

引用格式: 宋国虎, 杨桢贤, 张继, 杨军. 四川雅安市宝兴县和平沟泥石流防治工程成效考察[J]. 山地学报, 2023, 41(2): 295-306.

SONG Guohu, YANG Zhenxian ZHANG Ji, YANG Jun. Post-Shock performance of a debris flow dam built at the Heping gully, Baoxing county, Sichuan province, China [J]. Mountain Research, 2023, 41(2): 295-306.

四川雅安市宝兴县和平沟泥石流防治工程成效考察

宋国虎^{1,2}, 杨桢贤^{1,2*}, 张继^{1,2}, 杨军^{1,2}

(1. 四川省第一地质大队, 成都 610072; 2. 四川省地质工程勘察院集团有限公司, 成都 610072)

摘要: 和平沟位于四川省芦山地震灾区雅安市宝兴县北部的硃磬乡境内, 沟内防治工程历经约 10 余年运行, 发挥了巨大的减灾作用。但随着防治工程的运行, 工程有效性逐步降低。2020 年“8·16”强降雨后防治工程基本失效, 泥石流冲出沟口形成灾害。本文通过现场实地调查, 分析和平沟泥石流的致灾机制与防治工程运行效果, 探讨针对已实施防治工程泥石流的防灾减灾思路。结果表明: (1) 治理工程完成后, 拦挡工程经历了“发挥效益→逐步淤积→库内沟床抬高→新崩滑物源形成→拦砂坝逐步淤满→翻坝→泥石流翻坝规模放大→致灾”过程; (2) “8·16”泥石流前 15 日有效累计降雨量达到 204.5 mm, 当次激发小时雨强为 25 mm/h, 是本次泥石流的关键激发因素; (3) 拦挡工程满库运行, 泥石流翻坝后会产生流量及规模产生放大效应, 泥石流入射速度较初始速度增加约 8.45 倍; (4) 排导槽在运行过程中表现出“沟底冲刷侵蚀→侧墙基础掏蚀→侧墙悬空→侧墙失稳倾倒”的破坏模式; (5) 国土空间规划中应充分考虑地质安全以及防治工程设防标准承载能力。同时, 对于已实施防治工程的泥石流沟仍不能放松警惕, 在防灾减灾中需密切关注其防治工程有效性, 及时消除隐患。

关键词: 地震灾区; 防治工程; 运行效果; 和平沟

中图分类号: X43; XP15.5; P315; P694

文献标志码: C

泥石流是汶川地震灾区危害最严重的震后灾害类型^[1]。震后修建的泥石流防治工程, 在震后前期取得积极的防治效果^[2-5], 然而实地调查发现, 防治工程历经十多年的运行, 部分泥石流治理工程运行工况不良, 甚至失效, 已不能满足防灾减灾需求。

和平沟泥石流防治工程具有典型性。2020 年 8 月 11 日—8 月 16 日, 四川雅安市宝兴县遭遇超过 50 年一遇区域性暴雨, 和平沟在 8 月 16 日暴发大规模泥石流, 历时约 40 分钟, 泥石流冲出总量总计约 $10 \times 10^4 \text{ m}^3$, 直接经济损失约 1000 万元。泥石流造成沟内既有两座拦砂坝全部淤满, 主坝下游副坝

损毁, 沟口排导槽部分被冲毁; 两处桥涵因泥石流堵塞致使沟道改道至仁朵藏寨一侧, 导致和平藏寨与仁朵藏寨受损严重, 共计 85 户 390 间房屋受到不同程度的损害; 国道 G351 断道, 公路与房前平均淤积厚度达 1 m, 最厚可达 6.2 m。由于临灾预警及时, 人员提前撤离, 该次泥石流未造成人员伤亡。

本文在现场调查及资料分析的基础上, 初步分析了和平沟泥石流形成的背景条件、成因、致灾特征及发展趋势, 评估了防治工程成效与不足, 并提出相应的防灾减灾对策, 为今后此类泥石流灾害的防灾减灾提供借鉴。

收稿日期 (Received date): 2023-01-30; 改回日期 (Accepted date): 2023-04-09

基金项目 (Foundation item): 四川省地矿局科技创新项目 (SCDKZCKJXM-2022055); 四川自然资源厅科研项目 (KJ-2023-31) [Research Project of Department of Natural Resources of Sichuan Province (KJ-2023-31); Science and Technology Innovation Project of Sichuan Bureau of Geology and Mineral resources (SCDKZCKJXM-2022055)]

作者简介 (Biography): 宋国虎 (1989-), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 山地灾害防治。[SONG Guohu (1989-), male, M. Sc., senior engineer, research on mountain disaster prevention and control] E-mail: justdoitsgh@126.com

* 通讯作者 (Corresponding author): 杨桢贤 (1983-), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 研究方向: 工程地质与灾害地质。[YANG Zhenxian (1983-), male, M. Sc., professor of engineer, research on engineering geology and disaster geology] E-mail: 279875692@qq.com

1 研究区概况

1.1 泥石流沟地质地貌

和平沟位于雅安市宝兴县县域北部的硃砂藏族乡,地处芦山地震灾区,宝兴河的次级支流东河左岸,沟口地理坐标为 $30^{\circ}39'45.59''\text{N}$, $102^{\circ}45'31.55''\text{E}$ 。流域面积 15.96 km^2 ,主沟长 7.40 km ,源头海拔高程 4118 m ,沟口海拔高程 2002 m ,主沟相对高差 2116 m ,主沟平均纵比降 28.58% 。和平沟沟口为和平藏寨与仁朵藏寨,现有居民 $45\text{ 户 }195\text{ 人}$,国道 G351 从沟口穿过(图 1)。

和平沟位于龙门山断裂带南段,属深构造侵蚀中、高山深切峡谷地貌,沟域内地形陡峻。受区内幺子堂、青草塘及九奔流等三条弧形冲断层构造影响,节理裂隙发育,岩体破碎、松散的崩坡积层稳定性差,沟域内崩塌、滑坡等不良地质现象发育,为泥石流的形成提供了有利的松散固体物源条件。沟谷形态总体为 V 型沟谷,流域内支沟发育,中上游沟谷较为狭窄,纵坡较陡。沟口实测清水流量为 $0.26\text{ m}^3/\text{s}$,但季节动态变化较大,枯、洪季流量相差十倍至数十倍,径流年内分布极不均匀。2013 年芦山“4·20”地震对研究区沟岸斜坡结构的破坏程度相对较小,在沟道两侧形成了规模不等的浅层崩塌

滑坡体,规模较小,且由于流域内植被覆盖度较高,灾害体的隐蔽性较强,因此泥石流灾害隐患较难识别^[6-7]。

1.2 泥石流沟发育历史及灾害

据调查访问,和平沟历史上曾多次暴发泥石流,其中以 1990 年“8·28”、2019 年“8·22”及 2020 年“8·11~8·16”三次规模较大。历次泥石流暴发情况统计见表 1。

