

引用格式:张友谊,钟磊,樊晓一,顾成壮,田述军.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.

ZHANG Youyi, ZHONG Lei, FAN Xiaoyi, GU Chengzhuang, TIAN Shujun. The disaster model of debris flows after earthquake at Chutou gully of Minjiang River Valley, China [J]. Mountain Research, 2021, 39(5):756-766.

岷江河谷锄头沟震后泥石流致灾模式

张友谊¹, 钟磊¹, 樊晓一², 顾成壮¹, 田述军¹

(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 土木工程与测绘学院, 成都 610500)

摘 要: 锄头沟位于岷江河谷汶川县绵虬镇羌锋村,是汶川地震震后大型活跃型泥石流沟,震后大规模泥石流活动造成锄头沟泥石流拦挡工程失效,多次淤积损毁都汶高速公路 G317 和国道 G213。震后泥石流治理工程对泥石流的发展起到一定遏制作用,也改变了泥石流的致灾模式。本文通过实地调查与数据分析,探讨了 2019 年 8.20 锄头沟泥石流的成因及对工程设施的致灾模式,提出了拦挡坝对翻坝泥石流能力的放大机理。研究表明:(1) 锄头沟 8.20 泥石流灾害是由各支沟暴发、主沟铲刮而形成的大规模泥石流,受侵蚀铲刮效应影响其冲出规模放大约 44.2%;(2) 锄头沟泥石流致灾模式主要为:翻坝加速、侵蚀铲刮、侧蚀强烈、弯道雍高、磨蚀槽底、堵断桥涵、冲淤民房;(3) 锄头沟泥石流现仍处于发展壮年期,在未来 10~20 年内遇强降雨仍会暴发大规模泥石流;(4) 翻坝泥石流的破坏能力和拦砂坝坝高及过坝运动速度密切相关,当初速度为 2 m/s、坝高 25 m 时,泥石流入射速度是初速度的 11.1 倍,故有效坝高较高、速度较低的翻坝泥石流对坝下的沟道仍具有很强的冲蚀能力;(5) 当过坝泥石流初速度一定时,有效坝高对翻坝泥石流的水平距离的增幅呈下降趋势,这可为坝下副坝位置的选取或护坦尺寸的设定提供科学依据。

关键词: 汶川地震;8.20 泥石流;放大效应;锄头沟;

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

2008 年汶川 5.12 地震在强震区形成大量固体松散物质,在降雨激发下,泥石流丛生,呈现规模大、范围广、历时长、破坏强等特点。震后泥石流成为国内外泥石流研究关注的热点。十多年来,针对震后泥石流的激发临界雨强、运动规律、成因机理、活跃周期、监测预警等方面,国内外学者著述颇丰^[1-4]。观测与实验研究已经证实,震后泥石流的激发雨强的数值低于震前,并随着年时持续走低,最终将恢复到震前水平。对于震后泥石流恢复到震前水平的年限,以及震后泥石流的生命周期,不同学者对此有不同判断^[5-8],认为震后汶川泥石流灾害将持续 5~30 年,以 4~5 年为一个周期,震荡式衰减并恢复到

震前水平。

锄头沟震后多次暴发大规模泥石流,淤积和冲毁都汶高速公路 G317 和国道 G213,造成严重人员伤亡和经济损失^[9-13]。锄头沟沟口泥石流防治工程数次损毁,工程防治问题突出。文献^[9-13]表明:震后历次大规模泥石流成因和致灾模式并非相同,震后沟谷型泥石流的暴发除和降雨条件相关外,亦与物源储量的多少及物源种类密切相关。震后泥石流的物源,5 年内参与泥石流活动多为崩滑碎屑体,且主、支沟并发。随着治理工程的实施及多次雨季的冲刷搬运作用,转变为以主沟暴发且以沟道物源沿程补给的动力学过程为主。虽然工程治理对泥

收稿日期(Received date):2020-12-13;改回日期(Accepted date):2021-05-28

基金项目(Foundation item):国家重点研发计划(2018YFC1505401);国家自然科学基金面上项目:(41971214,41877524)。[National Key Research and Development Plan (2018YFC1505401); National Natural Science Foundation of China (41971214, 41877524)]

作者简介(Biography):张友谊(1980-),男,博士,副教授,主要研究方向:工程地质。[ZHANG Youyi (1980-), male, Ph.D., associate professor, research on geological engineering] E-mail:53437391@qq.com

泥石流的发展起到一定遏制作用,泥石流的发育特征演变与致灾模式有何规律,工后(实施治理工程后)泥石流的活动破坏模式如何,目前还有待于进一步研究。本研究开展了野外调查及资料收集^[14-16],分析了锄头沟泥石流致灾条件、致灾模式,探讨了拦挡坝对翻坝泥石流能力的放大机理。本研究结论为强震区泥石流预测预防及工程治理提供参考。

1 锄头沟泥石流概况

锄头沟位于汶川县绵虬镇羌锋村,为岷江右岸一级支流,距绵虬场镇约 1.5 km,都汶高速公路桩号 K93+500,沟口地理坐标为东经 103°28′46.5″,北纬 31°20′28.0″。2019 年 8 月 20 日凌晨 2 时许,锄头沟暴发泥石流,约 $75 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的固体物质从沟口冲出,凌晨 3 点左右岷江河道发生严重堵塞,回水长度向上游约 1.6 km,水位壅高至加油站老桥附近,回水高差达 14 m,持续时间约 2 h。泥石流导致羌锋村 10 余户房屋被掩埋损毁,沟口都汶高速公路被淤埋约 200 m,国道 G213 线高店大桥被冲断长达 122 m(图 1)。该次特大泥石流灾害造成锄头沟泥石流拦挡工程失效,泥石流翻坝、防护堤及护岸墙等防护工程损毁、排导槽局部冲毁、居民房屋被掩埋,沟道中下游被抬高 5~10 m,造成上亿元的经济损

