流量之间的关系。从图 6b 中我们可以看出，背水坡坡度的增加会导致洪峰流量的增加，且洪峰流量最大值 6.2 L/s 与最小值 3.7 L/s相差 2.5 L/s 左右，背水坡坡度 30°时的溃决流量约为背水坡坡度 10°时溃决流量的 1.7 倍。从溃决机理的角度分析，随着背水坡坡度的增加，一方面使背

水坡上的水流速度增加,侵蚀作用增强,溃口发展迅速,溃决流量增加;另一方面,由几何关系可知,坝体顺河长度随背水坡坡度的增大而减小,这也会造成侵蚀量和路径的缩短,相同条件下溃决历时缩短,溃决流量加大。背水坡坡度是通过影响水流坡降,从而影响水流侵蚀能力来改变溃决过程的。

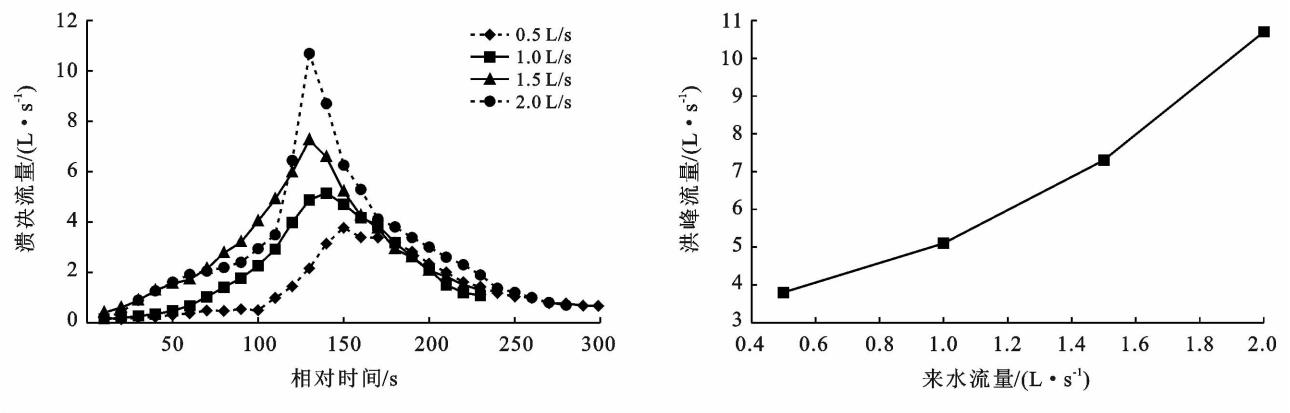


图 5　不同来水流量下溃决流量过程

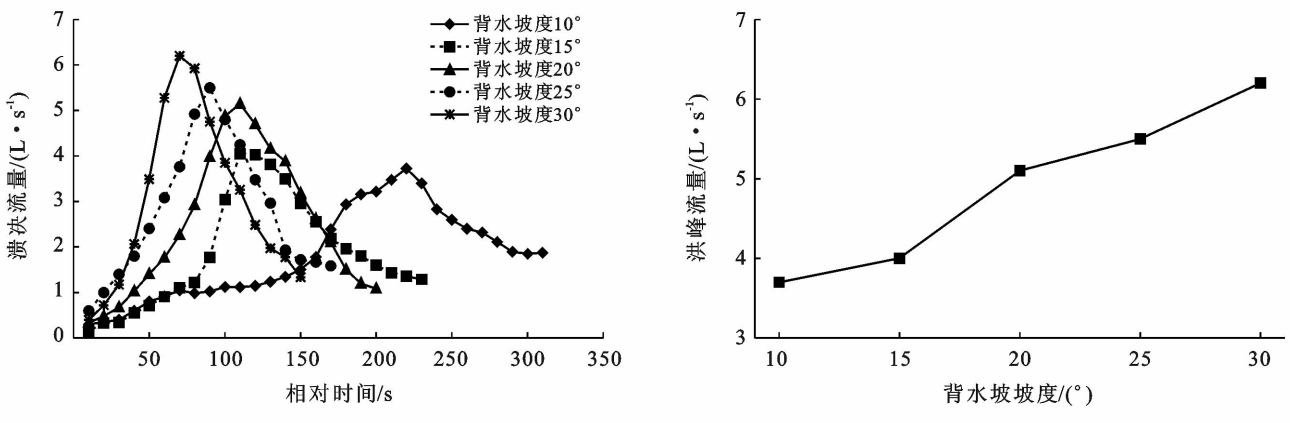


图 6　不同背水坡坡度下溃决流量过程

2.3.3　坝高的影响　坝高是影响泥石流堰塞坝溃决的重要因素,坝体高度往往决定了堰塞湖库容和水力势能。一方面,坝体高度直接影响坝前水位、库容和坝体内部水力梯度(水力比降);另一方面,坝体高度影响了坝体下游坡度、溢流时水流速度和水流冲刷能力。图 7a 为来水流量 1 L/s,背水坡度 20°,黏粒含量 15%,初始含水量 13%,泥石流重度 2.06 g/cm^3,坝高分别为 15,20,25,30 cm 条件下的溃决流量过程线。