1.3 防治工程概况

岩土工程措施在泥石流防治中得到了广泛应用,是泥石流防灾减灾的重要手段^[8]。但若对泥石流形成机理认识不准,设计参数选取不当或遭遇超设计标准的泥石流时,仍然会造成危害,甚至加重危害^[9-11],而且随着治理工程的运行,防灾减灾效果会逐步降低。

该流域的防治工程于 2012 年 6 月年竣工,总体防治方案为拦挡与排导相结合,主要工程措施为“2 座拦砂坝(含副坝)+沟口排导槽”,设计防护标准为 20 年一遇。

1.3.1 防治工程设计参数

(1)降雨:按照 20 年一遇标准设计暴雨强度,为 32.5 mm/h 。

(2)物源:沟内总物源量估算为 $83.67\times 10^4\text{ m}^3$,可能参与泥石流活动的物源动储量约为 $6.66\times 10^4\text{ m}^3$ 。

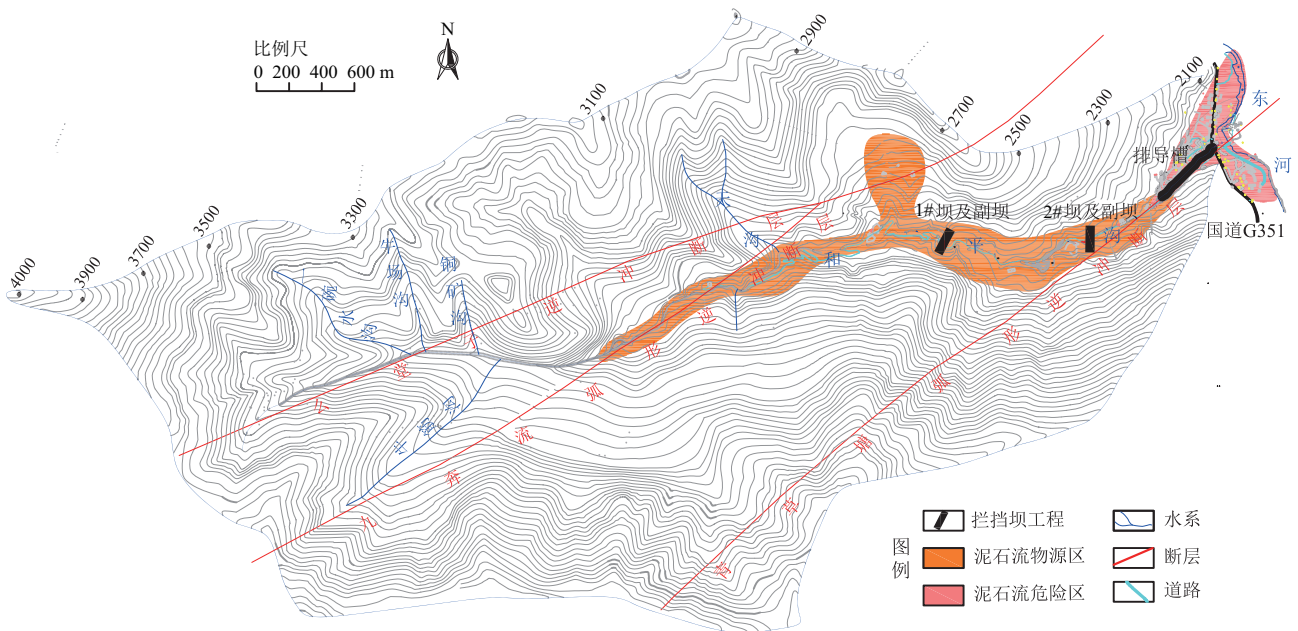


图 1 和平沟泥石流流域治理工程设施分布图

Fig. 1 Distribution of prevention and control projects in Heping gully

表 1 和平沟泥石流灾害史统计表

Tab. 1 Historical statistics of debris flow disasters in Heping gully

暴发时间	灾情介绍
1966-08	因年代久远,当地老人只记得暴发时冲出固体物质挤压了东河,其余信息不详。
1972-08	据当地老人回忆,淤埋损毁沟口农田土地约 3.5 亩,挤压东河,堆积物厚度平均为 1.2 m,冲出总量约 $0.7 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。
1975-07	据当地老百姓回忆,距 1972 年暴发时隔三年后再次暴发泥石流。淤埋损毁沟口农田约 5.5 亩,淤埋、冲走牲畜 20 余头,挤压并导致东河改道,淤积厚度平均约 2 m,冲出总量约 $1.1 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。
1990-08	8 月 5 日,本次泥石流暴发后历时近 2 h,冲出量约 $2.3 \times 10^4 \text{ m}^3$,毁损房屋 50 余间,淤埋毁坏拖拉机 4 台,淤埋 210 省道(现 G351 国道),死亡 4 人,轻伤 1 人,堵断东河主河约 10 min,直接经济损失超过 200 万元。
2019-08	8 月 22 日,本次泥石流暴发后既有拦挡工程及排导工程充分发挥作用,1#拦砂坝淤满,2#拦砂坝淤积约 2/3 的总库容。主要以山洪携带细颗粒固体物质冲出沟口,未对下游造成危害。
2020-08	8 月 16 日,泥石流爆发后两座拦砂坝淤满漫溢,溢流口磨蚀严重,坝下护坦及副坝不同程度损毁,损毁下游排导槽 12 m。冲出量约 $10.0 \times 10^4 \text{ m}^3$,造成和平藏寨与仁朵藏寨 85 户 390 间房屋严重受损,淤埋厚度约 0.8~2.5 m;淤埋 G351 国道长约 1.2 km,淤埋深度约 1 m,导致国道断道,堵断东河约 20 min,造成直接经济损失约 1000 万元。

(3)泥石流运动特征:按照 20 年一遇的设计标准,沟口泥石流的主要特征参数见表 2。

表 2 和平沟泥石流防治工程设计参数表

Tab. 2 Design parameters of debris flow control engineering in Heping gully

重度/ ($\text{KN} \cdot \text{m}^{-3}$)	流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	一次泥石流总量/ (10^4 m^3)	一次固体物质冲出量/ (10^4 m^3)	整体冲压力/ kpa
15.30	5.28	119.57	22.73	8.03	57.94

