

张友谊, 古维扬, 黄琛. 基于模型试验的翻坝泥石流流铲刮效应研究[J]. 灾害学, 2023, 38(3): 75–81, 86. [ZHANG Youyi, GU Weiyang, HUANG Chen. Study on Scraping Effect of Dam – overtopping Debris Flow Based on Model Test[J]. Journal of Catastrophology, 2023, 38(3): 75–81, 86. doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2023.03.012.]

# 基于模型试验的翻坝泥石流流铲刮效应研究<sup>\*</sup>

张友谊<sup>1</sup>, 古维扬<sup>1</sup>, 黄琛<sup>2</sup>

(1. 西南科技大学 土木工程与建筑学院, 四川 绵阳 621010; 2. 西南石油大学 机电工程学院, 四川 绵阳 621010)

**摘要:**汶川大地震后,震区泥石流灾害频发,拦砂坝工程为灾区泥石流灾害防灾减灾发挥了重大作用。但当条件限制拦砂坝库区清淤困难,拦砂坝满库后,翻坝泥石流将加剧对沟道物源的侵蚀铲刮效应。该文以强震区锄头沟“8·20”翻坝泥石流为研究对象,在野外详查、无人机航拍及遥感影像资料收集的基础上,建立室内模型试验,进行25组不同因素(泥石流重度、坝高、规模)组合条件的正交试验,探究了泥石流翻坝后的流速、侵蚀冲刷深度、侵蚀量。研究表明:①翻坝泥石流流速变化经平抛加速→触底减速→涌浪飞溅加速→波动减速4个阶段,随着泥石流重度、坝高及规模的改变,沿程流速发生改变,重度越小、坝高及规模越大,沿程流速越大。②翻坝泥石流极限侵蚀冲刷深度随泥石流重度的减小、坝高及规模的增大而增大。铲刮后沟道的沿程形态变化表现为“全截面淤积(重度 $\geq 1.8\text{ t/m}^3$ )+入沟冲坑+沟道下切开槽+沟口前冲淤堆积”。③坝高及规模一定时,稀性泥石流翻坝后侵蚀量随重度的增大而增大,粘性泥石流则相反;重度一定时,泥石流翻坝侵蚀量随泥石流初始规模的增加而增加。研究结果为泥石流翻坝后侵蚀冲刷机理分析和泥石流灾害防护工程设计提供参考。

**关键词:** 锄头沟; 铲刮侵蚀; 侵蚀量; 室内模型试验

**中图分类号:** X43; X915.5; P642.22 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000–811X(2023)03–0075–08

doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2023.03.012

汶川8.0级地震<sup>[1]</sup>发生后,松散物源的堆积为泥石流的爆发创造了必要条件,而拦砂坝在对泥石流的防治工作中发挥了重要作用。随着沟内拦砂坝库容淤满,泥石流一旦爆发将翻坝冲出,发生铲刮效应。铲刮效应虽作为地质灾害方面的热点问题,但多集中在滑坡铲刮效应<sup>[2]</sup>和碎屑流铲刮效应<sup>[3]</sup>的研究。目前对于翻坝泥石流的研究多集中在坝下冲刷坑深度<sup>[4–5]</sup>,而对翻坝泥石流<sup>[6]</sup>的铲刮效应研究较少。

基于铲刮现象难以被完整的记录下来,为更好的研究铲刮效应的影响,1988年, HUTTER<sup>[7]</sup>等基于室内模型试验开展了较为系统的滑坡碎屑流动力学特征研究;余斌等<sup>[8]</sup>通过研究不同粗细颗粒的粘性泥石流流变试验,建立粘性泥石流运移模型;Y OKURA等<sup>[9]</sup>选用砖块作为滑源区材料,运用高速摄像机定点监测砖块的运移情况,进而得出滑坡碎屑流运移过程中的速度、位移变化规律;D' AGOSTINO等<sup>[10]</sup>根据野外调查和水槽试验,提出了计算冲刷坑极限深度和长度的公式;PANLIHUA等<sup>[11]</sup>建立了冲刷侵蚀坑极限侵蚀冲刷深度与泥石流重度、流量和沟床坡降、动床颗粒级配等因素的关系;陈华勇<sup>[12]</sup>通过搭建滑坡坝试验模型,验证并估计了在侵蚀河床条件下流锋的平均速度,且采用全应力传感器(TSTs)和激光测距仪(LRFs)分别测量全应力和流前深度;

TJALLING等<sup>[13]</sup>的模型试验表明,冲刷侵蚀深度一般在固定床向可蚀床过渡的下游处最大,但富粘土泥石流除外,因为泥石流以颗粒夹带和整体夹带的形式存在,且大部分夹带发生在流锋通过的过程中,泥石流形成相对均匀的冲刷格局。其次基础冲刷深度随河道坡度、流速、水流深度、流量和剪切应力的增大而增大,平均冲刷深度和最大冲刷深度随含水率和粒径的增大而增大,随粘土含量的增加而减小。IMAIZUMI F等<sup>[14]</sup>利用实时监测系统对泥石流侵蚀铲刮现象进行跟踪,通过分析动态影像资料,研究泥石流在运移过程中的流速、流量及侵蚀等情况。

目前对流体耦合的泥石流<sup>[14]</sup>流体侵蚀铲刮效应的研究,大多是以O'BRIEN等<sup>[15]</sup>构建的FLO–2D模型为依据。部分学者运用该模型对泥石流流体的流速、流深等运移特征进行研究。王骏等<sup>[16]</sup>采用FLO–2D模型对岳阳联合溪沟泥石流进行模拟,基于改进的Voellmy–Salm流体模型,对泥石流的铲刮区域及侵蚀深度等结果研究分析,得出模拟结果基本与实际一致;刘波等<sup>[17]</sup>利用三维泥石流模拟软件RAMMS,对锄头沟泥石流的运移过程进行模拟,模拟结果从泥石流流速、流量及沉积面积等方面揭示了震后泥石流的流动机理,为震区泥石流防治工程设计提供参考依据;樊赞赞等<sup>[18]</sup>结合质能、动能守恒理论和近似Riemann解

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2022–09–26

修回日期: 2023–01–31

基金项目: 国家重点研发计划“强震区特大泥石流综合防控技术与示范应用”(2018YFC1505401)

