

引用格式:雨德聪,丁攀,杨志全,韩用顺,廖丽萍.初始含水率对黄土滑坡堰塞坝溃决影响研究[J].山地学报,2021,39(3):367-377.

YU Decong, DING Pan, YANG Zhiqian, HAN Yongshun, LIAO Liping. Study on the influence of initial water content on the breakout of loess landslide barrier dam [J]. Mountain Research, 2021, 39(3):367-377.

初始含水率对黄土滑坡堰塞坝溃决影响研究

雨德聪^{1a,1b}, 丁攀^{1c}, 杨志全^{1a,1b*}, 韩用顺², 廖丽萍³

(1. 昆明理工大学 a. 公共安全与应急管理学院; b. 云南省高校高烈度地震山区交通走廊工程地质病害早期快速判识与防控重点实验室; c. 国土资源工程学院, 昆明 650093; 2. 湖南科技大学资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201; 3. 广西大学 土木建筑工程学院, 南宁 530004)

摘要:黄土区各类地质灾害伴随着极端降雨频繁发生,然而当前针对黄土滑坡堰塞坝溃决机制的相关研究成果较少,尤其是初始含水率、密实度、来水流量等参数对堰塞坝溃决的影响仍缺乏系统研究,其灾害机理尚不清晰。在影响堰塞坝溃决的众多因素中,初始含水率对黄土滑坡堰塞坝的稳定性有着重要影响,本文基于室内模型试验,初步探究了0%~25%含水率对黄土堰塞坝溃决的影响。试验表明:(1)不同初始含水率下的黄土滑坡堰塞坝溃决模式有四种,含水率为0%~18.75%时,堰塞坝溃决模式主要为漫顶溃决;18.75%~21.25%时漫顶溃决与渗漏管涌溃决并存;21.25%~23.75%时溃决模式表现为漫顶溃决与坝体失稳溃决并存;23.75%~25%时表现为坝体失稳溃决。其中漫顶溃决过程具有三个典型阶段:溃口及冲沟发展阶段—溃口扩大阶段—溃口稳定阶段。(2)不同初始含水率下的黄土堰塞坝坝体侵蚀规律为:随着土体初始含水率的逐渐增大,水流对溃口底部的下切作用和溯源侵蚀能力逐渐减弱,牵引侵蚀作用增强。(3)对于漫顶溃决模式,溃决后的溃口宽深比随土体初始含水率的增大,呈现出先增大后减小的趋势,而发生坝体失稳溃决的堰塞坝溃口宽深比无显著规律。该研究成果可以为黄土堰塞坝溃决灾害的防灾减灾提供一定的理论参考。

关键词: 初始含水率;水槽试验;黄土;堰塞坝溃决

中图分类号: TU42;P642.2

文献标志码: A

随着全球气候变暖,我国西北地区极端降雨发生的频率逐渐升高,促使滑坡、泥石流等各类黄土灾害频繁发生^[1-3]。黄土滑坡堰塞坝作为黄土地区特有的灾害类型,其溃决后形成的洪水和泥石流严重威胁着周边农田和居民的生命财产安全。诸如宁夏海原县8.5级大地震^[4]、“7·6”新疆叶城特大泥石流^[5]、新疆伊宁县喀拉亚尔奇乡黄土滑坡^[6]等灾害事件,引发滑坡、泥石流堵塞河道形成堰塞坝,堰塞

坝溃决后形成二次灾害,使周边居民遭受了巨大的生命财产损失。因此,研究黄土滑坡堰塞坝的溃决过程,揭示其溃决机制,对黄土区堰塞坝溃决灾害的防灾减灾工作有着重要意义。

室内水槽试验是学者研究堰塞坝溃决机制时常用的手段^[7-8]。1998—2004年,欧盟先后支持的两个项目^[9-10]分别通过室内和野外试验在土石坝溃决机理研究方面取得诸多成果,主要针对土石坝的

收稿日期(Received date):2020-06-15;改回日期(Accepted date):2021-04-28

基金项目(Foundation item):云南省万人计划“青年拔尖人才”专项(YNWR-QNBJ-2018-321);中国地质调查局西安地质调查中心科研项目([2018]01-21)。[Yunnan Ten Thousand Talents Plan Young & Elite Talents Project (YNWR-QNBJ-2018-321); Research Project of Xi'an Center of China Geological Survey ([2018]01-21)]

作者简介(Biography):雨德聪(1994-),男,云南蒙自人,硕士研究生,主要研究方向:地质灾害启动机理。[YU Decong(1994-), male, born in Mengzi, Yunnan province, M. Sc. candidate, research on initiation mechanism of geological disasters] E-mail: ydc941025@163.com

* 通讯作者(Corresponding author):杨志全(1983-),男,博士,教授,主要研究方向:地质灾害启动机理与水土保持。[YANG Zhiqian(1983-), male, Ph. D., professor, research on initiation mechanism of geological disaster and soil and water conservation] E-mail: yzq1983816@163.com

坝型、形状、坝体材料等因素对溃决模式的影响进行了详细研究。随后,越来越多的学者通过大量的室内水槽试验,总结了入流流量^[11-13]、坝体材料与颗粒级配^[12-14]、底床坡度^[15]、密度^[16-18]等对堰塞坝溃决过程的影响,分析了上述因素与溃决流量、溃决模式等的关系。对于初始含水率与溃决参数的关系,已有学者开展过以黏土、均质无粘性沙等为对象的相关研究,得出淤泥质土的初始含水量与侵蚀率的关系^[19],针对渐进式溃决的堰塞坝,探讨了上游坝体的渗流作用和下游河床的侵蚀特征,同时研究了初始含水率对堰塞坝溃口演化规律的影响^[20-21],但由于研究对象的不同,这些成果是否适用于黄土有待进一步探究。此外,国外相关学者分析了以饱和与干燥两种初始条件下,溃决破坏过程中孔隙水压力的变化规律,其研究中的落脚点是初始含水量对堰塞坝破坏特性的影响,而对初始含水量与溃决参数之间的定量关系研究鲜有研究^[22]。在黄土堰塞坝灾害研究成果中,仅有部分针对特定黄土滑坡堰塞坝灾害进行的成灾模式分析与调查成果。

目前,在黄土高原地区,针对黄土滑坡堰塞坝溃决机制的相关研究成果甚少,尤其是初始含水率、密实度、来水流量等参数对堰塞坝溃决的影响,少有学者对其开展系统研究,然而近年来频发的极端气候与自然灾害很可能促进黄土滑坡堰塞坝的形成,因此开展黄土堰塞坝相关研究具有一定的意义。本文通过开展堰塞坝室内水槽试验,主要探究初始含水率对黄土滑坡堰塞坝溃决的影响,因此在研究过程中保持其他影响因素不变,定性地分析黄土堰塞坝溃决过程和溃口下切变化,定量地探讨初始含水率

