

引用格式: 刘世成, 王运生, 宋良. 四川茂县叠溪堰塞坝溃决的实验研究[J]. 山地学报, 2024, 42(5): 672-684.

LIU Shicheng, WANG Yunsheng, SONG Liang. Experimental interpretation of a historical landslide dam failure at Diexi Town in Maoxian County, Sichuan Province, China [J]. Mountain Research, 2024, 42(5): 672-684.

四川茂县叠溪堰塞坝溃决的实验研究

刘世成^a, 王运生^{b*}, 宋良^a

(成都理工大学 a. 环境与土木工程学院; b. 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都 610059)

摘要: 滑坡堰塞坝上下游坝体结构与颗粒组分展现出显著差异性。虽然国内外学者对各类堰塞坝体的溃决机制进行了广泛研究, 但已有研究在坝体粒序的选择上存在局限性, 加之堰塞坝结构的复杂性, 使得天然溃决过程与人工土石坝溃决存在根本不同。本文选取 1933 年四川阿坝羌族自治州茂县叠溪镇发生 $M_s 7.5$ 级强震诱发的滑坡堵江事件为案例, 通过野外实地取材并进行物理模型实验, 探究似反粒序结构下, 不同颗粒级配的滑坡堰塞坝溃决过程。研究结果表明: (1) 似反粒序结构下侵蚀过程依次经历渗流、冲刷、侧蚀、下切、破坏 5 个阶段。(2) 当颗粒级配 $d_{50} = 30$ mm 级配时, 溃口的横向拓展模式主要表现为整体式剪切错动, 致使溃口流量迅速上升且消退缓慢, 侵蚀曲线整体呈现出平缓态势。(3) 当 $d_{50} = 14.2$ mm 时, 溃口的横向拓展模式则转变为整体式的重力崩塌, 侵蚀曲线相对陡峭, 溃口流量呈现出快速上涨与迅速消退的特点。研究结果可为滑坡堰塞坝溃决机理研究及防治提供参考。

关键词: 堰塞坝; 似反粒序; 破坏模式; 叠溪

中图分类号: TV149.2

文献标志码: A

滑坡堰塞坝通常呈现为不规则形态, 其结构与其滑坡类型、所处地形地貌等多种要素有关, 上下游坝体的粒径分布也有明显差异^[1]。大型滑坡如若运动距离短, 堰塞坝便能保持原有的层序, 呈现出上细下粗的正粒序结构。如若滑坡运动距离长, 在高速运动过程中经强烈的碎屑化作用而逐渐解体成为碎屑颗粒^[2], 堰塞坝会呈现上粗下细的反粒序结构。而中距离滑坡堰塞湖形成过程中, 由于坡体下滑速度不是很快, 体积较大块体有一定的运动, 堆积体表面仍以大块石为主, 下部组成物质仍以块碎石为主, 填充少量的土, 但整体结构有一定层序, 表现为堰塞坝粗细颗粒混杂, 也就是所谓似反粒序堆积结构。

滑坡堰塞坝的溃决机理研究主要集中在正粒序和反粒序两种坝体结构上。研究方法主要分为物理实验和数值模拟两种。物理实验是通过室内水槽模拟堰塞坝实验, 探究不同坡度、密实度、级配等条件下坝体的破坏过程、溃口演化过程及溃决流量数值, 并在此方面取得了丰富的成果^[3-8]。数值模拟则通过模拟坝体失稳, 总结破坏的一般规律。例如, 彭成^[9]、钟启明^[10]等对唐家山堰塞坝溃决的数学模拟, 沈光泽^[11]建立的西藏贡嘎堰塞坝数学模型。尽管国内外学者对不同类型的堰塞坝体溃决机理进行了大量研究, 然而, 由于堰塞坝的自然形成过程及其结构的复杂性, 多数研究选用的坝体粒序存在局限性, 使得数值模拟结果与实际的天然溃决过程仍存

收稿日期 (Received date): 2023-08-08; 改回日期 (Accepted date): 2024-09-07

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金 (41877235); 国家重点研发计划 (2017YFC1501000)。[National Natural Science Foundation of China (41877235); National Key Research and Development Program of China (2017YFC1501000)]

作者简介 (Biography): 刘世成 (1998-), 男, 四川成都人, 硕士研究生, 主要研究方向: 工程地质和地质灾害。[LIU Shicheng (1998-), male, born in Chengdu, Sichuan Province, M. Sc. candidate, research on engineering geology and geological disaster] E-mail: 1159554101@qq.com

* 通讯作者 (Corresponding author): 王运生 (1960-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 工程地质。[WANG Yunsheng (1960-), male, Ph. D., professor, research on engineering geology] E-mail: 1109286292@qq.com

在一定的差异。

1933年8月25日,四川茂县岷江上游中部叠溪镇发生 $M_s 7.5$ 级强震,震中位于龙门山构造带与秦岭构造带之间^[12],青藏高原与四川盆地的交界过渡地段。强震触发了大量的高速远程滑坡与崩塌事件,形成了多处滑坡堰塞坝堵江现象,这为研究似反粒序滑坡堰塞坝的溃决模式提供了丰富资料。

本文以1933年四川茂县叠溪镇地震触发堰塞坝为例,在阿坝茂县叠溪镇松坪沟设立研究场地,利用实地取材进行物理模型实验和原位实验,分析似反粒序结构下滑坡堰塞坝的溃决变化过程和稳定性差异,确定似反粒序滑坡堰塞坝的溃决模式,以期为人类防灾减灾及类似滑坡堰塞坝溃决机理研究提供参考。

1 实验过程

1.1 实验背景

四川茂县叠溪镇位于岷江上游,属于青藏高原与四川盆地的过渡单元,上距松潘县80 km,下距茂县60 km^[13],如图1。同时由于岷江地理位置特殊,属于印度板块、欧亚板块两个陆板块之间的解压带内部,因此叠溪镇所在区域的地质构造作用复杂强烈,历史上已有诸多强震事件发生^[14]。

1933年8月25日14点30分,阿坝羌族藏族自治州茂县叠溪镇发生 $M_s 7.5$ 级强震,诱发了大量滑坡、崩塌等地质灾害以及次生灾害,在岷江叠溪镇流域内形成大大小小多处堰塞湖,在岷江河谷及右岸支流松坪沟、鱼儿寨沟内数量最多。松坪沟内至今仍保存有公棚海子,上、下白腊寨海子,上、下水磨沟海子和无名海子。两河口和下木石坝处的海子后来虽然干涸,但其湖盆、溃坝缺口地形仍然很清晰。另外,鱼儿寨沟内的鱼儿寨海子也保存较完整^[15]。沟内现存堰塞堵江多为地震诱发的高速远程滑坡堆积体堵江^[16]。鱼儿寨沟是支沟,干流量较小,沟内有多处以古滑坡或崩坡积堵塞形成的小方量堰塞湖,堰塞体的组成物质多为土夹石。在降雨作用下,水流量剧增,坝体底部有渗流,加之坝体上部胶结比较松软,漫顶溢流很容易侵蚀坝体而引起堰塞坝溃决。相较于主沟,支沟堰塞更容易溃决形成巨大洪流,冲毁或淹没下游途径范围内的

