

文章编号: 1008-2786-(2020)3-473-10

DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000485

泥石流拦挡坝破损分析及优化对策 ——以陇南市武都区为例

刘兴荣,周自强*,董耀刚,吴玮江,魏万鸿

(甘肃省科学院地质自然灾害防治研究所,兰州 730000)

摘 要: 拦挡坝的破损研究是困扰泥石流治理工程的主要难点之一,分析总结拦挡坝破损原因,优化其设计理念十分重要。本文对陇南市武都区 16 条沟道的 65 道泥石流拦挡坝破损形式及导致坝体破损的相关条件进行详细调查和统计分析。结果表明:(1)拦挡坝破损形式主要有以下几种(按破损概率由大到小排序),依次为副坝破损、坝肩破损、溢流口破损、基础破损、冲毁(失去功能)、勾缝破损;(2)根据拦挡坝破损特征统计分析,确定其破损主要与泥石流性质、圬工材料、坝体高度、坝体选址、坝肩保护、基础保护和库容淤积等情况有关;(3)导致拦挡坝破损的主要原因总结为对沟道机理认识不足、坝体自身存在缺陷和保护措施不当。在此基础上,从理论研究、工程管理、拦挡坝体系设计、新技术新方法应用等方面着手,提出了拦挡坝防治工程优化对策。

关键词: 泥石流拦挡坝;拦挡坝破损;统计分析;优化对策

中图分类号: X43

文献标志码: A

甘肃南部地区是我国主要的泥石流高发区之一,又是汶川地震破坏区^[1-2],曾多次发生较大泥石流灾害,如 2008 年“7.17”康县及成县暴洪灾害、2010 年“8.8”舟曲泥石流灾害、2010 年“8.12”陇南市多县暴洪灾害、2017 年陇南“8.7”泥石流灾害等。据不完全统计,“5.12”地震以来,甘肃省已对近 400 多条泥石流沟道进行了治理,投入资金达数十亿元之多,无论是治理数量还是资金投入都创下了历史之最,同时也为甘肃省泥石流沟道的防治积累了丰富的经验。

拦挡坝是泥石流防治的一项重要工程类型,在泥石流治理中发挥着无可替代的作用^[3-4],然而,优化坝体结构、防止其被破坏,一直是工程治理的关注

焦点。20 世纪中期,康志成、李焯芬、周必凡、李德基等从工程实践的角度,开始系统地调查泥石流拦挡坝破损,总结了拦挡坝主要受损条件及保障其安全的相关方法^[3-6];之后,泥石流工作者主要从拦挡坝稳定性^[7-8]、结构优化^[9-11]、泥石流物质对拦挡坝的冲击破坏^[12-14]等方面出发,研究保护拦挡坝不受破损、尽可能延长其使用周期的主要措施,使得拦挡坝在选址、设计、结构优化等方面有了较理想的改进。虽然有关泥石流拦挡坝的研究已经较为丰富,但上述研究要么单纯来自实验室模拟,缺乏野外运行例证的考验,要么仅解决拦挡坝结构的某一方面改进,并未对拦挡坝设计进行整体优化。

本文将武都区泥石流拦挡坝整体作为研究对

收稿日期(Received date):2020-02-28;改回日期(Accepted date):2020-05-12

基金项目(Foundation item):第二次青藏高原综合科学考察研究资助(2019QZKK0902);甘肃省科技计划项目(18JR3RA251);甘肃科学院科技产业化项目(CY08)。[The Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research Program(2019QZKK0902);The Projects of the Gansu Department of Science(18JR3RA251);Science and Technology Industrialization Project of Gansu Academy of Sciences(CY08)]

作者简介(Biography):刘兴荣(1979-),男,甘肃靖远人,副研究员,主要研究方向:地质灾害防治。[LIU Xingrong(1979-),male,born in Jingyuan,Gansu Province,associate research fellow,mainly engaged in geological disaster prevention and control]E-mail:402794885@qq.com

* 通讯作者(Corresponding author):周自强(1965-),男,甘肃天水人,研究员,主要研究方向:地质灾害防治。[ZHOU Ziqiang(1970-),male,born in Tianshui,Gansu Province,research fellow,mainly engaged in geological disaster prevention and control]E-mail:zzq01118@163.com

象,运用统计的方法,调查拦挡坝的运行工况,科学总结拦挡坝的破损原因,为泥石流拦挡坝的优化设计提供理论依据,为其运行管理和后期维护提供科学支撑。

1 研究区概况

1.1 调查点选择

据不完全统计,自“5.12”汶川地震以来,陇南市武都区对 30 多条泥石流沟道实施了综合治理。本次调查选择相对集中、影响因素接近的泥湾沟等 16 条泥石流治理沟道进行了详细调查,采用 1 架大疆 Mavic 2 无人机对拦挡坝及上下游进行补充调查拍摄,统计坝体破损的主要影响因素及灾害背景,便于区域内泥石流治理工程的改进和完善(见图 1)。

1.2 地质环境概况

武都区位于青藏高原东北缘陡坡过渡带,在地貌单元上属西秦岭侵蚀—剥蚀构造山地,区内地形陡峻且沟谷发育,固体物质丰富,泥石流分布密度和发生频率均居国内首位,以粘性泥石流为主。武都区有灾害性泥石流沟将近 236 条,其中有 170 多条分布于区域中北部,占武都区泥石流总数的 70% 以上。本次调查区域主要集中在两水镇、城关区、东江镇和汉王镇,为泥石流发育相对集中区域,泥石流分