第一作者简介: 张友谊(1980–),男,汉族,安徽宿州人,博士,副教授,从事地质灾害成因机理研究。E-mail: youyzh@126.com

的 HLL 格式,研究了泥石流侵蚀运移过程中对其动力影响,证实了泥石流沿程铲刮增加其运动体积的动力过程。另有部分学者<sup>[19-20]</sup>采用软化模型对泥石流流域进行模拟,通过模拟可蚀土层基底的侵蚀及夹带作用,证实土层的侵蚀及铲刮增大了泥石流流体体积。

研究现状表明,泥石流铲刮效应研究多集中在泥石流爆发<sup>[21]</sup>后对原始沟道的侵蚀机制上,但对于工程治理后,拦砂坝本身对翻坝泥石流运移特征的影响研究较少。基与此,本文以锄头沟 2019 年“8·20”泥石流为原型,对锄头沟流域进行野外调查,结合室内模型试验,旨在研究翻坝泥石流铲刮效应及入沟后沿程侵蚀过程,为山区防震减灾提供科学依据。

1 研究区概况

锄头沟位于四川省汶川县绵虬镇羌锋村,地理坐标为 103°29'8.43"E, 31°20'20.84"N。都汶高速公路和 G213 国道公路横穿沟口堆积区前缘,距绵虬镇 1.5 km。锄头沟流域面积 21.7 km<sup>2</sup>,整体呈扇形,流域最高点高程 4 130 m,最低点位于沟口处,高程 1 178 m,相对高差 2 952 m,沟床平均纵坡降 184‰。据汶川气象站 26 年实测资料(图 1),锄头沟流域内年平均降水量 718.3 mm,年最大降水量 828.6 mm,年最小降水量 1 369.8 mm。每年的 5—8 月为强降水期,占全年降水量的 62.2%。锄头沟历史上曾发生 6 次不同规模的泥石流,其中包含两次小型泥石流(1976 年和 1999 年),四次大型泥石流(时间分别为:2013.7.10、2014.7.15、2019.8.20、2020.8.17)。而此次“8·20”泥石流具有爆发时间短,速度快,一次冲出量大的特点。大量泥石流汇入岷江堵塞河道,致上游水位抬升,回水淹上游段约 1.6 km,上下游水位差约 14 m,堵江持续时间 2 h。泥石流的暴发,致使护岸墙、沟道左岸单边防护堤、下游排导槽局部被掏蚀、冲毁。拦砂坝坝体结构整体完整,局部存在毁坏。

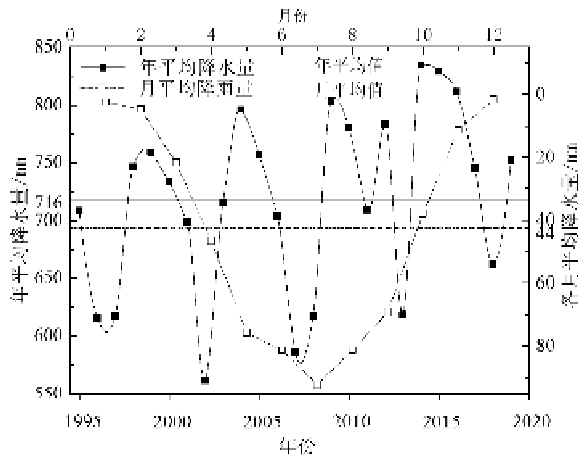


图1 汶川县多年(月)平均降雨量

2 室内模型试验

以锄头沟 1#坝及下游沟道为研究对象,利用水槽试验装置,开展室内“三因素五水平”正交模

型试验,探讨翻坝泥石流侵蚀铲刮效应。

2.1 试验装置

铲刮效应模型试验装置主要由物料搅拌槽、加速段模型槽、铲刮段模型槽和数据测量装置四部分组成。室内模型试验装置如图 2 所示。模型试验槽坝下游沟道如图 3 所示。

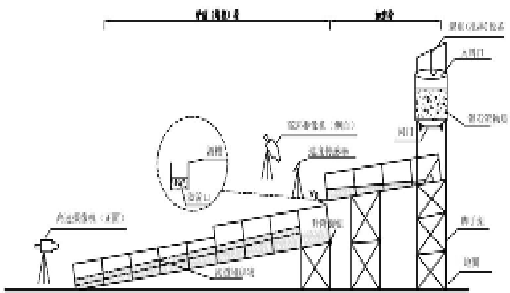


图2 室内试验模型装置



图3 装置下游沟道

2.2 试验方案

本试验设计为三因素五水平的正交试验,共计 25 组(表 1)。因试验条件限制,故此次设计将满足关键因素的相似条件,本试验选取几何相似比  $\lambda_L = 1:50$ ,加速度相似比  $\lambda_g = 1:1$ ,预设重度相似比  $\lambda_\gamma = 1:1$ ,依据无量纲数:

$$\lambda_\sigma = \lambda_\gamma \lambda_g \lambda_L; \tag{1}$$

$$\lambda_\rho = \lambda_\sigma \lambda_L^2; \tag{2}$$

$$\lambda_g = \lambda_\rho = \lambda_\sigma = \lambda_\mu = 1. \tag{3}$$

式中:  $\lambda_\gamma$ ,  $\lambda_g$ ,  $\lambda_L$ ,  $\lambda_\sigma$ ,  $\lambda_\rho$ ,  $\lambda_\mu$ ,  $\lambda_\varphi$  分别为重度,加速度,几何,应力,集中荷载,泊松比和内摩擦角的相似比。

以锄头沟 1#坝下游沟道物源颗粒级配分布为基础,通过调整坝高、泥石流重度及规模变化,用速度传感器、高速摄像机对泥石流翻坝后的整个运移过程进行记录,获取泥石流流速、铲刮长度等参数。

表 1 正交试验方案

因数	泥石流规模 $V/m^3$	坝高 $H/m$	泥石流重度 $\gamma/(t/m^3)$
1	0.08	0.20	1.2
2	0.12	0.28	1.4
3	0.16	0.34	1.6
4	0.20	0.42	1.8
5	0.24	0.50	2.0

2.3 试验参数

调查表明,锄头沟 1#拦砂坝高 22 m,“8.20”