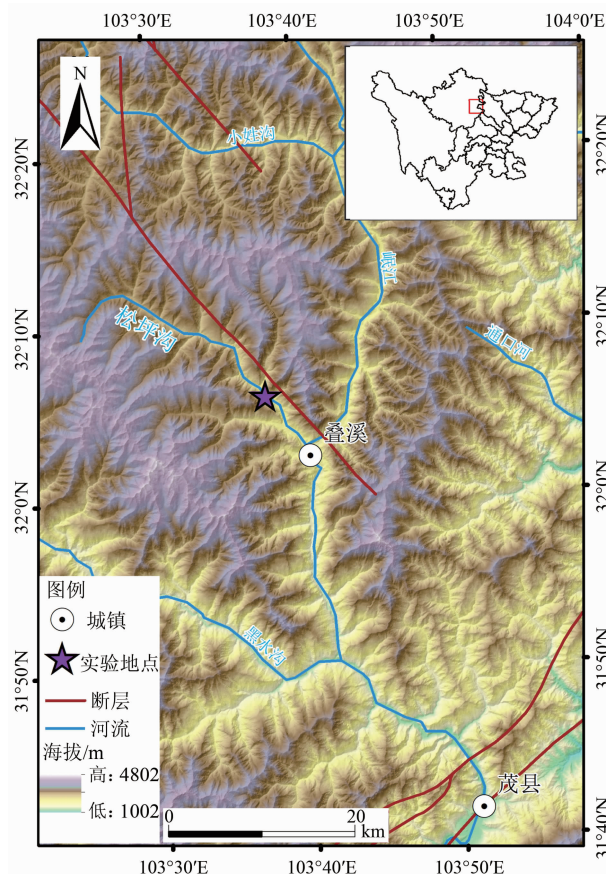


图1 研究区概况图

Fig. 1 Overview map of the study area

基础建设,严重危害人民生命财产安全。因此研究堰塞坝溃决机制和溃决过程,有助于提高山区堰塞坝稳定性评估的准确性,对堰塞坝下游地区防灾减灾有重要意义。

1.2 实验设计

本实验是探究型实验,实验槽选址于四川省阿坝羌族藏族自治州茂县松坪沟内上白腊寨。松坪沟为岷江上游的主干支流,位于叠溪小海子和岷江的汇合处^[17]。实验设计的水槽长3.65 m、宽0.4 m、高0.25 m(图2)。底坡可人工微调,根据对松坪沟内叠溪海子、下白蜡海子、上白蜡海子、白石海子等几个堰塞湖海子的实地调查,参考了松坪沟实际纵坡比38‰,水槽倾斜角度设定为2°。本系统采用松坪沟内岷江支流旁一溪流循环供水,通过控制上游流过三角堰的水头高度来实现实验水槽的稳定供水。改变三角堰的水头高度,可以改变入流量,从而达到水量的稳定供应和流量的控制。本实验的流量 Q 设为5.3 L/s。

由于坝体一般呈对称结构,本次实验在侧面开

挖泄流槽,通过侧面插入的玻璃板进行观察,整个实验过程采用编号为1*、2*、3*的摄像机全程记录(SONYFDR-AX60,3840×2160像素,120帧),3台摄像机分别记录坝体的横纵坡面变化和坝体溃口的拓展历程。坝体的溃决过程水位记录,可根据3台摄像机的录像进行实时测量。实验水槽系统主要由蓄(供)水装置、水槽、支架等组成,实验设备布置如图3所示。由于堰塞坝的形态不规则,根据工程经验溃口位置一般分布于坝体侧边(图4a、4b),因此本次实验在侧边设置溃口,溃口断面形式为直角

梯形断面,溃口尺寸为上底0.07 m、下底0.05 m、高0.07 m(图4c)。

本实验坝体以松坪沟内堵沟型堰塞坝为概化模型,依照叠溪地震后,收集到的坝体信息^[15,18-19](表1),叠溪地区上下游坝体坡度一般为天然休止角,由于叠溪地区堰塞坝坡度较缓,考虑到似反粒序结构坝体保留时间一般大于土石坝,因此需要增大模型上、下游坝坡的坡度分别至37.6°和38.3°,设计的堰塞坝堆积体长0.5 m、宽0.4 m,坝顶宽为0.17 m(图5)。

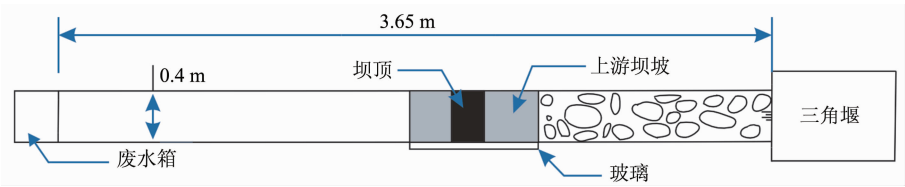


图2 实验槽俯视图

Fig. 2 Top view of the experimental tank



图3 实验设备布置图

Fig. 3 Layout diagram of experimental equipment



图4 初始溃口形态设置依据:

(a) 绵远河堰塞坝初始溃口位置;(b) 绵远河堰塞坝初始溃口细景;(c) 实验设定初始溃口位置

Fig. 4 Basis for the initial breach morphology design: (a) initial breach location of the Mianyuan River landslide dam; (b) close-up view of the initial breach in the Mianyuan River landslide dam; (c) initial breach location set for the experiment

表 1 1933 年叠溪地区堰塞坝几何数据
Tab. 1 Geometric data of the Diexi landslide dam in 1933

堰塞湖名称	轴向/(°)	坝高/m	坝长/m	坝顶宽/m	上下游 落差/m	上游坡度		下游坡度	
						水上	水下	水上	水下
叠溪海子	70	160	500	100	160				
下白蜡海子	330	60	330	50	60			1:8	
上白蜡海子	300	20	400	300	20			1:15	
校场堰塞坝	325	100	3000	200	65	1:17	1:17	1:25	1:25
银屏崖堰塞坝	40	130	700	750	66	1:9.1	1:3	1:3	1:7

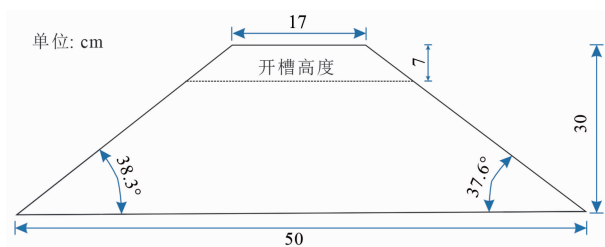


图 5 坝体形态
Fig. 5 Dam morphology

松坪沟内堰塞坝的组成物质主要为 1933 年叠溪大地震产生的崩坡积物和滑坡堆积物。而堰塞坝的破坏过程受到坝体材料以及颗粒级配的影响

响^[20-21]。叠溪地震后,真实的由单一粒径组成的堰塞坝不容易形成,也可能在形成后极短的时间内发生溃决,加之中距离滑坡形成的似反粒序堰塞坝距今时间久远,其保留时间未知,导致后期采样困难。根据 Casagli^[21] 等统计的天然堰塞坝的级配范围、沟内宽级配以及松散堆积物的特点,本次实验材料选取于 2022 年 5 月 15 日上白蜡海子,堆积体经过人工筛分,选取最大粒径为 60 mm,最小粒径为 0.4 mm 的颗粒,实验模型体积为 0.04 m³,实验堵沟坝体共采用两种级配进行实验,其中 2[#]级配在 1[#]级配的基础上减少了粗粒径的占比。1[#]、2[#]级配的级配曲线见图 6。