对溃口宽深演化规律的影响,对黄土堰塞坝溃决进行了理论性探索研究,以期进一步揭示其溃决机制。

1 试验设计

1.1 试验参数及装置

本试验属于机制性研究,根据野外调查发现,延安地区小流域沟道内常有由滑坡、崩塌等形成的黄土堆积体堵塞河道,并在堆积体后方形成水塘(图1),当遇到极端降雨条件时存在形成堰塞坝等灾害的隐患。本文根据学者在研究区的野外调查报告结果^[23],总结出延安地区黄土灾害易发沟道的主要参数范围,其流域面积为 $0.53 \sim 9.88 \text{ km}^2$,平均值为 4.08 km^2 ;沟道长度为 $0.34 \sim 7.1 \text{ km}$,平均值为 3.03 km ;沟道比降为 $1.94\% \sim 32.83\%$,平均值为 21.2% ;沟道两侧坡度范围为 $20^\circ \sim 60^\circ$,平均值为 40° 。

根据相似理论等比缩放设计了试验水槽,试验装置长度相似比为 $1:850$,流量相似比为 $1:850^{2.5}$,比降和两侧坡度相似比为 $1:1$ 。整个试验系统由蓄水装置、试验水槽装置、流体收集装置和摄像装置组成。蓄水装置主要有蓄水池和水泵,水泵能够在试验时供应稳定的水流,流量则由不同的档位控制;水槽模型装置长 3.6 m ,底部木材后方由轴承支撑,可调坡度 $0^\circ \sim 35^\circ$,两侧亚克力板材料与底部木材合页连接,可调坡度 $10^\circ \sim 80^\circ$,横截面积为梯形,沟道分为汇水区、堆土区以及流通区3个部分;流体收集装置为一些大容量水桶等装置,用来收集试验开始后产生泥水混合物;摄像系统放置于水槽模型正前

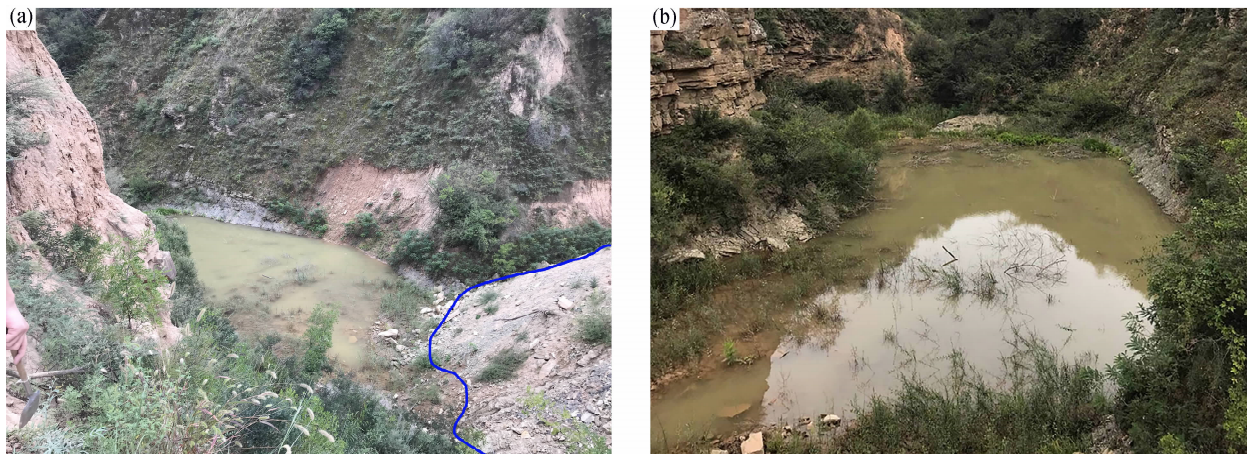


图1 沟道内黄土松散堆积体及水塘:(a)黄土松散堆积体;(b)水塘

Fig. 1 Loose accumulations of loess in the channel and ponds:(a) loose accumulations of loess;(b) ponds

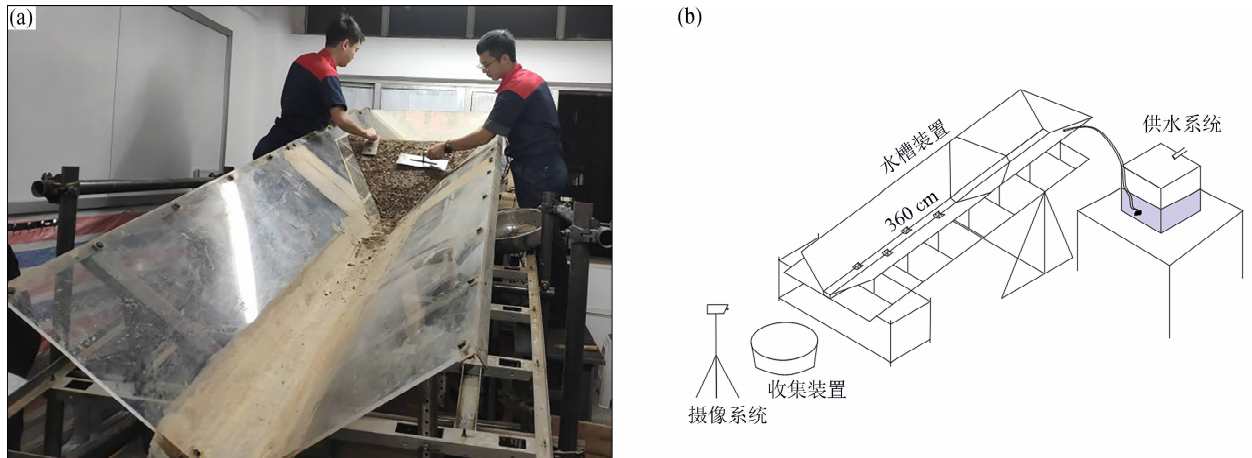


图2 水槽装置图:(a)实体装置图;(b)整体示意图

Fig. 2 The drawing of sink device:(a) physical installation diagram;(b) overall schematic

方,用来记录整个试验过程(图2)。相较于传统的矩形室内水槽,该水槽装置可灵活调整沟道两侧坡度和河床比降,使模型试验更接近野外实际情况。此外,为了增加亚克力板与试验土体之间的摩擦力,借鉴一些学者的试验经验^[24-25],通过在水槽与堆土体接触位置放置砂纸的方法来增大堆土体与周边槽体件的摩擦力。

1.2 试验材料

本试验材料采自陕西省延安市宝塔区某流域(109°31'07"E,36°29'58"N),采样时间为2018年11月,并在试验前先开展试验材料的基本物理力学性质参数测定(表1)^[26,28],材料的颗粒级配曲线如图3所示。试验材料粒径小于0.75 mm的颗粒含量达到53.97%,属于低液限粉状土体,在进行水槽试验时,可以不用考虑其相似比,因此直接采用野外黄土土样进行试验^[27]。

表1 黄土基本物理性质参数

Tab. 1 Basic physical property parameters of loess

平均天然 密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	平均天然 含水率/ %	平均天然 干密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	比重/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	塑限/ %	液限/ %
1.27 ± 0.09	9.85 ± 1.95	1.16	2.60	16.21	28.35

1.3 试验方案

在试验开始前,先对配制好的试样测定含水率,当含水率符合要求后开始试验。为控制坝体的土体密度,本试验采用分层铺土法,将坝体从下到上分别按5、10、10和5 cm的高度进行铺设,待每层铺设完