泥石流流体重度为  $1.662 \sim 1.825 \text{ t/m}^3$ , 属粘性泥石流, 一次泥石流固体冲出物约  $52 \text{ 万 m}^3$ 。锄头沟流域 1#坝至沟口处, 每间隔  $500 \text{ m}$  选择一处合适地点。做堆积物颗粒筛分试验, 共计三组(图 4)。测量其不同粒径范围的固体颗粒质量, 得到筛分后颗粒分布图(图 5)。堆积物主要为碎石和块石, 占  $60 \sim 80\%$  取样后母岩中主要为粒径  $20 \sim 80 \text{ cm}$  的花岗岩, 砂和粉土填充, 分选性较差。因此室内模型试验加速区选用级配比为  $1:3.3:1.2$  的碎石、砂及粉土混合物, 铲刮区选用级配比为  $1:4.9:0.8$  的碎石、砂及粉土混合物, 粒径都为  $0.2 \sim 0.8 \text{ cm}$ 。锄头沟 1#坝堆积区纵坡降  $126 \sim 285\%$ , 1#坝到沟口平均纵坡降  $93\%$ , 按  $0.5 \sim 0.7$  倍计算回淤纵坡, 加速槽坡度设定为  $8.0^\circ$ , 铲刮堆积槽坡度设定为  $5.5^\circ$ , 模型槽全长  $6.2 \text{ m}$ , 加速槽长  $2.0 \text{ m}$  宽  $0.3 \text{ m}$  高  $0.35 \text{ m}$  铲刮堆积槽长  $4.2 \text{ m}$  宽  $0.3 \text{ m}$  高  $0.35 \text{ m}$ , 已有 1#拦砂坝到沟口处堆积物厚度一般大于  $12 \text{ m}$ , 试验模型铲刮堆积区厚度设定为  $0.25 \text{ m}$ 。



图 4 堆积物颗分试验现场

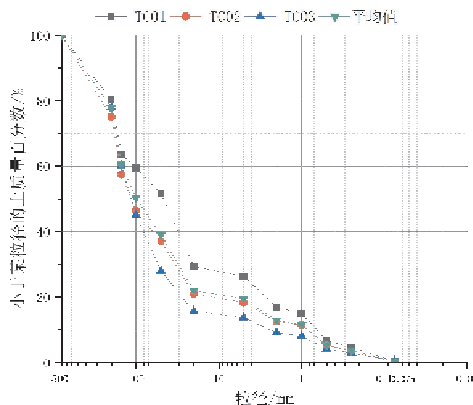


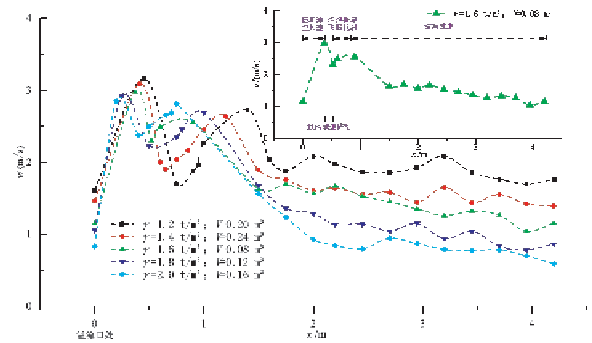
图 5 锄头沟堆积体颗粒级配情况

### 3 试验结果分析

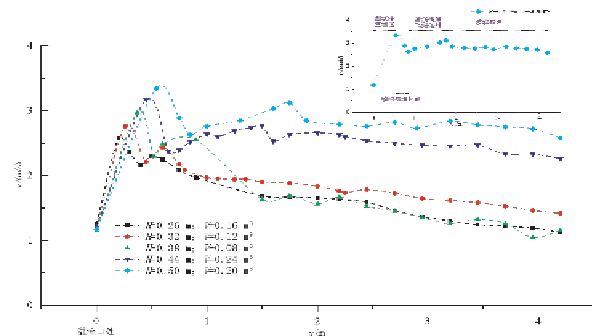
#### 3.1 翻坝泥石流流速变化特征

坝高一定时, 泥石流流速沿程变化与重度呈负相关趋势(图 6)。泥石流规模  $V$  越大, 在后续来流推动下, 侵蚀冲刷坑下游出射点速度越大, 沿程流速  $v$  变化也应越大, 但以  $\gamma = 1.6 \text{ t/m}^3$ ,  $V =$

$0.08 \text{ m}^3$  及  $\gamma = 2.0 \text{ t/m}^3$ ,  $V = 0.16 \text{ m}^3$  两组工况为例, 试验结果却与之相反。表明泥石流重度较于规模对沿程流速的影响更为显著。

图 6 坝高相同, 重度、规模不同时, 翻坝泥石流流速沿程变化( $H=0.38 \text{ m}$ )

而当重度一定时, 坝高影响入射速度, 坝高  $H$  越大, 入射角  $\theta$  越大, 流体触底后波动起伏越大(图 7)。以  $H = 0.50 \text{ m}$ ,  $V = 0.20 \text{ m}^3$  及  $H = 0.26 \text{ m}$ ,  $V = 0.16 \text{ m}^3$  两组工况为例, 泥石流规模  $V$  越大, 涌浪频率越高, 紊流现象越明显, 对沟道物源波动侵蚀的次数越多。以  $H = 0.38 \text{ m}$ ,  $V = 0.08 \text{ m}^3$  及  $H = 0.26 \text{ m}$ ,  $V = 0.16 \text{ m}^3$  两组工况为例, 泥石流规模  $V$  越大, 流体获得可持续的动能越大, 冲刷携带沟道物源的能力越强。试验结果表明, 重度  $\gamma$  一定时, 涌浪飞溅加速前, 坝高较于泥石流规模  $V$  对泥石流流体沿程流速  $v$  的变化起决定性作用, 涌浪飞溅加速后, 泥石流规模  $V$  对泥石流流体沿程流速  $v$  的影响效果更为明显。

图 7 重度相同, 坝高、规模不同时间, 翻坝泥石流流速沿程变化( $\gamma=0.16 \text{ t/m}^3$ )

由图 8 可知, 稀性泥石流工况下, 即:  $H = 0.44 \text{ m}$ ,  $\gamma = 1.2 \text{ t/m}^3$ 、 $H = 0.50 \text{ m}$ ,  $\gamma = 1.4 \text{ t/m}^3$  两组实验表明, 泥石流重度  $\gamma$  越大, 运移过程中冲刷裹挟的固体物质越多, 动能越大。粘性泥石流工况下, 即:  $H = 0.26 \text{ m}$ ,  $\gamma = 1.6 \text{ t/m}^3$ 、 $H = 0.32 \text{ m}$ ,  $\gamma = 1.8 \text{ t/m}^3$  与  $H = 0.38 \text{ m}$ ,  $\gamma = 2.0 \text{ t/m}^3$  三组实验表明, 粘性泥石流固体物质含量越高, 流动性越差, 抛射出坑后以淤积的形式向下游移动, 没有物源的补充, 能量逐渐消散。试验结果表明, 规模  $V$  一定时, 泥石流滞空阶段主控因素为坝高, 其后泥石流沿程流速  $v$  变化主要与泥石流性质有关。