表 3 和平沟泥石流拦挡工程参数表

Tab. 3 Parameters of the debris flow blocking projects in Heping Gully

拦砂坝	坝型	坝顶长/m	坝净高/m	基础埋深/m	设计库容/(10^4 m^3)	坝体结构	总库容/(10^4 m^3)
1#	主坝	35.27	12	3.0	3.07	C15 毛石砼	8.67
	副坝	40.14	4	1.5		C15 毛石砼	
2#	主坝	55.29	12	3.0	5.60	C15 毛石砼	
	副坝	26.72	4	1.5		C15 毛石砼	

1.3.2 防治工程设计

在形成流动区布置 2 座拦砂坝拦挡泥石流,设计拦挡总库容为 $8.67 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。其中 1#拦砂坝位于 H1 滑坡下游约 250 m 处,设坝处沟道狭窄,且两侧基岩出露,上游沟谷开阔。回淤后,能减小泥石流对沟床两岸的侧蚀作用。2#拦砂坝位于 H2 滑坡下游约 160 m 处,设坝处沟道相对上下游较狭窄。回淤后,能对 H2 滑坡进行固脚,增加 H2 稳定性,且能减小泥石流对沟床两岸的侧蚀作用,两座拦挡坝均下游设置副坝,而均未设置护坦。排导工程布置于堆积区扇顶至沟口附近,尽量利用现有沟道,对部分弯曲沟道进行取直,截面能满足防洪要求即可。具体工程设计参数见表 3、表 4。

2 “8·16”泥石流形成条件及特征分析

2.1 “8·16”泥石流形成条件分析

和平沟流域在地质构造上处于金汤弧形构造带内,褶皱强烈,岩层风化破碎。该沟内滑坡、溜滑及崩塌较为发育,规模及活动性不一。和平沟流域处于新构造运动强烈上升区,沟道两岸坡体十分陡峭,在地表水和重力作用下,斜坡易失稳形成滑坡物源。斜坡失稳使得使大量泥砂、石块进入沟道内,造成沟道堵塞,成为该泥石流形成的主要固体物质补给源。据现场调查分析,因 2 座拦砂坝满库运行及沟道两岸失稳形成新增物源补给,沟域内共计有松散固体物源量 $217.75 \times 10^4 \text{ m}^3$,可能参与泥石流活动的动

储量为 $65.18 \times 10^4 \text{ m}^3$, 动储量较治理工程设计时增加了近 10 倍(表 5)。

表 4 和平沟泥石流排导工程参数表

Tab.4 Parameters of the debris flow drainage project in Heping Gully

长度/m	基础埋深/m	净高/m	结构形式
515.76	1	2	M10 浆砌块石

表 5 “8·16”前后和平沟泥石流物源变化统计表

Tab.5 Comparison of classification provenance before and after “8·16” rainstorm in Heping gully

统计时期	物源量/(10^4 m^3)	
	总储量	动储量
原设计	83.67	6.66
“8·16”后	217.75	65.18

流域内风化作用和流水侵蚀作用强烈,沟谷发育,沟道局部狭窄陡急,整体形态呈“V”字型,谷坡坡度一般为 $30^\circ \sim 50^\circ$,局部达 70° 以上。沟床纵比降均在 90‰ 以上,最高处可达 601‰,且多弯道和狭口,沟坡和沟床稳定性差,极易形成堵塞溃决,沟道条件有利于泥石流的发育。流域主沟和支流流域均呈树叶状,有利于暴雨产汇流,具备泥石流形成的水力条件。

研究区多年实测平均降雨量 1148.6 mm,最大日降雨量 230.1 mm,最大小时降雨 83.4 mm。泥石流的形成往往是在长时间的前期降雨影响下,由短历时强降雨激发形成,前期降雨在影响泥石流的各项降雨指标中贡献超过 80%,前期降雨使流域内堆

积物含水量增高,降低了土体的抗剪强度,导致坡体稳定降低,易于启动^[12-13]。根据和平沟沟口雨量站数据,本次统计了泥石流暴发前 15 天的前期降雨,结果显示前 15 日累计降雨量达到 399.5 mm,前 15 日有效累计降雨量达到 204.5 mm(图 2)。

本次降雨自 8 月 15 日 0:00 开始,至 8 月 16 日 24 点结束,总降雨量达 153 mm。降雨过程中雨强超过 10 mm/h 的降雨量分别出现在 8 月 15 日 21:00 ~ 22:00 的 25 mm/h、22:00 ~ 23:00 的 15 mm/h,以及 16 日 4:00 ~ 5:00 的 12.5 mm/h、5:00 ~ 6:00 的 10.5 mm/h。最大降雨出现在 8 月 15 日的 21:00 ~ 23:00,2 小时累计降雨量达到 40 mm/h(图 3),泥石流在 16 日 4:00 左右冲出沟口。

2.2 和平沟“8·16”泥石流特征

汶川地震之后,为了防治区域泥石流的危害,修建了大批防治工程。和平沟的泥石流防治设计方案是该区域内典型的岩土工程防治流域,因此在震后的防减灾过程和“8·16”泥石流致灾过程中,特征显著且典型,主要为表现为:

(1) 泥石流历时长、规模大,拦砂坝调峰有效

“8·16”泥石流从最大小时降雨形成至成冲出沟口致灾历时全过程约 6 h,随后持续堆积约 40 min,冲出沟口泥石流方量约 $10.0 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。成沟内既有两座拦砂坝全部淤满,沟口排导槽部分被冲毁,泥石流改道导致和平藏寨与仁朵藏寨受损严重,G351 国道断道,公路与房前淤积厚度达 1 m,并造成东河淤塞(图 4、图 5)。1#拦砂坝在本次泥石流之前已淤满,2#拦砂坝剩余拦蓄库容为 $1.87 \times 10^4 \text{ m}^3$,在调节泥石流峰值流量达到沟口起到了重

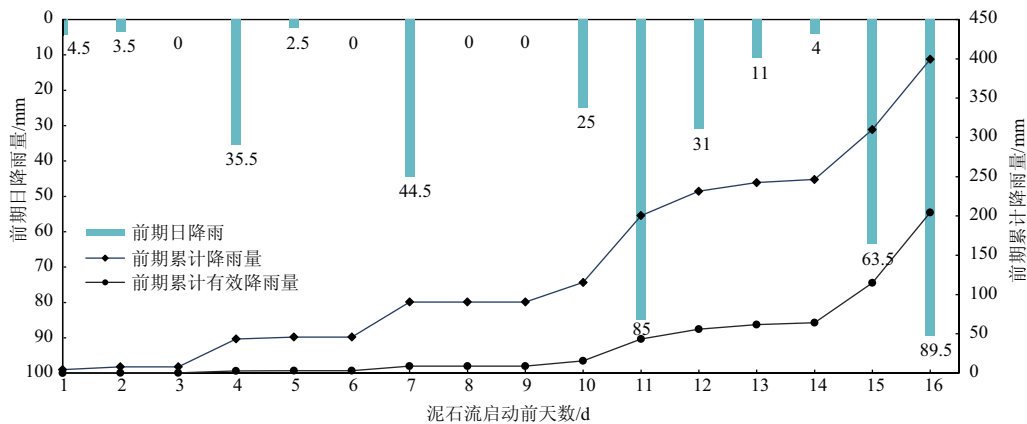


图 2 泥石流形成前期日降雨过程

Fig.2 Statistics of daily rainfall process in the early stage of debris flow formation