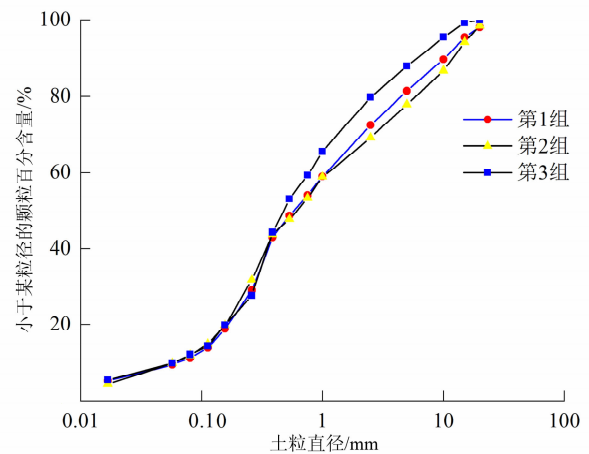


图3 颗粒级配曲线图

Fig. 3 Grain-size distribution curve

后测量土体含水率和密度,当测量结果符合试验要求再进行下一层土体的铺设。土体铺设完后立即开始试验,以免水分挥发影响试验结果,水泵向沟道输水时打开摄像装置开始记录试验,同时,在水槽装置底端利用多个小盆实时收集试验产生的流体,以便得出试验过程中侵蚀量、流量和容重等参数。

本试验土样的液限含水率为28.35%(表1),应注意设计的变量初始含水率不能大于液限,同时考虑到含水率过于接近会影响试验现象的区分度,故本系列试验将堰塞坝土体的含水率以5%的梯度变化开展,选取0%、5%、10%、15%、20%和25%作为初始含水率。需要说明的是,野外黄土滑坡堰塞坝是一个巨型堆积体,其含水率和土体密度分布不均匀,为了更好地研究含水率单因素对其溃决的影

响,在保证其他试验参数不变的情况下,本文将模型坝体简化为土体各处初始含水率和土体密度一致。流量大小依据《陕西省中小流域设计暴雨洪水图集》中汇流推理公式法及相关图表和参数计算,并按流量比尺缩放后得出供水流量为 $0.3 \pm 0.01 \text{ L/s}$ 。

2 试验结果及分析

2.1 试验现象

现以土体初始含水率为 10% 的堰塞坝溃决过程为例对整个试验现象进行分析。本次试验自入水一刻起开始计时至试验结束共历时 481 s,在 0 ~ 116 s 时,水流持续汇入沟道,可观察到这一时期水流对土体的渗透能力较弱,坝前水位逐渐升高(图 4a);117 s 时,水流开始从顶部漫出,由于水流的携沙能力较小,不能快速形成一个水流通道的,导致水流大面积地流经土体表面,随着溃决过程的进行,水流逐渐侵蚀堰塞坝临空面土体,携带走部分黄土后形成四条明显的细沟,后续大部分水流经过细沟并向下侵蚀土体,细沟深度逐渐增大形成冲沟(图 4b ~ 4d);257 s 后,随着冲沟规模扩大,水流向左右两侧侵蚀土体后,上部分土体由于重力作用而垮塌,这一时期堰塞坝溃决流量较大,流水携沙能力强,溃口底部下切和横向展宽较为迅速(图 4e);409 s 开始至实验结束,由于坝前水位逐渐下降,水流流量逐渐变

小,溃口及冲沟的下切减弱,水流携沙能力降低,水沙运动处于一个新的平衡状态(图 4f)。通过观察试验现象,黄土堰塞坝漫顶溃决的溃决过程大致可分 3 个阶段:溃口及冲沟发展阶段、溃口扩大阶段和溃口稳定阶段。

为保证试验装置的可靠性,选取了含水率为 10% (含水率用 w 表示,单位为%) 接近野外条件的一组试验开展了三组平行实验,通过对比三组试验的容重、流量、侵蚀量和累计侵蚀量等参数可知(图 5),整个试验过程中,溃决所形成的泥流各项参数存在差异,但是三组平行试验数据呈现的时变规律基本相同,因此说明所采用的试验装置对于开展本研究具有一定的可靠性^[28]。

2.2 不同初始含水率下的堰塞坝溃决模式

针对堰塞坝溃决模式的分类,水利部组织了相关学者对国内滑坡堰塞坝溃坝案例进行了总结^[29],同时根据一些学者的统计,得出自然情况下堰塞坝溃决通常有 3 种模式:漫顶溢流溃决、渗漏管涌溃决和坝体失稳溃决,破坏方式常有漫顶溢流侵蚀、坝坡失稳破坏、渗漏管涌和人工诱发 4 种^[30-31]。通过 6 种初始含水率下的溃坝试验发现,不同含水率下的堰塞坝溃决模式各有差异,土体含水率为 0% ~ 15% 时为漫顶溃决(图 6a ~ 6b),土体含水率为 20% 时漫顶溃决与渗漏管涌溃决并存(图 6e),土体含水率为 25% 时为坝体失稳溃决(图 6i)。为得出

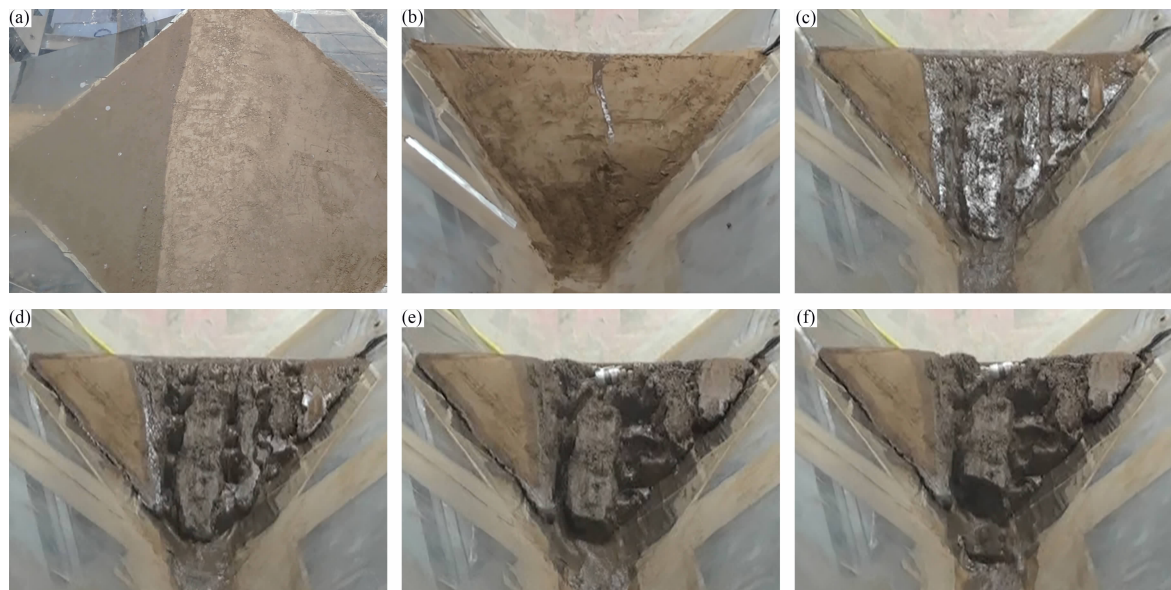


图 4 土体含水率为 10% 的堰塞坝漫顶溃决过程:(a)100 s; (b)117 s; (c)175 s; (d)257 s; (e)409 s; (f)481 s