从图 7a 中可以看出溃决洪峰流量随着坝高的增加而迅速增加,溃决洪峰时间随坝高的增加而缩短,坝体高度对洪峰的影响很大。图 7b 反映了坝体高度和洪峰流量之间的关系,整体呈线性相关。

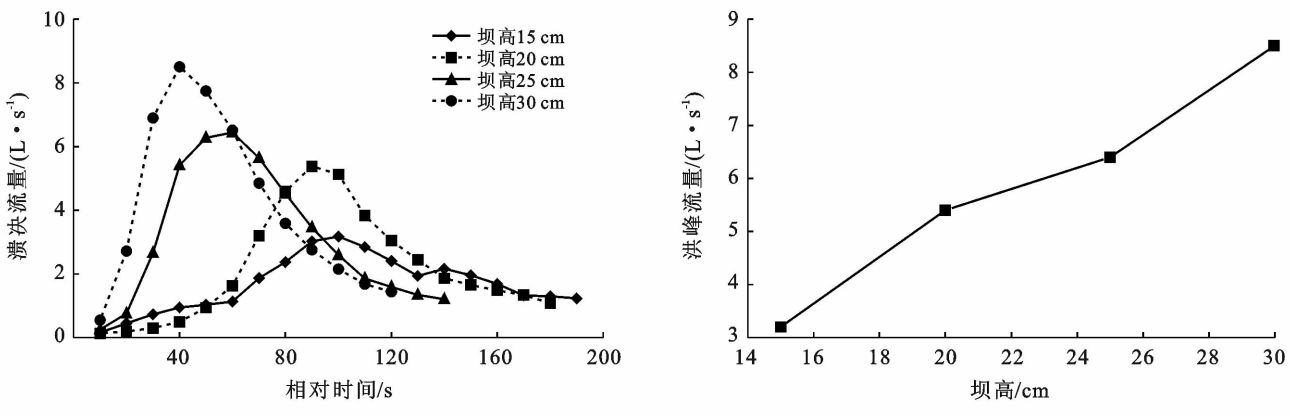


图 7　不同坝高下溃决流量过程

2.3.4 *黏粒含量的影响* 泥石流堰塞坝坝体中黏粒含量对其溃决过程影响很大。黏粒含量会直接影响堰塞坝体的抗冲刷能力和坝体稳定性。坝体黏粒含量不同导致坝体强度不同,坝体内部黏聚力和内摩擦角也不同,从而影响下游坡面稳定性。此外,黏粒含量不同会导致坝体渗透系数不同,渗透过程对坝体稳定性的影响也不同。图 8a 为来水流量 1 L/s,背水坡度 20°,坝高 20 cm,初始含水量 13%,泥石流重度 1.81～2.13 g/cm^3,黏粒含量分别为 5%,10%,15%,20%,30%条件下的溃决流量过程线。从图 8a 中我们可以发现泥石流堰塞坝溃决流量过程线随着黏粒含量的增加从“瘦尖”型逐渐转变成“矮胖”型。溃决流量随黏粒含量的增加而减小,溃决时间随黏粒含量的增加而增加。图 8b 反映了泥石流堰塞坝坝体黏粒含量与洪峰流量之间的关系,整体呈现负相关。