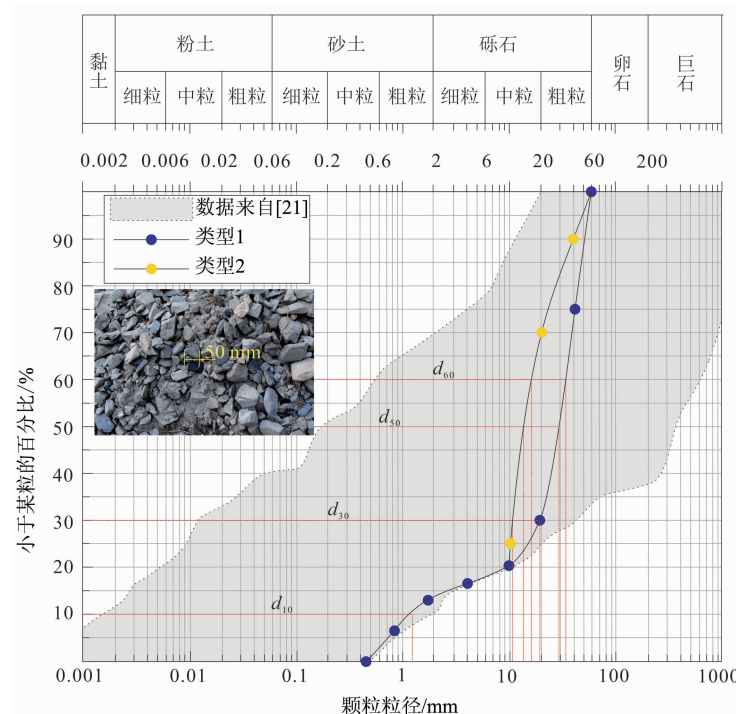


图 6 阿尔卑斯山北麓 42 座典型堰塞坝颗粒级配分布区间以及本实验颗粒分布
Fig. 6 Grain size distribution ranges of 42 typical landslide dams on the northern flank of the Alps and experimental grain distribution in this study

坝体块石颗粒的不均匀系数(C_u)和曲率系数(C_c)的值也能够表征出坝体不同位置的结构特征,计算公式如下^[22]:

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \tag{1}$$

$$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{60} \times d_{10}} \tag{2}$$

式中, C_u 为不均匀系数; C_c 为曲率系数; d_{10} 、 d_{30} 以及 d_{60} 为粒径特征值,其值为在粒径累计分布曲线中10%、30%和60%所对应的横坐标。本实验针对似反粒序结构下人工开槽泄流的溃坝过程机理做了初步研究,针对结构这一因素进行了单变量实验研究,保持其他参数一致的前提下,分别在1[#]、2[#]级配下进行对比实验,共进行了两组有效实验,结合坝体块石粒径特征值的取值、不均匀系数和曲率系数的计算结果如表2所示。

进行实验时,先按照要求安置测量设备,似反粒序结构均采用人工分层堆筑,按照指定形状、尺寸筑成坝体(图7~9)并开挖泄口。每次实验采用相同大小的击实功击实坝体,保证每次实验时的密实度相同。需要说明的是,实际似反粒序堰塞坝的坝体密度分布较为随机,压实密度相关参数难以获取,文中野外水槽实验采用了概化处理,以便两组实验工况间成果的参照对比。根据赵高文^[23]等密度-孔隙率关系曲线,通过插值法可得下部细颗粒的孔隙率为26.5%。最后调节三角堰的水头高度控制流量,启动测量仪器录制整个漫顶侵蚀过程。

2 实验结果及分析

2.1 侵蚀过程

因为似反粒序结构坝体的特殊性,决定了它的破坏过程在一定程度上与正粒序、反粒序结构坝体不同。如图10、图11所示,两种级配在侵蚀,溃决破坏过程中存在巨大差异。



图7 坝体顺河长度
Fig.7 Longitudinal length of the dam



图8 坝体横河长度
Fig.8 Transverse length of the dam

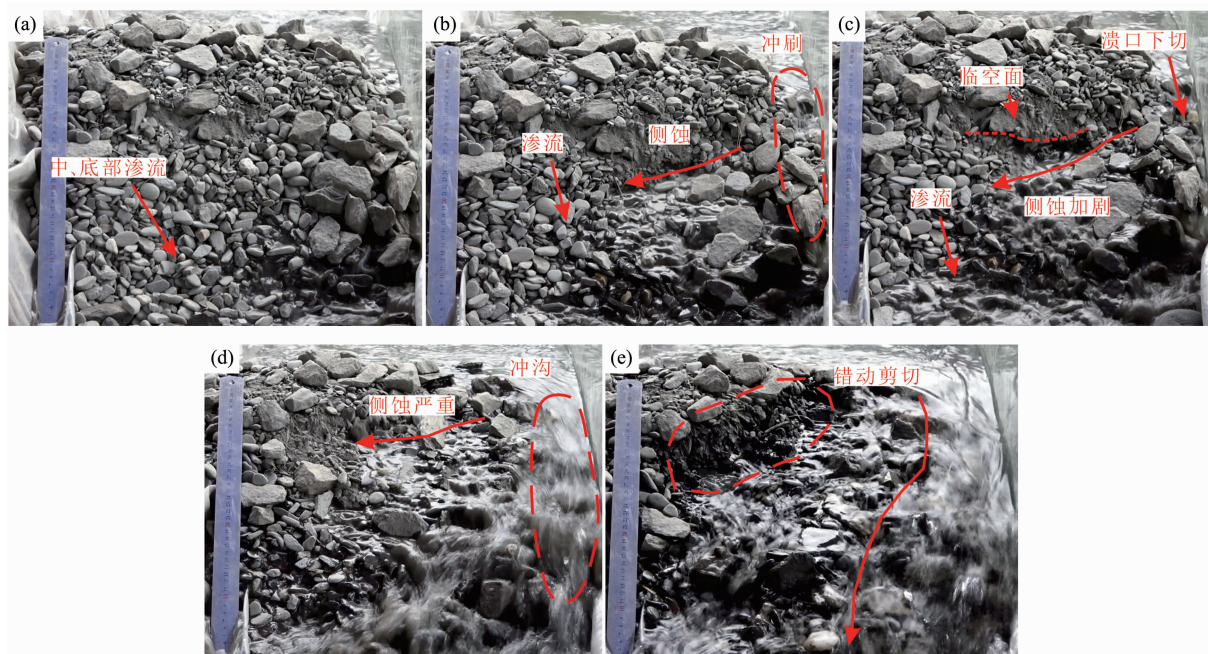
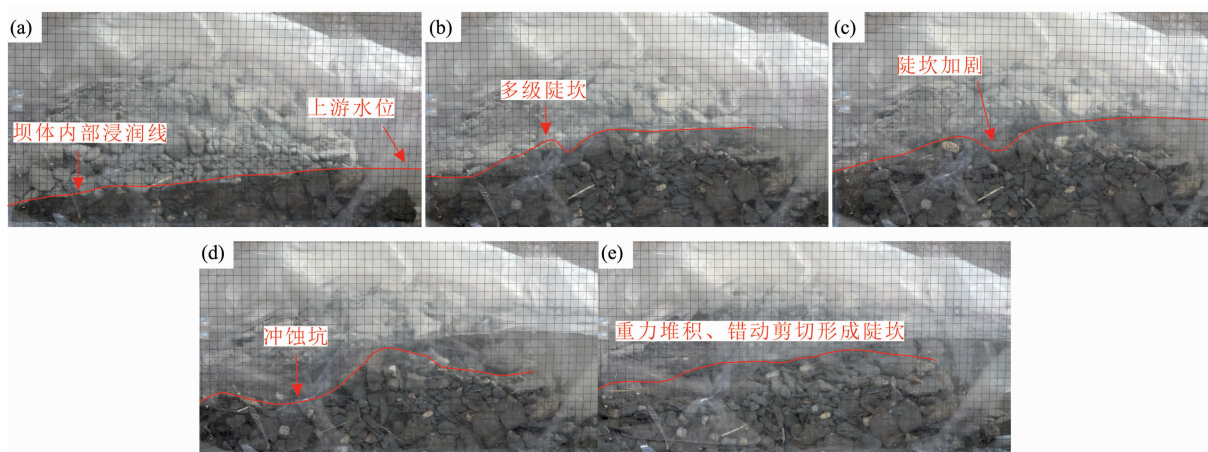