布密度约为 20~30 条/(100 km²),泥石流爆发频率一般为 2~3 年 1 次。

武都区降雨集中,暴雨、大暴雨相对居多,这种降水特点为沟岸坍塌和滑坡的形成创造了有利条件,导致短时间在沟道内聚集大量泥石流物质。曾思伟等^[15]认为,在陇南市 1 d 降雨量超过 25 mm,小流域 10 min 降雨量超过 10 mm,或 30 min 降雨量超过 20 mm,就有可能诱发泥石流。研究区内超过上述降雨阈值的频率较高,这是导致区内泥石流频发的主要原因之一。

区内地层岩性软弱,出露的地层由老到新主要有志留系(S)、新近系(N)、第四系(Q)。其中,志留系是区内主要地层,以千枚岩、炭质千枚岩、板岩为主,岩层褶皱较多,小断层十分发育,是泥石流物质的主要来源;新近系主要为砂砾岩,钙质胶结,砾石直径 10~15 cm,裂隙发育,形成的很多巨石直接参与泥石流运动;第四系地层主要有白龙江 I、II 级阶段冲洪积堆积物、泥石流堆积物、重力堆积物、残坡积物和中—上更新统黄土,是泥石流物质的有力补充。同时,区内构造和新构造运动活动强烈,地震活动频繁,尤其是有史以来的百余次大于 5 级的地震,在沟道两侧诱发了大量滑坡、崩塌,为泥石流的形成聚集了规模较大的松散固体物质。

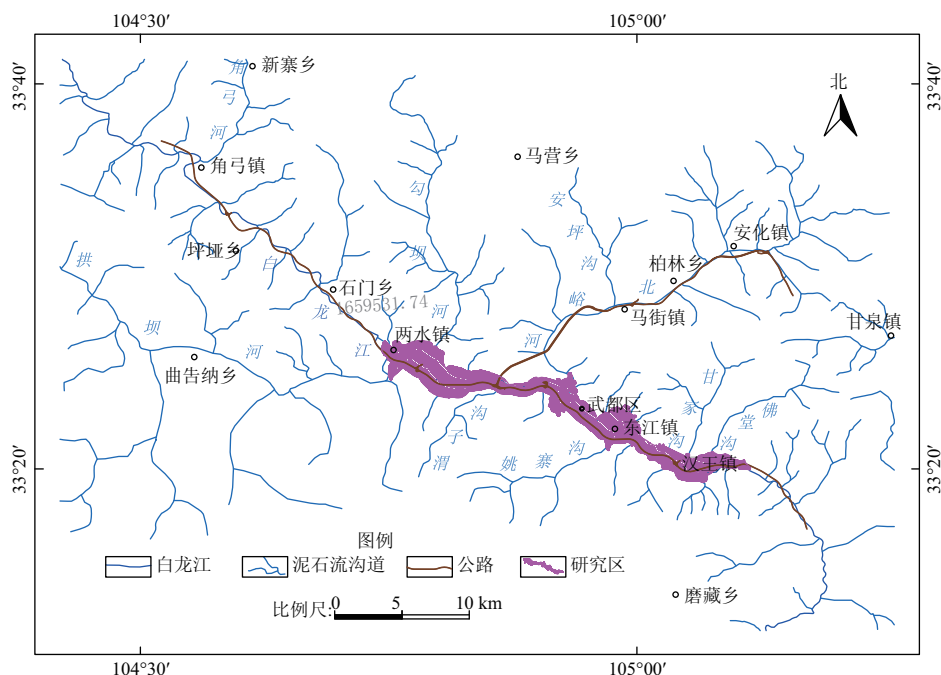


图 1 研究区示意图

Fig. 1 Schematic map of study area

1.3 泥石流危害模式

武都区泥石流沟道特征比较明显。其中,较大规模泥石流沟道的松散物质主要集中在中下游地段,形成区不明显,由于流域狭长,泥石流流程长、强度大、规模大,沟道内沉积物有分段、分期搬运现象,危害模式主要有冲刷、淤积、掏蚀、撞击和磨蚀等。较小规模泥石流沟道多呈漏斗状,形成区与堆积区较难分隔,堆积作用明显,由于沟道面积小,汇水有限,形成的泥石流一般重度大、规模小,但泥石流堆积物多为一次搬运,其流速快、过程短、冲击力强,危害作用以淤积和夹杂石块的撞击为主。

1.4 拦挡坝的布设特征

拦挡坝大多分布在沟道中下游区域,坝肩和基础

以基岩或者碎石土(由坡积、白龙江洪积和泥石流堆积形成)为主。坝体布设有三种情况,如图2所示:(1)一侧布设在基岩上,另一侧分布设在碎石土上;(2)布设在基岩体上;(3)布设在碎石土上。

2 研究方法

2.1 沟道特征

16条泥石流沟以中、小型为主,均为暴雨激发型。其中,粘性泥石流8条,稀性泥石流8条;大型泥石流2条,中型泥石流8条,小型泥石流6条;高易发泥石流5条、中易发泥石流8条,低易发泥石流3条(见表1)。