失。据调查,泥石流发生前两天的前期降雨量为 150 mm,当日 0:00—7:00 降雨量 65 mm,短历时集中暴雨是此次泥石流发生的主要诱因。

锄头沟震后多次发生泥石流灾害(表 1),其中 1976 年、1999 年两次规模较小,2013 年、2014 年、2019 年、2020 年四次规模较大,并造成严重经济损失。

2 锄头沟 8.20 泥石流成因

2.1 有利的沟谷条件

锄头沟流域形态呈叶形,流域面积 21.7 km^2 ,主沟长 8.9 km,平均纵坡降 184‰。流域发育支沟 16 条,其中 5 条较大支沟参与 8.20 泥石流活动,其基本特征见表 2。各支沟普遍沟谷狭窄,纵坡陡峻,支沟沟道平均纵坡均在 350‰以上。主支沟岸坡坡度为 35°~45°,局部呈陡崖状,沟谷上游纵坡较大,有利于降雨的汇集,为泥石流的起动提供动力条件。

2.2 充沛的降雨条件

研究区属大陆性半干旱季风气候区,据汶川气象站 23 年实测(图 2),多年平均降雨 526.3 mm,最大年降水量为 648.6 mm。据调查,2019 年 8 月 19 日 0:00 至 20 日 7:00 的累积降雨量为 150 mm,20 日当天零点到七点降雨量达 65 mm,具体每小时



图 1 锄头沟 8.20 泥石流灾害沟口(2019-12-07 摄)

Fig. 1 The gully mouth of debris flow on August 20 of Chutou gully (Photo taken on December 7, 2019)

表 1 震后锄头沟泥石流灾害史统计表
Tab.1 List of post – shock debris flow at Chutou gully

爆发日期	固体冲出量/m ³	规模	治理工程情况	危害及损失
2013 – 07 – 10	40 × 10 ⁴	大型	2008 年震后已建的拦挡、排导工程完全损毁。	39 户农房严重损毁,3 人死亡、1 人重伤、1 人失踪。造成都汶高速公路损坏 5 处,公路被淤埋 100 m,中断交通。
2014 – 07 – 15	30 × 10 ⁴	大型	7.10 灾害后新建 1#、2#拦砂坝满库,沟口排导工程尚未完工。	未造成人员伤亡,泥石流淤堵桥洞后淹没高速。
2019 – 08 – 20	75 × 10 ⁴	特大型	1#、2#拦砂坝被淤满,护岸墙、防护堤损毁,排导槽被局部冲毁。	10 余户房屋被掩埋损毁,未造成人员伤亡,都汶高速公路被淤埋约 200 m,泥石流堵塞岷江导致其断流 2 小时,G213 线高店大桥被冲毁 122 m。
2020 – 08 – 17	30 × 10 ⁴	大型	1#拦砂坝清库 30 万方后再次被淤满,排导槽槽底磨蚀破坏。	未造成人员伤亡,都汶高速 G317 线被淹没断道。

表 2 锄头沟各沟域基本特征表^[10]
Tab.2 Table of basic characteristics of Chutou gully area^[10]

编号	沟名	汇水面积/km ²	沟长/km	最高高程/m	最低高程/m	高差/m	平均比降/‰
1	锄头沟(主沟)	21.70	8.90	4130.00	1178.00	2952.00	184.00
2	小沟	3.56	3.60	3113.00	1520.00	1593.00	371.00
3	簇头沟	2.89	3.27	3543.00	1955.00	1588.00	549.00
4	蚂蝗沟	1.46	1.55	3152.00	1784.00	1368.00	720.00
5	麻地漕沟	1.04	1.28	2835.00	1656.00	1179.00	737.00
6	大塘沟	1.25	1.33	2943.00	2004.00	939.00	626.00

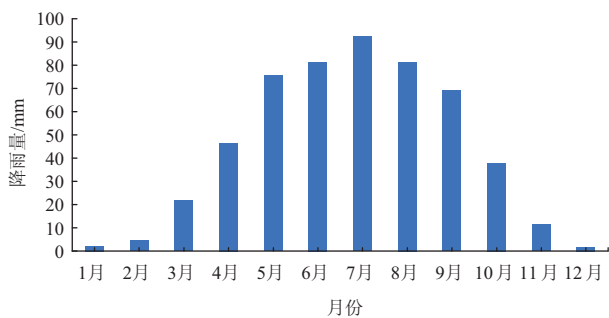


图 2 汶川县降雨柱状图

Fig.2 Rainfall histogram in Wenchuan County

降雨量及累计降雨量(图 3)。8.20 泥石流灾害的激发雨强为 24.2 mm/h,区内雨强达到激发泥石流的降雨条件^[9]。

2.3 丰富的物源条件

在长期地质构造、风化剥蚀作用下,锄头沟流域松散固体物源丰富,主要有崩滑型、沟道堆积型及坡面型松散物源。受汶川地震影响,在 2019 年 8 月 19 日—20 日强降雨激发下,各主要支沟相继发生泥石流,泥石流堆积物堆积于支沟沟口或堵塞主沟或

在主沟洪水冲刷作用下参与泥石流运动。

通过对 8.20 泥石流前后流域内的物源统计及对比可知(表 3),8.20 前物源总量 $1231.86 \times 10^4 \text{ m}^3$,动储量 $244.47 \times 10^4 \text{ m}^3$,2014 年 7.15 泥石流冲出量约 $30 \times 10^4 \text{ m}^3$,2019 年 8.20 泥石流冲出量约 $75 \times 10^4 \text{ m}^3$,而 8.20 后物源总量 $1426.10 \times 10^4 \text{ m}^3$,动储量 $293.46 \times 10^4 \text{ m}^3$,说明自 2014—2019 年,锄头沟新增物源总量达 $299.24 \times 10^4 \text{ m}^3$,动储