图9 坝体高度
Fig.9 Height of the dam

表2 实验工况

Tab.2 Overview of experimental conditions

编号	结构	级配	d_{60}/mm	d_{50}/mm	d_{30}/mm	d_{10}/mm	C_u	C_c
1	似反粒序	1 [#]	34.3	30.0	18.9	0.73	46.98	14.26
2	似反粒序	2 [#]	16.7	14.2	11.2	0.73	22.87	10.28

图 10 级配 1[#]似反粒序坝破坏过程Fig. 10 Destruction process of gradation 1[#] quasi-inverse grading sequence dam图 11 级配 1[#]似反粒序坝破坏过程(观测玻璃板处)Fig. 11 Destruction process of gradation 1[#] quasi-inverse grading sequence dam (at the observation glass plate)

2.1.1 级配 1[#]

实验开始时,河槽开始蓄水,坝体上游进水后,坝体内浸润线基本与上游水位同步,这种现象随河槽蓄水量的增加一直从坝体底部延伸至坝体中上部,同样因为河水的分选作用,坝体中底部的细颗粒被河水带走;当河槽蓄水位达到溃口高度时,溃口处开始受到冲刷,河水流过溃口,一部分沿溃口方向流走,另一部分从坝体下游坡表流走,使得坝体中部堆积物被一同带走,在坝体下游坡体表面形成一条侧蚀凹槽线;河水后续继续冲刷流过溃口,溃口拓宽,

在河流下切侵蚀作用下,溃口深度加大,河水通过溃口流量增大,通过坝体下游坡表的流量也增大,坝体下游坡表逐渐形成侧蚀凹槽,凹槽上部堆积体,随河流的侵蚀作用,呈整体下座式破坏;随着溃口的不断拓宽,下游坡表的凹槽不断发育,上部堆积体也由于河水的冲刷侧蚀不断减少,坝体的过水流量逐渐增大,坝体未完全破坏;再经过长时间冲刷渗流,最终坝体破坏。1[#]级配条件下侵蚀过程主要分为坝体中底部渗流—溃口受到冲刷后坝体表面形成一条侧蚀凹槽线—河流持续下切—溃口垮塌—坝体破坏 5 个

阶段(图 10、图 11)。

2.1.2 级配 2[#]

2[#]级配条件下,实验开始时,河槽开始蓄水,由于水流的分选作用,坝体底部细小颗粒率先被带走,坝体底部有细微渗流,但渗流量远小于河水流量,坝体开始破坏;随着库水容量的逐渐增加,当蓄水高度足够时,靠近玻璃一侧溃口受到冲刷,水流的下切作用加剧,溃口侧的堆积材料进一步被河水冲刷流走,形成多级陡坎,溃口拓宽;当河水下切一定深度(并未切穿坝体)时,溃口拓宽一定宽度,溃口侧堆积物因一侧临空开始垮塌,导致坝体中部堆积物受到河水的侧蚀作用加剧,中部堆积物逐渐被河水带走,溃

口进一步拓宽,坝体进一步破坏,虽然坝体过水流量仍小于河水流量,但因为坝体中底部的渗流量,加之坝体结构,使得坝体能暂时保存;在上述两种因素影响下,经过长时间的冲刷,坝体最终破坏。2[#]级配条件下侵蚀过程主要分为坝体底部渗流—溃口受到冲刷—河流持续下切—溃口垮塌—坝体破坏 5 个阶段(图 12、图 13)。

根据图 10~13 可知,首先两组实验全程受到的溯源侵蚀。从玻璃板侧观察,1[#]级配条件下,实验开始后,蓄水量达到溃口高度后,河水通过溃口,随着库区水容量的不断减少,水流无法下切,导致溃口侧整体下切不明显,在河水的侧蚀作用下,坝体下游坡

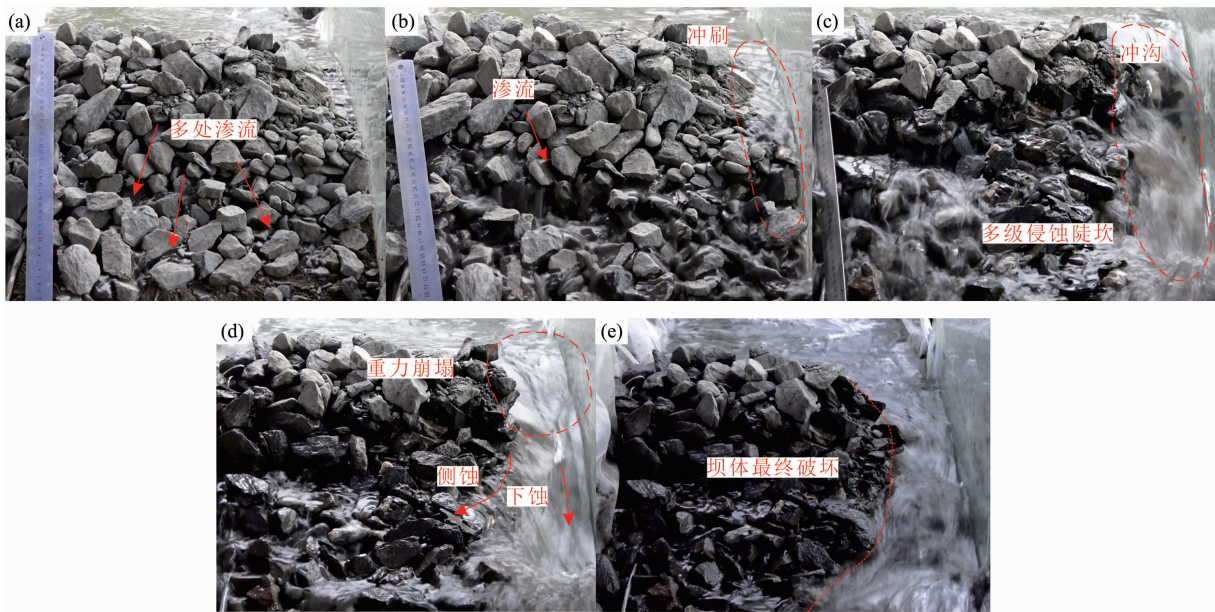


图 12 级配 2[#]似反粒序坝破坏过程

Fig. 12 Destruction process of gradation 2[#] quasi-inverse grading sequence dam

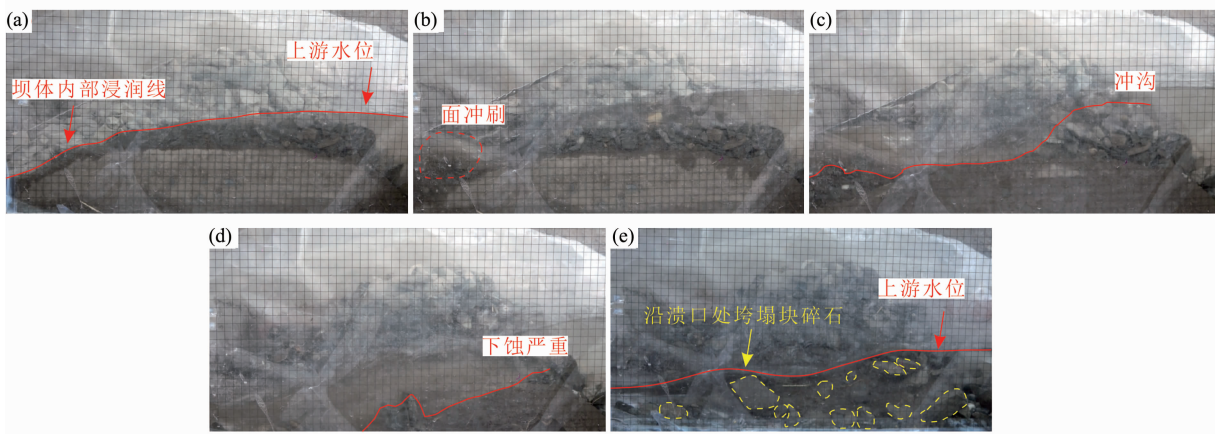


图 13 级配 2[#]似反粒序坝破坏过程(观测玻璃板处)