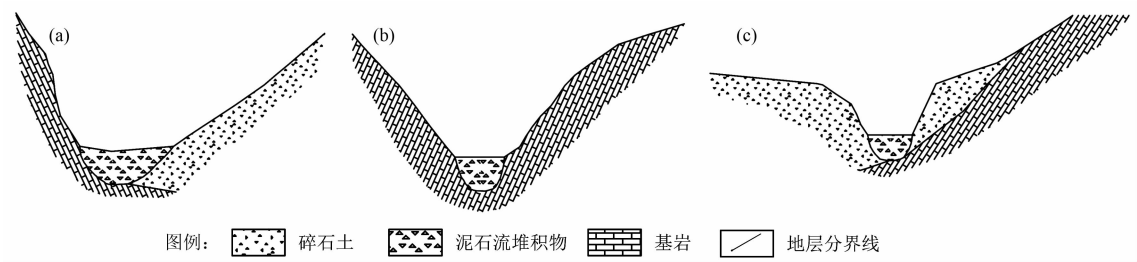


图2 拦挡坝工程地质条件示意图
Fig.2 Schematic diagram of geological conditions of dam

表1 泥石流沟主要参数统计表
Table 1 Main parameters of debris flow gully

流域名称	面积/km ²	主沟长/km	主沟比降/‰	平均坡度/(°)	流量(2%)/(m ³ /s)	泥石流性质	规模	易发性
泥湾沟	10.30	5.34	110	25~45	187.90	粘	中	高易发
缠坡里沟	0.25	0.90	100	30~40	3.40	稀	小	中易发
缠坡沟	0.23	0.60	320	45~60	4.80	稀	小	中易发
大湾沟	1.50	3.50	230	25~40	21.90	稀	中	中易发
正叉沟	1.10	1.40	285	30~40	18.30	粘	中	中易发
清水沟	2.22	2.70	400	35~50	30.40	稀	中	中易发
教场小沟	0.33	0.97	290	35~50	6.40	稀	小	中易发
桥子沟	0.29	0.75	240	30~45	6.00	稀	小	中易发
东江水沟	6.71	5.64	217	50~70	113.50	粘	中	高易发
王沟	3.57	2.00	255	35~45	49.30	粘	中	中易发
王村东沟	0.43	0.80	490	30~45	10.50	稀	小	低易发
燕沟里沟	1.09	1.38	267	35~50	22.80	粘	中	低易发
燕儿沟	4.33	3.10	110	50~75	104.00	粘	中	高易发
燕儿东沟	0.12	0.46	520	30~45	2.70	稀	小	低易发
甘家沟	40.40	10.10	69	35~40	1133.30	粘	大	高易发
佛堂沟	44.71	9.90	113	25~35	1247.50	粘	大	高易发

2.2 数据获取

采用现场调查、GPS(Magellan Triton 500) 获取拦挡坝坐标与高程;大疆 Mavic 2 无人机航拍坝体整体运行情况和无法到达区域。本次调查除佛堂沟 8 号坝、东江水沟 1 号坝和甘家沟 1~4 号坝无法到达现场外,其余各沟道拦挡坝具体信息如表 2 所示,将影响因素和破损情况一一对应。

3 拦挡坝破损形式

按破损部位分,拦挡坝主要破损形式有以下 5 种:冲毁(功能丧失)、副坝破损、溢流口破损、坝肩破损、基础破损、勾缝破损。同一坝体破损部位要重复统计。由图 3 知,破损概率由大到小依次排序为:副坝、坝肩、溢流口、基础、冲毁、勾缝。

调查结果与实际情况相符。主坝的设计有规范依据,能确保其运行安全,副坝设计仅凭设计人员经验,没有统一要求,导致安全性较主坝差;坝肩、溢流口、基础都是坝体的薄弱点,已调查的拦

挡坝工程中,很少针对 3 处同时加强保护;基础破损多为未设副坝或者护坦的坝体,长期遭受下切或撞击破坏;拦挡坝冲毁多发生在同一条沟道内,主要是对泥石流流形成机理认识不足,工程治理不到位,或者是泥石流规模超过了防控标准;勾缝等破损大多是工程质量问题,需要加强施工管理。