表 3 分类物源对比表^[17]

Tab.3 Comparison table of classification provenance^[17]

物源 类型	“8.20”前(据 2013 年 10 月勘查资料)		“8.20”后	
	总储量/m ³	动储量/m ³	总储量/m ³	动储量/m ³
崩滑堆积	355.78	126.64	419.88	154.04
沟道堆积	774.08	107.63	870.22	128.82
坡面侵蚀	102.00	10.02	136.00	10.60
总计	1231.86	244.47	1426.10	293.46

量增加 $154 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。因此该泥石流沟仍处于活跃发展期,在强降雨作用下,未来 10~20 年内暴发大规模泥石流可能性大,如 2020 年 8 月 17 日锄头沟再次爆发大规模泥石流,清库后的 1#拦砂坝被约 $30 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的泥石流固体物质再次淤满。因此锄头沟具备泥石流暴发的丰富固体松散物源条件。

3 8.20 泥石流致灾模式

通过对沟域内既有防治工程、威胁对象损毁情况及泥石流成因的调查分析表明,锄头沟 8.20 泥石流是由于强降雨引发各支沟物源汇入主沟后在上游洪水作用下起动的。泥石流冲出物质在相继淤满 2# 拦砂坝、1#拦砂坝后,翻坝向下游铲刮运动,沿途冲击损毁护坦、下切侵蚀沟道、侧蚀损毁护岸墙及防护堤、磨蚀排导槽、淤埋民房建筑及道路,并堵塞桥

涵、冲断桥面,其具体致灾模式如下所述。

3.1 翻坝加速、冲蚀加剧

锄头沟流域主要拦挡工程为 2014 年修建的两座拦砂坝(图 4a、图 5a)和一座归流坝,拦砂坝的坝体尺寸及库容见表 4。据调查,两座拦砂坝坝体现状整体性及稳定性均较好,但其护坦均存在不同程度毁坏(图 4b、图 6),主要以翻坝泥石流的冲击、下切侵蚀破坏为主。

2#拦砂坝有效坝高 8 m,坝下基础下切侵蚀深度 4 m(图 4b),护坦完全损毁,坝下游沟道内松散物质下切侵蚀剧烈(图 7、图 8),沿程侵蚀区长约 340 m,面积约 8830 m^2 ,平均下蚀深度约 7 m,刮铲方量约 6.2 万 m^3 ;1#拦砂坝有效坝高 19 m,坝下护坦侵蚀深约 3 m,下游沿程铲刮长 1.55 km,侵蚀铲刮区面积约 $33\,720 \text{ m}^2$,平均下蚀深度 5 m,侵蚀方量约 16.8 万 m^3 。由此可见,拦挡工程在 8.20 泥石

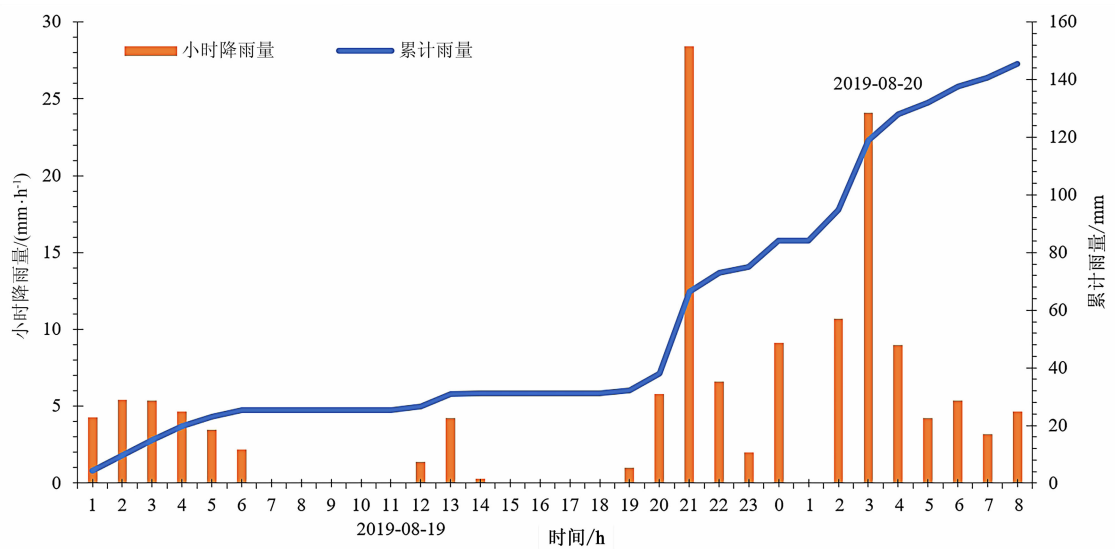


图 3 锄头沟 8.20 近两日降雨量^[9]

Fig. 3 Rainfall of Chutou gully 8.20 in recent two days^[9]

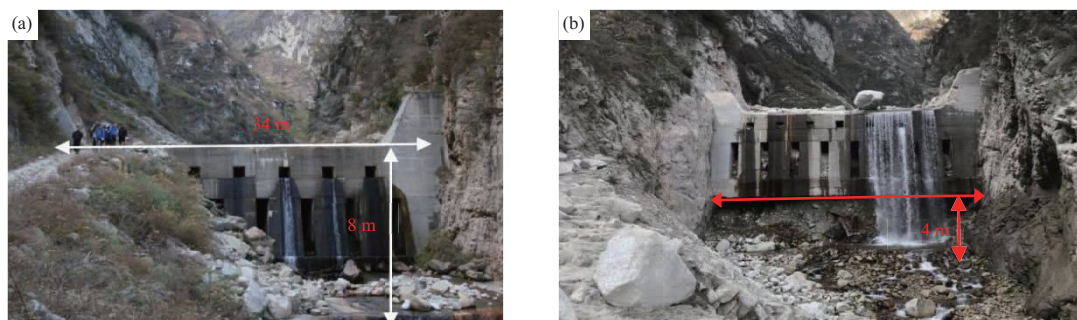


图 4 2#拦砂坝及护坦:(a)8.20 前;(b)8.20 后损毁

Fig. 4 2# Sand bar and retaining dam:(a) Before August 20;(b) Damage after August 20