Fig. 13 Destruction process of gradation 2[#] quasi-inverse grading sequence dam (at the observation glass plate)

体被侵蚀,水流基准面以上的堆积物垮入溃口冲沟,被河水带走,在溃口冲沟内形成多级陡坎以及冲蚀坑,经过长时间,坝体冲刷最终破坏。2[#]级配条件下,实验开始后,水位达到溃口,有明显的面冲刷现象,随着河流下切形成,溃口逐渐发育成陡坎状冲沟,坝体堆积体不断垮塌堆积在溃口冲沟处,在河水冲刷及溯源侵蚀等作用下被河水带走,致使坝体靠玻璃板一侧逐渐临空,经过长时间的河水冲刷最终破坏。不同溃决时间段的侵蚀过程曲线如图 14 所示。

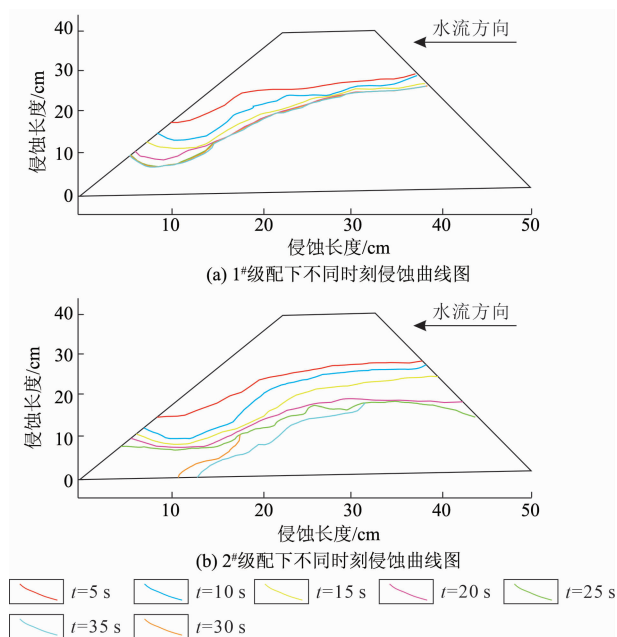


图 14 侵蚀过程线

Fig. 14 Erosion process line

结合图 10 ~ 图 13 可知,1[#]级配下坝体的溃决持续时间远大于 2[#]级配下坝体的溃决持续时间,且溯源侵蚀不明显,随着溃决的进行,侵蚀曲线出现交叉重合,在溃决尾声阶段,1[#]级配下坝体的下游部分会出现陡坎。

在 1[#]、2[#]级配情况下,侵蚀形成的多级陡坎会随侵蚀过程的发展,逐渐后退,溯源侵蚀明显,在侵蚀过程中,因为冲刷、渗流、侧蚀等的综合作用,会使坝体靠近溃口部分的堆积体发生重力堆积或剪切错动从而堵塞坝体下游形成水跃如图 15,同时,随着侵蚀的持续,多级陡坎后退合并成为单陡坎。尤其是在变化过程中,坝宽和坝高皆在侵蚀作用下缩小,但坝宽的侵蚀缩小速率要高于坝高的侵蚀缩小速率。根据图 11 ~ 图 13 还可以看出,在似反粒序结构下,堆积体受到侵蚀会形成冲蚀坑。

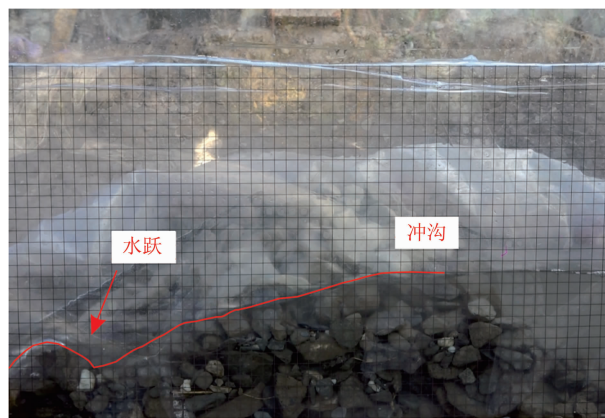


图 15 实验中水跃现象

Fig. 15 Hydraulic jump phenomenon in the experiment

2.2 溃口冲刷扩展过程

溃决过程中,水流特征和溃口形态逐渐发生变化,两者相互影响。以 1[#]、2[#]级配两组实验为例,1[#]级配情况下,溃口变化较大(图 16)。溯源侵蚀结束前,水流流速较缓慢,随着蓄水量的增加,溃口形态逐渐转变为 S 形态,此时溃口内部水流方向为顺流方向,水沙作用简单,溃口整体缓慢展宽。该过程的特点是,随着蓄水量的增加,水流速度逐渐增大,水流侵蚀范围逐渐由上游向下游拓展,直至扩大到整

图 16 溃口展宽过程(1[#]级配)Fig. 16 Breach widening process (Gradation 1[#])

个坝体。

溯源侵蚀结束后,现有 S 形态溃口整体的入流量增大,加之溃口首部扩大并且整体性差,同时在侵蚀过程中斜向流量加入,溃口首部为弯曲型,导致溃口内部会形成束缩段。因此入流流量对 S 形溃口中部分以及溃口底部的侵蚀会加强。

2[#]级配情况下,随着侵蚀的进行,水流透过粗颗粒的空隙,向溃口底部侵蚀。溯源侵蚀结束前,过流较为缓慢,溃口的形态逐渐向玻璃板一边弯曲,溃口整体宽度稍微增大,但是溃口各处宽度基本相等(图 17)。该过程的特点是,随着蓄水量增大,过流量增大,溃口纵向侵蚀范围逐渐向上游发展直至扩大到整个坝体。溯源侵蚀结束后,溃口整体过流量增大,水流透过粗颗粒向溃口底部侵蚀加强。随着细颗粒被侵蚀,溃口靠近坝体一侧逐渐形成临空面。因为溃口的整体性差,在水流的冲击下,使得溃口进一步增大,进而更加大了对溃口底部的侵蚀。

根据图 11 ~ 图 17 以及上述两种级配下两种结构的溃口拓展过程可知,似反粒序结构状态下,堰塞坝溃口的横向拓展模式分为两种。一种为堆积体的

重力崩塌,这种重力崩塌是连续的,是由于堆积体溃口遭受冲刷后,溯源侵蚀严重,陡坎逐渐后退,多级陡坎合并,形成冲蚀坑,导致溃口上部边坡临空,因重力最终产生崩塌,溃口重力崩塌的拓展模式一般形成的新溃口边缘边坡分界明显,如图 18 所示。另一种堰塞坝溃口的横向拓展模式为堆积体的错动剪切滑动,是由于坝体在受到水流冲刷时,溃口上的细小颗粒率先被冲刷流走,产生孔隙,大颗粒等其他颗粒再填入孔隙,形成错动剪切滑动。这种引起堆积体错动剪切滑动的拓展模式犹如边坡坡脚开挖引起的边坡失稳,表现为剪切破坏,如图 19 所示。