Fig. 4 The process of overtopping failure of dam with water content of 10% :

(a)100 s; (b)117 s; (c)175 s; (d)257 s; (e)409 s; (f)481 s

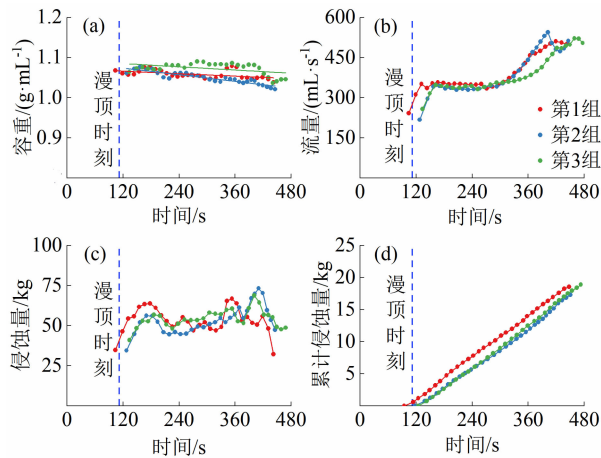


图5 平行试验各参数对比图:

(a) 容重; (b) 流量; (c) 侵蚀量; (d) 累积侵蚀量

Fig. 5 Comparison of Parallel-test Parameters: (a) bulk density;

(b) flowrate; (c) erosion amount; (d) cumulative erosion

不同溃决模式间的界限含水率,在含水率 15% ~ 25% 增加了初始含水率分别为 17.5%、18.75%、

21.25%、22.5% 和 23.75% 的 5 组试验,根据试验现象得出含水率 17.5% 时为漫顶溃决(图 6c),含水率 18.75% 时漫顶溃决与渗漏管涌溃决并存(图 6d),含水率为 21.25%、22.5% 和 23.75% 时漫顶溃决与坝体失稳溃决并存(图 6f~6h)。坝体的主要破坏方式也有差异,含水率 0% ~ 17.5% 时为漫顶溢流侵蚀,含水率为 18.75% 和 20% 时为“溢流侵蚀 + 渗漏作用”,含水率为 21.25%、22.5% 和 23.75% 时为“溢流侵蚀 + 坝体失稳破坏”,含水率为 25% 时为“渗漏作用 + 坝体失稳破坏”,总结如表 2。

2.3 土体含水率对溃口下切过程的影响

以坝体溃口剖面为研究对象,目的是为了进一步研究土体含水率对下蚀现象的作用机理,研究整个试验过程中下蚀变化情况。图 7 反映了不同初始含水率土体的下切过程,各组试验在不同时刻的侵蚀过程并不都是相对稳定的直线,还存在一些明显的坡折点,这说明在水流漫过堰塞坝侵蚀坝体过程



图6 不同含水率下的溃决模式图:

(a) $w = 5\%$; (b) $w = 15\%$; (c) $w = 17.5\%$; (d) $w = 18.75\%$; (e) $w = 20\%$; (f) $w = 21.25\%$; (g) $w = 22.55\%$; (h) $w = 23.75\%$; (i) $w = 25\%$

Fig. 6 Illustration of collapse pattern under different moisture content:

(a) $w = 5\%$; (b) $w = 15\%$; (c) $w = 17.5\%$; (d) $w = 18.75\%$; (e) $w = 20\%$; (f) $w = 21.25\%$; (g) $w = 22.55\%$; (h) $w = 23.75\%$; (i) $w = 25\%$

表 2 不同初始含水率下的堰塞坝溃决模式
Tab.2 The mode of dam break under different initial water content

设计含水率/ %	实测含水率/ %	设计干密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	实测干密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	溃决模式	破坏方式
0	0.34 ± 0.13		1.15 ± 0.02	漫顶溃决	漫顶溢流侵蚀
5	5.09 ± 0.15		1.18 ± 0.01	漫顶溃决	漫顶溢流侵蚀
10	10.01 ± 0.14		1.15 ± 0.02	漫顶溃决	漫顶溢流侵蚀
15	15.02 ± 0.30		1.16 ± 0.02	漫顶溃决	漫顶溢流侵蚀
17.50	17.61 ± 0.30		1.17 ± 0.01	漫顶溃决	漫顶溢流侵蚀
18.75	18.72 ± 0.35	1.16	1.16 ± 0.01	漫顶溃决 + 渗漏管涌溃决	漫顶溢流侵蚀 + 渗漏作用
20	19.95 ± 0.21		1.17 ± 0.01	漫顶溃决 + 渗漏管涌溃决	漫顶溢流侵蚀 + 渗漏作用
21.25	21.28 ± 0.44		1.17 ± 0.02	漫顶溃决 + 坝体失稳溃决	溢流侵蚀 + 渗漏作用 + 坝体失稳破坏失稳破坏
22.50	22.33 ± 0.55		1.17 ± 0.01	漫顶溃决 + 坝体失稳溃决	溢流侵蚀 + 渗漏作用 + 坝体失稳破坏
23.75	23.78 ± 0.53		1.16 ± 0.01	漫顶溃决 + 坝体失稳溃决	溢流侵蚀 + 渗漏作用 + 坝体失稳破坏
25	24.85 ± 0.47		1.15 ± 0.01	坝体失稳溃决	坝体失稳破坏 + 渗漏作用