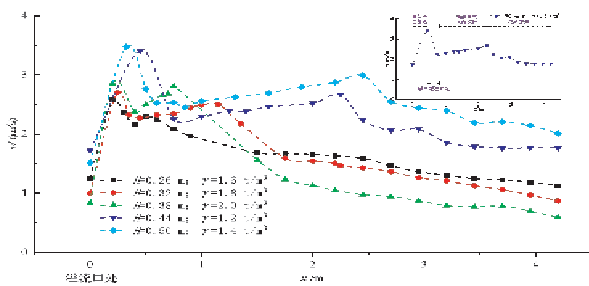


图8 规模相同, 坝高、重度不同条件下, 翻坝泥石流流速沿程变化 ( $V=0.16 \text{ m}^3$ )

综上所述, 泥石流流体的重度  $\gamma$  越小、坝高  $H$  及规模  $V$  越大, 泥石流沿程流速  $v$  变化幅度也越大。试验表明翻坝泥石流流速变化经过平抛加速→触底减速→涌浪飞溅加速→波动减速 4 个明显阶段。平抛加速(图 9): 泥石流流体翻坝经过平抛运动加速, 在触沟前速度达到最大, 此阶段主控因素为坝高, 坝高越高, 入射速度越大。触底减速: 滞空加速对坝下局部冲刷, 形成的马蹄涡不断对坝踵及沟道侵蚀, 使泥石流发育。泥石流流体入沟初期(图 10), 浆体动能较大, 翻坝泥石流在触沟道瞬间, 受到流体的巨大冲击力, 沟道物源被迅速下切侵蚀。涌浪飞溅加速(图 11): 翻坝泥石流随后发生一系列涌浪, 涌浪沿沟道向下游移动, 各涌浪不断叠加, 沟道物源侵蚀量增加进而放大泥石流规模。随着流体的持续运动, 后续来流在挑流的消能作用下使得流体滩高并不断回流。当回流介于最大雍高及地面线之间时, 冲刷坑内的泥沙淤积逐渐达到平衡形成底流。波动减速: 泥石流重度越大, 侵蚀冲刷坑下游出射角度越小, 因此速度变化幅度越小, 随后以曲线波动形式逐渐减小冲出沟口(图 12)。

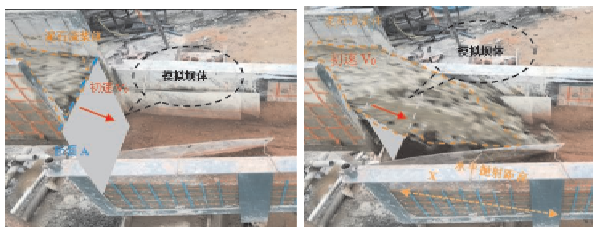


图9 泥石流滞空阶段平抛运动



图10 泥石流翻坝入沟触底减速

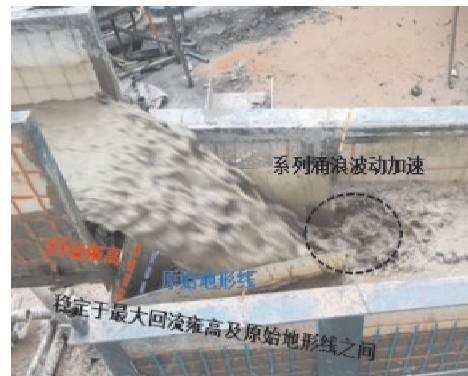


图11 泥石流涌浪波动加速



图12 泥石流冲出沟口

### 3.2 翻坝泥石流侵蚀冲刷深度变化特征

通过对试验后沟道钻孔取样, 分析不同重度、坝高及规模组合条件下, 翻坝泥石流侵蚀冲刷深度及范围的变化规律。

试验表明翻坝泥石流铲刮后的沿着程形态变化表现如图 13 为“全截面淤积+入沟冲坑+沟道下切开槽+沟口前冲淤堆积”与“入沟冲坑+涌浪滚波再次侵蚀+沟道下切开槽”两种。

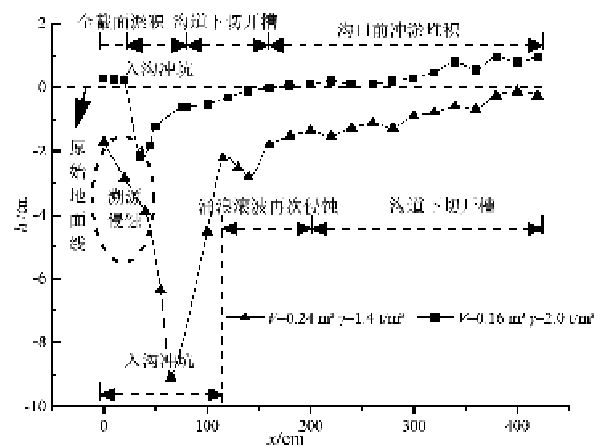


图13 同坝高时沿程冲刷形态特征 ( $H=0.38 \text{ m}$ )

由表 2、图 13 可知, 坝高  $H$  一定时, 对于稀性泥石流, 重度  $\gamma$  越大泥石流翻坝后的极限侵蚀深度  $h_t$  越大。这是由于稀性泥石流在沿程运移中发生股流和散流现象, 沟道表层土体接近饱和, 孔隙水压增大, 下切侵蚀沟道, 致使极限侵蚀深度较大。对于粘性泥石流, 重度  $\gamma$  越小泥石流翻

坝后的极限侵蚀深度及铲刮距离  $x$  越大。粘性泥石流较大的粘滞阻力, 导致其流动性差、动能小, 铲刮距离  $x$  亦随重度  $\gamma$  的增大而逐渐减小。分析同坝高沿程冲刷形态图, 重度  $\gamma$  越小, 流峰越多, 涌浪滚波产生侵蚀的次数越多。泥石流重度在  $\gamma = 1.2 \text{ t/m}^3$  与  $\gamma = 1.4 \text{ t/m}^3$  两种工况下, 泥石流的回流效应应使冲刷坑上游出现明显的溯源侵蚀现象。