2.3 溃决流量

根据目前现有的研究成果,堰塞坝的坝前水位对堰塞坝的溃决过程影响大。堰塞湖水量平衡方程计算公式为:

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = Q_{in} - Q - Q_s \quad (3)$$

式中, Q 为溃口流量; Δt 为时间; ΔV 为 Δt 时间内坝前变化水容量(ΔV 根据溃口处观测玻璃板网格实测结合实验录像获得); Q_{in} 为入流量(5.3 L/s); Q_s 为



图 17 溃口展宽过程(2[#]级配)

Fig. 17 Breach widening process (Gradation 2[#])

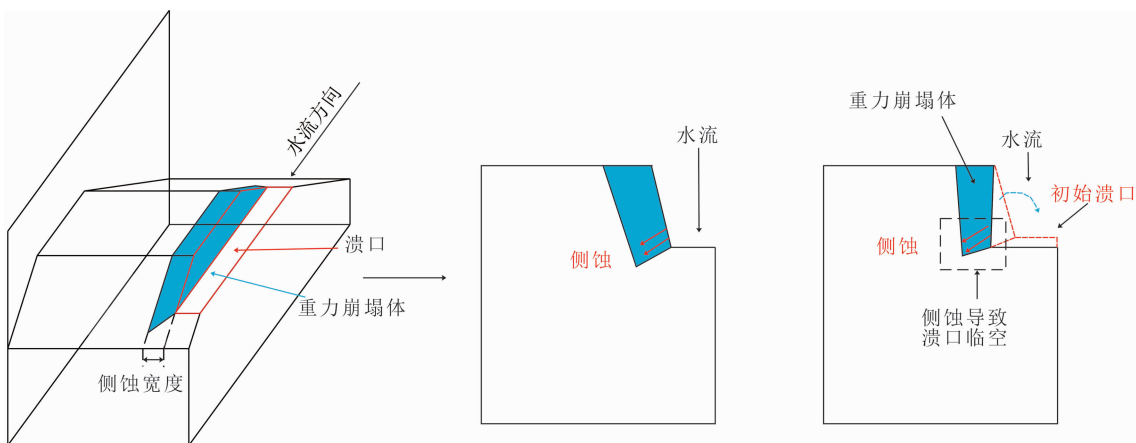


图 18 重力式溃口横向拓展示意图

Fig. 18 Schematic of lateral expansion of gravity-induced breach

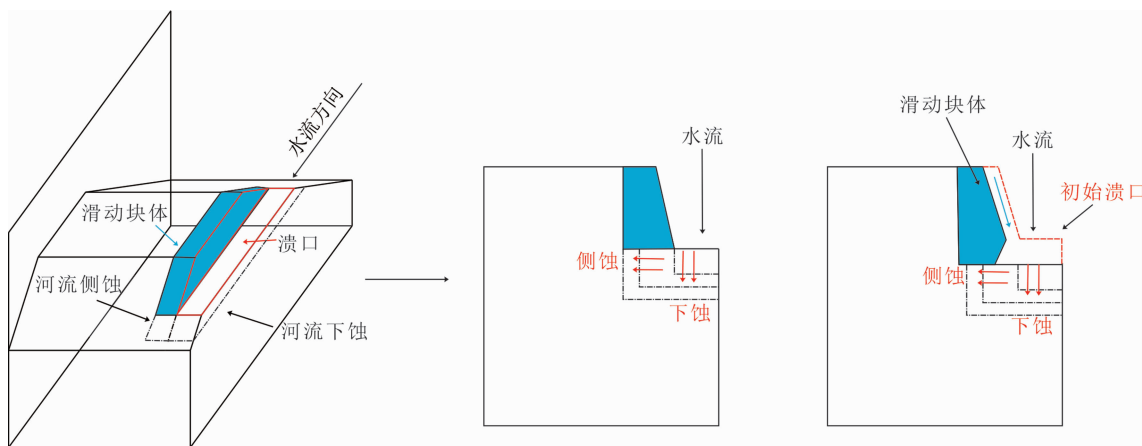


图 19 剪切式溃口横向拓展示意图

Fig. 19 Schematic of lateral expansion of shear-induced breach

渗流量,虽然本次实验过程中存在渗流,但实验过程持续时间较短,可以忽略渗流流量的影响。则公式(3)转化为:

$$Q = Q_{in} + \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (4)$$

根据公式(4)可以得出溃口流量过程曲线,如图 20 所示。

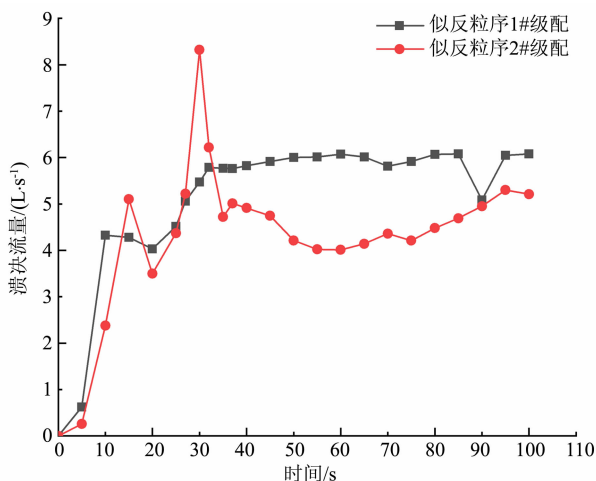


图 20 溃决流量随时间变化关系曲线

Fig. 20 Curve of breach discharge vs. time

从图中可以看出在似反粒序的结构下,1[#]级配下坝体的溃决时间远超过于2[#]级配。从整体上看,两者的溃口流量都上涨迅速,但是后退速度很慢。对于2[#]级配来说,整体的溃决曲线起伏较大,达到峰值流量历时30 s,而峰值流量为8.32 L/s。溃口流量先上涨,后小幅度回跌,又快速上涨直至峰值,再迅速回跌,最终接近入流量 $Q_{in} = 5.3 \text{ L/s}$,此时坝

体已被破坏,溃决流量近似等于河流入流量。这是由于在溃口拓展的过程中,因重力堆积的堆积体堵塞溃口,使得溃决流量先上涨后小幅度回跌,在水流的冲刷侵蚀下,下部细颗粒逐渐流失,使得原本堵塞的溃口再次贯通,溃口拓宽,溃决流量达到峰值,直至坝体被破坏,溃决流量接近入流量 Q_{in} 。而1[#]级配的溃决曲线较为平整,在1[#]级配的条件下坝体溃口流量从0逐渐上升至峰值流量6.07 L/s,总历时100 s,此时虽同样超越河流入流量,但1[#]级配条件下坝体整体破坏程度不高,且达到峰值时间大于2[#]级配。因此两者的溃决流量皆存在明显的波动特征,但是2[#]级配条件下的波动性更强。

2.4 机制分析

实验结果表明,似反粒序结构在两种不同级配的情况下,堰塞坝的溃决过程存在明显差异。正粒序以及反粒序结构下,土和碎石经过充分的混合,堆积体再经过人工分层堆积,堆积体的层密度应保持在定值。但是在似反粒序结构下,层密度不同导致两种级配整体的孔隙率不同。