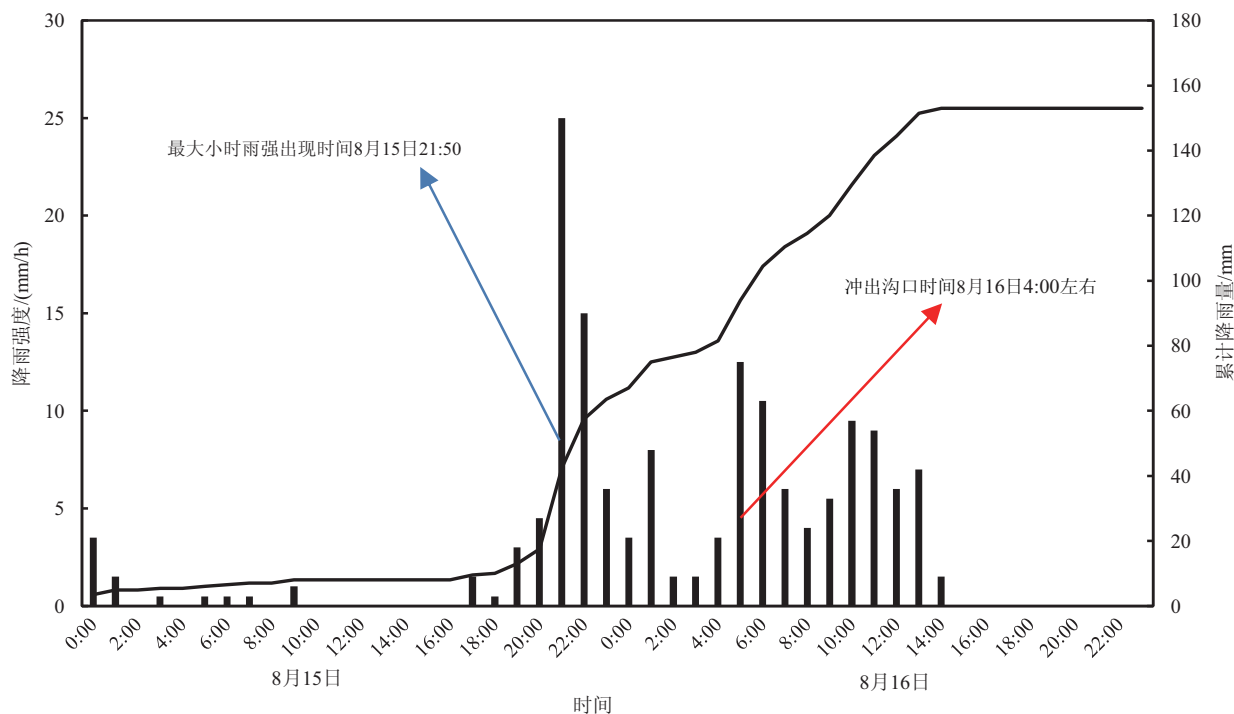


图3 “8.16”泥石流降雨过程

Fig. 3 Current rainfall process of debris flow



图4 沟口建筑物淤埋

Fig. 4 Deposited buildings at the mouth of debris flow gully



图5 沟口国道 G351 及房屋淤积

Fig. 5 Deposited G351 and houses at the mouth of debris flow gully

要作用。

(2) 泥石流以冲为主, 坝区先淤后冲, 治理工程基本失效

“8·16”泥石流使整个沟道平均冲刷深度 2 ~ 3 m, 局部冲刷深度最深可达 8 m 左右。沿程冲刷掏蚀导致沟道两岸岸坡失稳, 进一步增加了泥石流流量(图 6、图 7)。泥石流在 1#拦砂坝满库翻坝运行后迅速将 2#坝库区淤满。翻坝后的高速泥石流流体对坝下游河道进行了剧烈冲刷侵蚀, 致使 2#拦砂坝副坝完全损毁, 进而加速排导槽基础的冲刷侵蚀破坏, 随后冲出沟口, 形成壅塞坝体堵塞主河约

10 min。

(3) 泥石流流速高、高弯道超高

由于泥石流的流速较大, 流经弯道时, 直冲外侧岸坡或陡岸, 超高壅起最高达 11.48 m, 甚至越过沟道一侧的坡脊坡嘴(图 8)。在沟口排导槽弯道处, 高速泥石流流体将凹岸的排导槽完全冲毁约 50 m, 翻过排导槽直接导致泥石流淤埋沟口民房(图 9)。

3 泥石流防治工程运行过程分析

和平沟泥石流防治工程于 2012 年 6 月竣工, 防



图 6 中上游沟道岸坡失稳

Fig. 6 Instability of the bank slope of the upstream and middle channels



图 7 沟道被冲刷侵蚀

Fig. 7 Gully eroded by erosion

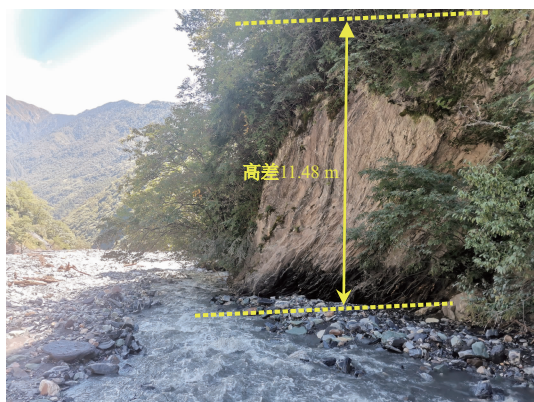


图 8 中上游沟道堵溃点下游弯道超高泥痕

Fig. 8 Mud marks at the bend

治工程竣工后已历时超过 10 年,期间经历了 2012 年“8·18”强降雨、2013 年“4·20”芦山地震及“7·9”暴雨、2016 年“8·18”暴雨、2018 年“8·22”暴雨、2019 年“8·22”暴雨,最终在 2020 年“8·11~8·16”强降雨期间再次暴发泥石流致使