由表 3、图 14 可知, 重度  $\gamma$  一定时, 泥石流极限侵蚀冲刷深度  $h_i$  及铲刮距离  $x$  随流体规模  $V$  的增大而增大。这是由于泥石流规模  $V$  增大, 入沟后相应的势能转化为动能增加, 泥石流冲击切沟道物源的冲击力增大, 随着后续泥石流持续推动和冲击作用, 不断下切侵蚀冲刷坑, 使坑内深度持续增大, 同时多涌浪形成的紊流, 不断下切裹挟沿程沟道物源, 导致泥石流规模放大及铲刮距离变长。  $V = 0.24 \text{ m}^3$ ,  $H = 0.44 \text{ m}$  与  $V = 0.20 \text{ m}^3$ ,  $H = 0.50 \text{ m}$  两组工况下的极限侵蚀冲刷深度最大, 分别为  $8.4 \text{ cm}$ 、 $7.4 \text{ cm}$ , 铲刮距离  $x$  亦最长, 均至模型槽沟口位置。  $V = 0.12 \text{ m}^3$ ,  $H = 0.32 \text{ m}$  虽比  $V = 0.08 \text{ m}^3$ ,  $H = 0.38 \text{ m}$  工况下的坝高值小, 但其极限侵蚀冲刷深度分别为  $5.5 \text{ cm}$ 、 $4.5 \text{ cm}$ , 铲刮长度分别为  $336 \text{ cm}$ 、 $318 \text{ cm}$ 。表明极限侵蚀冲刷深度  $h_i$  与泥石流规模  $V$  及坝高  $H$  的变化呈明显的正相关趋势, 且泥石流规模的影响效果显著大于坝高。

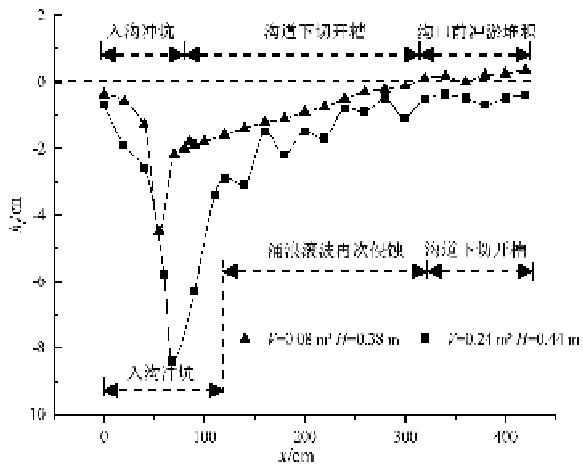


图 14 同重度下沿程冲刷形态特征 ( $\gamma = 0.16 \text{ t/m}^3$ )

由表 4、图 15 可知, 规模  $V$  一定时, 对于稀性泥石流, 极限侵蚀冲刷深度  $h_i$  及铲刮距离  $x$  随流体重度  $\gamma$  的增大而增大; 对于粘性泥石流, 极限侵蚀冲刷深度  $h_i$  及铲刮距离  $x$  随流体重度  $\gamma$  的增

大而减小。  $\gamma = 1.4 \text{ t/m}^3$  相较于  $\gamma = 1.2 \text{ t/m}^3$  固体物质含量更多, 动能也相应增大, 因此在沟道物源土体饱和前提下, 流体沿程铲刮携带沟道物源能力更强, 侵蚀冲刷深度  $h$  更大, 铲刮距离  $x$  更长, 均至模型槽沟口全截面铲刮。粘性泥石流虽有较大动能, 但其流动性差, 铲刮能力降低, 侵蚀冲刷深度  $h$  最小, 铲刮距离  $x$  亦随重度  $\gamma$  的增大而逐渐减小。

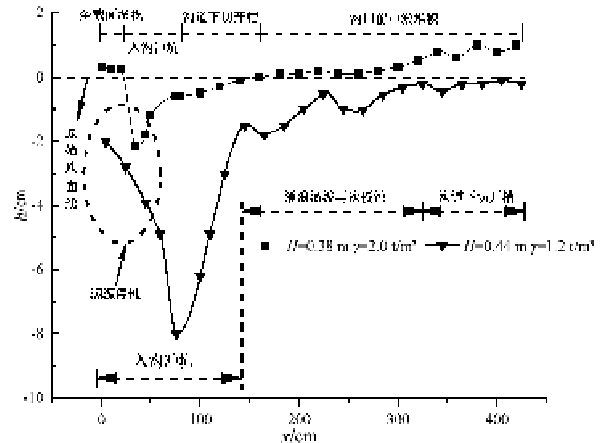


图 15 同规模时沿程冲刷形态特征 ( $V = 0.16 \text{ m}^3$ )

综上所述, 翻坝泥石流侵蚀冲刷深度  $h_i$  随泥石流重度  $\gamma$  的减小、坝高  $H$  及规模  $V$  的增大呈正相关趋势。重度  $\gamma$  一定时, 极限侵蚀冲刷深度  $h_i$  与泥石流规模  $V$  及坝高  $H$  的变化呈明显的正相关趋势, 且泥石流规模的影响效果显著大于坝高; 规模  $V$  一定时, 翻坝泥石流极限侵蚀冲刷深度  $h_i$  随泥石流重度  $\gamma$  的减小而增大, 且重度  $\gamma$  较于坝高  $H$  对沿程侵蚀冲刷深度的影响更大。主要原因, 一方面, 泥石流重度减小, 流体内固体物质含量相应减小, 在入沟后铲刮可侵蚀动床时的渗透性增大。流体进入沟道主要依靠摩擦与碰撞对沟道物源进行相互作用, 伴随泥石流重度的减小, 沟道物源铲刮耗能方式逐渐由摩擦作用转为碰撞作用, 使泥石流流体作用于可侵蚀动床的动力作用相对增强。另一方面, 随着坝高的增大, 泥石流翻坝后获得较强的冲击力, 铲刮作用会沿着沟道持续扩展形成较深的冲刷坑或更长的下切开槽。最后, 流体规模的增大, 为泥石流提供物质来源, 使其具有持续不断的输送能力, 延长泥石流运移距离, 进而增大铲刮长度。泥石流翻坝后导致涌浪的形成, 放大了泥石流涌浪的峰值流量, 造成可侵蚀动床的失稳及侵蚀, 成为泥石流铲刮效应进一步增强的原因。

表 2 同坝高时翻坝泥石流极限侵蚀冲刷深度

编号	重度 $\gamma / (\text{t/m}^3)$	坝高 $H/\text{m}$	规模 $V/\text{m}^3$	极限侵蚀冲刷深度 $h_i/\text{cm}$	铲刮距离 $x/\text{cm}$
1	1.2	0.38	0.20	7.4	/
2	1.4	0.38	0.24	9.1	/
3	1.6	0.38	0.08	4.5	362
4	1.8	0.38	0.12	5.7	321
5	2.0	0.38	0.16	2.1	162