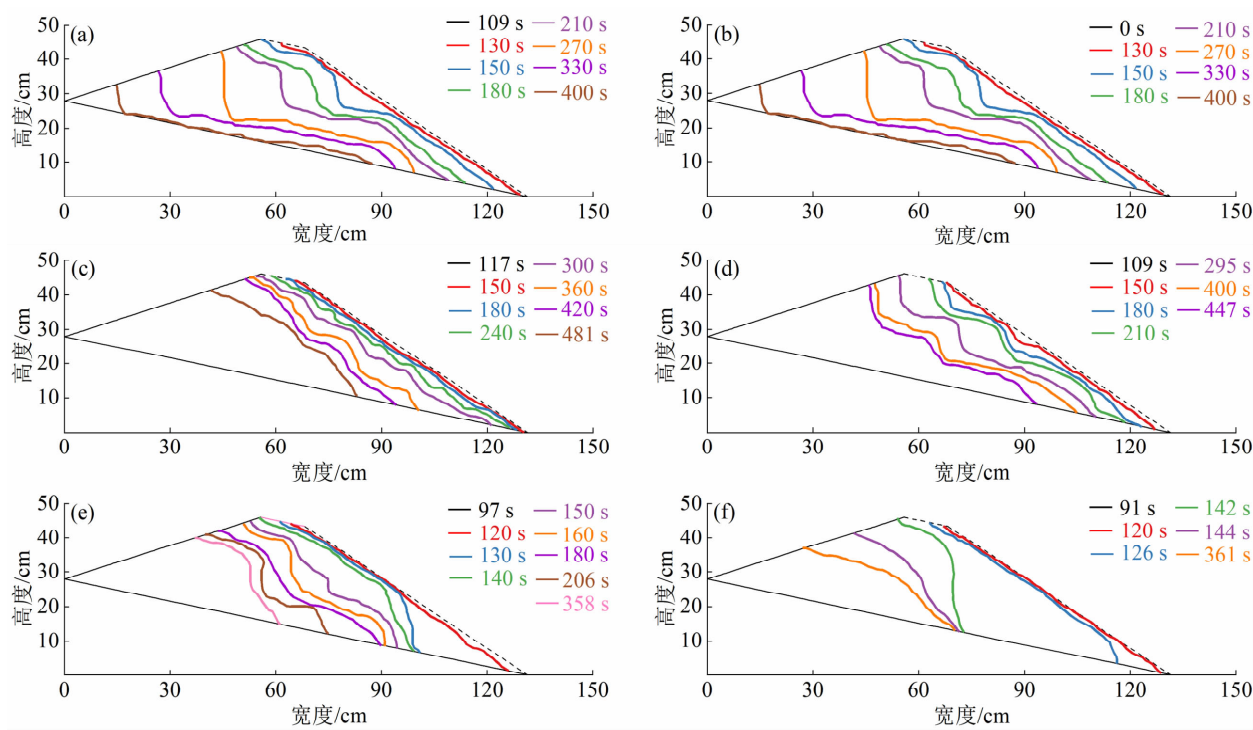


图 7 不同初始含水率条件下的堰塞坝纵剖面侵蚀变化图：

(a) $w = 0\%$; (b) $w = 5\%$; (c) $w = 10\%$; (d) $w = 15\%$; (e) $w = 20\%$; (f) $w = 25\%$

Fig.7 Erosion change process of the longitudinal profile of dam under different initial water content:

(a) $w = 0\%$; (b) $w = 5\%$; (c) $w = 10\%$; (d) $w = 15\%$; (e) $w = 20\%$; (f) $w = 25\%$

中土体受到溯源侵蚀。对比图 7 堰塞坝纵剖面发现,随着初始含水率逐渐增大,溃口底部坡折则相对平缓,说明水流的溯源侵蚀作用随着初始含水量的增大而减弱,但含水率大于 15% 后,溃口底部又出

现坡折,这是因为土体含水率较高时,土体抗剪强度降低而易受水流牵引侵蚀而发生局部崩塌,此时水流的牵引侵蚀作用增强。

为进一步得到水流漫过顶部后对坝体的侵蚀作

用与初始含水率的关系,使用定性化思想对 5 组漫顶溃决试验的坝体侵蚀过程进行分析,分别比较 5 组试验溃决后溃口发展初期、溃口扩大时期、溃口稳定期 3 个时期在同一位置的溃口下切情况,此处选取各试验都具有典型侵蚀现象的位置 a(图 8)。通过对试验现象的观察,对 5 组试验重新从漫顶一刻起开始计时,选取 30、150、240 s 分别代表溃口发展的 3 个时期。图 8 分别反映了不同土体含水率的堰塞坝分别在 30、150、240 s 三个时刻在同一位置 a 处的下切深度,通过纵向对比各组含水率等级试验在 a 处的下切深度可发现,在含水率为 0% 和 5% 时,土体抗剪强度较大,土体主要受下切侵蚀作用,且易形成跌水,当跌水迅速后退,沟底急剧下切,进而出现溯源侵蚀;而当含水率逐渐增大,土体抗剪强度降低,土体更容易受水流牵引侵蚀作用,溯源侵蚀与下切侵蚀作用逐渐减弱,下切深度减小,但当含水率增至 20% 时,土体在牵引侵蚀、下切、渗漏等综合作用下局部发生崩塌,故对于漫顶溃决,侵蚀形态上的下切深度随着含水率的增大表现出先减小后增加的现象。

2.4 土体含水率对溃口深宽的影响

为分析不同初始含水率下坝体漫顶溃决后的溃口侵蚀破坏规律,以 7 组发生漫顶溃决的试验为对象,依据比例尺原理,分别计算了各组试验最终溃口宽度和深度。为减小工作量,此处溃口深宽值取试验结束时的最大值,计算得到了各组试验的侵蚀宽

深比(表 3)。

分析表 3 可知,对于漫顶溃决型堰塞坝(含水率为 0% ~ 20%),堰塞坝溃口宽深比随土体初始含水率的增大呈现出先增大后减小的趋势。这表明,低初始含水率时土体优先受到下切侵蚀作用,而随着含水率的增大,面蚀和牵引侵蚀作用逐渐增强^[28]。倘若土体初始含水率持续增大,此时的土体强度已经过低,坝体发生漫顶溃决的同时也发生整体失稳破坏,坝体坡脚土体大量垮塌,试验结束后大多只剩溃口两侧的少量土体,发生坝体失稳溃决的堰塞坝溃口宽深比无显著规律。

表 3 漫顶溃决中各含水率等级侵蚀宽深比

Tab. 3 Erosion width-depth ratio of various moisture content grades in overtopping outburst

含水率/%	沟道宽度/cm	沟道深度/cm	宽深比
0	9.83	29.47	0.33
5	33.29	24.31	1.37
10	34.31	17.46	1.97
15	17.81	16.79	1.06
17.50	16.43	20.57	0.80
18.75	17.52	29.14	0.60
20	12.11	28.46	0.43

为进一步得出漫顶溃决时含水率与侵蚀沟道宽深比的定量关系,利用 7 组漫顶溃决的试验数据对含水率与侵蚀沟道宽深比进行拟合,得到含水率与

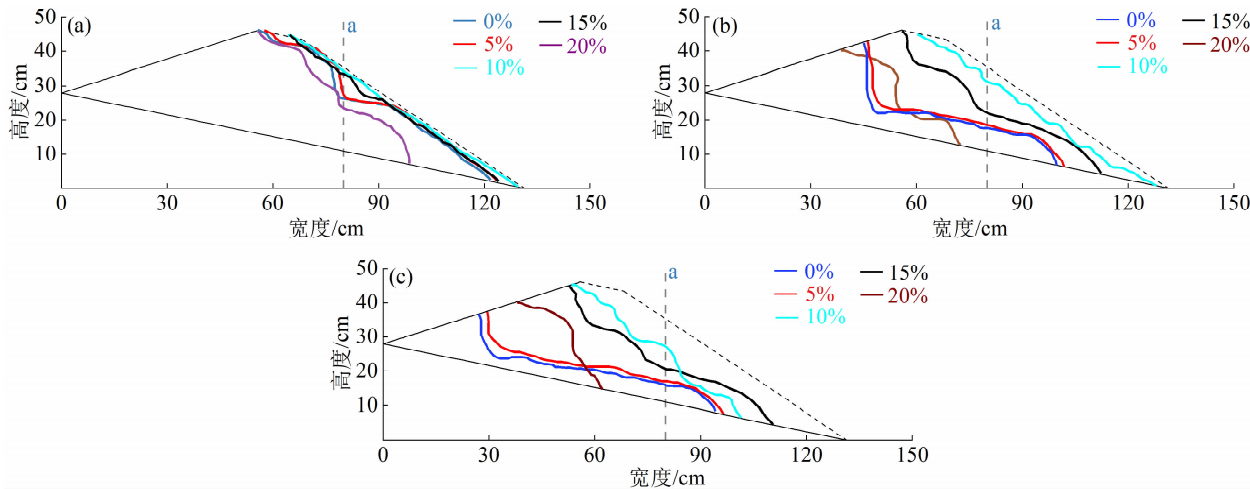


图 8 同一时刻同一位置不同初始含水率下的坝体侵蚀对比:

(a) 溃口发展初期: $t = 30$ s; (b) 溃口扩大时期: $t = 150$ s; (c) 溃口稳定时期: $t = 240$ s

Fig. 8 Comparison of dam erosion under different initial moisture content at same time and position:

(a) early stage of collapse development: $t = 30$ s; (b) collapse expansion period: $t = 150$ s; (c) collapse stability period: $t = 240$ s

侵蚀宽深比的拟合关系式为:

$$k_m = -0.0139w^2 + 0.2736w + 0.3669 \quad (1)$$

式中, k_m 为侵蚀宽深比。

拟合曲线如图 9 所示, 拟合公式的相关系数 R^2 为 0.82, 表明含水率与侵蚀宽深比关系模型与试验结果间的回归分析效果较好。

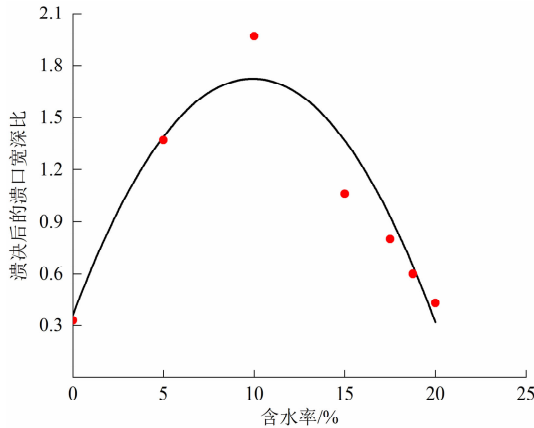


图 9 漫顶溃决中初始含水率与溃口宽深比拟合曲线图

Fig. 9 Fitting curve diagram of initial water content and width to depth ratio of overtopping-collapse

3 不同初始含水率下的黄土堰塞坝溃决机制

综合不同含水率下的溃决试验现象可发现, 不同初始含水率条件的黄土堰塞坝溃决过程存在明显差别。对于黄土抗剪强度参数与含水率关系的研究, 已有研究^[32-34]通过直剪试验, 分析了含水率和抗剪强度参数之间的关系, 通过曲线回归发现黏聚力的对数与含水量呈线性关系, 内摩擦角与含水量也呈线性关系。同时, 根据 Fredlund^[35]等提出的非饱和土抗剪强度公式对黄土堰塞坝溃决机制进行分析, 如下所示:

$$\tau = c + (\sigma - u_a) \tan \varphi \quad (2)$$

$$c = c' + (u_a - u_w) \tan \varphi' \quad (3)$$

式中, τ 为非饱和土体抗剪强度 (kPa); c 为黏聚力 (kPa); c' 为有效粘聚力 (kPa); u_a 为土体内孔隙气压力 (kPa); u_w 为土体内孔隙水压力 (kPa); $(u_a - u_w)$ 为基质吸力 (kPa); φ 为土的内摩擦角 ($^\circ$)。 φ' 为随基质吸力变化的土的内摩擦角 ($^\circ$)。可以看出, 土体的抗剪强度主要受摩擦强度和黏聚强度影响。

该试验土样作为一种粉质黏土 ($I_p = 12.14$), 水敏性高、含水率对其抗剪强度的影响显著。黄土颗粒表面常吸附水膜, 其粘聚强度 c 取决于土颗粒间的各种物理化学作用力, 包括库仑力、范德华力、胶结作用力和基质吸力等, 同时这些作用力的改变也对土体的摩擦强度有影响。由式 (2)、式 (3) 可知, 在初始含水率较低时, 由于土中水主要以结合水的形式存在, 具有较大的基质吸力, 黏聚力较大, 故此时土体的抗剪强度较大; 当土体含水率增加后, 土颗粒表面的水膜变厚, 自由水多于结合水, 土颗粒间的接触、咬合能力和摩擦强度大大降低, 土中基质吸力逐步减小, 土体的黏聚力降低^[20]。因此, 随着初始含水率的增大, 整个坝体的稳定性逐渐减小, 这也导致了不同含水率下的黄土堰塞坝溃坝模式的差异。

对于漫顶溃决, 水流漫过坝顶后, 坝体前方临空面上的土体在水流不断下切、侧蚀作用下, 抗剪强度较弱的土体被水流搬运走并形成侵蚀浅沟, 随着溃口漫出水流增多, 水流侵蚀能量增加, 下切侵蚀、旁蚀和溯源侵蚀作用剧烈, 浅沟逐渐发育为冲沟, 当临空面上的水蚀沟道和冲沟数量增多后, 水流对冲沟的掏、刷作用加强, 加剧了土体遭受侵蚀的态势, 最终溃口规模扩大。当土体初始含水率较大时 ($\geq 21.25\%$), 由于本试验土样为重塑土, 土样在配制过程中存在结团现象, 导致在坝体铺设过程中存在一些孔隙, 随着后方汇水持续增加, 这些孔隙促进了优势通道的形成, 进而加快了水流对土体的渗入 (图 10), 以致该组试验的水流未漫顶, 反而从坝体前方的临空面渗漏而出, 由于坝体材料自身稳定性较弱, 同时在水流的渗漏作用和坝体的自身重力等综合作用下, 坝体出现了失稳 (图 6f~6i), 进而出现

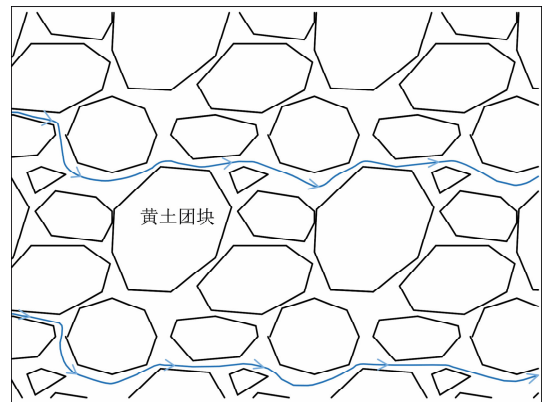


图 10 优势通道示意图

Fig. 10 Schematic diagram of dominant channels

大面积垮塌,形成坝体失稳溃决。

4 结论

本文通过室内水槽试验,初步探究了不同初始含水率下的黄土质滑坡堰塞坝溃决机制。得出以下结论:

(1)通过 11 组溃坝试验发现,不同初始含水率条件下的黄土堰塞坝溃决模式有 4 种。含水率为 0% ~ 18.75% 时,堰塞坝溃决模式为漫顶溃决;18.75% ~ 21.25% 时为漫顶溃决与渗漏管涌溃决并存;21.25% ~ 23.75% 时为漫顶溃决与坝体失稳溃决并存;25% 时为坝体失稳溃决。其中漫顶溃决过程有 3 个典型阶段:溃口及冲沟发展阶段、溃口扩大阶段和溃口稳定阶段。