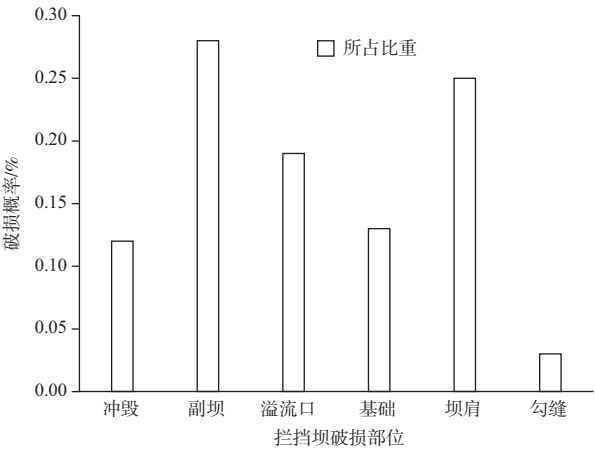


图 3 拦挡坝破损形式统计

Fig.3 Statistics of damaged parts of dam

表 2 拦挡坝调查信息

Tab.2 Investigative information of dam

流域名称	坝体高度 /m	材料		选址情况			坝肩处理		基础保护		库容		破损情况		数量 /道
		砼	浆	选址 合理	选址基 本合理	选址 不合理	有保护 工程	无保护 工程	副 坝	护 坦	库容 淤积满	库容 有空余	完 好	破 损	
泥湾沟	5.0~11.0	-	7	-	5	2	-	7	1	-	1	6	-	7	7
缠坡里沟	7.0~8.0	-	2	1	1	-	-	2	-	-	-	2	1	1	2
缠坡沟	4.0~5.5	-	3	3	-	-	3	-	1	3	-	3	3	-	3
大湾沟	4.5~11.5	-	4	4	-	-	-	4	2	-	4	-	2	2	4
正叉沟	7.5~8.5	-	2	2	-	-	2	-	-	2	-	2	2	-	2
清水沟	3.0~8.0	-	4	3	1	-	1	-	2	-	2	2	-	4	4
教场小沟	8.0~8.5	1	2	2	-	1	1	2	2	-	-	3	3	-	3
桥子沟	5.0~5.5	-	2	2	-	-	-	2	2	-	-	2	-	2	2
东江水沟	8.0~19.0	3	5	8	-	-	3	5	5	-	-	8	7	1	8
王沟	4.0~8.0	3	-	2	1	-	3	-	3	-	2	1	2	1	3
王村东沟	12.5	1	-	1	-	-	1	-	1	-	-	1	1	-	1
燕沟里沟	10.0~11.0	-	2	1	1	-	2	-	2	-	-	2	1	1	2
燕儿沟	4.5~12.0	-	6	2	2	2	3	3	1	-	5	1	2	4	6
燕儿东一沟	1.5	-	1	-	1	-	-	1	-	-	-	1	1	-	1
甘家沟	12.0~14.0	-	3	3	-	-	3	-	3	-	2	1	1	2	3
佛堂沟	3.5~8.0	-	14	13	1	-	11	4	11	-	-	14	10	4	14

4 结果与分析

拦挡坝的破损主要与泥石流沟道特征、坝体圯工材料、坝体高度、坝体选址、坝肩保护、基础保护和库容淤积等工况有关。

4.1 泥石流沟道特征影响拦挡坝安全

沟道特征影响泥石流性质、规模和易发性的程度。

从图4知,粘性泥石流破坏程度大于稀性泥石流,其破坏概率高达87.5%,甚至造成坝体冲毁;稀性泥石流沟道中拦挡坝的破坏概率约50%,大多为局部破损,修缮后仍能较好使用。规模大的泥石流沟道对拦挡坝的破坏概率达到了100%;规模中等的沟道对拦挡坝的破坏概率也在85%以上,其破坏程度几乎和规模大的沟道一样;规模小的泥石流沟道对拦挡坝的破坏概率为33%,其破坏程度小,容易修复。高易发的泥石流沟道对拦挡坝的破坏概率达到了100%,中易发的泥石流沟道对拦挡坝的破坏概率也在60%以上,低易发的泥石流沟道对拦挡坝的破坏概率接近33%。从武都地区看,高易发沟道对拦挡坝的破坏程度高,冲毁的拦挡坝都发生在高易发沟道内;中易发沟道对拦挡坝的破坏程度也较高,一般破坏坝肩和溢流口;而低易发沟道对拦挡坝的破坏程度低,容易造成基础冲刷和副坝局部破损。

因此,对粘性、大中规模、高易发泥石流沟道的

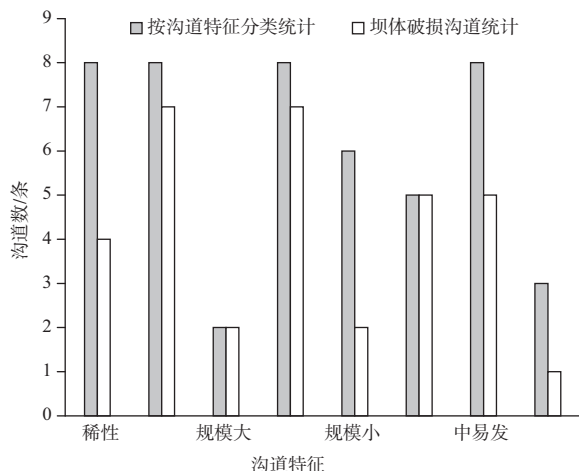


图4 泥石流特征与拦挡坝破坏情况统计分析图

Fig.4 Statistical analysis figure of nature characteristics and damage of dam

治理要适当加大治理标准,尤其要加强细部结构保护。

4.2 圯工材料对拦挡坝破坏影响

武都区拦挡坝圯工材料以浆砌石为主。有12条沟道砌筑浆砌石拦挡坝,占调查沟道的75%,调查的拦挡坝中有58道由浆砌石砌筑,占调查总数的88%;仅有4条沟道全部或部分建有砼拦挡坝(共8道,仅占调查拦挡坝总数的12%),比例很小,砼拦挡坝也是近几年新治理沟道或者原治理沟道内新增设的拦挡坝;调查未发现钢筋砼拦挡坝。说明武都区泥石流治理的标准相对较低。

图5表明,浆砌石拦挡坝的破坏概率达到了50%,且发生冲毁的拦挡坝圯工材料均为浆砌石,而砼拦挡坝的破坏概率仅占12.5%。因此,在泥石流治理中还是应尽量选择砼作为圯工材料。

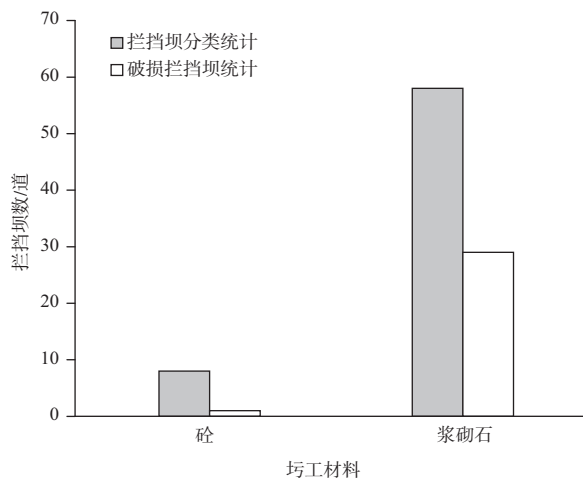


图5 圯工材料与拦挡坝破坏情况统计分析图

Fig.5 Statistical analysis figure of masonry materials and damage of dams

4.3 坝体高度对拦挡坝破坏影响

将调查的65道拦挡坝按坝高分为小于4m、4~8m(包括4m)、8~12m(包括12m)、大于12m四个区间。依照图6可知,各区间对应拦挡坝数分别为4道、31道、20道和10道,其破坏概率依次为50%、45%、40%和50%。从统计比例看,破坏的坝体均约占所在区间坝体总数的一半,说明坝体高度与泥石流拦挡坝破坏概率没有必然的关联。这与传统认识差别比较大,对拦挡坝的设计提出了新要求,无论是低坝、还是中高坝都要符合规范要求,不能因为是高坝就修豪华工程,也不能因为是低坝就降低