图 9 沟口排导槽弯道超高

Fig. 9 Mud marks on drainage canal bend

拦挡工程淤满失效冲出沟口形成灾害,防治工程历年运行情况见表 6。

泥石流沟从治理工程完成至再次成灾过程期间历经 10 余年,泥石流沟的发展过程可概化为“拦挡工程发挥效益→逐步淤积→库内沟床抬高→新崩滑物源形成→拦砂坝逐步淤满→翻坝→泥石流翻坝规模放大→致灾”等一系列过程。治理工程完工至 2020 年“8·16”强降雨前,1#拦砂坝已满库运行,库容方量已达设计库容 $3.07 \times 10^4 \text{ m}^3$;2#拦砂坝已淤满 2/3,剩余拦蓄库容为 $1.87 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。2020 年 8 月 16 日再次暴发泥石流后 1#、2#拦砂坝完全淤满,泥石流翻坝后规模放大,副坝冲毁,沟口排导槽在弯道处冲刷掏蚀破坏成灾,形成演化机制见图 9。

通过对泥石流的形成条件及特征、沟域内既有防治工程运行情况、威胁对象损毁情况的调查分析,和平沟“8·16”泥石流是由于强降雨导致泥石流固体物质 1#拦砂坝满库运行,翻坝规模放大后在 1#拦砂坝库区内向下游铲刮运动,进而导致 2#拦砂坝淤满进一步翻坝规模和流量放大,继续向下游铲刮,沿途冲击损毁 2#坝副坝及护坦,下切及侧蚀沟道、冲刷侵蚀排导槽沟底及基础,最终冲出沟口淤埋房屋及道路,并堵塞东河,其具体致灾模式如下所述。

3.1 拦挡工程淤满,泥石流翻坝加速、规模放大,冲刷侵蚀加剧

在本次泥石流暴发过程中,两座拦砂坝及副坝均已满库运行,泥石流翻坝流速流量增大。1#拦砂坝主坝库区满库运行,溢流口磨蚀严重;副坝中部局部损毁,坝下护坦严重损毁、坝基被掏蚀悬空(图 11)。2#拦砂坝主坝库区淤满后满库运行、坝顶及

表 6 和平沟防治工程历年运行情况统计表

Tab 6 Historical running condition of the Prevention and Control Project in Heping Gully

复核时间	强降雨事件	防治工程运行情况
2012 年	2012 - 08 - 18	该场次强降雨事件对防治工程受影响较小,两座拦砂坝库内无固体物质淤积,排导槽畅通。
2013 年	2013 - 07 - 09	该场次强降雨事件对防治工程有一定影响,1#拦砂坝内有少量淤积,2#拦砂坝库内无固体物质淤积,排导槽畅通。
2014 年	—	防治工程较前一年无明显变化。
2015 年	—	防治工程较前一年无明显变化。
2016 年	2016 - 08 - 18	该场次强降雨事件对防治工程有一定影响,1#拦砂坝内淤积约 $1.02 \times 10^4 \text{ m}^3$,约占总库容的 1/3;2#拦砂坝库内有少量固体物质淤积;排导槽畅通,沟道铺底处基础面受水流冲刷侵蚀产生局部空洞。
2017 年	—	防治工程较前一年无明显变化。
2018 年	2018 - 08 - 22	该场次强降雨事件对防治工程有较大影响,1#拦砂坝内淤积约 $2.09 \times 10^4 \text{ m}^3$,约占总库容的 2/3;2#拦砂坝库内淤积约 $1.4 \times 10^4 \text{ m}^3$,约占总库容的 1/4;排导槽基本畅通,沟道铺底处基础面及排导槽基础受冲刷侵蚀形成空洞。
2019 年	2019 - 08 - 22	该场次强降雨事件对防治工程有较大影响,1#拦砂坝内满库,达到设计库容 $3.07 \times 10^4 \text{ m}^3$;2#拦砂坝库内淤积约 $2.17 \times 10^4 \text{ m}^3$,约占总库容的 1/3;排导槽基本畅通,沟道铺底处基础面及排导槽基础受冲刷侵蚀形成空洞,排导槽侧墙有局部变形。
2020 年	2020 - 08 - 11	该场次强降雨事件对防治工程有较大影响,1#拦砂坝内满运行,溢流口受冲刷侵蚀,石子外露;2#拦砂坝库内淤积约 $3.7 \times 10^4 \text{ m}^3$,约占总库容的 2/3;排导槽基本畅通,排导槽侧墙有局部变形。
	2020 - 08 - 16	该场次强降雨事件对防治工程有较大影响,1#拦砂坝内满库运行,溢流口磨蚀严重,副坝溢流口磨蚀严重,坝前基础冲刷掏蚀形成空洞悬空;2#拦砂坝满库运行,达到设计库容 $6.5 \times 10^4 \text{ m}^3$,溢流口磨蚀严重,坝前基础冲刷掏蚀形成空洞悬空,副坝结构性损毁;排导槽侧墙在凹岸处倒塌损毁约 50 m。

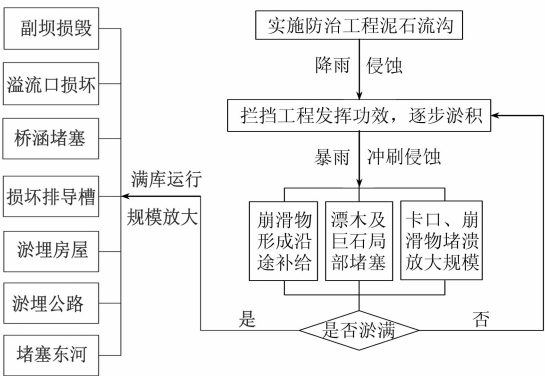


图 10 和平沟泥石流形成机制演化图
Fig. 10 Evolution and formation mechanism of debris flow in Heping gully

溢流口磨蚀严、坝体基础掏蚀;副坝及副坝护坦几乎完全损毁,仅残存左侧坝肩,本次泥石流对防治工程结构安全产生了较大的影响(图 12a ~ d),拦挡工程几乎已失去应有的防灾功能。究其原因,在防治工程设计时,对拦砂坝淤满翻坝后的流量及放大效应考虑不足,且未在主坝下游设置护坦,造成坝前冲刷掏蚀强烈,坝基掏蚀产生悬空,影响坝体结构安全。

泥石流淤满后翻坝,翻坝泥石流的运动过程可分为滞空加速阶段、侵蚀刮铲阶段和减速停淤阶段,其中滞空加速阶段可简化为平抛运动,运动方程如下^[14]:

$$S = V_0 \sqrt{2Hg} \tag{1}$$

$$V = \sqrt{V_0^2 + 2Hg} \tag{2}$$

$$\tan \theta = \sqrt{2Hg/V_0} \tag{3}$$

式中, S 为坝体距离最远入射点的水平距离; V_0 为翻坝初始速度; H 为有效坝高; g 为重力加速度; V 为坝体下游入射速度; θ 为入射角,即入射方向与水平方向夹角。