表 3 同重度时翻坝泥石流极限侵蚀冲刷深度

编号	重度 $\gamma / (\text{t/m}^3)$	坝高 $H/\text{m}$	规模 $V/\text{m}^3$	极限侵蚀冲刷深度 $h_i/\text{cm}$	铲刮距离 $x/\text{cm}$
1	1.6	0.38	0.08	4.5	318
2	1.6	0.32	0.12	5.5	336
3	1.6	0.26	0.16	4.9	382
4	1.6	0.50	0.20	7.4	/
5	1.6	0.44	0.24	8.4	/

表 4 同规模时翻坝泥石流极限侵蚀冲刷深度表

编号	重度 $\gamma/(\text{t}/\text{m}^3)$	坝高 $H/\text{m}$	规模 $V/\text{m}^3$	极限侵蚀冲刷深度 $h_i/\text{cm}$	铲刮距离 $x/\text{cm}$
1	1.2	0.44	0.16	8.0	/
2	1.4	0.50	0.16	8.4	/
3	1.6	0.26	0.16	4.9	473
4	1.8	0.32	0.16	4.4	309
5	2.0	0.38	0.16	2.1	142

### 3.3 翻坝泥石流侵蚀量变化特征

将试验的侵蚀铲刮数据导入 CAD，得到侵蚀量模型的三维点坐标，运用 CATIA 软件形状设计中的 Sketch Tracer 功能进行三维点坐标定位，通过 CATIA 零件设计功能中的多截面几何体功能进行三维建模(图 16)，从而获取翻坝泥石流对沟道物源的侵蚀量。

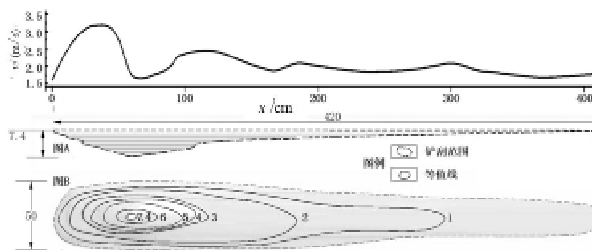


图 16 侵蚀量模型图(图 A 为侧视图，图 B 为俯视图)

由图 17 可知，坝高  $H$  一定时，稀性泥石流翻坝后侵蚀量随泥石流重度  $\gamma$  的增大而增大，粘性泥石流则相反。初始泥石流规模  $V$  的增加虽使泥石流翻坝后侵蚀量增加，但以  $\gamma = 1.2 \text{ t}/\text{m}^3$ ， $V = 0.08 \text{ m}^3$ 、 $\gamma = 2.0 \text{ t}/\text{m}^3$ ， $V = 0.16 \text{ m}^3$  两组为例，侵蚀量分别为  $0.0297 \text{ m}^3$ 、 $0.0062 \text{ m}^3$ ，表明泥石流初始规模对翻坝泥石流侵蚀量的影响显著小于泥石流重度  $\gamma$ 。

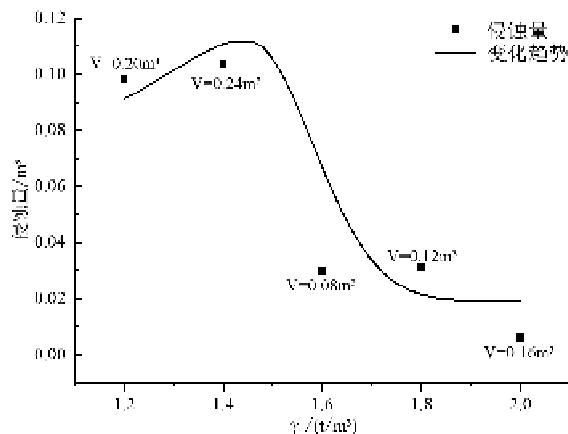


图 17 同一坝高下翻坝泥石流侵蚀量沿程变化( $H = 0.38 \text{ m}$ )

由图 18 可知，重度  $\gamma$  一定时，泥石流翻坝后侵蚀量随坝高  $H$  与规模  $V$  乘积的增大而增大。因规模增大泥石流入沟后能量会得到持续补充，流体的侵蚀铲刮能力不断增强，致铲刮范围及铲刮量增加。坝高的增加虽使泥石流翻坝后动能增大，侵蚀量值增大，但以  $H = 0.38 \text{ m}$ ， $V = 0.08 \text{ m}^3$ 、 $H = 0.32 \text{ m}$ ， $V = 0.12 \text{ m}^3$  两组试验为例，侵蚀量分别为  $0.0297 \text{ m}^3$ 、 $0.0401 \text{ m}^3$ ，表明泥石流规模  $V$  对翻坝泥石流侵蚀量的影响显著大于坝高  $H$ 。

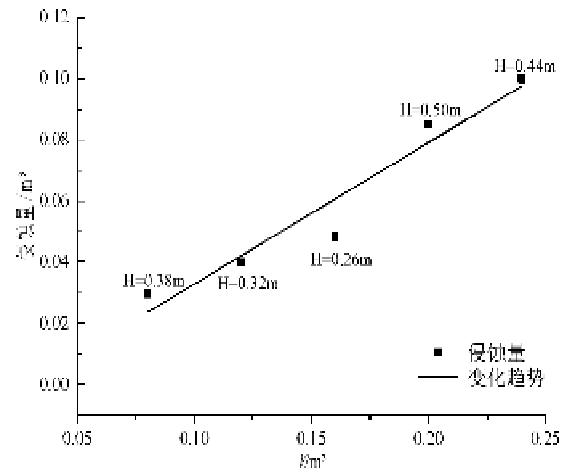


图 18 同一重度下翻坝泥石流侵蚀量沿程变化( $\gamma = 1.6 \text{ t}/\text{m}^3$ )