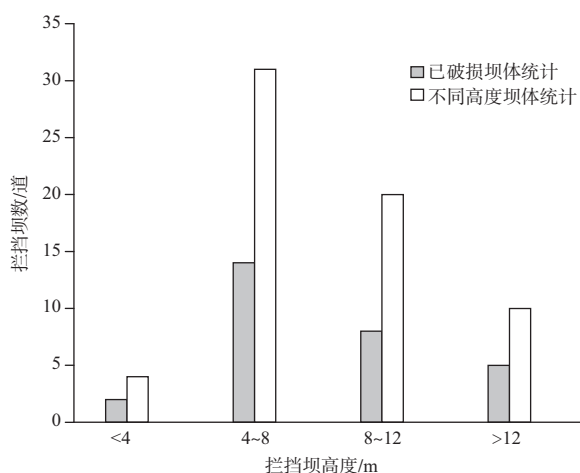


图6 坝体高度与拦挡坝破损情况统计分析图

Fig. 6 Statistical analysis figure of height and damage of dams

设计标准。

4.4 坝体选址对拦挡坝破损影响

拦挡坝的选址是否合理主要依照坝肩及基础地质情况、沟道坡降、库容大小、施工难度、是否有灾害体威胁、前后坝体相对位置等确定。从图7知,坝置选择合适的拦挡坝52道,占调查拦挡坝的80%;坝置选择基本合适的8道,占调查拦挡坝的12%;坝置选择不合适的5道,占调查拦挡坝的8%。进一步分析可知,坝置合理的拦挡坝破损概率仅为38%,基本合理的拦挡坝破损概率上升至46%,而坝置选择不合理的拦挡坝破损概率高达100%,其破损概率成倍增加。坝置选择应引起广大设计人员的高度重视。

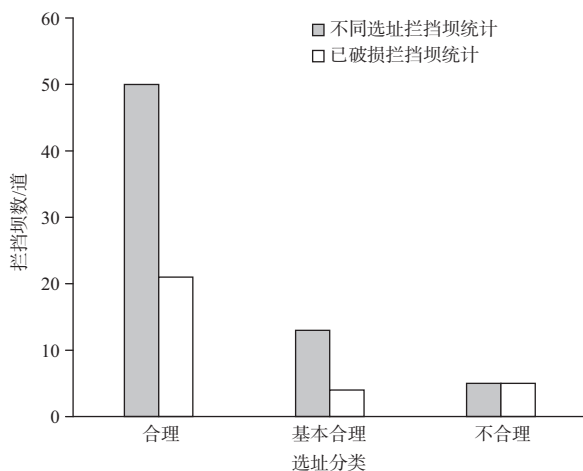


图7 坝体选址与拦挡坝破损情况统计分析图

Fig. 7 Statistical analysis figure of location and damage of dams

4.5 坝肩和基础保护措施对拦挡坝破损影响

坝肩和基础是坝体最容易遭受破损的部位,是保障坝体整体安全的关键。从图8可知,对坝肩进行保护(坝肩为基岩即当有坝肩保护统计)的拦挡坝22道,对坝体基础进行保护的拦挡坝38道。对坝肩保护后,其破损率仅占设有坝肩保护工程的拦挡坝总数的9%;对基础保护后,其破损率仅占设有坝体基础保护工程的拦挡坝总数的8%。说明坝体通过坝肩和基础保护工程的实施,均能较大幅度提升坝体安全。

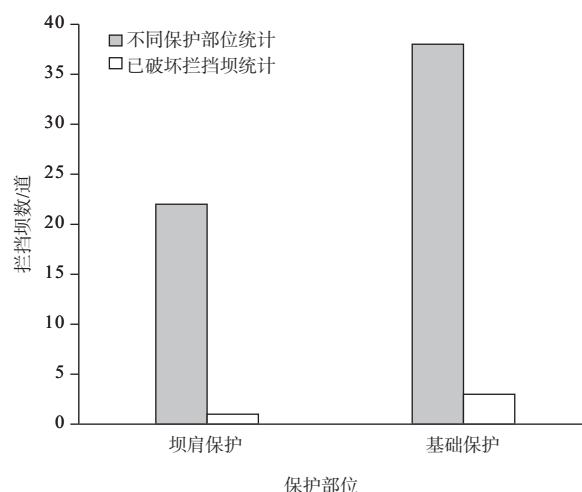


图8 坝肩和坝体基础保护与拦挡坝破损情况统计分析图

Fig. 8 Statistical analysis figure of abutment and foundation protection with damage of dams