以 2#主坝翻坝泥石流进行简化计算,2#主坝有效坝高 H 为 12 m;2#主坝距离最远入射点的水平距离 S 为 28 m;重力加速度取 9.80 m/s^2 。由式(1)、(2)和(3)联立计算可知,翻坝时初始加速度为 1.82 m/s ;入射速度为 15.44 m/s ;入射角 $\tan \theta$ 为 11.35,入射速度较初始速度增加了 8.48 倍。由此可见,拦挡工程对泥石流运动有拦蓄作用,但若拦砂坝淤满运行,泥石流翻坝后运动速度增大,动能相应

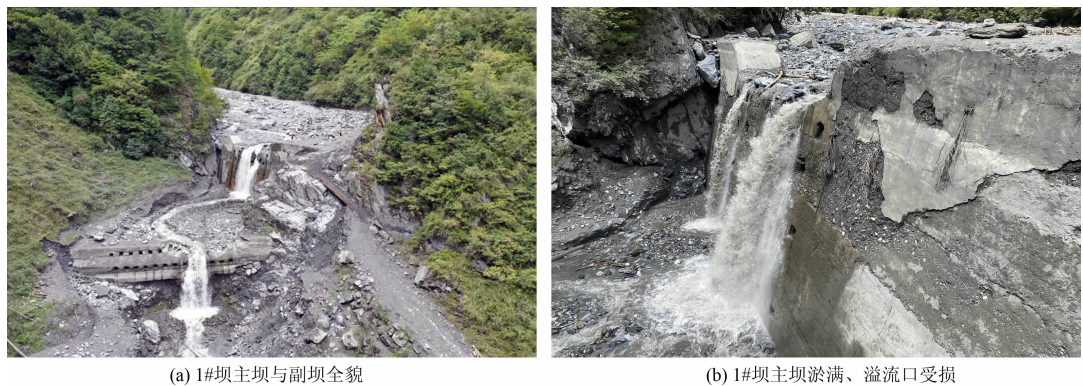


图 11 “8·16”后 1#拦砂坝运行情况

Fig. 11 Operation situation of 1# dam after “8·16” rainstorm



图 12 “8·16”前后 2#拦砂坝运行情况

Fig. 12 Operation situation of 2# dam before and after “8·16” rainstorm

放大,下切和侧蚀能力增强,对原沟道松散堆积物侵蚀铲刮作用明显提高^[15],沿程物源不断进入沟道形成泥石流体,最终使翻坝泥石流流量及规模产生放大效应。

3.2 排导槽弯道超高,侧蚀和底蚀严重,防护工程损毁

和平沟域内防护工程主要位于和平沟沟口,

“8·16”泥石流在弯道处对排导槽沟底及侧墙基础产生强烈冲刷侵蚀下切,排导槽段弯道基础悬空,最终倾倒损毁长约 50 m,排导槽损毁后泥石流越过沟道漫流至居民建筑区。该排导槽在两次泥石流灾害中发挥了很好的防护及排导效能,但由于泥石流流域内固体物源丰富,两座拦砂坝满库运行,泥石流翻坝规模放大,造成排导槽排泄压力增大。排导槽的

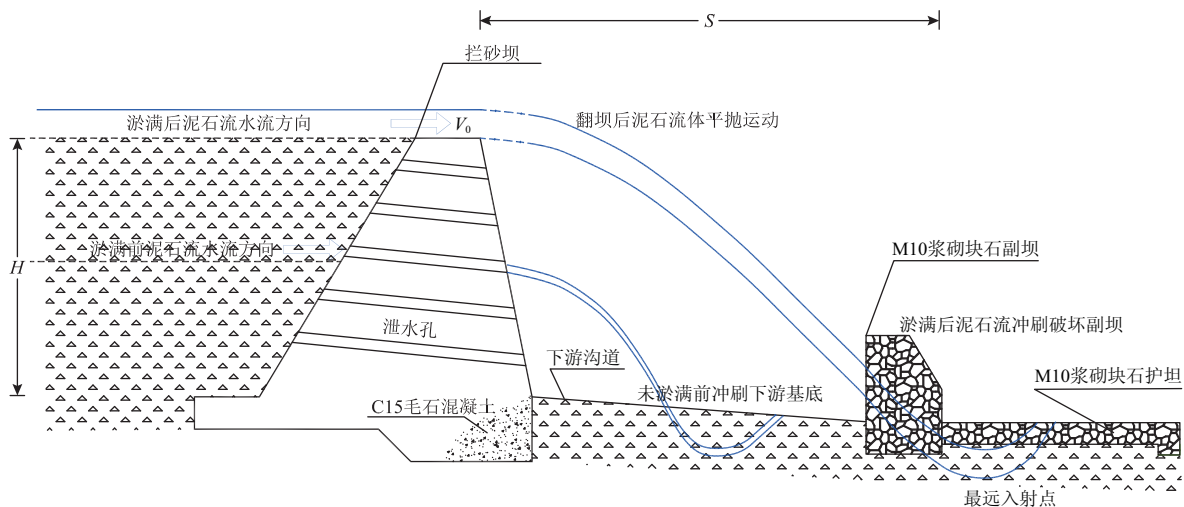


图 13 泥石流翻坝运动过程示意图

Fig.13 Movement model schematic diagram of debris flow over dam

破坏模式为“沟底冲刷侵蚀→侧墙基础掏蚀→侧墙悬空→侧墙失稳倾倒”(图 14),类似的损毁模式在泥石流治理工程实践中较为普遍^[16]。

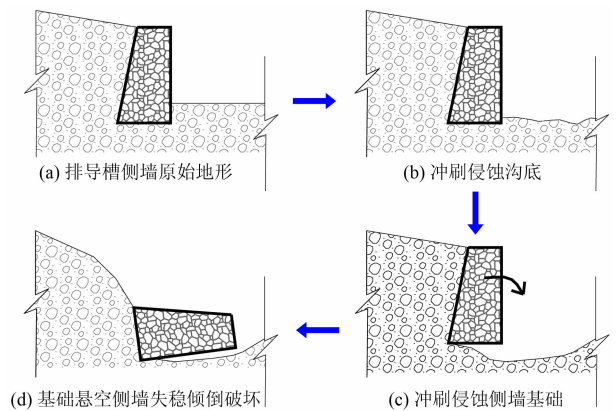


图 14 排导槽侧墙破坏过程示意图



(a) 排导槽基础冲刷 (b) 排导槽侧墙损毁

图 15 “8·16”前后排导槽运行情况

Fig.15 Operation situation of drainage canal before and after “8·16” rainstorm

4 结论与讨论

4.1 结论

和平沟泥石流是处于芦山地震灾区已工程治理的泥石流,历史上多次暴发泥石流。泥石流沟流域地形陡峻、汇水面积大、动力条件好。受“5·12”和“4·20”及多次强降雨影响,沟内物源丰富,目前泥石流处于相对活跃期,一旦遭遇暴雨,可再次引发泥石流灾害。