(2)不同含水率下,坝体受水流侵蚀作用类型也存在差异,在低含水率($w < 10\%$)时,土体主要受下切侵蚀作用,该时期溯源侵蚀作用也较为显著,随着土体含水率逐渐增大,水流对土体的下切侵蚀作用和溯源侵蚀作用逐渐减弱,水流的牵引侵蚀作用则逐渐增强。

(3)对于漫顶溃决型黄土堰塞坝,随着土体初始含水率的增大,堰塞坝最终溃口宽深比具有先增大后减小的规律。

本文初步研究得出不同含水率条件下的黄土堰塞坝的溃决机制,对黄土地区滑坡堰塞坝灾害的防灾减灾有一定的理论参考价值。但黄土堰塞坝的溃决机理研究仍处于探索阶段,还有很多内容需进一步探究,若要更全面地揭示黄土堰塞坝溃决机理,依托于实际黄土滑坡堰塞坝参数设计试验,并对堰塞坝溃决中的土体参数与含水率的关系进行深入分析将会使成果更加完善。此外,黄土堰塞坝溃决是多因素共同影响作用下的结果,系统研究其溃决机制仍需开展大量的研究工作。

参考文献 (References)

- [1] 丁一汇,王会军. 近百年中国气候变化科学问题的新认识[J]. 科学通报, 2016, **61**(10): 1029 - 1041. [DING Yihui, WANG Huijun. Newly acquired knowledge on the scientific issues related to climate change over the recent 100 years in China [J]. Chinese Science Bulletin, 2016, **61**(10): 1029 - 1041] DOI: 10.1360/N972015-00638
- [2] 赵安周,朱秀芳,潘耀忠. 1965—2013 年黄土高原地区极端降水事件时空变化特征[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2017, **53**(1): 43 - 50. [ZHAO Anzhou, ZHU Xiufang, PAN Yaozhong. Spatiotemporal variations of extreme precipitation events in the Loess Plateau from 1965 to 2013 [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2017, **53**(1): 43 - 50] DOI: 10.16360/j.cnki.jbnuns.2017.01.009
- [3] 李志,郑粉莉,刘文兆. 1961—2007 年黄土高原极端降水事件的时空变化分析[J]. 自然资源学报, 2010, **25**(2): 291 - 299. [LI Zhi, ZHENG Fenli, LIU Wenzhao. Analyzing the spatiotemporal changes of extreme precipitation events in the Loess Plateau from 1961 to 2007 [J]. Journal of Natural Resources, 2010, **25**(2): 291 - 299] DOI: 10.11849/zzrxyb.2010.02.013
- [4] 刘百箴,张俊玲,吴建华,等. 1920 年 12 月 16 日海原 8.5 级大地震的伤亡人口再评估[J]. 中国地震, 2003, **19**(4): 386 - 386. [LIU Baizhi, ZHANG Junling, WU Jianhua, et al. Reevaluating on casualty in the Haiyuan Ms8.5 earthquake on December 16, 1920 [J]. Earthquake Research in China, 2003, **19**(4): 386 - 386]
- [5] 胡桂胜,尚彦军,曾庆利,等. 新疆叶城“7.6”特大灾害性泥石流应急科学调查[J]. 山地学报, 2017, **35**(1): 112 - 116. [HU Guisheng, SHANG Yanjun, ZENG Qingli, et al. The emergency scientific investigation of catastrophic debris flow in Yecheng county of Xinjiang on July 6th, 2016 [J]. Mountain Research, 2017, **35**(1): 112 - 116] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000202
- [6] 邵海,魏云杰,黄喆,等. 新疆伊宁克孜勒赛黄土滑坡堵溃型泥石流成灾模式[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2018, **29**(6): 40 - 46. [SHAO Hai, WEI Yunjie, HUANG Zhe, et al. Kezilesai loess landslide dam - breaking debris flow hazards model in Yining county, Xinjiang [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2018, **29**(6): 40 - 46] DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2018.06.06
- [7] 杨海龙,樊晓一,赵运会,等. 偏转角度对滑坡-碎屑流运动影响的模型试验[J]. 山地学报, 2017, **35**(3): 316 - 322. [YANG Hailong, FAN Xiaoyi, ZHAO Yunhui, et al. Model tests on influence of deflection angle on the movement of landslide - debris avalanches [J]. Mountain Research, 2017, **35**(3): 316 - 322] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000227
- [8] 樊晓一,杨海龙,田述军,等. 滑坡碎屑流运动参数与影响因素敏感度研究[J]. 山地学报, 2016, **34**(6): 724 - 731. [FAN Xiaoyi, YANG Hailong, TIAN Shujun, et al. Susceptibility degree of factors influence on the movement parameters of landslide-debris avalanches [J]. Mountain Research, 2016, **34**(6): 724 - 731] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000179
- [9] MORRIS M W. CADAM: Concerted action on dambreak modelling [R]. Berkshire: HR Wallingford Limited, 2000: 2 - 5.
- [10] MORRIS M W, HASSAN M. IMPACT: Investigation of extreme flood processes and uncertainty—a European research project[R]. 2005.
- [11] 蒋先刚,崔鹏,王兆印,等. 堰塞坝溃口下切过程试验研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2016, **48**(4): 38 - 44. [JIANG