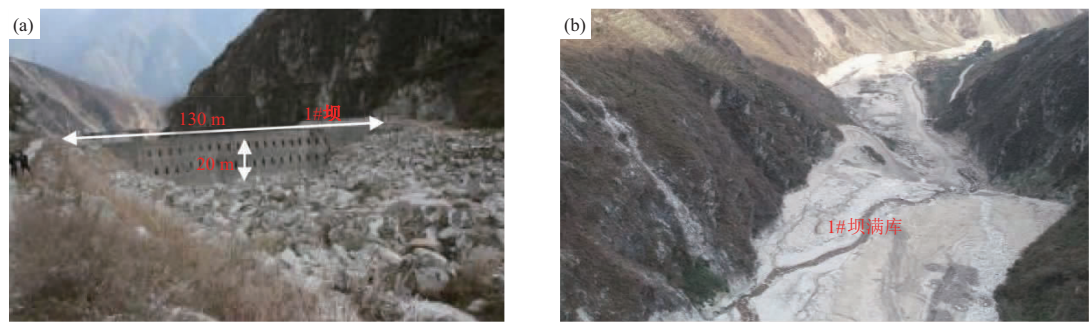


图 5 1#拦砂坝库容:(a)8.20 前;(b)8.20 后满库
Fig. 5 1# Dam reservoir:(a) Before August 20;(b) Full storage after August 20

表 4 各拦挡坝坝体结构尺寸

Tab.4 Structural dimensions of each retaining dam

分项工程	坝顶标高/m	坝底标高/m	基底标高/m	坝高/m	有效坝高/m	基础埋深/m	坝顶长度/m
1#拦砂坝	1437.80	1415.80	1413.80	22.00	19.00	桩基础	130.00
2#拦砂坝	1524.90	1512.90	1509.90	15.00	8.00	3.00	34.00
分项工程	坝顶厚度/m	坝底厚度/m	回淤面积/m ²	回淤平均深/m	库容/m ³	防揭底冲刷量/m ³	稳拦物源总量/m ³
1#拦砂坝	3.00	20.30	26 707.00	12.00	320 484.00	60 150.50	380 634.50
2#拦砂坝	2.00	9.00	5193.00	4.00	20 774.40	13 160.00	35 934.40
合计	/	/	31 900.00	16.00	341 258.40	73 310.50	416 568.90



图 6 1#拦砂坝护坦冲刷侵蚀悬空(8.20 后)
Fig.6 1# Sand Barrage Protector Erosion Suspension
(after August 20)



图 7 1#拦砂坝下游沟道铲刮侵蚀(8.20 后)
Fig. 7 Spade erosion of gully downstream of No. 1 dam
(after August 20)

流过程中虽起到较好拦挡作用,但由于泥石流规模大,拦砂坝库容不足,泥石流翻坝后获得较大动能,对原沟道松散堆积物侵蚀铲刮效应明显,使翻坝泥石流流量及规模产生放大效应^[18-22]。8.20 锄头沟泥石流冲出量按 75 万方计算,泥石流经翻坝下蚀铲刮后冲出规模放大约 44.2%。

3.2 侧蚀强烈、防护工程损毁

锄头沟域内防护工程主要护岸墙及防护堤工程,护岸墙位于 1#拦砂坝下游左岸,长 128.9 m,基

础埋深 2.0 m,护岸高度 6.0 m。防护堤位于护岸墙下游沟道左岸,长度为 572.3 m,顶宽 0.8 m,底宽 1.8 m,高 5.0 m,基础埋深 2.0 m。受 8.20 泥石流的侧蚀作用,护岸墙上游段损毁长约 18.8 m,导流丁坝被冲断;防护堤堤外被泥石流堆积物淤平,堤内由于侧蚀及沟道下切导致基础悬空(图 9),损毁段长约 78.8 m。防护堤等防护工程是震后泥石流治理最为常用的工程措施之一,类似的损毁模式^[23-25]在强震区泥石流治理工程中屡见不鲜。



图 8 1#拦砂坝下游沟道铲刮侵蚀(8.20后)

Fig. 8 Spade erosion of gully downstream of No. 1 dam (after August 20)

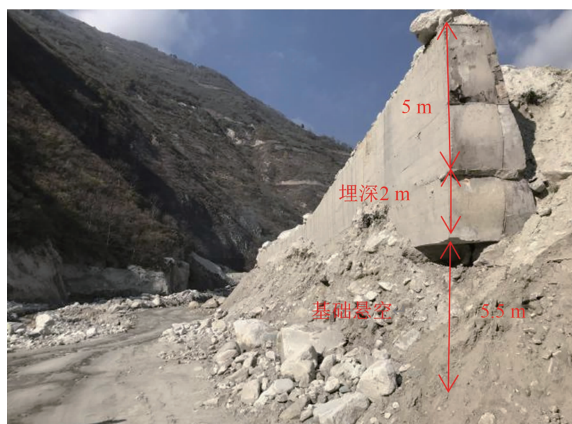


图 9 防护堤基础悬空

Fig. 9 The foundation of the protective dike is suspended

3.3 排导槽弯道雍高, 磨蚀槽底

排导槽位于锄头沟沟口, 总长 404.3 m, 侧墙顶宽 0.8 m, 底宽 1.7 m, 高 5.5 m, 基础埋深 1 m。调查期间槽内无泥石流堆积物, 起到较好的束流排导作用。震区排导槽的损毁模式通常为槽底、侧墙磨蚀→槽底损毁→侧墙悬空→侧墙失稳损毁, 在 8.20 泥石流作用下锄头沟沟口排导槽下游段损毁长约 140 m (图 10), 侧墙及槽底磨蚀、损毁严重。排导槽弯道处 (图 11), 在泥石流的爬高及冲击作用下, 侧墙被冲断, 泥石流翻越排导槽后对居民建筑造成淤埋破坏 (图 12)。