4.6 库容淤积对拦挡坝破损影响

运行中的泥石流拦挡坝库容表现为3种状态:满库、有库余、空库(冲毁的拦挡坝不参与统计)。从图9可知,满库的拦挡坝15道,其对拦挡坝破坏最大,破损概率约占满库坝体数量的67%,由于淤满库容后,一方面增大了坝前壅水位,人为抬高泥石流,增大了泥石流对溢流口及坝肩的接触面,造成泥石流对溢流口和坝肩的直接磨蚀和侧蚀破坏,另一方面抬高后的泥石流势能增大,翻坝后对下游基础或护坦的冲击破坏增强;有库余的拦挡坝26道,其对拦挡坝破坏也较大,破损概率约占有库余拦挡坝数量的38%,主要破坏副坝,对溢流口也有少许破坏;空库的拦挡坝19道,其对拦挡坝破损相对较小,破损概率约占空库拦挡坝数量的26%,主要破坏副坝和坝肩的局部。在坝体运行的不同阶段,应有针

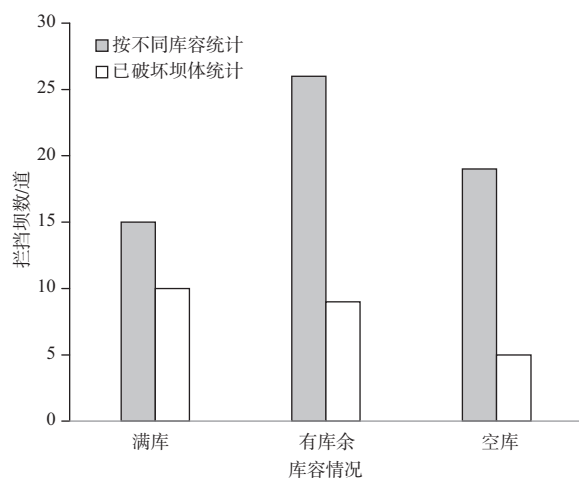


图9 库容淤积与拦挡坝破损情况统计分析图

Fig.9 Statistical analysis figure of storage capacity siltation with damage of dams

对性的加强巡查、维护和清淤。

5 拦挡坝破损原因分析

导致拦挡坝破损的因素很多,对应拦挡坝破损特征,主要总结为以下3个方面:对沟道机理认识不足、坝体自身存在缺陷和保护措施不当。

5.1 对沟道认识不足

在拦挡坝的设计中,各参数的选取和计算比较复杂、困难,经常借助地方经验公式和方法协助完成,即设计人员依据经验确定一些量化指标,由于不同专业人员针对同一沟道的机理认知差别较大。造成治理工程要么太保守,造成浪费;要么太薄弱,经不起泥石流破坏考验。

5.2 坝体自身存在缺陷

拦挡坝自身缺陷主要反映在以下3方面:一是拦挡坝圯工材料大多选择浆砌石,由于施工周期短、监管不到位,施工工艺不满足浆砌石砌筑要求(如坐浆不饱满、拉结石不规范等),存在质量缺陷;二是对坝体周边潜在灾害认识不足,拦挡坝的修建诱发边坡失稳、滑塌或落石,造成坝体摧毁或者局部砸坏,存在安全隐患;三是坝体库容小,拦蓄少,工程效益低。

5.3 保护措施不当

保护措施主要指坝肩保护和基础保护。

坝肩保护措施不到位主要有2种情况,其一是未对基岩边坡抠槽镶嵌(清除风化层),直接顶在表

层,接触面不粘连,容易被泥石流贯通;其二是碎石土边坡未修翼墙,泥石流淤积、水位抬高,在接触面形成侧蚀破坏。

为保护基础不被泥石流掏蚀,在拦挡坝背水侧修建护坦,或者在下游10~30m范围内修建副坝,又或者连续布设数道拦挡坝,形成坝群,上下彼此保护。护坦和副坝是附属工程,在设计中不被重视,为降低成本,通常缩小尺寸或降低材料标准,在泥石流长期的冲刷、砸、撞破坏下最容易失效。坝群形成后数量有限,相邻距离比较远,很难达到下游坝体抬高基准面保护上游坝体的目的,反而上游坝体遭到破坏后形成放大效应,加剧泥石流的破坏力度,造成下游更严重的破坏。比如泥湾沟坝体整体被毁就是很有力的证据。

6 防治对策研究

6.1 从理论研究与管理方面着手

(1)“5.12”地震以来,甘肃省泥石流理论研究已赶不上治理速度提高的需要,很多经验公式都沿用地震前的成果,很少考虑地震近期的“影响因素”;工程形式也多沿用早期模式,创新小;主体工程偏保守,细部结构加固处理不到位。泥石流治理工程应在计算公式和工程结构上加以优化。

(2)很多拦挡坝治理后管理缺失,修成的翻坝路或者人行路已破坏,导致人员无法到达(本次调查有3条沟道的6道坝无法到达,分别占调查沟道的19%和调查拦挡坝的9%),给坝体后期的管理和维护造成困难。调查发现很多破坏严重的坝体并不是一次泥石流破坏,而是没及时维修,逐渐被破坏。因此,治理工程完成后应尽可能预留翻坝路(至少预留人行路),汛期前后进行巡查,发现局部破损及时修复。后期巡查和维护是泥石流治理的一部分,应列专项资金,督促监管部门定期完成巡查和维护。

6.2 从完整的拦挡坝体系设计方面着手

上下游各坝体之间的距离较远,很难做到前后保护,却会放大破坏效应。因此,每道坝都应该是一个完整的、独立的体系,有自我保护功能。如图10所示,拦挡坝两侧(非基岩边坡)应修翼墙和翻坝路(或人行路);溢流口应采用钢筋砼加固;背水侧应修护坦;下游应修副坝(若坡降较大,应修2~3道,最后1道副坝也应加护坦)。

