

沟谷泥石流活动特征对公路安全威胁及应对措施

吴 斌^{1,2}, 唐红波^{1,2}, 张 斌^{1,2}, 乔文号^{3,4}, 尹小涛³

(1. 云南大永高速公路有限公司, 云南 大理 671000;

2. 云南省交通投资建设集团有限公司, 云南 昆明 650200;

3. 中国科学院 武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071;

4. 中国科学院大学, 北京 100000)

摘 要:以大永高速公路八代村—杨家凹段泥石流安全威胁问题为研究对象,利用地面调查和现场测试,评估八代村、栗山村和杨家凹大规模冲积扇的冲沟泥石流危险性和动力特征,基于现状设计评估该路段桥涵路基的安全性。所得主要结论如下:多期次大规模冲洪积扇,应该进行安全分区,安全区宜采取路基通过,危险区应采取桥涵通过,潜在威胁区可采取有限加固条件下的路基或涵洞通过;八代村、栗山村、杨家凹的泥石流危险性、黏性、规模依次减弱;八代村桥梁临山侧堆积高度大于桥面,桥下净空过小,容易堵塞,应采取增加桥下净空+U型渡槽疏导+迎水面固坡+降低堆积物高度的联合整治措施;杨家凹涵洞存在过水断面偏小,容易水毁,应该取迎水面固坡+导流+固底+增加过水断面尺寸联合措施;其余水毁路段,应采取迎水面固坡+截排疏联合措施;工程建设针对泥石流灾害的有限工作应和国土资源部门的大范围系统工作结合起来才能保障工程泥石流风险的长期可控。

关键词:高速公路;冲沟;泥石流;冲洪积扇;动力特征

中图分类号: TV697.2⁺3

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2019)06—0215—06

Highway Security Threat by Dynamic Characteristics of Typical Gulch Debris Flows and Their Engineering Countermeasures

WU Bin^{1,2}, TANG Hongbo^{1,2}, ZHANG Bin^{1,2}, QIAO Wenhao^{3,4}, YIN Xiaotao³

(1. Yunnan Dayong Highway Limited Company, Dali, Yunnan 671000, China;

2. Yunnan Communications Investment & Construction Group Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650200, China;

3. State Key Laboratory of Geo-mechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China;

4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100000, China)

Abstract: By taking the security threat of debris flow in the Badai village – Yangjiawa section of Dayong Expressway as the research object, this paper adopted the ground investigation and field test to evaluate the debris flow hazard and dynamic characteristics of the main gullies of Badai village, Lishan village and Yangjiawa. Based on the current design, the safety of the bridge and culvert subgrade of the road section was evaluated. The main conclusions are as follows: For multi-stage and large-scale alluvial-distributed fan, safety division should be carried out. The safety zone should adopt the roadbed, the dangerous zone should pass the bridge and culvert, and the gray zone can pass the roadbed or culvert under the limited reinforcement condition. The risk, viscosity and scale of the debris flow in Badai village is

收稿日期: 2019-08-10

修稿日期: 2019-09-05

基金项目: 云南省交通运输厅项目(云交科教[2017]23号); 交通运输部科技示范项目(2017-09)

作者简介: 吴 斌(1971—), 男, 山东聊城人, 工程师, 主要从事高速公路建设管理工作。E-mail: 329256899@qq.com

通讯作者: 尹小涛(1975—), 男, 陕西咸阳人, 博士, 副研究员, 主要从事工程防灾减灾研究工作。E-mail: yxt9406@163.com

more serious than Lishan village which is worse than Yangjiawa. The bridge height of the Badai village bridge is higher than that of the bridge side, and the clearance under the bridge is too small. It is necessary to increase the joint clearance under the bridge + U-shaped aqueduct to guide the water surface and reduce the height of the deposit; Yangjia concave culvert If there is a small cross section of water, it is easy to be destroyed by water. It is necessary to take joint measures to meet the water surface slope, backflow, solid bottom and increase the cross-section size; the remaining water damage section should adopt the joint measures of the slope facing the slope and intercepting and draining. The limited work of the project construction for debris flow disasters should be combined with the extensive system work of the land and resources department to ensure the long-term controllability of the project debris flow risk.