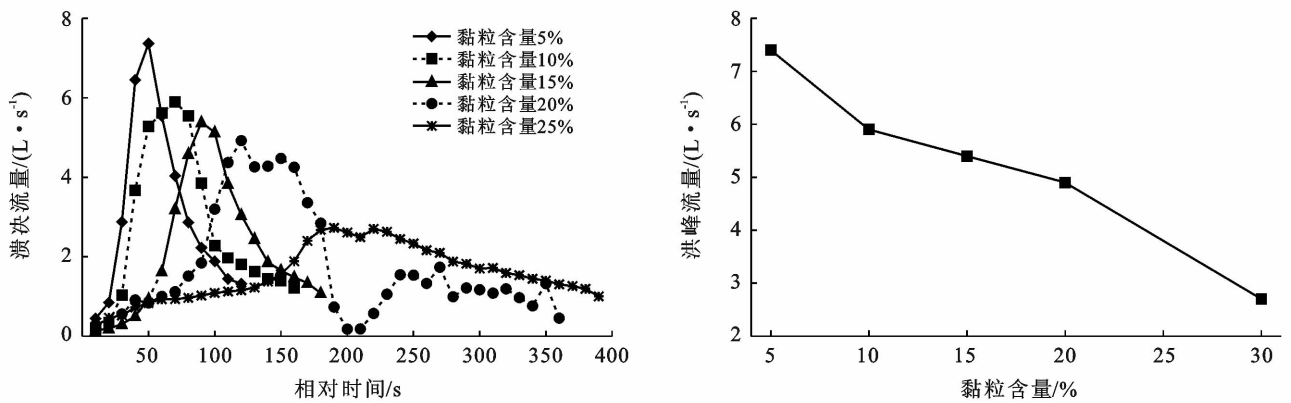


图 8 不同黏粒含量下溃决流量过程特征

2.3.5 *初始含水量的影响* 泥石流堰塞坝坝体初始含水量对坝体强度的影响较大,土体含水量的变化会影响其结构的强度和抗冲刷能力。图 9a 为来水流量 1 L/s,背水坡度 20°,坝高 20 cm,黏粒含量 15%,泥石流重度 1.91～2.09 g/cm^3,初始含水量分别为 11%,12%,13%,14%,15%条件下的溃决流量过程线。从中我们发现不同含水量条件下溃决流量过程线的整体形状变化不大,说明具有相似的坡面侵蚀过程、陡坎侵蚀过程、下切和侧向侵蚀过程和衰退过程,含水量对溃决过程中的主要特征影响不大。初始含水量与洪峰流量之间的关系如图 9b 所示。溃决洪峰流量随着含水量的增加而缓慢降低,但变化的范围不大。

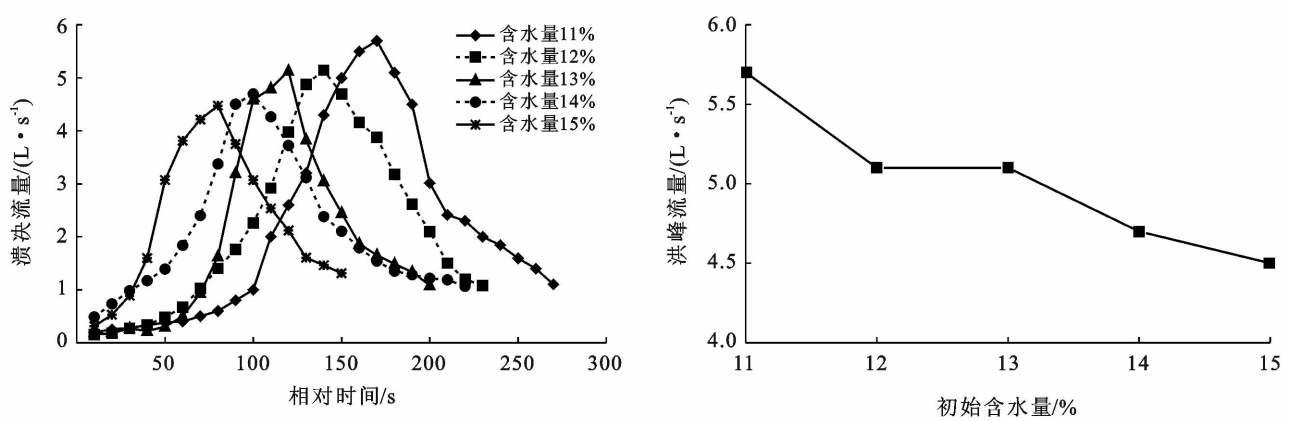


图 9 不同初始含水量下溃决流量过程特征

3 机制分析

泥石流堰塞坝漫顶破坏的过程实质上是水流对坝体的冲刷侵蚀过程。现有对坝体漫顶破坏机理的初步分析大多着眼于溃坝过程中颗粒的冲刷与起动,从不同粒径颗粒的冲刷起动特征层面来说明溃坝机理。坝体溢流冲刷破坏机制可从 3 个方面分析:①坡面流剪力,坡面颗粒运动是坡面水流拖曳力作用造成的;②坡面流流速,溃口中水流速度越大对坝体的掏蚀越强;③坡面流能量,坡面颗粒运动必定要损耗一定的能量。其中,从水流流速入手最直观也最简单。分析颗粒的受力情况,颗粒起动是水流运动产生的拖