图 10 槽底损坏、侧墙磨蚀

Fig. 10 Trough bottom damage, side wall abrasion



图 11 弯道雍高翻槽

Fig. 11 Bend heightening over trough



图 12 民房被冲毁淤埋

Fig. 12 Houses destroyed and silted up

3.4 堵断桥涵、冲淤民房道路

8.20 泥石流从排导槽出口冲出的固体物质, 在淤满堵塞 G317 都(都江堰)汶(汶川)高速涵洞后, 冲断国道 G213 高店大桥, 堵塞岷江, 造成岷江断

流约 2 小时。据现场调查,该次泥石流淤埋高速公路路面长 200 m,高店大桥被冲毁段长约 122 m (图 13)。



图 13 堵塞涵洞、冲断道路桥梁

Fig. 13 Blocked culverts, washed out roads and bridges

4 讨论与结论

4.1 讨论

(1)根据震后数次群发性泥石流发育特征资料分析(2008 年 9.24 泥石流、2010 年 8.13 泥石流、2013 年 7.10 泥石流及 2019 年 8.20 泥石流)^[26-28],随着年时的持续,震区泥石流发育演化具有由主、支沟同时爆发→主沟爆发为主→支沟群发主沟放大的特征。

(2)震区泥石流治理工程的实施改变了泥石流的成灾模式。拦砂坝等拦挡工程满库后若清库不及时,一旦暴发大规模泥石流,则造成翻坝。翻坝泥石流具有强大的动能,其下切侵蚀和侧蚀能

力更强,泥石流的规模及冲出量由于铲刮效应而放大,具有巨大的破坏能力。因此,应关注翻坝泥石流铲刮效应运动机制研究,拦砂坝工程应加强库容监测并及时清库,以确保拦挡工程有足够的库容。

(3)(1)翻坝泥石流的运动,按其运动特征可分为:滞空加速段、侵蚀铲刮段及减速停淤段三个运动阶段(图 14 所示)。其中滞空加速段属平抛运动,水平运动距离、入射速度及入射角只与拦砂坝有效坝高和翻坝初速度有关,根据平抛运动方程可知(未考虑泥深):

$$\text{水平方向位移: } S = V_0 \sqrt{2Hg} \quad (1)$$

$$\text{入射速度: } V = \sqrt{V_0^2 + 2Hg} \quad (2)$$

入射角(入射速度方向与水平面夹角):

$$\tan \theta = \sqrt{2Hg}/V_0 \quad (3)$$

式中, V_0 为翻坝初速度($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); H 为有效坝高(m); g 为重力加速度($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)。

震后泥石流治理工程中拦砂坝高度一般在 5 ~ 30 m (高度小于 5 m 为谷坊坝,汶川震区已治理拦砂坝工程最大坝高 25 m),泥石流速度一般小于 10 m/s,结合上述滞空加速阶段的物理模型,可知翻坝泥石流在入射到沟道时的速度及水平运动距离,如图 15、图 16 所示。

由图 15 可知,随有效坝高的增加入射速度呈增加趋势。随有效坝高的增加,初速度愈小,翻坝泥石流入射速度的增幅愈大,因此翻坝速度较低的泥石流对坝下的沟道仍具有较强的冲蚀能力。