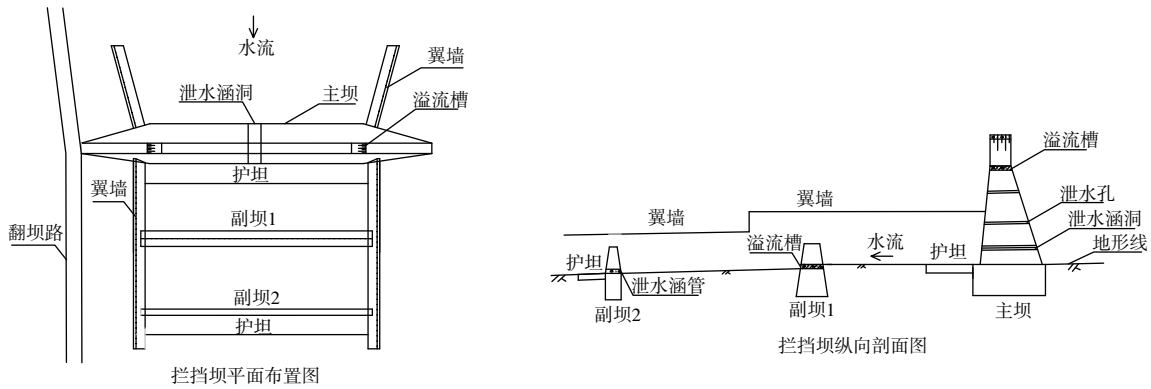


图 10 拦挡坝体系设计图

Fig. 10 System design of dam

6.3 从新技术新方法的应用方面着手

武都区泥石流的治理形式比较单一,对于新技术和新方法的应用比较滞后。传统拦挡坝规模大,基槽开挖或者修建运输道路会形成大量松散体,造成二次环境破坏,应引进一些新技术和新方法替代部分传统治理措施。如柔性防护^[16]和格宾石笼^[17]等拦挡和防护措施,既方便搬运(避免修路和开挖)、减小环境破坏,又节约成本、保证治理效果。

对于单个拦挡坝体系设计,也应刚柔结合,即在拦挡坝与沟道接触部位附加一些柔性防护措施过渡。柔性防护在应对沟道微地貌变形(冲、淤)效果更好,不会因为局部地形变化而破坏。

7 结论

本文统计了已有拦挡坝破损形式,指出拦挡坝治理工程结构的不完善,一方面可作为优化工程设计的依据,另一方能指导运行期间工程维护,最大程度保障灾后重建成果,让其发挥更大的作用。得出结论如下:

(1)通过对武都区泥石流拦挡坝破损形式汇总,发现其主要破损形式有:冲毁(失去功能)、副坝破损、溢流口破损、坝肩破损、基础破损、勾缝破损等,并通过概率统计的方法对其破损概率由大到小排序:副坝、坝肩、溢流口、基础、冲毁、勾缝。

(2)对拦挡坝破损原因分析发现:拦挡坝的破损主要与泥石流沟道特征、坝体圯工材料、坝高、坝体选址、坝肩处理、基础保护和库容淤积等情况有关。

(3)拦挡坝的设计要从理论研究、工程管理、完

整的体系设计、新技术和新方法应用等四方面着手。理论研究要与治理工程投入力度相一致;工程管理要补充工程验收后的巡查和维护;完整的体系设计要求坝群结合是一个高效的防灾体系,分开后每一道坝体也都能保证自身安全;新技术和新方法的应用,在保证治理效果的基础上,最大限度保护环境。

参考文献 (References)

- [1] CUI Peng, CHEN Xiaoqing, ZHU Yingyan, et al. The wenchuan earthquake (May 12, 2008), Sichuan province, China, and resulting geohazards[J]. Natural Hazards, 2011, **56**(1): 19 - 36.
- [2] 田述军,张静,张珊珊,等.震后泥石流防治工程减灾效益评价研究[J].灾害学,2020, **35**(3): 102 - 109. [TIAN Shujun, ZHANG Jing, ZHANG Shanshan, et al. Effectiveness evaluation of disaster reduction for debris flows control engineering after Wenchuan earthquake [J]. Journal of Catastrophology, 2020, **35**(3): 102 - 109]
- [3] 康志成.中国泥石流研究[M].北京:科学出版社,2004:195 - 211. [KANG Zhicheng. Research on debris flow in China [M]. Beijing: Science Press, 2004: 195 - 211]
- [4] 周必凡.泥石流防治指南[M].北京:科学出版社,1991:1 - 2. [ZHOU Bifan. Debris flow prevention and control guidelines. Beijing: Science Press, 1991: 1 - 2]
- [5] 李德基.泥石流减灾理论与实践[M].北京:科学出版社,1997: 150 - 167. [LI Deji. Theory and practice of debris flow disaster mitigation. Beijing: Science Press, 1997: 150 - 167]
- [6] 曾庆利,岳中琦,杨志法,等.谷坊在泥石流防治中的作用——以云南蒋家沟2条支沟的对比为例[J].岩石力学与工程学报, 2005, **24**(17): 3137 - 3145. [ZENG Qingli, YUE Zhongqi, YANG Zhifa, et al. Functions of check dam against debris flow: comparison of two watersheds of Jiangjia Gully, Yunnan, China [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(17): 3137 - 3145]

