

云南大永高速八代村冲积扇沟谷 泥石流危险度评价

张 斌^{1,2}, 段现花^{1,2}, 唐红波^{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: 云南是多山和地质灾害高发区。大永高速八代村段基本以冲积扇地形地貌特征为主, 局部冲沟极易形成以泥石流为主的地表强冲蚀破坏, 对在建公路工程造成潜在威胁。为准确评价泥石流可能对工程造成的影响程度和范围, 针对此区域的典型冲沟, 采用地面调查、定性分析和定量评价相结合的综合方法, 进行泥石流危险评价, 定性分析认定三处冲沟较为发育, 有潜在泥石流地质风险。两种量化评价方法结果表明: 低-中度危险, 致灾能力强, 需警惕泥石流对工程建设和长期安全的影响。调查结论与评价结果为大永高速公路八代村段泥石流灾害防控提供了科学依据。

关键词: 高速公路; 冲积扇; 泥石流; 影响区

中图分类号: TU443

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2019)05-0050-06

Debris Flow Risk of Badaicun Alluvial Fan Gully on Yunnan Dayong Highway

ZHANG Bin^{1,2}, DUAN Xianhua^{1,2}, TANG Hongbo^{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: Yunnan is a mountainous and high-risk area of geological disasters. The main feature of the eight-generation village section of Dayong Expressway is alluvial fan topography and landform. Local gullies are liable to form surface erosion damage mainly by debris flow, which poses a potential threat to highway engineering in this area. In order to accurately evaluate the range and extent of the impact of debris flow on the project, a comprehensive method combining ground survey, qualitative analysis and quantitative evaluation is adopted for the typical gully in this area, and the debris flow risk is assessed. The qualitative analysis determines that three gullies are relatively developed, with potential debris flow geological risks. The results of two quantitative evaluation methods indicate that low-to-moderate hazard and strong disaster-causing ability need to be alert to the impact of debris flow on project construction and long-term safety. The results of investigation and evaluation provide a scientific basis for the prevention and control of debris flow disasters in the eight-generation village section of Dayong Expressway.

Keywords: Expressway; alluvial fan; debris flow; area of converage

中国是多山之国, 山地面积占国土面积的 69% , 泥石流沟谷异常发育^[1-2]。尤其是在我国西部地

区,由于现代地壳活动强烈,活动断裂十分发育,活动断裂的强度和数量远远大于全国其他地区,公路工程的建设一方面面临着严重的活动断裂灾害的威胁;另一方面,由于这一区域的季节性强降雨的气候特征和强风化地质特点,导致滑坡、泥石流等地质灾害的发生频率和危害程度明显高于其他地区^[3-4]。

当前对于泥石流危险性评价多数是在地面调查的基础上,形成定性评价;利用调查物性资料和历史降雨资料,形成不同的量化评价^[5-13];在评价基础上,形成不同针对性有限防控措施^[14-15]。适用于本区域的主要为刘希林方法^[12]和规范方法^[13]。

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,以大永高速永胜县程海镇段线路的途经区域为重点,展开了可能影响高速公路路基和桥梁结构安全的冲积扇地质调查。此次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、冲积扇形态等,并针对冲积扇地形条件下三处规模较大的冲沟采用两种方式进行危险度计算与评价对比。

1 工程概况

大理至永胜高速公路,是 G4216(张掖至打洛)高速公路其中的一段。根据大永高速建设规划,高速途经永胜县程海镇区域。这一地区主要以冲积扇地形地貌特征为主,且高速临近程海断裂带。由于这一区域冲积扇规模巨大,其发育程度、地层岩性及分布规律等尚未得知。初步调查显示这一区域有三处较大冲沟群,分别位于杨家凹、栗山和八代村附近,其区域地形地貌如图 1 所示。