Keywords: highway; gulch; debris flow; alluvial fan; dynamic characteristics

山区高速公路建设经常需要穿跨临山侧的各种冲洪积地貌,工程建设过程中,需要高度关注由此带来的泥石流安全威胁^[1-2]。大永高速公路八代村—杨家凹段,穿跨一系列大规模冲积扇和典型泥石流沟谷,需要评估由此带来的安全和技术保障问题。

山区高速公路建设,由于调高和线形要求,经常没有多少选择的余地,所以面临很多安全控制问题。面对泥石流的威胁,经常造成建设和运营的风险,多数条件很难保障长期安全可控目标^[3-4]。这是高速公路的线状特点造成的,其勘察设计是有限范围做出的常规方案。而泥石流的迁移特征,往往又是全影响域覆盖的^[5-9]。这个矛盾决定了桥、涵、路基应对冲洪积和沟谷地质条件的针对性往往不强或者严重不够。矛盾的解决需要全新的齐抓共管理念和局部加强及补充专项工作才能有效应对^[10-15]。

本文以大永高速公路八代村—杨家凹段为例,分析不同沟谷泥石流活动性和动力特征,探讨当前设计措施下高速公路穿跨方式的合理性和存在的问题。在大范围工作的基础上,查漏补缺,为泥石流安全风险控制提供综合安全管控建议。相关工作可为类似工程提供借鉴。

1 工程概况及潜在问题

1.1 泥石流沟谷和线路关系简介

永胜县地处我国西南地区,区域活动断裂发育,现代地壳活动强烈,造成工程区山体滑坡、泥石流、崩塌等地质灾害多发,极大的增加了公路工程建设的中长期安全风险。为保障高速公路建设施工的安全和建成后公路的正常运行,以八代村—杨家凹段大规模冲积扇为研究对象,结合这一区域的地质条件,展开可能影响高速公路路基和桥梁结构安全的洪积扇地质调查,主要调查内容包括区域地形地貌、区域地质、物质组成及特点、气候特点、水文条件、洪

积扇形态等,然后就可能的工程问题进行分析,并提出针对性的设计建议和工程处治措施。线路和八代村—杨家凹段冲积扇的关系,见图 1。



图 1 冲积扇和在建高速关系图

1.2 潜在工程安全问题

在建的大永高速公路(丽江段)以桥梁、涵洞和路基型式从八代村—杨家凹段大规模冲积扇通过,冲洪积物质堆积区位于山麓斜坡冲沟沟口宽缓地带,平面上呈喇叭状,受程海断裂带的影响,地形坡度一般在 $5^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 之间,长、宽几百米至一千米不等,堆积物厚度一般在 $15 \text{ m} \sim 20 \text{ m}$,局部 $> 30 \text{ m}$,堆积体岩性以碎石、角砾为主,夹杂含角砾黏性土,形成一系列山前洪积扇(裙)。

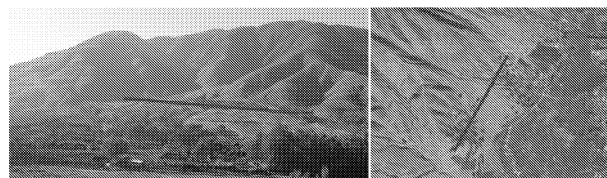


图 2 大规模冲积扇(黑粗线为公路示意)

根据地形资料,可以判断八代村—杨家凹段冲洪积扇区目前还有活动冲沟,地面调查也证明了这一点,整个扇区有 4 个活动沟谷,上部的主沟活动性相对较强,目前设置了桥梁,其余部位设置了涵洞,主沟内的多级挡墙和拦石坝基本已经淤满,主沟稳定性较差,对工程的影响主要为物源堆积场的规划