曳力和上举力超过颗粒间的黏结力。水流运动的拖曳力和上举力体现在水流的流速上,当流速效应超过颗粒的黏结力效应,颗粒便发生运动。我们对坡面上颗粒进行受力分析发现,颗粒物质受力有水流拖曳力 F_D,水流上举力 F_L,颗粒浮重力 W' 和坡面摩阻力 F_S。具体分析如下:当水流经过坡面粗糙的颗粒物质时,会对颗粒产生拖曳力 F_D,其中拖曳力方向与水流方向相同;当水流经过颗粒时,由于颗粒顶部和底部流速的不同,根据伯努利原理,顶部流速快压力小,底部流速慢压力大,因此造成了压力差 F_L,即上举力;颗粒受到自身在水下的重力 W',即浮重力;颗粒还受到坡面对其阻力的作用 F_S。因为泥石流堰塞坝中的黏粒含量一般比较高,应该说还要考虑内聚力,但是由于坡面侵蚀阶段的冲刷作用发生在泥石流堆积物表层,而表层结构一般比较松散,我们忽略内聚力的影响。受力情况如图 10 所示。

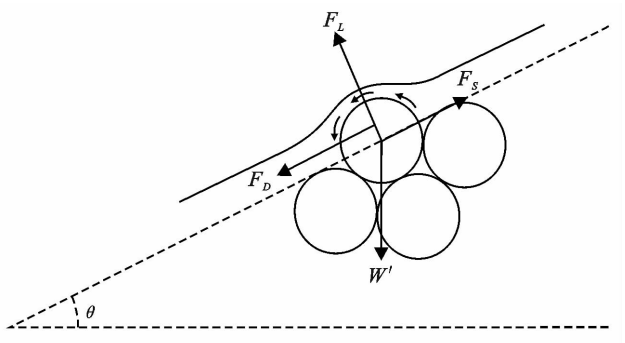


图 10　坡面颗粒物质受力示意图

水流拖曳力 F_D,上举力 F_L,颗粒浮重力 W',摩擦阻力 F_S 和颗粒附近的对数流速公式的一般表达式分别为:

$$F_D = C_D A \frac{\rho u_0^2}{2} \tag{1}$$

$$F_L = C_L A \frac{\rho u_0^2}{2} \tag{2}$$

$$W' = \frac{1}{6}(\gamma_s - \gamma)\pi D^3 \tag{3}$$

$$F_S = (W'\cos\theta - F_L)\tan\Phi \tag{4}$$

$$u_0 = 5.75 u_* \lg(30.2 \frac{\chi y}{K_s}) \tag{5}$$

式中:C_D 和 C_L 分别为阻力系数和上举力系数;u_0 为作用在坡面颗粒上的流速;A 为颗粒最大截面面积;ρ_s 和 ρ 分别为颗粒和水的密度;γ_s 和 γ 分别为颗粒和水的重度;θ 为背水坡面角度;Φ 为颗粒水下休止角;u_* 为摩阻流速。

分析泥石流堰塞坝下游坡面上物质的受力,在坡面方向上建立平衡方程:

$$F_D + W'\sin\theta = (W'\cos\theta - F_L)\tan\Phi \tag{6}$$

则下游坡面物质起动条件:

$$(C_D + C_L\tan\Phi)0.75\rho u_0^2 \geqslant D(\gamma_s - \gamma)(\cos\theta\tan\Phi - \sin\theta) \tag{7}$$

4　结论与讨论

本研究开展了不同来水流量、坝体形态、黏粒含量、坝高和初始含水量条件下的泥石流堰塞坝溃决试验。通过试验现象和数据,分析了泥石流堰塞坝漫顶溃决的主要特征,总结了泥石流堰塞坝溃决的主要过程,探讨了 5 种因素对溃决过程的影响,并研究了溃口演化机理。