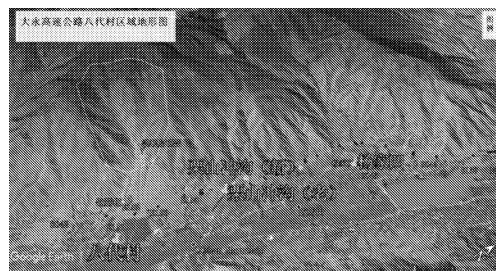


图 1 大永高速程海镇沿线区域地形地貌

2 永胜县程海镇区域地质调查

2.1 永胜县地质特点

2.1.1 地形地貌

永胜县地处云贵高原和青藏高原的衔接部和滇西高原与横断山脉两个地形单元的结合部,亦位于

程海大断裂带北端。境内新构造运动强烈,以间隙性升降运动为主,继承和复活老的断裂构造而形成现代的地貌景观。由于新构造运动影响,境内地震频繁,历史记载最大震级 7.5 级。

2.1.2 气候条件

永胜县地处低纬高海拔地区,气候以北亚热带山地季风气候为主,是典型的立体气候。总的气候特点时是:冬春干旱,夏秋多雨,南部热旱,北部暖湿,年际温度变化小,降水时空变化大。光质好,日照时数为 2 403.6 h,光照充足,年均降雨量 936.4 mm,但分布不均,82% 的降水集中在 6 月—9 月,干湿季分明,属半潮润气候。

2.1.3 地质水文

永胜县降水年际变化突出,当年 11 月至次年 5 月境内上空受干燥劲西风控制,不易形成降水过程而成为旱季,5 月下旬至 10 月受暖湿气流影响,因山阻和冷却作用而形成雨季。永胜境内降水总特点是:海拔每增加 100 m,降雨量增加 30 mm~40 mm,迎风坡每升高 100 m,降雨量增加 50 mm~70 mm。

2.1.4 植被土壤

永胜海拔高程变化幅度大,因此,气候、生物、土壤等高线呈带谱状分布比较明显,其规律是:海拔 3 200 m 以上分布为亚高山草甸土,2 900 m~3 200 m 之间为棕壤和黄棕壤为主,2 400 m~2 700 m 之间以红棕类棕红壤为主,1 500 m~2 400 m 之间分布红壤、黄红壤、褐红壤、紫色土等;1 500 m 以下温度高、降雨少、湿度低,以燥红土的褐红土为主。自然植被主要呈现垂直差异,分为落叶阔叶林、针阔叶混交林、灌丛和草地类植物。

2.2 永胜县程海镇区域冲积扇地质调查

总体而言,大永高速程海镇沿线基本以冲积扇地形地貌特征为主,局部冲沟较发育,易形成以泥石流为主的地表强冲侵蚀破坏,进而对这一区域的公路工程造成潜在威胁。为明确其可能造成的影响程度和范围,针对此区域的典型地貌特征展开调查,具体情况如下。

2.2.1 大永二期 K101+400 杨家凹一号大冲沟

杨家凹冲积扇的整体情况见图 2。一号大冲沟占杨家凹冲积扇区汇水面积 90% 以上,汇水面积大于 8.3 km²,并有多多个山前冲沟汇集。该冲沟最大深度超 30 m。山前出口部分冲沟冲侵蚀岩层明显,切割深度几米到几十米。冲沟内最大块石直径超 5 m,并且整个冲沟以大的块石为主,其粒径从 0.2 m~3.0 m 为主。从山前到路基段块石直径逐渐减小,