问题;支沟总体物源有限,主要是来水量的准确估算问题。

2 沟谷泥石流活动性评价

2.1 沟谷泥石流现状调查和工程稳定性定性评价

2.1.1 八代村沟谷

八代村泥石流冲积扇具有典型的山口堆积地貌特征,为多期次作用结果,分区明显,调查结果见图 3。

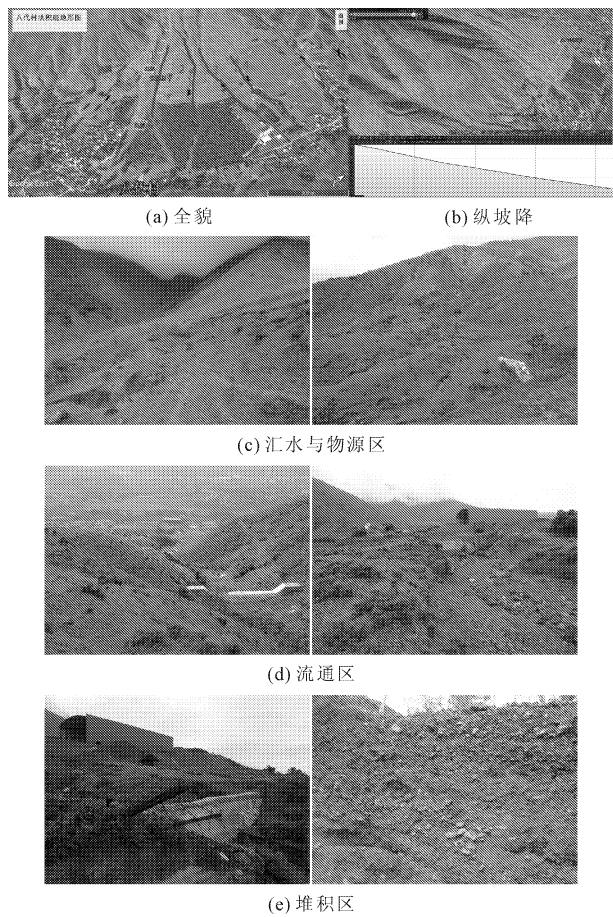


图 3 八代村冲沟调查照片

根据上述泥石流沟谷地面调查,所得泥石流活动性和潜在工程影响结论如下:

(1) 经过对八代村泥石流沟谷的调查,发现深部沟谷携带山体固体物质较多,多数为崩塌堆积物,坡面调查发现的孤石尺寸及其空间分布可以佐证一点;同时部分活动性较强的沟谷,如 1#沟设置多道拦砂坝和挡墙,已基本淤满,说明主沟具有一定活动性。

(2) 物源区和流通区,沟谷局部存在侧壁边坡稳定问题,往下稳定性趋好;但是沟谷掏侵蚀作用随着能量的消减往下逐步降低。不稳定的区域主要集

中在沟内有限范围,沟间山脊相对稳定,有多年耕种记录和人类工程活动为证。

(3) 目前八代村泥石流冲积扇还在发展中,几个沟谷的活动性,从左往右逐步降低,八代村冲沟会威胁桥梁安全,其余冲沟存在过水断面不足的问题。

2.1.2 栗山村沟谷

栗山村泥石流沟谷地质特征典型且明显,地面调查结果见图 4。

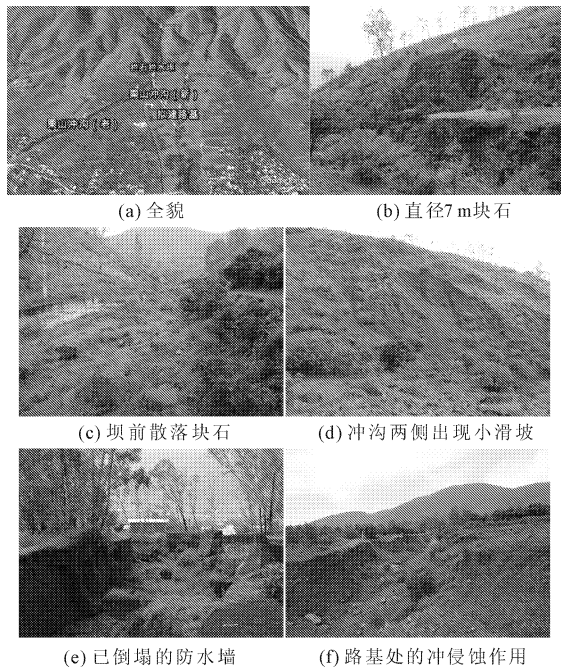


图 4 栗山村冲沟调查图

根据上述泥石流沟谷地面调查,所得泥石流活动性和潜在工程影响结论如下:

(1) 沟内既有拦阻挡措施基本淤满,说明沟谷泥石流具有一定活动性,但程度比八代村稍低;根据冲沟内历史泥石流夹携的块石最大粒径空间分布规律可知,未来仍存在爆发较大泥石流的可能,建议提高公路涵洞过水能力,并在过水涵两侧路基处设置防冲侵蚀的护面墙措施。