由图 19 可知，规模一定  $V$  时，稀性泥石流翻坝后侵蚀量随泥石流重度  $\gamma$  的增大而增大，粘性泥石流翻坝后侵蚀量则相反。这与稀性泥石流流体中固体物质含量有关，物质含量越高，重度  $\gamma$  越大，流体沿程运移过程中挟砂侵蚀的能力越强，侵蚀量越大；粘性泥石流由于粘性的存在，增强了土体的抗剪切能力，削弱了泥石流下切侵蚀的规模，因而重度越大，侵蚀量值越小。以  $\gamma = 1.6 \text{ t}/\text{m}^3$ ， $H = 0.26 \text{ m}$ 、 $\gamma = 2.0 \text{ t}/\text{m}^3$ ， $H = 0.38 \text{ m}$  两组工况为例，侵蚀量为  $0.0484 \text{ m}^3$ 、 $0.0062 \text{ m}^3$ ，表明重度  $\gamma$  较坝高  $H$  对翻坝后泥石流的铲刮量影响更大。

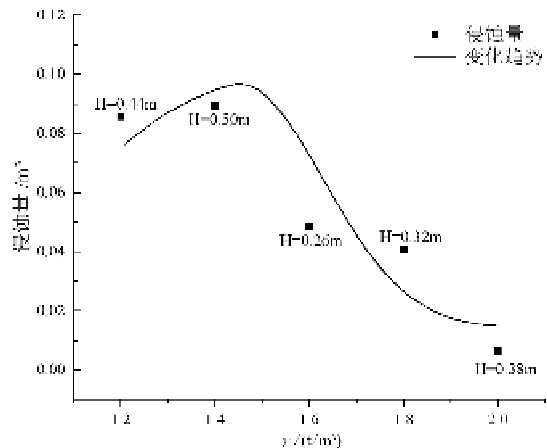


图 19 同一规模下翻坝泥石流侵蚀量沿程变化( $V = 0.16 \text{ m}^3$ )

## 4 多元回归分析

通过多元线性回归方法，分析灾害因子的变异数，估计潜在泥石流方差。计算出的方差值可

用于评估影响比, 并为每个影响因素赋予一个评估值。假设  $Y$  是一个变量,  $X_i (i = 1, 2, 3 \dots, k)$  为自变量。设变量  $Y$  的期望值为自变量的线性函数, 根据自变量随机误差  $e$  对误差精度  $X_i$  修正, 通过最小二乘和偏微分进行变换, 最终得到多元线性回归方程。

$$Y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + \dots + b_k x_k, \quad (4)$$

式中: 系数  $b_0, b_1, b_2 \dots$  是通过最小化由数据集的侵蚀量(冲出量)近似产生的平方和确定的。 $x_1, x_2, x_3 \dots$  分别代表各影响因素(泥石流重度、坝体高度、泥石流规模)。通过 matlab 对变量进行多元线性回归分析, 得到翻坝泥石流极限侵蚀冲刷深度( $Y$ )与控制因素(重度、坝高及泥石流规模)之间的最佳线性关系。

稀性泥石流:

$$Y = 0.47 - 0.31x_1 + 0.02x_2 + 0.17x_3, R^2 = 0.8933. \quad (5)$$

粘性泥石流:

$$Y = 0.41 - 0.21x_1 + 0.02x_2 + 0.07x_3, R^2 = 0.7838. \quad (6)$$

翻坝泥石流侵蚀量( $Y$ )与控制因素(重度、坝高及泥石流规模)之间的最佳线性关系。

稀性泥石流:

$$Y = 0.25 - 0.52x_1 + 0.03x_2 + 0.44x_3, R^2 = 0.8933. \quad (7)$$

粘性泥石流:

$$Y = 0.88 - 0.64x_1 + 0.02x_2 + 0.33x_3, R^2 = 0.7838. \quad (8)$$

由于室内模型试验本身的尺缩效应, 产生误差难以忽略。通过对比验证, 由表 5、表 6 可知, 计算值均高于野外调查实际值, 其原因在于试验过程中没有考虑护坦在泥石流翻坝后的消能防冲作用以及泥石流与沟道物源摩擦碰撞作用, 试验过程中虽亦未考虑护坦因素的影响, 但为尽量减小试验误差, 在坝下 0.5 m 范围内对沟道物源进行适当硬化, 同时由于试验设备及场地的限制, 试验过程中会有少许泥石流流体遗留于搅拌料斗及加速段模型槽内, 因而导致试验过程中的泥石流翻坝初始规模减少, 对沟道物源的侵蚀铲刮相应减少, 这也是计算值于大实际值的原因。在今后工作中可进行原位试验, 尽可能消除尺寸效应对试验结果的影响, 探究泥石流翻坝后铲刮效应。

表 5 翻坝泥石流极限侵蚀冲刷深度对比验证分析

参数			极限侵蚀冲刷深度 $H/m$		
泥石流重度 $\gamma/(t/m^3)$	初始规模 $V/m^3$	坝高 $H/m$	计算值	实际值	误差/ %
1.8	52	19	4.05	3.7	8.6

表 6 表翻坝泥石流侵蚀量对比验证分析

参数			侵蚀量 $V_1/m^3$		
泥石流重度 $\gamma/(t/m^3)$	初始规模 $V/m^3$	坝高 $H/m$	计算值	实际值	误差/ %
1.8	52	19	17.268	16.8	2.7

## 5 结论

本文以锄头沟“8.20”泥石流为原型, 结合野外调查, 基于室内模型试验, 探究泥石流翻坝后沿程流速变化、极限侵蚀冲刷深度、侵蚀量等变化规律及通过观测沿程运移侵蚀铲刮现象得出以下结论:

(1) 翻坝泥石流流速变化主要呈现“翻坝滞空加速 + 入沟触底减速 + 涌浪飞溅加速 + 波动减速”的规律, 但各阶段流速变化在不同工况下的主控

因素差异明显。坝高一定时, 泥石流流体容重较于规模影响作用更大; 容重一定时, 泥石流规模起决定性作用; 规模一定时, 泥石流容重对泥石流流体沿程流速的影响效果更为明显。

(2) 翻坝泥石流极限侵蚀冲刷深度及侵蚀量均呈现随泥石流容重的减小、坝高及规模的增大而增大的规律。铲刮后沿程形态变化表现为“全截面淤积( $\gamma \geq 1.8 t/m^3$ ) + 入沟冲坑 + 沟道下切开槽 + 沟口前冲淤堆积”。

(3) 通过多元线性回归分析, 建立泥石流重度、坝高、规模与最大铲刮深度与侵蚀量的线性关系, 得到两者的定量统计模型, 与锄头沟“8.20”泥石流对比验证, 两者误差分别为 8.6%, 2.7%, 证明表达式在适用范围内具有一定的实用性。