和平沟“8·16”泥石流的形成是在丰富的前期降雨及短历史强降雨共同影响和激发下形成的,前 15 日有效累计降雨量达到 204.5 mm,当次激发小时雨强为 8 月 15 日的 21:50 的 25 mm/h。

该沟按照 20 年一遇的设防标准余于 2012 年 6 月完实施防治工程,总体方案为拦挡与排导相结合,主要工程措施为“2 座拦砂坝(含副坝)+沟口排导槽”。截止到 2022 年“8·16”泥石流暴发,该沟治理工程经历“4·20 地震”及 10 个汛期,泥石流沟从治理工程完成至再次成灾过程期间历经 10 余年,泥石流沟的发展过程可概化为“拦挡工程发挥效益→逐步淤积→库内沟床抬高→新崩滑物源形成→拦砂坝逐步淤满→翻坝→泥石流翻坝规模放大→致灾”等一系列过程。

和平沟拦挡工程在减轻泥石流灾害上发挥了重要作用,该次泥石流在冲出沟口距离最大小时雨强出现时间间距约 6 h,拦砂坝剩余库容在调节泥石流峰值流量达到沟口起到了重要作用,说明拦挡工程对泥石流运动过程有重要的调节作用。但当拦砂坝库容满库运行时,泥石流翻坝后流量及规模会产生放大效应,泥石流在坝下游入射速度较初始速度增加达 8.45 倍。

排导槽在运行过程中表现为“沟底冲刷侵蚀→侧墙基础掏蚀→侧墙悬空→侧墙失稳倾倒”的模式破坏,排导槽破坏后可能导致泥石流越沟对居民建筑造成淤埋破坏。因此,对排导槽基础埋深及是否铺底,应充分泥石流的在弯道处冲刷侵蚀特征。

目前两座拦挡坝 $8.67 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的库容已全部淤满,拦挡工程满库运行,坝基础及副坝均有不同程度的损坏,几乎丧失再次抵挡泥石流的防治功效,排导槽侧墙出现不同程度的毁损,因此亟需对原防治工程及时进行清淤加固和修复治理。

4.2 防灾减灾思路探讨

和平沟泥石流在工程治理之初沟口无过多的居民分布,因此设防标准仅为 20 年。在后期社会经济发展过程中,逐渐修建了和平安置点及仁朵藏寨,承灾体分布逐渐增加。原 20 年的设防能力在面对现有的承灾体时稍显不足,为此在国土空间规划中应充分考虑地质安全以及设防标准承载能力。所幸在遭受 2019 年 8 月 22 日晚强降雨后,当地自然资源部门立即组织专业技术人员对该沟及治理工程现状进行了应急调查,及时发现该沟沟内物源较之前增加幅度极大,且拦蓄空间严重不足。鉴于该沟再次暴发泥石流的可能性较大且已有治理工程防护功效不足,当地自然资源部门及地方政府在遇到 2022 年“8·16”降雨预警前及时做出了临灾响应,避免了

人员伤亡。

因此,对于已进行工程治理的泥石流沟的防灾减灾工作并不能因为已进行工程治理就放松警惕。治理后同样要密切关注强降雨天气,对沟内物源活动性进行监测;每年汛期到来之前应对拦挡工程的防治有效性进行评估,对库内淤积及时进行清运,留足拦蓄库容,及时消除隐患。如遇异常情况,及时发出预警信号,并提前做好转移安置工作,最大限度降低灾害损失。同时,国土空间规划中应充分考虑地质安全以及工程设防标准的承载能力,在开展地质灾害风险评价时应考虑防治工程的有效性,对防治工程的效性进行评价后按照评价结果相应调整风险等级。

参考文献(References)

- [1] 崔鹏,何思明,姚林侃,等.汶川地震山地灾害形成机理与风险控制[M].北京:科学出版社,2011:15-17. [CUI Peng, HE Siming, YAO Linkan, et al. The formation mechanism and risk control of mountain disasters caused by the Wenchuan earthquake [M]. Beijing: Science Press, 2011:15-17]
- [2] 陈宁生,周海波,卢阳,等.西南山区泥石流防治工程效益浅析[J].成都理工大学学报(自然科学版),2013,40(1):50-58. [CHEN Ningsheng, ZHOU Haibo, LU Yang, et al. Analysis of benefits of debris flow control projects in southwest mountain areas of China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science and Technology Edition), 2013, 40(1): 50-58] DOI: 10.3969/j.issn.1671-9727.2013.01.008
- [3] 曾庆铭,薛强,徐继伟.都江堰市龙池镇黄夹沟泥石流特征与防治工程效果分析[J].西北地质,2014,47(3):192-199. [ZENG Qingming, XUE Qiang, XU Jiwei. Analysis on the debris flow characteristics and effectiveness of prevention projects in Huangyang Gully in Longchi town of Dujiangyan city [J]. Northwestern Geology, 2014, 47(3): 192-199] DOI: 10.3969/j.issn.1009-6248.2014.03.025
- [4] 向龙,陈宁生,李俊.震后白沙河、龙溪河流域泥石流灾害治理效果分析——以四川都江堰市三合场沟为例[J].人民长江,2016,47(23):60-64. [XIANG Long, CHEN Ningsheng, LI Jun. Effect analysis of debris flow control in Baisha River basin and Longxi River basin after earthquake: Case of Sanhechang Gully in Dujiangyan city, Sichuan province [J]. Yangtze River, 2016, 47(23): 60-64] DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2016.23.013
- [5] 周文兵,柳金峰,袁东,等.白龙江中游泥石流拦砂坝防治效果分析[J].长江科学院院报,2019,36(6):64-70. [ZHOU Wenbing, LIU Jinfeng, YUAN Dong, et al. Control effect of check dams on debris flow in the midstream of Bailong River [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, 36(9): 64-