似反粒序结构堆积的是原始堰塞坝上的堆积物颗粒,土体的抗剪强度公式为:

$$\tau_f = \sigma \tan \varphi + c \quad (5)$$

式中, τ_f 为土体的抗剪强度; σ 为土体的正应力; φ 为土体的内摩擦角; c 为土体的内聚力。

粘聚力取决于土的颗粒与颗粒之间的各种物理化学作用力。而摩擦强度取决于土颗粒之间的咬合程度。颗粒越紧密,颗粒间的咬合程度越大,粘聚力越大。

两种级配表现出两种完全不同的侵蚀曲线(图14),可以看出,1[#]级配条件下,堰塞坝的侵蚀曲线较为平缓,曲率小。侵蚀率公式为:

$$D_r = K_r(\tau - \tau_c) \quad (6)$$

式中, D_r 为侵蚀率; K_r 为土壤的可侵蚀参数; τ 为溃口水流的剪切应力; τ_c 为堆积体颗粒的临界启动切应力。

当 $\tau > \tau_c$,土颗粒被侵蚀,表现为无选择性侵蚀,即大小颗粒一并被水流挟走^[23]。而在2[#]级配条件下,下部堆积体的孔隙率更小。堆积体的宏观强度相较1[#]级配更大。堆积体的临界启动切应力大,堆积体越难被侵蚀^[24]。但是2[#]级配的侵蚀曲线曲率是随溃决过程的发展而变化的。随着溃决过程的发展,继而出现多级陡坎、冲蚀坑等现象,曲率逐渐增大。两种级配均采用人工分层堆积,尤其是两者皆为似反粒序结构,对于类似的分层结构来说,不同部位的 τ_c 差异性较大。在溃口水流冲蚀下, τ_c 较小的部位率先发生侵蚀,从而造成分层堆积体和水之间的接触点不同,逐渐形成多级陡坎,加之溯源侵蚀加剧,多级陡坎后退合并形成冲蚀坑,是一种选择性侵蚀。这是1[#]级配与2[#]级配侵蚀过程完全不同的根本原因。

同时对比两种级配情况下的渗流情况发现,控制坝体体积和上游来水量 Q_{in} 不变,1[#]、2[#]级配两者的渗流现象皆明显。进一步分析可知,随着上游水位上涨,堆积体的级配越不均匀,坝体的渗透系数就越小,就越容易发生渗流破坏^[25]。

3 结论

通过野外实验系统,对不同级配的滑坡型似反粒序堰塞坝溃决过程进行了机制探索型实验。实验结果表明,同一结构的不同级配对堰塞坝的溃决过程有重要影响。

(1)结构与级配影响堰塞坝的溃口横向拓展过程。1[#]级配条件下,堰塞坝的横向拓展模式为细小颗粒流失后形成孔隙,引起的堆积体的错动剪切滑动。2[#]级配条件下堰塞坝的横向拓展模式为堆积体的重力崩塌,是由于反粒序坝体溯源侵蚀严重,坝体受到侵蚀逐渐变薄,陡坎后退,溃口上部边坡产生临空面,从而在重力的原因下发生变形破坏。

(2)结构与级配影响堰塞坝的溃决过程。分析

1[#]、2[#]级配下坝体的起侵蚀过程,1[#]级配的侵蚀过程为:坝体中底部渗流—溃口受到冲刷后坝体表面侧蚀凹槽线形成—河流持续下切—溃口垮塌—坝体破坏;2[#]级配条件下侵蚀过程为:坝体底部渗流—溃口受到冲刷—河流持续下切—溃口垮塌—坝体破坏。两者的溃决过程皆为5个阶段,区别在于2[#]级配细颗粒占比大于1[#]级配,这也就造成了2[#]级配条件下,因溃口拓宽而导致的溃口侧重力堆积堵塞溃口后,下部细颗粒更容易被河水带走,从而疏通溃口,产生面冲刷,形成的陡坎会随侵蚀过程的发展,逐渐后退,合并成侵蚀坑,侵蚀曲线会出现重叠交叉。而1[#]级配,总体的颗粒及颗粒空隙较大,河水冲刷通过溃口时,更容易因剪切错动而堵塞溃口,同时也产生更多空隙,致使溃口的横向拓展较快,纵向拓展较慢。但两者皆在侵蚀过程中,因为冲刷、渗流、侧蚀等耦合作用,使坝体变薄,加速堰塞坝的破坏。

(3)结构与级配影响堰塞坝的溃决时间。两组实验,在实验开始时皆有不同程度的破坏变形,但两组实验在坡体产生破坏后,并未被河槽蓄水量整体破坏,而是在经过一段时间的侵蚀冲刷后,坝体最终被破坏。这区别于一般的正粒序以及反粒序坝。一般正粒序坝体,一旦溃决,上部细颗粒很难承受河槽蓄水,将随着溃口的拓宽而破坏;一般反粒序坝体,下部细颗粒在压实情况下,随着溃口的拓宽,整个坝体将会随之调整至稳定状态,这也是为什么反粒序坝体能长久保存;似反粒序坝体则介于两者之间。

参考文献(References)

- [1] ZHENG Hongchao, SHI Zhenming, SHEN Danyi, et al. Recent advances in stability and failure mechanisms of landslide dams [J]. *Frontiers in Earth Science*, 2021, **9**: 659935. DOI: 10.3389/feart.2021.659935
- [2] 代欣然, 赵建军, 赖琪毅, 等. 青藏高原察达高速远程滑坡运动过程与形成机理[J]. *地球科学*, 2022, **47**(6): 1932–1944. [DAI Xinran, ZHAO Jianjun, LAI Qiyi, et al. Movement process and formation mechanism of rock avalanche in Chada, Tibet Plateau [J]. *Earth Science*, 2022, **47**(6): 1932–1944] DOI: 10.3799/dqkx.2021.205
- [3] FRANK P J R. Hydraulics of spatial dike breaches [J]. *Karlsruhe: Karlsruhe Institute of Technology*, 2016: 1–3. DOI: 10.3929/ethz-a-010803310
- [4] SCHMOCKER L, HAGER W H. Modelling dike breaching due to overtopping [J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2009, **47**(5): 585–597. DOI: 10.3826/jhr.2009.3586