路基处仍以 0.2 m ~2.0 m 的块石为主(见图 3)。

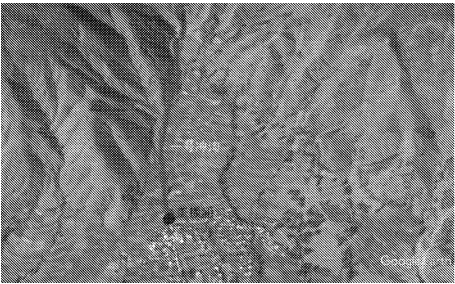


图 2 杨家凹冲积扇整体示意图



图 3 盖板涵不远处较大块石

2.2.2 大永二期 K99 +712 栗山村冲沟

在 1994 年之前,由于栗山村大冲沟(老)在强降雨期间,水量较大,并且携带大量泥石冲到沟口,冲毁农田,对房屋也有一定影响(见图 4)。冲沟内有较多的大块石;冲沟两侧出现多处小滑坡或坍塌现象,构成了冲沟新的物源。在村口之上,于 1994 年也设置多道拦石坝和挡水墙,多处挡水墙已经出现垮塌,而拦石坝现已填平,减小了块石的移动和冲侵蚀作用(见图 5)。为了减少泥石流对房屋的影响,当年在果园后也设置了拦石拦水坝,改变了水流流向。经过 20 多年的冲侵蚀作用,从村口到路基部分,新冲沟深度超过 3 m,并仍处于变化发展当中(见图 6)。该冲沟上部汇水面积约 2.5 km² 左右,汇水面山坡上树木较为稀疏,以小灌木和草本为主,防冲侵能力较弱。

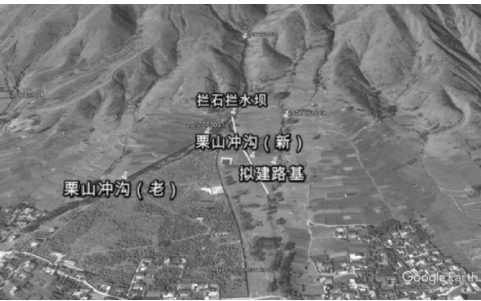


图 4 栗山冲沟示意图



图 5 已倒塌的防水墙



图 6 拟建路基处的冲侵蚀作用

2.2.3 永胜县程海镇八代村段冲积扇调查

(1) 冲积扇形态。大永高速途经永胜县八代村区域的整体地形地貌见图 7。

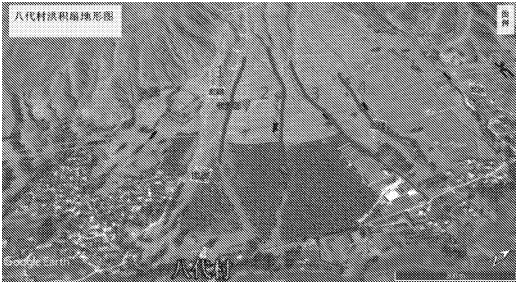


图 7 八代村冲积扇全景

整体来看图 7 中沿大永高速方向冲积扇均分布于靠山体一侧,由于后方山体汇水面积较大,汇水出口较多,导致高速沿线冲积扇分布范围较广,图中八代村段是冲积扇规模较大的一处,汇水面积约 2.5 km²,坡体基本稳定但尚在发育过程中。调查结果显示,就全貌来看,这一区域的冲积扇的坡度约在 9.6° ~16.7° 之间,一般后缘坡度较陡,前缘临进程海断裂带坡度较缓,冲积扇坡表受雨水侵蚀形成的冲沟较多,局部冲沟受侵蚀严重形成较大断面,一定条件下可能影响到高速路基及桥墩结构运行安全。就地质条件而言,影响这一区域的主要地质构造是谷底沿期纳至程海方向的程海断裂带。

(2) 冲积扇物质组成。如图8所示,一号二号冲沟之间:坡顶,海拔1 800 m,坡表可见大块石,直径大者2 m;海拔1 700 m,坡表可见较大块石,直径多在50 cm左右。冲积扇顶的这一区域植被较少,大块石和碎石较多,也是冲沟泥石流形成的主要物源区。从物质组成来看,冲积扇组成物质从扇顶向边缘变细,主要由砂砾层和亚砂土层互层组成,向扇顶方向砾石层变多,向扇缘方向亚砂亚黏土增多。

总体而言,由于此冲积扇后部山体汇水面积较大,山坡局部受雨水冲刷侵蚀严重,加之坡表植被较少,易形成以大块石夹杂碎石土的物源区,若雨水较大时将形成泥石流顺冲沟而下,将对高速公路路基或桥墩造成潜在威胁。