(1) 通过泥石流堰塞坝漫顶溃决试验表明,溃决过程主要分为坡面侵蚀过程(阶段Ⅰ)、陡坎侵蚀过程(阶段Ⅱ)、下切和侧向侵蚀过程(阶段Ⅲ)和衰退过程(阶段Ⅳ)。坡面侵蚀阶段和陡坎侵蚀阶段溃口过流水量较少,水流深度较浅,流速缓慢,水流挟沙能力较弱,坝体物质黏性较高,抗冲刷能力较强,此时侵蚀量很小,该阶段水流会以多数小波浪式推移侵蚀,再以少数大波浪式推移侵蚀,最终形成明显陡坎,同时由于陡坎的高差,陡坎下方会出现冲蚀坑;下切和侧向侵蚀阶段由于溃口降低导致溃决流量的突然增大,侧向侵蚀迅速增加,溃口反过来进一步增大,该阶段,溃口斜坡物质在水流侧蚀作用下以块状坍塌入溃口,发生频率较低,溃口形状类似梯形;衰退阶段坝前水位快速下降,水流侵蚀能力也逐渐变弱,细小颗粒被挟带走后,粗颗粒在溃口出形成一层粗化层,保护下面颗粒物质不被冲刷,水流的冲刷能力和粗化层的抗冲刷能力达到新的平衡,溃决过程结束。

(2) 溃决流量与来水流量之间呈非线性正相关,在其他条件相同时,溃决洪峰流量随来水流量的增加而增加,且增速也越来越快;坝体形态中,背水坡坡度是影响溃决流量重要因素之一,溃决洪峰流量随着背水坡坡度增加而增加,背水坡坡度 30°时的溃决流量约为背水坡坡度 10°时溃决流量的 1.7 倍;坝高对溃决流量的影响较大,溃决洪峰流量随着坝高的增加而迅速增加,溃决洪峰时间随坝高的增加而缩短,坝体高度和洪峰流量之间的关系,整体呈线性正相关的关系;坝体中的黏粒含量对坝体溃决影响也比较大,黏粒含量通过影响坝体的抗冲刷能力和坝体稳定性而影响溃决过程,溃决流量随黏粒含量的增加而迅速减小,溃决时间随黏粒含量的增加而迅速增加,泥石流堰塞坝坝体黏粒含量与溃决洪峰流量之间的关系,整体呈现负相关;土体初始含水量对其结构的强度和抗冲刷能力有重要影响,泥石流堰塞坝溃决洪峰流量随着土体初始含水量的增加而缓慢降低,但变化的范围不大。

(3) 分析泥石流堰塞坝坝体破坏机理,得到下游坡面泥沙起动条件:$(C_D+C_L\tan\Phi)0.75\rho u_0^2 \geqslant D(\gamma_s-\gamma)(\cos\theta\tan\Phi-\sin\theta)$

[参 考 文 献]

[1] Costa J E, Schuster R L. The formation and failure of natural dams [J]. Geological Society of America Bulletin, 1988,100(7):1054-1068.

[2] Casagli N, Ermini L, Rosati G. Determining grain size distribution of the material composing landslide dams in the Northern Apennines: Sampling and processing methods [J]. Engineering Geology, 2003,69(1/2):83-97.

[3] 柴贺军,刘汉超,张倬元,等.天然土石坝稳定性初步研究[J].地质科技情报,2001,20(1):77-81.

[4] Cheng Zunlan, Dang Chao, Liu Jingjing, et al. Experiments of debris flow damming in Southeast Tibet[J]. Earth Science Frontiers, 2007,14(6):181-185.

[5] 陈德明.泥石流与主河水流交汇机理及其河床响应特征[D].北京:中国水利水电科学研究院,2000.

[6] 吴积善,康志成,田连权,等.云南蒋家沟泥石流观测研究[M].北京:科学出版社,1990.

[7] 杜榕桓,王立伦,王彦龙,等.西藏古乡沟冰川泥石流的形成与发展[J].中国科学院兰州冰川冻土研究所集刊,1984(4):36-47.

[8] 吕立群,王兆印,漆力健,等.西藏古乡沟泥石流堰塞湖演化规律[J].泥沙研究,2015(5):14-18.

[9] 朱平一,程尊兰,游勇.川藏公路培龙沟泥石流输砂堵江成因探讨[J].自然灾害学报,2000,9(1):80-83.

[10] 陈宁生,陈瑞.培龙沟泥石流及其堵江可能性探讨[J].山地学报,2002,20(6):738-742.