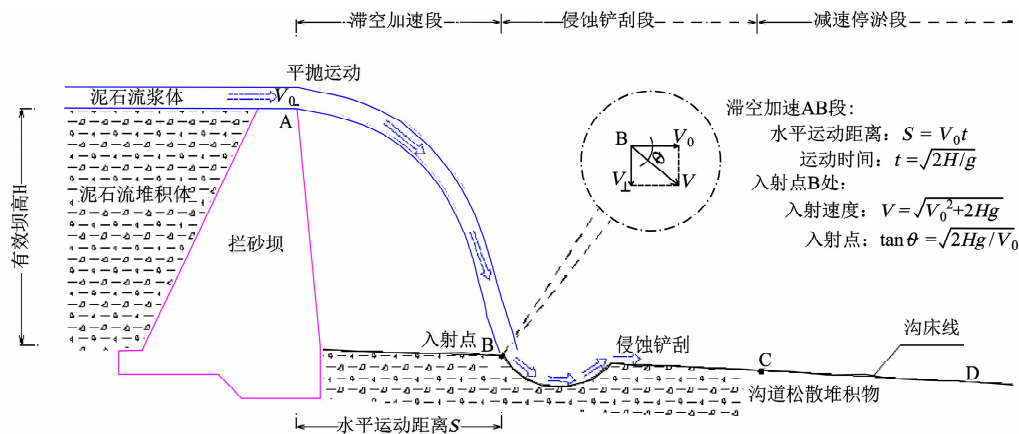


图 14 翻坝泥石流运动模型

Fig. 14 Movement model of debris flow over dam

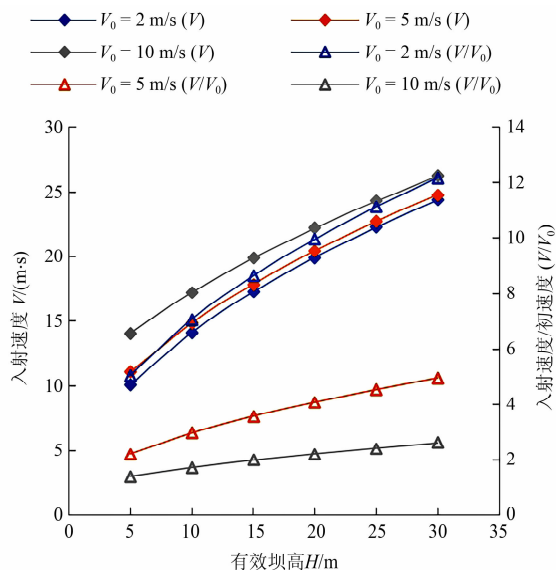


图 15 入射速度与坝高、初速度关系图

Fig. 15 Relationship between incident velocity and dam height and initial velocity

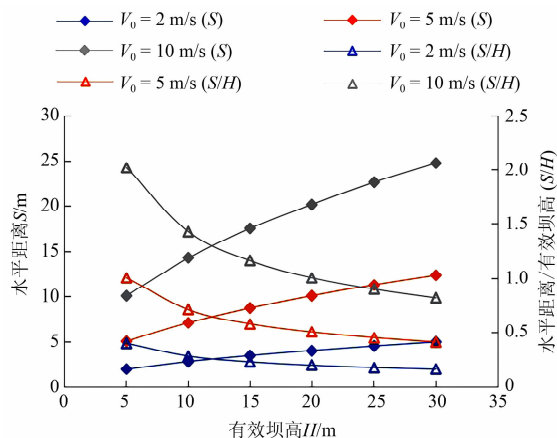


图 16 水平运动距离与坝高、初速度关系图

Fig. 16 Relationship between horizontal distance and dam height and initial velocity

由图 16 可知,有效坝高越高,翻坝泥石流水平运动距离越大。初速度一定时,坝高对翻坝泥石流的水平距离的增幅呈下降趋势,这可为坝下副坝位置的选取或护坦尺寸的设定提供科学依据。

对于入射沟道后泥石流的铲刮机理及减速停淤过程还有待进一步研究。

(4)根据震区近十余年来泥石流治理工程的经验,在震后泥石流治理工程设计时,应着重关注:拦砂坝清库翻坝路的设计;护坦的强度、结构类型及坝前冲刷深度设计;防护工程基础埋深、冲

刷深度的计算设计;排导槽槽底的耐磨蚀、弯道超高的设计等。

4.2 结论

(1)锄头沟震后频发泥石流,流域内存在大量的松散物质及陡峭的沟道条件是其内因,而短时强降雨是其触发因素,锄头沟 8.20 泥石流灾害是由各支沟暴发、主沟铲刮而形成的大规模泥石流。

(2)锄头沟 8.20 泥石流致灾模式受既有工程的影响较大,具有翻坝加速、下蚀铲刮、侧蚀强烈、弯道雍高、磨蚀槽底、堵塞桥涵、淤埋民房道路等特征。受翻坝加速的影响,锄头沟泥石流规模具有放大效应,其冲出规模放大约 44.2%。

(3)翻坝泥石流的下蚀刮铲能力受泥石流翻坝流速及有效坝高影响。锄头沟泥石流仍处于发展的壮年期,在未来 10~20 年内遇强降雨仍会暴发大规模泥石流,应加强既有 1#坝库容监测及时清库,以确保其有效拦挡库容。

参考文献 (References)

- [1] 张向营, 张春山, 孟华君, 等. 地震扰动区泥石流起动阈值研究现状及展望[J]. 灾害学, 2017, **32**(1): 221 - 227. [ZHANG Xiangying, ZHANG Chunshan, MENG Huajun, et al. The review and development trend of critical threshold value of debris flow in earthquake influenced area [J]. Journal of Catastrophology, 2017, **32**(1): 221 - 227] DOI: 10.3969/j. issn. 1000 - 811X. 2017. 01. 039
- [2] TANG H, MCGUIRE L A, RENGERS F K, et al. Developing and testing physically based triggering thresholds for runoff-generated debris flows [J]. Geophysical Research Letters, 2019, **46**(15): 8830 - 8839. DOI: 10.1029/2019GL083623
- [3] CORREA O, GARCIA F, BERNAL G, et al. Early warning system for rainfall-triggered landslides based on real-time probabilistic hazard assessment [J]. Natural Hazards, 2020, **100**(1): 345 - 361. DOI: 10.1007/s11069 - 019 - 03815 - w
- [4] 潘青, 张清照, 李艺灵. 基于 EDEM 的碎屑流运动规律及冲击性能研究[J]. 工程地质学报, 2020, **28**(5): 1057 - 1065. [PAN Qing, ZHANG Qingzhao, LI Yiling. Discrete element simulation study of debris flow movement law and impact performance [J]. Journal of Engineering Geology, 2020, **28**(5): 1057 - 1065] DOI: 10.13544/j. cnki. jeg. 2020 - 315
- [5] 崔鹏, 庄建琦, 陈兴长, 等. 汶川地震区震后泥石流活动特征与防治对策[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2010, **42**(5): 10 - 19. [CUI Peng, ZHUANG Jianqi, CHENG Xingchang, et al. Characteristics and countermeasures of debris flow in Wenchuan area after the earthquake [J]. Journal of Sichuan University