- Xiangang, CUI Peng, WANG Zhaoyin, et al. Experiments investigation on longitudinal breaching of natural dam [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2016, **48** (4): 38 – 44. DOI: 10.15961/j.jsuese.2016.04.006
- [12] 蒋先刚. 溃决型泥石流形成过程分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, **37** (S1): 3613 – 3622. [JIANG Xiangang. Analysis on the formation process of outburst debris flow [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, **37** (S1): 3613 – 3622] DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2016.1518
- [13] CAO Z, YUE Z, PENDER G. Landslide dam failure and flood hydraulics. Part I: Experimental investigation [J]. Natural Hazards, 2011, **59** (2): 1003 – 1019. DOI: 10.1007/s11069 – 011 – 9814 – 8
- [14] JIANG X, HUANG J, WEI Y, et al. The influence of materials on the breaching process of natural dams [J]. Landslides, 2018, **15** (2): 243 – 255. DOI: 10.1007/s10346 – 017 – 0877 – 9
- [15] 蒋先刚, 吴雷. 不同底床坡度下的堰塞坝溃决过程研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, **38** (S1): 3008 – 3014. [JIANG Xiangang, WU Lei. Influence of bed slope on breaching process of natural dam [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, **38** (S1): 3008 – 3014] DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2017.1401
- [16] 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
- [17] RIFAI I, ERPICUM S, ARCHAMBEAU P, et al. Overtopping – induced failure of noncohesive, homogeneous fluvial dikes [J]. Water Resources Research, 2017, **53** (4): 3373 – 3386. DOI: 10.1002/2016WR020053
- [18] MORRIS M, HANSON G, HASSAN M. Improving the accuracy of breach modelling: Why are we not progressing faster? [J]. Journal of Flood Risk Management, 2008, **1** (3): 150 – 161. DOI: 10.1111/j.1753 – 318X.2008.00017.x
- [19] WINTERWERP J C, VAN KESTEREN W G M. Introduction to the physics of cohesive sediment in the marine environment [M]. Amsterdam: Elsevier, 2004: 344 – 379.
- [20] 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 mechanism of natural dam [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2020, **50** (1): 185 – 193] DOI: 10.13278/j.cnki.jjuese.20190049
- [21] JIANG X, WEI Y, WU L, et al. Laboratory experiments on failure characteristics of non – cohesive sediment natural dam in progressive failure mode [J]. Environmental Earth Sciences, 2019, **78** (17): 538. DOI: 10.1007/s12665 – 019 – 8544 – 1
- [22] AL-RIFFAI M. Experimental study of breach mechanics in overtopped noncohesive earthen embankments [D]. Ottawa: University of Ottawa, 2014: 131 – 147. DOI: 10.20381/ruor – 6578
- [23] 中国地质调查局西安地质调查中心. 陕西省延安市地质灾害详细调查与综合研究报告[R]. 西安: 中国地质调查局西安地质调查中心, 2015: 120 – 132. [Xi'an Geological Survey Center of China Geological Survey. Detailed survey and comprehensive research report of geological hazards in Yan'an, Shaanxi province [R]. Xi'an: Xi'an Geological Survey Center of China Geological Survey, 2015: 120 – 132]
- [24] HU W, XU Q, WANG G H, et al. Sensitivity of the initiation of debris flow to initial soil moisture [J]. Landslides, 2015, **12** (6): 1139 – 1145. DOI: 10.1007/s10346 – 014 – 0529 – 2
- [25] HU W, XU Q, RUI C, et al. An instrumented flume to investigate the initiation mechanism of the post – earthquake huge debris flow in the southwest of China [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2015, **74** (2): 393 – 404. DOI: 10.1007/s10064 – 014 – 0627 – 3
- [26] 杨志全, 丁攀, 雨德聪, 等. 基于孔隙率的延安黄土抗剪强度模型[J]. 山地学报, 2019, **37** (3): 392 – 399. [YANG Zhiqian, DING Pan, YU Decong, et al. Shear strength model of Yan'an loess interpreted by porosity [J]. Mountain Research, 2019, **37** (3): 392 – 399] DOI: 10.16089/j.cnki.1008 – 2786.000432
- [27] YUAN B, CHEN W, TANG Y, et al. Experimental study on gully-shaped mud flow in the loess area [J]. Environmental Earth Sciences, 2015, **74** (1): 759 – 769. DOI: 10.1007/s12665 – 015 – 4080 – 9
- [28] 丁攀. 土体初始含水率对沟道黄土泥流发育影响研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2020: 33 – 36. [DING Pan. Research on the influence of soil initial water content on the development of loess mud flow in gully [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2020: 33 – 36]
- [29] 刘宁, 杨启贵. 唐江山堰塞湖应急除险技术实践[J]. 中国工程科学, 2009, **11** (6): 74 – 81. [LIU Ning, YANG Qigui. The emergency handling technique and practice of Tangjiashan barrier lake [J]. Strategic Study of CAE, 2009, **11** (6): 74 – 81]
- [30] 牛志攀, 陈昆廷, 张新华, 等. 滑坡堰塞坝坝体溃决机理与溃决实验研究综述[J]. 西南民族大学学报(自然科学版), 2019, **45** (6): 646 – 653. [NIU Zhipan, CHEN Kunting, ZHANG Xinhua, et al. Review of relevant characteristics of landslide dams and dam – break experimental studies [J]. Journal of Southwest Minzu University (Natural Science Edition), 2019, **45** (6): 646 – 653] DOI: 10.11920/xnmdzk.2019.06.017
- [31] 解家毕, 孙东亚. 全国水库溃坝统计及溃坝原因分析[J]. 水利水电技术, 2009, **40** (12): 124 – 128. [XIE Jiabi, SUN Dongya. Statistics of dam failures in China and analysis on failure causations [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2009, **40**

- (12): 124 – 128] DOI: 10.3969/j.issn.1000 – 0860.2009.12.032
- [32] 程小勇. 含水量对黄土强度的影响试验研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2009: 20 – 35. [CHENG Xiaoyong. Experimental study of the effect of loess strength on moisture content [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2009: 20 – 35]
- [33] 邢鲜丽, 李同录, 李萍, 等. 黄土抗剪强度与含水率的变化规律[J]. 水文地质工程地质, 2014, **41** (3): 53 – 59, 97. [XING Xianli, LI Tonglu, LI Ping, et al. Variation regularities of loess shear strength with the moisture content [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2014, **41** (3): 53 – 59, 97] DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000 – 3665.2014.03.019
- [34] 廖红建, 李涛, 彭建兵. 高陡边坡滑坡体黄土的强度特性研究[J]. 岩土力学, 2011, **32** (7): 1939 – 1944. [LIAO Hongjian, LI Tao, PENG Jianbing. Study of strength characteristics of high and steep slope landslide mass loess [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32** (7): 1939 – 1944] DOI: 10.16285/j.rsm.2011.07.005
- [35] FREDLUND D G, MORGENSTERN N R, WIDGER R A. The shear strength of unsaturated soils [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1978, **15** (3): 313 – 321. DOI: 10.1139/t78 – 029

Study on the Influence of Initial Water Content on the Breakout of Loess Landslide Barrier Dam

YU Decong^{1a,b}, DING Pan^{1c}, YANG Zhiquan^{1a,b*}, HAN Yongshun², LIAO Liping³

(1. a. Faculty of Public Safety and Emergency Management; b. Key Laboratory of Early Rapid Identification, Prevention and Control of Geological Diseases in Traffic Corridor of High Intensity Earthquake Mountainous Area of Yunnan Province;

c. Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, 650093, China;

2. College of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, Hunan, China;

3. College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: Various geological disasters in the loess area frequently occur with extreme rainfall. However, there are few research results considering the effects of initial water content, compactness, incoming flowrate and other parameters on the breakout of loess landslide barrier dam, and the disaster mechanism is still not clear. The breaching process of natural dam is influenced by many factors, the initial water content has an important influence on the stability of loess landslide barrier dam. Based on indoor model tests, this paper preliminarily explored the influence of different water content in the range of 0% ~ 25% on the breakout of loess barrier dam. The tests show that: (1) There were four breakout modes with different initial water content. When the water content was 0% ~ 18.75%, the breakout mode was overtopping. At 18.75% ~ 21.25%, overtopping and leakage piping breakout coexisted. From 21.25% to 23.75%, the breakout mode was the coexistence of overtopping and instability failure. When 23.75% ~ 25%, the barrier dam body became unstable and broke out. Among them, the process of overtopping breakout had three typical stages: the development stage of breach and gully, the expansion stage of breach, and the stability stage of breach. (2) The erosion law of dam under different initial water content was as follows: with the gradual increase of initial water content of soil, the undercutting effect of water on the bottom of breach and the traceability erosion ability gradually weaken, while the traction erosion effect increases. (3) For the overtopping breakout mode, the width-depth ratio of the breach after breakout increased first and then decreased with the increase of the initial water content. However, the ratio of width to depth of barrier dam failure in which the dam body was unstable and broke out had no obvious law. The research results can provide a theoretical reference for the prevention and mitigation of loess barrier dam break disasters.

Key words: initial water content; flume tests; loess; dam-failure