[11] 余斌,杨永红,苏永超,等.甘肃省舟曲 8.7 特大泥石流调查研究[J].工程地质学报,2010,18(4):437-444.

[12] 刘宁.舟曲白龙江堰塞排险与应急疏通减灾工程管理认知[J].中国工程科学,2011,13(1):25-30.

[13] 余斌,马煜,吴雨夫.汶川地震后四川省绵竹市清平乡文家沟泥石流灾害调查研究[J].工程地质学报,2010,18(6):827-836.

[14] 游勇,陈兴长,柳金峰.四川绵竹清平乡文家沟"8·13"特大泥石流灾害[J].灾害学,2011,26(4):68-72.

[15] 倪化勇,郑万模,唐业旗,等.汶川震区文家沟泥石流成灾机理与特征[J].工程地质学报,2011,19(2):262-270.

[16] 唐川,李为乐,丁军,等.汶川震区映秀镇"8·14"特大泥石流灾害调查[J].地球科学,2011,36(1):172-180.

[17] 甘建军,孙海燕,黄润秋,等.汶川县映秀镇红椿沟特大型泥石流形成机制及堵江机理研究[J].灾害学,2012,27(1):5-9.

[18] 卜祥航,唐川,屈永平,等.烧房沟滑坡型泥石流工程治理及效果分析[J].工程地质学报,2016,24(2):220-227.

[19] 黄翔超.汶川震区典型泥石流堵江可能性分析[D].成都:成都理工大学,2012.

[20] 郭晓军,向灵芝,周小军,等.高家沟泥石流和深溪沟泥石流灾害特征[J].灾害学,2012,27(3):81-85.

[21] 高波,任光明,王军,等.四川汶川高家沟泥石流形成条件与启动机理研究[J].中国地质灾害与防治学报,2014,25(4):1-5.

[22] 吴积善,程尊兰,耿学勇.西藏东南部泥石流堵塞坝的形成机理[J].山地学报,2005,23(4):4399-4405.

[23] 匡尚富,汪小刚,黄金池,等.堰塞湖溃坝风险及其影响分析评估[J].中国水利,2008(16):17-21.

[24] 陈德明,王兆印,何耘.泥石流入汇对河流影响的实验研究[J].泥沙研究,2002(3):22-28.

[25] 徐永年,匡尚富,黄永键,等.泥石流入汇的危险性判别指标[J].自然灾害学报,2002,11(3):33-38.

[26] 唐川,黄润秋,黄达,等.金沙江美姑河牛牛坝水电站库区泥石流对工程影响分析[J].工程地质学报,2006,14(2):145-151.

[27] 党超,程尊兰,刘晶晶.泥石流堵塞主河条件[J].山地学报,2009,27(5):557-563.

(上接第 19 页)

[11] 杨中文,唐甜华,陈野,等.樟树林冠截留模拟试验研究[J].长江科学院院报,2011,28(3):5-9.

[12] 陈培琴,黄泽云,马廷贵,等.宁夏'红梅杏'设施盆栽促早栽培技术[J].中国果树,2018(4):97-100.

[13] 冯平,鲁小清.宁夏固原地区水文特性分析[J].水土保持通报,1993,13(1):51-59.

[14] 黄鹤,张维江,李娟,等.原州区近 60 年降水特征分析[J].农业科学研究,2019,40(3):32-36.

[15] 芦新建,贺康宁,王辉,等.应用 Gash 模型对青海高寒区华北落叶松人工林林冠截留的模拟[J].水土保持学报,2014,28(4):44-48.

[16] 刘胜涛,高鹏,李肖,等.江西大岗山杉木人工林降雨截留特征及修正 Gash 模型的模拟[J].水土保持学报,2015,29(2):172-176.

[17] 李苗,邓永成,史红文.武汉市公园绿地植物群落冠层雨水截留能力研究[J].黑龙江农业科学,2018(7):112-116.

[18] 殷晖.森林植被林冠截留降水模型初探[J].现代园艺,2012(8):149.

[19] 黄进,胡海波,张家洋,等.北亚热带毛竹林林冠截留特征的研究[J].南京林业大学学报(自然科学版),2009,33(2):31-34.

[20] 方书敏,赵传燕,荐圣淇,等.陇中黄土高原油松人工林林冠截留特征及模拟[J].应用生态学报,2013,24(6):1509-1516.