(2) 调查发现 1994 年修建的挡水墙基础冲侵蚀最大深度超过 3 m,冲侵蚀作用仍在发展中,尚未达到稳定状态。因此,在修建过水构筑物时,基础埋深深度应大于该影响深度,预估在当前常规埋深基础上仍需加深约 1.5 m。

2.1.3 杨家凹沟谷

杨家凹泥石流沟谷地质特征典型且明显,地面调查结果见图 5。

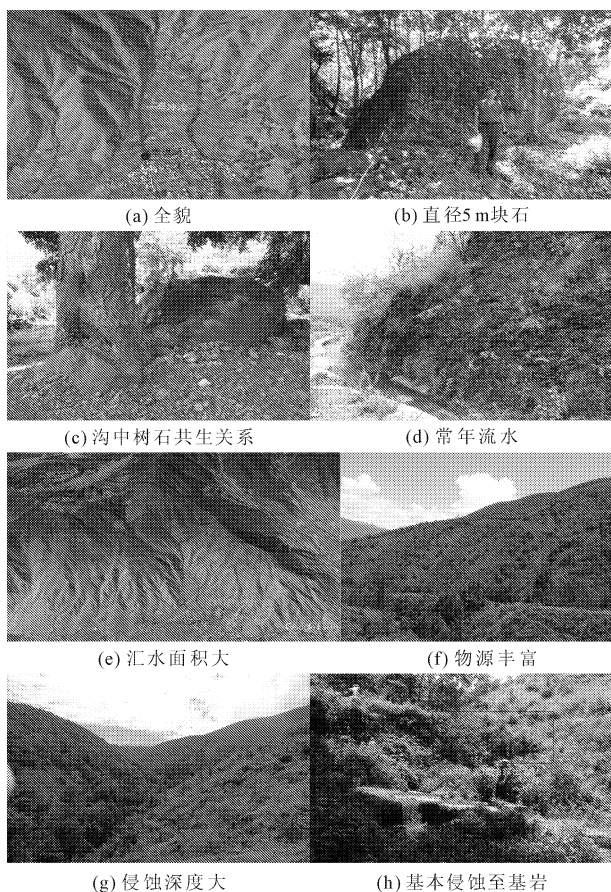


图5 杨家凹冲沟调查图

根据上述泥石流沟谷地面调查,所得泥石流活动性和潜在工程影响结论如下:

(1) 沟内植被丰茂,发现的大树和块石共生关系,说明其近百年没有大规模爆发记录,近期爆发的特点为小规模泥石流。

(2) 冲沟汇水面积在 $8.3 \text{ km}^2 \sim 10 \text{ km}^2$ 左右,在百年一遇的强降雨作用下,设计采用的 $3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ 的盖板涵难以有效排出汇集的强降雨,且冲沟附近地势相对较低,存在水毁路基的危险,需要加强涵洞断面,以增强过水能力。

2.2 沟谷泥石流动力学特征及其工程威胁评价

2.2.1 泥石流动力学特征

在地面调查和测试的基础上,依据泥石流灾害防治工程勘察规范^[15]的有关规定和计算公式,对上述沟谷泥石流的重度、流速及冲击力等动力学指标进行评估。

(1) 泥石流重度。研究区的泥石流为多期次堆积产物,本文利用目击者访视和现场测量的方法,综合确定的平均重度 18.0 kN/m^3 。

(2) 泥石流流速。流速测算采用成都山地所推

荐的适用于西南地区的经验公式进行计算:

$$V_c = KH_c^{2/3} I_c^{1/5} \quad (1)$$

式中: K 流速系数; H_c 计算断面平均泥深, m ; I_c 泥石流水力坡度,可用沟床坡度代替。计算结果统计列于表 1,后续不做特殊说明,默认列于表 1。

(3) 泥石流流量。泥石流流量测算主要采用形态调查法,即调查获取最高泥位及其对应的流通断面数据,公式为:

$$Q_c = A_c V_c \quad (2)$$

式中: A_c 断面过水面积; V_c 泥石流平均流速。

(4) 一次泥石流总量及冲出固体物质总量。根据泥石流的历时和最大流量,按泥石流暴涨暴落的特点,将其过程概化为一个理想五边形,一次泥石流总量 W_c 和冲出固体物质总量 W_s 计算公式如下:

$$W_c = 19TQ_c/72 \quad (3)$$

$$W_s = \frac{\gamma_c - \gamma_w}{\gamma_s - \gamma_w} W_c \quad (4)$$

式中: W_s 和 W_c 单位为 m^3 , T 为泥石流历时, Q_c 为最大流量, γ_c 为泥石流重度, γ_s 为土或石重度, γ_w 为水重度。

(5) 泥石流冲击力。单个块体冲击墩、台、柱的作用力:

$$F = \sqrt{\frac{3EJV_c^2 W}{gL^3}} \sin \alpha \quad (5)$$

式中: F 为大块石冲击力, Pa ; E 为弹性模量, Pa ; J 为构件截面中心轴惯性模量, m^4 ; L 为构件长度, m ; W 为块石重量, t 。

考虑建筑物形状的流体整体冲压力估值公式:

$$\delta = \lambda \frac{\gamma_c}{g} V_c^2 \sin \alpha \quad (6)$$

式中: δ 为泥石流整体冲压力, Pa ; V_c 为流速, m/s ; g 为重力加速度, m/s^2 ; λ 为建筑物形状系数,圆形取 1,矩形取 1.33,方形取 1.47。

依据调查获取的上述三个沟谷的泥石流动力特征指标,结果统计列于表 1。

2.2.2 泥石流的工程威胁及应对措施

(1) 针对沟谷冲挖掏侵蚀的固帮措施。针对存在沟谷侧帮侵蚀的路基段、桥梁段和涵洞段,需要采取固帮措施,问题和应对见图 6。

(2) 涵洞疏排能力不足及其应对措施。以杨家凹冲沟为例,说明涵洞工程存在的问题和应对措施。涵洞断面设计,需要考虑冲沟来水量,冲沟的侵蚀对其基础的影响,迎水面水毁的可能性,杨家凹冲沟常年流水,汇水面积较大,存在涵洞过水能力不足的问题。

题,需要加大断面尺寸,同时需要考虑迎水面路基固 坡 + 硬底 + 导水,见图 7。

表 1 泥石流动力特征计算结果统计表

测站名称	流速 V_c $/(m \cdot s^{-1})$	过水断面 面 A_c $/m^2$	峰值流量 Q_c $/(m^3 \cdot s^{-1})$	一次总 流量/ m^3	一次泥石流冲 出固体物质 总量 A_c/m^3	最大石块 冲击力 F/kN	泥石流整 体冲击力 δ/ Pa
杨家凹	13	20 ~ 80	261 ~ 1045	248244 ~ 992976	132397 ~ 529587	2760 ~ 7810	408671
栗山冲沟	11	20 ~ 80	225 ~ 901	213930 ~ 855720	114096 ~ 456384	2380 ~ 6730	228197
八代村	9	20 ~ 80	178 ~ 712	169183 ~ 676731	90231 ~ 360923	1880 ~ 5330	142718
备 注	$K = 5$, 水力坡度 $tg(30/30/25)$	—	—	$T = 1\ h$	固体重度 $2.2\ t/m^3$	墩、台、柱 $5\ m \sim 10\ m$	$\alpha = 90^\circ$

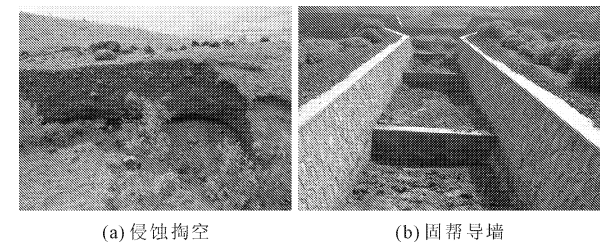


图 6 冲沟侵蚀问题和应对措施

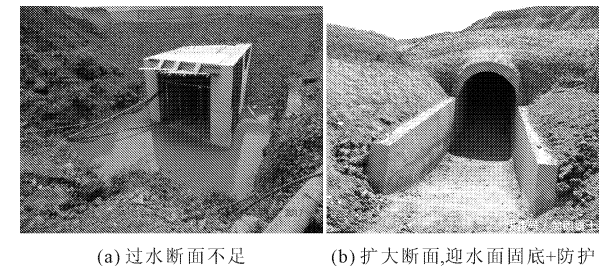


图 7 涵洞问题和应对措施

(3) 桥梁净空不足及其应对措施。八代村冲沟位置以桥梁形式通过,上游面堆积物太高靠桥面太近,桥下净空不足。该沟活动性较强,所以需要采取上部沟谷束腰 + 桥下清出足够净空 + U 型渡槽快速通过综合措施,尽可能往下游疏导堆积(见图 8)。