- (Engineering Science Edition), 2010, **42**(5):10–19] DOI: 10.15961/j.jsuese.2010.05.004
- [6] 崔鹏, 韦方强, 何思明, 等. 5·12 汶川地震诱发的山地灾害及减灾措施[J]. 山地学报, 2008, **26**(3):280–282. [CUI Peng, WEI Fangqiang, HE Siming, et al. Mountain disasters induced by the earthquake of may 12 in Wenchuan and the disasters mitigation [J]. Mountain Research, 2008, **26**(3):280–282]
- [7] 谢洪, 钟敦伦, 矫震, 等. 2008 年汶川地震重灾区的泥石流[J]. 山地学报, 2009, **27**(4): 501–509. [XIE Hong, ZHONG Dunlun, JIAO Zhen, et al. Debris flow in Wenchuan quake-hit area in 2008 [J]. Mountain Research, 2009, **27**(4):501–509] DOI: 10.16089/j.cnki.1008–2786.2009.04.010
- [8] 黄润秋. 汶川地震地质灾害后效应分析[J]. 工程地质学报, 2011, **19**(2): 145–151. [HUANG Runqiu. After effect of geohazards induced by the Wenchuan earthquake [J]. Journal of Engineering Geology, 2011, **19**(2):145–151]
- [9] 勒文, 张国涛, 邹强, 等. 震后泥石流活跃期的新认识——以四川汶川“8.20”灾害事件为例[J]. 山地学报, 2019, **37**(5): 787–796. [JIN Wen, ZHANG Guotao, ZOU Qiang, et al. A new understanding of the activity behavior of post-earthquake debris flow-taking the “8.20” event in Wenchuan, Sichuan, China as an example [J]. Mountain Research, 2019, **37**(5): 787–796] DOI: 10.16089/j.cnki.1008–2786.000469
- [10] 冯德志. 汶川县国道 G213 线锄头沟泥石流形成机理与危险性评价研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016:7–41. [FENG Dezhi. Research on debris flow formation mechanism and hazard assessment of Chutou gully, Wenchuan county [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016:7–41]
- [11] 严炎, 葛永刚, 张建强, 等. 四川省汶川县簇头沟“7.10”泥石流灾害成因与特征分析[J]. 灾害学, 2014, **29**(3):229–234. [YAN Yan, GE Yonggang, ZHANG Jianqiang, et al. Research on the debris flow hazards in Cutou gully, Wenchuan county on July 10, 2013 [J]. Journal of Catastrophology, 2014, **29**(3):229–234] DOI: 10.3936/j.issn.1000–811X.2014.03.042
- [12] 龚柯, 杨涛, 夏晨皓, 等. 基于 FLO-2D 的泥石流危险性评价——以四川省汶川县绵虬镇簇头沟为例[J]. 水资源与水工程学报, 2017, **28**(6):134–138. [GONG Ke, YANG Tao, XIA Chenhao, et al. Assessment on the hazard of debris flow based on FLO-2D: A case study of debris flow in Cutou gully, Wenchuan, Sichuan [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2017, **28**(6):134–138] DOI: 10.11705/j.issn1672–643X.2017.06.23
- [13] 李安润, 邓辉, 余天彬, 等. 汶川极震区锄头沟泥石流发育特征及启动机理[J]. 四川地质学报, 2019, **39**(2):285–288. [LI Anrun, DENG Hui, YU Tianbin, et al. Development and genetic mechanism of the Chutougou debris flow in the Wenchuan meizoseismal area [J]. Sichuan Geological Journal, 2019, **39**(2):285–288] DOI: 10.3969/j.issn.1006–0995.2019.02.022
- [14] 陈俊淇. 强震区泥石流物源侵蚀运移特征分析——以汶川县绵虬镇锄头沟为例[D]. 长春: 吉林大学, 2020:6–32. [CHEN Junqi. Analysis of material source erosion and migration characteristics of debris flows in strong earthquake areas: A case study of Chutou gully, Wenchuan, Sichuan [D]. Changchun: Jilin University, 2020:6–32] DOI: 10.27162/d.cnki.gjlin.2020.006318
- [15] 李彩侠, 马煜, 何元勋. 泥石流致灾因子敏感性分析——以四川都江堰龙溪河流域为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, **31**(5):32–39. [LI Caixia, MA Yu, HE Yuanxun. Sensitivity analysis of debris flow to environmental factors: A case of Longxi River basin in Dujiangyan, Sichuan province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazards and Control, 2020, **31**(5):32–39] DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003–8035.2020.05.05
- [16] WANG Jiao, JIN Wen, CUI Yifei, et al. Earthquake-triggered landslides affecting a UNESCO natural site: The 2017 Jiuzhaigou earthquake in the world national park, China [J]. Journal of Mountain Science, 2018, **15**(7):1412–1428. DOI:10.1007/s11629–018–4823–7
- [17] 张友谊, 袁亚东, 顾成壮. 震区泥石流物源储量评价方法综述[J]. 山地学报, 2020, **38**(3):394–401. [ZHANG Youyi, YUAN Yadong, GU Chengzhuang. Review of evaluation methods for debris flow resource reserves in areas affected by earthquakes [J]. Mountain Research, 2020, **38**(3):394–401] DOI: 10.16089/j.cnki.1008–2786.000519
- [18] 陈兴长, 陈慧, 游勇, 等. 泥石流拦砂坝底扬压力分布及影响因素试验[J]. 岩土力学, 2018, **39**(9):3229–3236. [CHEN Xingchang, CHEN Hui, YOU Yong, et al. Experiment on distribution and influence factors of uplift pressure acting on bottom of debris flow check dam [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, **39**(9):3229–3236] DOI: 10.16285/j.rsm.2016.2670
- [19] 安笑, 潘华利, 欧国强, 等. 恒定渗流作用泥石流碎屑物质启动判别模型研究[J]. 岩土力学, 2020, **41**(Z1):115–122. [AN Xiao, PAN Huali, OU Guoqiang, et al. Recognition model on triggering debris flow under constant seepage condition [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, **41**(Z1):115–122] DOI: 10.16285/j.rsm.2019.1425
- [20] 王东坡, 张小梅. 泥石流冲击弧形拦挡坝动力响应研究[J]. 岩土力学, 2020, **41**(12):1–11. [WANG Dongpo, ZHANG Xiaomei. Study on dynamic response of debris flow impact arc-shaped dam [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, **41**(12):1–11] DOI: 10.16285/j.rsm.2020.0311
- [21] 郑志山, 潘华利, 安笑, 等. 泥石流泥舌水力特性的沿程变化实验研究[J]. 自然灾害学报, 2019, **28**(6):154–166. [ZHENG Zhishan, PAN Huali, AN Xiao, et al. Experimental study on spatial hydraulic characteristics of debris flow jet [J]. Journal of Natural Disasters, 2019, **28**(6):154–166] DOI: 10.13577/j.