## 参考文献:

- [1] 李宁, 唐川, 卜祥航, 等. “5·12”地震后汶川县泥石流特征与演化分析[J]. 工程地质学报, 2020, 28(6): 1233-1245.
- [2] 陆鹏源, 侯天兴, 杨兴国, 等. 滑坡冲击铲刮效应物理模型试验及机制探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(6): 1225-1232.
- [3] 李祥龙, 唐辉明, 熊承仁, 等. 基底刮铲效应对岩石碎屑流堆积过程的影响[J]. 岩土力学, 2012, 33(5): 1527-1534, 1541.
- [4] LIU S, YOU Y, ZHANG G, et al. Calculation of the ultimate depth of a scour pit after debris flow through drainage canal ribs[J]. Journal of Mountain Science, 2016, 13(2): 246-254.
- [5] LEBZI M A, COMITI F. Local scouring and morphological adjustments in steep channels with check-dam sequences[J]. Geomorphology, 2003, 55(1-4): 97-109.
- [6] 张友谊, 钟磊, 樊晓一, 等. 岷江河谷锄头沟震后泥石流致灾模式[J]. 山地学报, 2021, 39(5): 756-766.
- [7] ABANCÓ C, HURLIMANN M. Estimate of the debris-flow entrainment using field and topographical data[J]. Natural Hazards, 2014, 71(1): 363-383.
- [8] 余斌, 赵惠林. 粘性泥石流运动模型的实验研究[J]. 自然灾害学报, 1999, 8(2): 81-87.
- [9] OKURA Y, KITAHARA H, SAMMORI T, et al. The effects of rockfall volume on runoff distance[J]. Engineering Geology, 2000, 58(2): 109-124.
- [10] D'AGOSTINO V, FERRO V. Scour on alluvial bed downstream of grade-control structures[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 130(1): 24-37.
- [11] PAN L H, WANG R, HUANG J, et al. Study on the ultimate depth of scour pit downstream of debris flow sabo dam based on the energy method[J]. Engineering Geology, 2013, 160: 103-109.
- [12] CHING H Y, CUI P, ZHOU G, et al. Experimental study of debris flow caused by domino failures of landslide dams[J]. International Journal of Sediment Research, 2014, 29(3): 414-422.
- [13] DE HAAS T, VAN WOERKOM T. Bed scour by debris flows: experimental investigation of effects of debris-flow composition[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2016, 41(13): 1951-1966.
- [14] IMAIZUMI F, TSUCHIYA S, OHSAKA O. Field observations of debris-flow initiation processes on sediment deposits in a previous deep-seated landslide site[J]. Journal of Mountain Science, 2016, 13(2): 213-222.
- [15] O'BRIEN J S, JULIEN P Y, FULLERTON W T. Two-dimensional water flood and mudflow simulation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1993, 119(2): 244-261.
- [16] 王骏, 丁明涛, 黄英. 基于 FLO-2D 的联合溪沟泥石流运动特征及防治对策[J]. 西南科技大学学报, 2016, 31(2): 59-66.
- [17] LIU B, HU X W, HE K, et al. Numerical simulation on post-earthquake debris flows: a case study of the Chutou gully in Wenchuan, China[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 570(2): 022044.
- [18] 樊赞赞, 王思敬, 王恩志, 等. 泥石流沿程侵蚀动力过程模拟分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(S2): 4146-4152.

(下转第 86 页)

disasters by using the accumulated rainfall in the same time period. In order to explore the meteorological forecast, monitoring and early warning indicators suitable for geological disasters in Shaanxi Province, based on data 4060 landslides, disaster-causing rainfall data and real-time monitoring data from 2001 to 2019, the correlation between rainfall and geological disasters, and the relationship between rainfall and soil moisture content and geological disasters in different areas of Shaanxi Province are analyzed. Suggestions on meteorological forecast and early warning indicators of geological disasters in Shaanxi Province are put forward. The research results provided a scientific basis for carrying out meteorological forecast and early warning of geological disasters in Shaanxi Province.

**Keywords:** geological disasters; rainfall; soil moisture content; forecast and early warning; Shaanxi

(上接第 81 页)

- [19] LEE K, JEONG S. Large deformation FE analysis of a debris flow with entrainment of the soil layer[J]. *Computers and Geotechnics*, 2018, 96: 258–268.
- [20] LEE K, JEONG S. Study on the effect of entrainment on the behavior of debris flows using a 3D Coupled Eulerian – Lagrangian

finite element method[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2022, 81(4): 164.

- [21] 李宁, 唐川, 史青云, 等. 九寨沟震区“6·21”泥石流成因与致灾机制研究[J]. *工程地质学报*, 2022, 30(3): 740–750.

## Study on Scraping Effect of Dam – overtopping Debris Flow Based on Model Test

ZHANG Youyi<sup>1</sup>, GU Weiyang<sup>1</sup>, HUANG Chen<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China; 2. Southwest Petroleum University, Chengdu 610000, China)

**Abstract:** Debris flow disasters occurred frequently in the earthquake area after Wenchuan “5.12” earthquake. Debris dam project played an important role in disaster prevention and mitigation of debris flow disaster. However, when the conditions limit the difficulty of dredging in the sand dam reservoir area, after the sand dam is full, the overtopped debris flow will aggravate the erosion and scraping effect on the channel source. This paper takes the “8.20” dam – turning debris flow Chutou gully in strong earthquake area as the research object. On the basis of detailed field investigation, UAV aerial photography and remote sensing image data collection, 25 groups of orthogonal experiments with different factors ( debris flow bulk density, dam height and scale) are carried out based on indoor model test. Research shows that: (1) The velocity change of dam – overtopping debris flow goes through four stages: flat throwing acceleration→bottoming deceleration→surge splash acceleration→fluctuating deceleration. With the change of bulk density, dam height and scale of debris flow, the velocity along the way changes. The smaller the bulk density, the greater the dam height and scale and the greater the velocity along the way. (2) The ultimate erosion scour depth of dam – turning debris flow increases with the decrease of debris flow bulk density and the increase of dam height and scale. The morphological change of the channel along the path after scraping is shown as “full – section siltation ( bulk density  $\geq 1.8 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$ ) + gully erosion pit + gully undercut + gully front erosion and deposition accumulation”. (3) When the dam height and scale are fixed, the erosion amount of dilute debris flow increases with the increase of bulk density, while the viscous debris flow is the opposite; when the bulk density is constant, the erosion amount of debris flow dam increases with the increase of the initial scale of debris flow. The research results could provide a reference for erosion mechanism analysis and debris flow disaster protection engineering design after debris flow dam.

**Keywords:** chutou gully; scraper erosion; erosion amounts; indoor model test