- [7] 刘建兵,杨曼,肖智锋,等. 泥石流重力拦挡坝稳定性验算方法探讨[J]. 东华理工大学学报:自然科学版,2013, **36**(s2):43-46. [LIU Jianbing, YANG man, XIAO zhifeng, et al. Calculation of the stability of the gravity dam in front of debris flows [J]. Journal of East China Institute of Technology (Natural Science), 2013, **36**(s2):43-46]
- [8] 丁霞,王琦,孙楠,等. 浆砌石拦挡坝稳定性验算及在泥石流灾害治理中的应用[J]. 探矿工程-岩土钻掘工程,2015, **42**(10):69-75. [DING Xia, WANG Qi, SUN Nan, et al. Stability checking of stone masonry landslide dam and the application in debris flow disaster treatment [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2015, **42**(10):69-75]
- [9] 王秀丽,李安民. 基于 ANSYS 泥石流拦挡坝设计软件的开发及应用[J]. 甘肃科学学报,2016, **28**(5):56-60. [WANG Xiuli, LI Anming. Development and application of ANSYS based debris flow blocking dam design software[J]. Journal of Gansu Sciences, 2016, **28**(5):56-60]
- [10] 王小军,陈晓清,谢湘平,等. 泥石流拦砂坝排泄孔优化及其数值模拟研究[J]. 科学技术与工程,2016, **16**(9):28-34. [WANG Xiaojun, CHEN Xiaoqing, XIE Xiangping, et al. The optimization of debris flow check dam drainage hole and its numerical simulation Research [J]. Science Technology and Engineering, 2016, **16**(9):28-34]
- [11] 马宗源,张骏,廖红建,等. 黏性泥石流拦挡工程数值模拟[J]. 岩土力学,2007, **28**(增刊):389-392. [MA Zongyuan, ZHANG Jun, LIAO Hongjian, et al. Numerical simulation of viscous debris flow block engineering [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(Supp):389-392]
- [12] 吴宏,董金义,李瑞冬,等. 三维可视化技术在舟曲县城区灾后重建泥石流防治工程中的应用[J]. 冰川冻土,2013, **35**(2):383-388. [WU Hong, DONG Jinyi, LI Ruidong, et al. Application of 3D visualization technology to debris flow control engineering of post-disaster reconstruction in Zhouqu County [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, **35**(2):383-388]
- [13] 张莉,游勇,柳金峰,等. 泥石流拦砂坝坝前沉积与坝基扬压力实验研究[J]. 山地学报,2018, **36**(2):271-279. [ZHANG Li, YOU Yong, LIU Jinfeng, et al. Experimental study on characteristics of debris flow deposition and the uplift pressure of a check dam [J]. Mountain Research, 2018, **36**(2):271-279]
- [14] 柳春,余志祥,骆丽茹,等. 含大块石泥石流冲击作用下混凝土拦挡坝的动力学行为研究[J]. 振动与冲击,2019, **38**(14):161-168, 238. [LIU Chun, YU Zhixiang, LUO Liru, et al. Dynamic behavior of a concrete dam impacted by debris flows with rock [J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, **38**(14):161-168+238]
- [15] 曾思伟,张世武,赵洪涛,等. 国道212公路(兰州—重庆)陇南段修筑技术研究[R]. 甘肃省科学院地质自然灾害防治研究所,2006:50-54. [ZENG Siwei, ZHANG Shiwu, ZHAO Hongtao, et al. Key technology study on NO. 212 national highway at Long Nan district [R]. Geological Hazards Prevention Institute, Gansu Academy of Sciences, 2006:50-54]
- [16] 李文侠. 加强型泥石流柔性防护体系抗冲击性能研究[D]. 兰州:兰州理工大学,2016:33-44. [LI Wenxia. Research on impact performance of reinforced flexible protection net of debris flow [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2016:33-44]
- [17] 张亚飞,徐光黎,谢书萌,等. 格宾石笼拦挡坝在玉树地震灾区泥石流治理工程中的应用[J]. 安全与环境工程,2013, **20**(5):11-14. [ZHANG Yafei, XU Guangli, XIE Shumeng, et al. Application of gabion dam to the regulation project of debris flow in Yushu seismic disaster area [J]. Safety and Environmental Engineering, 2013, **20**(5):11-14]

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

LIU Xingrong, ZHOU Ziqiang, DONG Yaogang, WU Weijiang, WEI Wanhong

(Geological Hazards Prevention Institute, Gansu Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: One of the engineering problems in debris flow control projects is to find out the failure patterns of retaining dams (check dams) and correspondingly to optimize their designs, which is challenging investigators. In this study, it made a detailed field investigation and statistical analysis of the damage patterns and the associated forming conditions of debris flow retaining dams, which was located at 16 gullies of Wudu District, Longnan City,

Gansu, China and suffered serious damages due to debris flows. The results show that: (1) The damage types of retaining dams are mainly grouped as follows (in order of percentage of damages from high to low): auxiliary dam breakage, abutment breakage, overflow mouth breakage, foundation failure, erosion sabotage (loss of function) and jointing cracking. (2) By analyzing the damage characteristics of retaining dams, it is concluded that the damages are mainly relevant to the properties of debris flows, masonry materials, dam height, dam site selection, dam abutment protection, dam foundation protection and storage capacity occupation. (3) The main reasons for the damages of retaining dams are summarized as follows: poor understanding of gully formations, structural defects in retaining dams and improper design or layout of retaining dams. According to aforesaid investigations, some optimization countermeasures for retaining dam prevention and control engineering are proposed in terms of the four approaches: theoretical exploration, construction management, design of retaining dam complex and the application of new technologies and new methods, etc. This research would be helpful to debris flow prevention and control engineering in China.

Key words: debris flow retaining dam; damage types; statistical analysis; optimized countermeasures in engineering