- jnd. 2019. 0617
- [22] 刘茂,袁磊,张鹏. 水平岩土层实体拦砂坝基底水压力研究[J]. 工程地质学报, 2020, **28**(5): 1140 – 1146. [LIU Mao, YUAN Lei, ZHANG Peng. Theoretical study on uplift pressure of check dam laid on horizontal soil [J]. Journal of Engineering Geology, 2020, **28**(5): 1140 – 1146] DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2020 – 151
- [23] 刘兴荣,周自强,董耀刚,等. 泥石流拦挡坝破损分析及优化对策——以陇南市武都区为例[J]. 山地学报, 2020, **38**(3): 473 – 482. [LIU Xingrong, ZHOU Ziqiang, DONG Yaogang, et al. Investigation of the failure patterns of debris flow retaining dams and optimized engineering countermeasures – a case study at Wudu district of Longnan city, Gansu, China [J]. Mountain Research, 2020, **38**(3): 473 – 482] DOI: 10.16089/j.cnki.1008 – 2786.000526
- [24] 李祥龙,唐辉明,熊承仁,等. 基底刮铲效应对岩石碎屑流停积过程的影响[J]. 岩土力学, 2020, **33**(5): 1527 – 1541. [LI Xianglong, TANG Huiming, XIONG Chengren, et al. Influence of substrate ploughing and erosion effect on process of rock avalanche [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, **33**(5): 1527 – 1541] DOI: 10.16285/j.rsm.2012.05.018
- [25] YU Xianbin, CHEN Xiaoqing, CHEN Jiangang, et al. Impulsive forces distribution along the sediment storage dam upstream face for different mud-rock flow unit weight [J]. Environmental Earth Sciences, 2018, **77**(5): 169. DOI: 10.1007/s12665 – 018 – 7351 – 4
- [26] 胡卸文,韩玫,梁敬轩,等. 汶川地震灾区泥石流若干关键问题[J]. 西南交通大学学报, 2016, **51**(2): 331 – 340. [HU Xiewen, HAN Mei, LIANG Jingxuan, et al. Some key problems on debris flow in Wenchuan earthquake area [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2016, **51**(2): 331 – 340] DOI: 10.3969/j.issn.0258 – 2724.2016.02.012
- [27] 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. [LI Ning, TANG Chuan, BU Xianghang, et al. Characteristics and evolution of debris flows in Wenchuan county after the “5.12” earthquake [J]. Journal of Engineering Geology, 2020, **28**(6): 1233 – 1245] DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2019 – 310
- [28] LI G. WEST A J, DENSMORE A L, et al. Seismic mountain building: Landslides associated with the 2008 Wenchuan earthquake in the context of a generalized model for earthquake volume balance [J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2014, **15**(4): 833 – 844. DOI: 10.1002/2013GC005067

New Geo-Disaster Forming Pattern of Post-Shock Debris Flow: A Case Study of the Chutou Gully in the Minjiang River Valley, China

ZHANG Youyi¹, ZHONG Lei¹, FAN Xiaoyi², GU Chengzhuang¹, TIAN Shujun¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, Sichuan, China;

2. School of Civil Engineering and Mapping, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

Abstract: The Chutou gully in Qiangfeng Village, Wenchuan County, China has become a large active debris flow gully after the 2008 Wenchuan earthquake. Large-scale debris flows at the Chutou gully has caused engineering failures in control facilities and multiple damages to highway G317 and national road G213. Engineered measuring in debris flow control facilities not only restrains debris flow development, but also reduce the extent of earthquake-induced debris flow. This paper explored the cause of a debris flow event on August 20, 2019 at the Chutou gully and its driving mechanism for engineering control purposes based on detailed field investigation. The factors that amplify the energy during debris flow over dams were also discussed. The results show that the August 20, 2019 disasters were large-scale debris flow that formed by the outbreak of each branch ditch and scraping by the main ditch. The scale of the debris flow was magnified by approximately 44.2% owing to erosion linked to debris flow scraping. The debris flows disasters at the Chutou gully mainly involved the acceleration of dam wall breaches, erosion linked to scraping, intensified lateral erosion, bend heightening, slot base abrasion, bridge and culvert

blockages, and the scouring and silting of civilian buildings. The debris flow at the Chutou gully remains its development stage, and large-scale debris flow disasters are expected to continue to occur over the upcoming 10 ~ 20 years in cases of heavy rainfall. The scale of debris-flow destruction in dam wall breaches was closely related to the debris dam height and debris flow velocity while overtopping the dam. For an initial velocity of 2 m/s and dam height of 25 m, the debris flow incident velocity was 11.1 times higher than that of the initial velocity. The dam breaching debris flow, therefore, has strong ability to erode the channel beneath the dam under conditions of higher effective dam heights and lower velocities. For a given initial debris flow velocity over a dam, higher effective dam heights can reduce the increase of horizontal displacement, thus providing a scientific basis for the location selection of an auxiliary dam under a dam or the size setting of a protective dam.

Key words: Wenchuan earthquake; August 20 debris flow; amplification effect; Chutou gully