- 70] DOI: 10.11988/ckyyb.20180205
- [6] 殷志强, 赵无忌, 褚宏亮, 等. “4·20”芦山地震诱发地质灾害基本特征及与“5·12”汶川地震对比分析[J]. 地质学报, 2014, **88**(6): 1145–1156. [YIN Zhiqiang, ZHAO Wuji, CHU Hongliang, et al. Basic characteristics of geohazards induced by Lushan earthquake and compare to them of Wenchuan earthquake [J]. Acta Geologica Sinica, 2014, **88**(6): 1145–1156] DOI: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2014.06.015
- [7] 崔鹏, 陈晓清, 张建强, 等. “4·20”芦山7·0级地震次生山地灾害活动特征与趋势[J]. 山地学报, 2013, **31**(3): 257–265. [CUI Peng, CHEN Xiaoqing, ZHANG Jianqiang, et al. Activities and tendency of mountain hazards induced by the Ms7.0 Lushan earthquake, April 20, 2013 [J]. Mountain Research, 2013, **31**(3): 257–265] DOI: 10.16089/j.cnki.1008–2786.2013.03.018
- [8] 张文涛, 柳金峰, 游勇, 等. 泥石流岩土防治工程治理效果分析与评价——以四川汶川卧龙幸福沟为例[J]. 灾害学, 2021, **36**(3): 208–214. [ZHANG Wentao, LIU Jinfeng, YOU Yong, et al. Analysis and evaluation of the treatment effect of the geotechnical engineering of debris flow: Case of Xingfu Gully in Wolong [J]. Journal of Catastrophology, 2021, **36**(3): 208–214] DOI: 10.3969/j.issn.1000–811X.2021.03.036
- [9] 宋国虎, 张继, 杨桢贤. 震后泥石流治理工程有效性评价及存在问题分析[J]. 灾害学, 2022, **37**(1): 58–67. [SONG Guohu, ZHANG Ji, YANG Zhenxian. Effectiveness evaluation and problems analysis of debris flow control project after earthquake [J]. Journal of Catastrophology, 2022, **37**(1): 58–67] DOI: 10.3969/j.issn.1000–811X.2022.01.011
- [10] 许强, 李骅锦, 何雨森, 等. 文家沟泥石流治理工程效果的定量分析评价[J]. 工程地质学报, 2017, **25**(4): 1046–1056. [XU Qiang, LI Huajin, HE Yusen, et al. Quantitative evaluation of engineering treatments for prevention of debris flow at Wenjia Gully [J]. Journal of Engineering Geology, 2017, **25**(4): 1046–1056] DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2017.04.019
- [11] 亓星, 许强, 余斌, 等. 汶川震区文家沟泥石流治理工程效果分析[J]. 地质科技情报, 2016, **35**(1): 161–165. [QI Xing, XU Qiang, YU Bin, et al. Treatment effects in Wenjia Gully, Wenchuan earthquake area [J]. Geological Science and Technology Information, 2016, **35**(1): 161–165]
- [12] 胡凯衡, 崔鹏, 马超, 等. 宁南县矮子沟“6·28”特大灾害性泥石流成因和特征[J]. 山地学报, 2012, **30**(6): 696–700. [HU Kaiheng, CUI Peng, MA Chao, et al. Causes and characteristics of 28 June disastrous debris flow event in Ningnan county of Sichuan, China [J]. Mountain Research, 2012, **30**(6): 696–700] DOI: 10.16089/j.cnki.1008–2786.2012.06.016
- [13] 崔鹏, 杨坤, 陈杰. 前期降雨对泥石流形成的贡献——以蒋家沟泥石流形成为例[J]. 中国水土保持科学, 2003, **1**(1): 11–15. [CUI Peng, YANG Kun, CHEN Jie. Relationship between occurrence of debris flow and antecedent precipitation: Taking the Jiangjia Gully as an example [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2003, **1**(1): 11–15] DOI: 10.16843/j.sswc.2003.01.006
- [14] 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. [ZHANG Youyi, ZHONG Lei, FAN Xiaoyi, et al. The disaster model of debris flows after earthquake at Chutou Gully of Minjiang River Valley, China [J]. Mountain Research, 2021, **39**(5): 756–766] DOI: 10.16089/j.cnki.1008–2786.000636
- [15] 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): 1527–1541. [LI Xianglong, TANG Huiming, XIONG Chengren, et al. Influence of substrate ploughing and erosion effect on process of rock avalanche [J]. Rock and Mechanics, 2012, **33**(5): 1527–1541] DOI: 10.16285/j.rsm.2012.05.018
- [16] 蔡红刚. 汶川震区泥石流防护工程损毁特征及破坏机制研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2012: 35–36. [CAI Honggang. Investigation of damage features and study failure mechanism to protection engineering for debris flow in the Wenchuan earthquake region [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2012: 35–36]

Post-Shock Performance of A Debris Flow Dam Built at the Heping Gully, Baoxing County, Sichuan Province, China

SONG Guohu^{1,2}, YANG Zhenxian^{1,2*}, ZHANG Ji^{1,2}, YANG Jun^{1,2}

(1. The 1st Geological Brigade of Sichuan Province. Chengdu 610072, China;

2. Sichuan Institute of Geological Engineering Investigation Group Co., Ltd., Chengdu 610072, China)

Abstract: The Heping gully is located at Qiaoqi town in the north of Baoxing county, Sichuan province of China, where it suffered a Ms7.0 earthquake in 2013 and Ms6.1 earthquake in 2022, both with the same epicenter at

Lushan, a neighboring town to Qiaoqi. The debris flow retaining dam in the gully has functioned normally for almost 10 years since it was built in 2012, which played an active role in geo-disaster control, but it has been running into a stage of deteriorating performance due to long disrepair. In 2020, there was a storm attacking the Heping gully on October 16; the retaining dam failed severely with massive debris flow rushing out of the gully mouth.

We conducted an emergency survey of the debris flow occurrence; the triggering mechanism of the debris flow was analyzed; the poor performance of the debris flow dam was scrutinized for risk assessment.

It found the Heping gully from a state of empty storage capacity in retaining dam after construction completion evolved into a tendency toward recurrence of debris flow, which can be generalized as a series of phases, including dam working normally→storage capacity of retaining dam decreasing gradually→gully bed behind dam uplifting in the upstream→geo-material accumulating along the gully floor due to slope collapsing→silting up to full in dam storage →debris flow overflowing the dam→debris flow scaling up after overflowing→geo-catastrophe forming.

Rich precedent precipitation and short-term storm were critical factors in debris flow formation. According to field survey, in case a cumulative effective precipitation reach to 204.5 mm in the former 15 days, an hourly rainfall intensity of 25 mm/h was capable of triggering debris flow.

In case of retaining dam in full, the destruction consequence of a debris flow definitely was amplified after overflowing the dam; the incident velocity of a debris flow increased by about 8.45 times compared with its initial velocity.

There was a pattern to describe the deterioration process of debris flow drainage flume. It could be divided into four stages: eroding at flume floor→eroding sidewall foundation→sidewall suspending→sidewall toppling or collapsing.

Although some debris flow gullies had already built prevention and control projects in earthquake-hit areas, which performed well in the past, but there are still geohazard risk, which should be pre-cautioned and fully prepared for geo-hazard mitigation. And in national spatial planning, geological safety and the carrying capacity of a prevention and control engineering fortification standards should be included.

Key words: earthquake-hit area; debris flow dam; performance; the Heping gully

(责任编辑 朱颖彦 李嵘)