- [5] WINTERWERP J C, KESTEREN W G M V. Introduction to the physics of cohesive sediment in the marine environment [M]. Elsevier, 2006: 343 – 423.
- [6] SHI Zhenming, WANG Youquan, CHEN Jianfeng, et al. Effect of fill size on the stability of barrier dams [J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, **90 – 93**: 1373 – 1382. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.90–93.1373
- [7] 吴茂林, 罗刚, 高延超, 等. 正反粒序结构条件下滑坡堰塞坝破坏模式研究[J]. 水文地质工程地质, 2022, **49**(6): 124 – 132. [WU Maolin, LUO Gang, GAO Yanchao, et al. A study of the failure mode of landslide dam under the structural conditions of positive and reverse grain sequences [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, **49**(6): 124 – 132] DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000–3665.202112062
- [8] 宋宜祥, 管景华, 李彦奇, 等. 反粒序砂土体内侵蚀及渗流特性变化规律试验研究[J]. 地质科技通报, 2023, **42**(3): 16 – 27. [SONG Yixiang, GUAN Jinghua, LI Yanqi, et al. Experimental study on the change law of internal erosion and seepage characteristics of inverse grading sand accumulation [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, **42**(3): 16 – 27] DOI: 10.19509/j.cnki.dzkg.tb20210693
- [9] 彭成, 谷刘伟凯, 钟启明. 利用 Flow-3D 软件数值模拟堰塞坝溃决过程[J]. 水科学与工程学报, 2023(5): 1 – 5. [PENG Cheng, GU Liuweikai, ZHONG Qiming. Numerical simulation of dam failure process based on Flow-3D [J]. Water Sciences and Engineering Technology, 2023(5): 1 – 5] DOI: 10.19733/j.cnki.1672–9900.2023.05.01
- [10] 钟启明, 陈生水, 赵联桢, 等. 堰塞坝漫顶溃决过程数值模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2012, **40**(4): 405 – 411. [ZHONG Qiming, CHEN Shengshui, ZHAO Lianzhen, et al. Numerical simulation of overtopping failure process of a barrier dam [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2012, **40**(4): 405 – 411] DOI: 10.3876/j.issn.1000–1980.2012.04.009
- [11] 沈光泽, 盛金保, 向衍, 等. 堰塞坝漫顶溃决过程数值模拟及应用[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(S2): 82 – 86. [SHEN Guangze, SHENG Jinbao, XIANG Yan, et al. Numerical modeling of breach process of landslide dams due to overtopping and its application [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(S2): 82 – 86] DOI: 10.11779/CJGE2018S2017
- [12] 王玉峰, 程谦恭, 朱圻. 汶川地震触发高速远程滑坡 – 碎屑流堆积反粒序特征及机制分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(6): 1089 – 1106. [WANG Yufeng, CHENG Qiangong, ZHU Qi. Inverse grading analysis of deposit from rock avalanches triggered by Wenchuan Earthquake [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(6): 1089 – 1106] DOI: 10.3969/j.issn.1000–6915.2012.06.002
- [13] 陈楠. 叠溪大海子堰塞坝稳定性分析[J]. 中国水运, 2014, **14**(12): 180 – 181. [CHEN Nan. Stability analysis of Diexi Xiaohaizi dam [J]. China Water Transport, 2014, **14**(12): 180 – 181]
- [14] 戎泽鹏. 岷江上游 1933 年叠溪地震形成滑坡坝堆积特征及溃坝洪水模拟研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2020: 1 – 81. [RONG Zepeng. Accumulation characteristics of landslide dam formed by Diexi Earthquake in 1933 and simulation of outburst flood in the upper Minjiang river [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2020: 1 – 81]
- [15] 柴贺军, 刘汉超, 张倬元. 一九三三年叠溪地震滑坡堵江事件及其环境效应[J]. 地质灾害与环境保护, 1995, **6**(1): 7 – 17. [CHAI Hejun, LIU Hanchao, ZHANG Zhuoyuan. Landslide dams induced by Diexi Earthquake in 1933 and its environmental effect [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 1995, **6**(1): 7 – 17]
- [16] 许强, 李为乐, 董秀军, 等. 四川茂县叠溪镇新磨村滑坡特征与成因机制初步研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, **36**(11): 2612 – 2628. [XU Qiang, LI Weile, DONG Xiujun, et al. The Xinmocun landslide on June 24, 2017 in Maoxian, Sichuan: Characteristics and failure mechanism [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, **36**(11): 2612 – 2628] DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2017.0855
- [17] 许向宁, 王兰生. 岷江上游松坪沟地震山地质灾害与生态环境保护[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2002, **13**(2): 31 – 35. [XU Xiangning, WANG Lansheng. Mountain hazard caused by earthquake in Songping River upper Minjiang and its controlling [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2002, **13**(2): 31 – 35] DOI: 10.3969/j.issn.1003–8035.2002.02.007
- [18] 段启忠, 姜明月. 岷江叠溪大海子地震堰塞坝稳定性分析[J]. 四川水力发电, 2004, **23**(1): 93 – 96. [DUAN Qizhong, JIANG Mingyue. Stability analysis of dams caused by Dixi Dashaizi Earthquake on Minjiang River [J]. Sichuan Water Power, 2004, **23**(1): 93 – 96] DOI: 10.3969/j.issn.1001–2184.2004.01.029
- [19] 严容. 岷江上游崩滑堵江次生灾害及环境效应研究[D]. 成都: 四川大学, 2006: 1 – 143. [YAN Rong. Secondary disaster and environmental effect of landslided and collapsed dams in the upper reaches of Minjiang River [D]. Chengdu: Sichuan University, 2006: 1 – 143] DOI: 10.7666/d.y994650
- [20] AWAL R, NAKAGAWA H, BABA Y, et al. Numerical and experimental study on landslide dam failure by sliding [J]. Doboku Gakkai Ronbunshuu B, 2010, **51**: 7 – 12. DOI: 10.2208/probe.51.7
- [21] 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. DOI: 10.1016/S0013–7952(02)00249–1
- [22] 张孟喜. 土力学原理[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2007: 11. [ZHANG Mengxi. Principle of soil mechanics [M]. Wuhan:

- Huazhong University of Science & Technology Press, 2007: 11]
- [23] 赵高文, 姜元俊, 乔建平, 等. 不同密实条件的滑坡堰塞坝漫顶溃决实验[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, **37**(6): 1496 – 1505. [ZHAO Gaowen, JIANG Yuanjun, QIAO Jianping, et al. Experimental investigation on overtopping failure of landslide dams with different conditions of compactness [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, **37**(6): 1496 – 1505] DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2017.1610
- [24] 蒋先刚, 吴雷. 不同初始含水量条件下的堰塞坝溃决机理[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2020, **50**(1): 185 – 193. [JIANG Xiangang, WU Lei. Influence of initial soil moisture on breaching of natural dam [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2020, **50**(1): 185 – 193] DOI: 10.13278/j.cnki.jjuese.20190049
- [25] 付建康, 罗刚, 胡卸文. 滑坡堰塞坝越顶溢流破坏的物理模型实验[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2018, **48**(1): 203 – 212. [FU Jiankang, LUO Gang, HU Xiewen. Physical model experiment on overtopping overflow failure of landslide dam [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2018, **48**(1): 203 – 212] DOI: 10.13278/j.cnki.jjuese.20170151

Experimental Interpretation of a Historical Landslide Dam Failure at Diexi Town in Maoxian County, Sichuan Province, China

LIU Shicheng^a, WANG Yunsheng^{b*}, SONG liang^a

(*a. College of Environment and Civil Engineering; b. State Key Laboratory of Geo-Hazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China*)

Abstract: The structures and particle compositions of landslide-formed barrier dams exhibit significant differences between the upstream and downstream parts. Although research was conducted extensively by scholars on breaching mechanisms of various landslide dam bodies, there was limitation in the selection of dam particle sequences, and the complexity of the structure of barrier dams made the natural breaching process fundamentally different from the breaching of artificial earth-rock dams.

This paper selected the landslide-induced river blocking event in 1933 triggered by the $M_s 7.5$ earthquake in Diexi Town, Mao County, Sichuan Province, China as a case study. Through fieldwork and in-situ physical modeling experiments, the failure process of landslide dams with different particle gradings under a quasi-inverse grading structure was examined.

(1) The erosion process of in-situ barrier dams built with quasi-inverse grading structure went through five stages of seepage, scouring, lateral erosion, downcutting, and destruction.

(2) As particle gradation was $d_{50} = 30$ mm, a lateral corrosion developing at breach manifested as a holistic shear faulting, causing a rapid increase but slow recession of breaching flow rate, with the erosion curve showing an overall gentle trend.

(3) As d_{50} was 14.2 mm, the lateral corrosion at the breach shifted to a holistic gravitational collapse, with the erosion curve being relatively steep, and the breach flow exhibited a pattern of rapid rise and quick recession.

The research provides reference for the mechanism research and prevention of landslide dam break.

Key words: landslide dam; quasi-inverse grading; erosion mode; Diexi

(责任编辑 朱颖彦 钟雨倩)