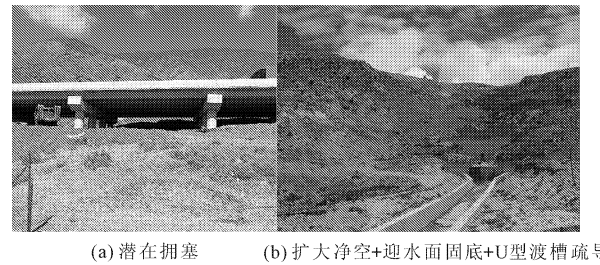


图 8 桥梁问题和应对措施

2.2.3 基于测斜监测的冲积扇边坡稳定性评价

根据调查,该区系列冲洪积扇,坡面基本稳定,多年耕种记录表明沟间山脊稳定状态良好,沟内局部存在侵蚀崩塌的可能,冲洪积扇整体稳定。根据

埋设的测斜孔监测表明,变形主要发生在路基挖填施工作业期间,最大侧向位移约 1.3 mm,影响深度约 25 m。经过两个雨季的监测,深部位移不再发展,边坡整体稳定(见图 9)。

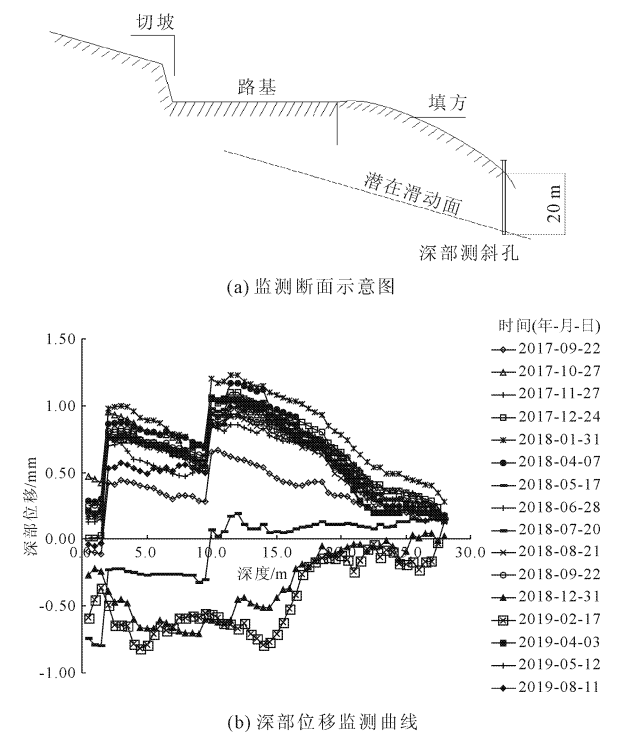


图 9 八代村冲洪积扇深部位移曲线

3 高速公路穿跨大规模冲洪积扇安全控制技术指南

3.1 基于稳定分区思想的选线建议

对于大规模冲洪积扇,根据历史、现状和未来一段时期的稳定状态,结合工程重要性等级,对其进行静态和动态稳定性分区。

基于环境扰动小、安全可控和最优化原则,选择线形。

3.2 不同穿跨方式及其安全控制要素

根据分区结果,在稳定区可以选择路基方式通过;危险区或者泥石流直接影响区,可以选择桥涵方式通过;潜在威胁区,建议采取防护条件下的路基方式通过。不同方式的安全控制要点如下:

(1) 不同技术手段的基础要落在侵蚀影响深度之下的稳定地基上,即桥、涵、路基的基础埋深要考虑侵蚀影响深度。

(2) 桥涵净空或者断面,要充分考虑流域总体汇水的影响和来水可以顺利疏通,建议进出段采取加速通过方式。

(3) 路基和桥涵的迎水面要考虑固坡措施,防止冲刷和水毁。

3.3 工程和环境相结合的减灾调控技术

工程建设对该区泥石流灾害的发生,不起主导作用,一般以被动应对为主,该区泥石流灾害的发生和发展,主要是程海断裂带和区域气候联合控制的。因此,在工程安全硬件措施应对的基础上,还要重视泥石流灾害本身的定期评估和系统应对,具体建议如下:

(1) 将相关工程安全监测接入国土资源部门的自然灾害监测预警系统,工点小系统、区域大系统联合进行泥石流灾害预警。

(2) 工程有限范围加固和应对措施联合国土部门针对该区泥石流防治的整体空间规划,固物源、截排水、空间梯级消能和规划堆积系统调控。

(3) 工程有限养护管理联合国土部门的大系统管理,硬件措施定期专人管理养护,附近行政村、乡镇县政府配合。

4 结论与建议

在大永高速公路八代村、栗山村和杨家凹路段系列冲沟泥石流活动性和动力特征分析的基础上,立足现状桥涵路基设计,对其泥石流安全风险进行了评价,所得主要结论如下:

(1) 泥石流威胁,尤其是大规模冲洪积地貌,应对其进行稳定性分区,根据分区制订合理的穿跨方式,危险区宜采取桥涵方式通过,安全区应采取路基方式,潜在威胁区可在有限工程措施下路基或者涵洞通过。

(2) 八代村、栗山村和杨家凹冲洪积扇的主要冲沟均存在泥石流风险,由八代村往杨家凹方向,泥石流的活动性、黏性和规模逐步递减,可从沟谷调查的植被情况、侧壁稳定性和块石最大直径的空间分

布及稳定状态佐证。

(3) 八代村主沟的桥梁跨越,存在下部净空过小,存在一次爆发拥塞风险,需采取上部疏导、桥下增大净空 + U 型渡槽联合治理措施;杨家凹主沟的涵洞通过,存在过水能力不足的问题,需要采取迎水面固坡 + 导流 + 增加过水断面联合措施;其余潜在水毁路基段,需采取固坡疏导措施。

参考文献:

- [1] 何健,李典庆,曹子君,等.基于贝叶斯理论的泥石流参数概率模型识别方法[J].武汉大学学报(工学版),2019,52(2):95-105.
- [2] 李天华,袁永博.地震重灾区诱发次生地质灾害风险评估研究[J].地震工程学报,2018,40(1):111-115.
- [3] 余加加,李强.泥石流的危害及防治[J].世界有色金属,2019(1):204-205.
- [4] 刘国盼,左永国.贵州山区高速公路典型安全问题对策研究[J].山西建筑,2019,45(9):143-144.
- [5] 肖文静,廖佳名,张亮亮.孤立山体地震动力响应的振动台试验研究[J].地震工程学报,2018,40(3):582-590.
- [6] 熊文,邹晨,叶见曙.基于动力特性识别的桥墩冲刷状态分析[J].中国公路学报,2017,30(5):89-96.
- [7] 朱天猛.小麻溪中桥垮塌原因分析及应对措施[J].西南公路,2014(2):25-27.
- [8] 涂国强,吴积善,陈尊兰.桥梁工程泥石流处置技术[J].公路交通科技(应用技术版),2013,9(7):291-293.
- [9] 周晓靖,王进,张振平,等.云南地区地震动特征与堆积体滑坡动力响应分析[J].水利与建筑工程学报,2018,16(3):108-112.
- [10] 戴国亮,邓会元,高鲁超,等.山区公路桥梁基桩嵌岩深度计算方法研究[J].岩土工程学报,2018,40(S2):225-229.
- [11] 阚生雷,孙世国,李晓芳.排土场滑坡与泥石流灾害控制技术与方法[J].岩土工程技术,2010,24(5):267-271.
- [12] 张加庆.基于大数据的地震损失价值评估模型设计[J].地震工程学报,2018,40(2):356-362.
- [13] 李伟,陈红权,陈宗援.高村排土场泥石流形成的可能性分析及防治措施[J].现代矿业,2018,34(9):211-212,217.
- [14] 陈玉华,邱冬冬,程志伟,等.库水位波动下三峡库区典型堆积层滑坡位移特征及预测[J].水利与建筑工程学报,2018,16(6):230-235.
- [15] 中华人民共和国国土资源部.泥石流灾害防治工程勘查规范:DZ/T 0220—2006[S].北京:中国标准出版社,2006:25-31.