图8 冲积扇坡面块石

2.2.4 大永高速公路永胜县区域地质调查小结

本次地质调查,针对沿线约6 km范围内的冲积扇地形特征进行了实地考察,其中杨家凹冲沟、栗山冲沟较为发育,八代村冲积扇规模巨大。此次调查成果总结如下:

(1) 从已形成的冲沟上部及冲积扇顶地形地貌来看,这三处冲积扇物源区地表块石较多,碎屑物充足,临近冲沟附近局部陡坡约 $30^{\circ} \sim 70^{\circ}$,坡面局部有浅层滑坡。

(2) 从地表冲沟规模来看,杨家凹冲沟和栗山冲沟断面较大,斜坡坡度约 $15^{\circ} \sim 30^{\circ}$,已成为泥石流通道;八代村冲积扇地表冲沟侵蚀严重,易形成新的泥石流通道。

(3) 从永胜县区域气候条件而言,6月—9月为雨季,由于降雨集中且雨量较大,将导致冲积扇坡面冲沟进一步发育,冲沟断面扩大的同时,泥石流的威胁更甚。从雨水统计量来说,冲沟上水量超过152 mm,这说明强降雨大部分变成地表径流。从已建成的冲沟构筑物来看,原有拦石坝已冲毁,新建拦石坝较快被填满,且有局部冲毁,并越顶或冲毁冲沟两侧拦泥坝。这进一步证实了冲沟受雨水作用造成的地表侵蚀严重,冲沟泥石流作用强烈。

(4) 从冲沟内的物质组成来看,通道上大块石

多,且有运移,最大5 m直径,普遍0.5 m~2.0 m,这说明冲沟上部物源丰富,且能量巨大。由于冲积扇顶物源充足,雨季降雨集中,地表局部形成滑坡及陡坡,总的来看这一区域冲积扇及地表冲沟仍处于发育过程中。

3 冲积扇地形条件下冲沟危险性评价

危险性评价是对泥石流的发展趋势进行的预测评价,危险度则是它的定量表达。泥石流风险评价包括对泥石流危险性的评价和对承灾体易损性的评价,它是这前两者的综合评价结果。对于泥石流风险评价的方法,大致分为两大类,一类为对单沟泥石流进行风险评价,另一类为对一个区域的泥石流进行风险评价^[1-2]。

单沟泥石流危险性评价有多种方法,目前还没有统一的泥石流危险度评价标准。刘希林首次提出了多因子综合判别的模型(即刘希林模型),被广泛运用于西南地区泥石流危险性评价工作中。

程海镇区域以冲积扇地形地貌特征为主,加之区域气候地质条件的诱导因素,使得目前这三处冲沟较为发育,且近二十年内已发生多次规模不等的泥石流。其中,杨家凹和栗山冲沟坡陡,断面较大,集中降雨条件下易形成泥石流灾害;八代村冲积扇规模巨大,坡体表面受雨水冲刷已形成四条较大冲沟。为合理评估这一区域三处冲沟的潜在泥石流风险,以调查结果和相关数据为基础,采用两种评价方法进行危险度对比评估。一是刘希林等提出的评价模型^[12],二是采用基于模糊理论的泥石流危险程度评价方法^[10-11]。

3.1 刘希林评价模型

该计算方法采用多因子综合判定模式计算,修订后的单沟泥石流危险度计算公式为:

$$H = 0.2587M + 0.2587F + 0.1428S_1 + 0.0857S_2 + 0.0571S_3 + 0.1143S_6 + 0.0286S_9 \quad (1)$$

式中:泥石流发生规模 M 、发生频率 F 、流域面积 S_1 、主沟长度 S_2 、流域相对高差 S_3 、流域切割密度 S_6 和活动沟床比例 S_9 七个因子,均根据其不同的绝对数值转换成相应的替代数值。上式中危险度 H 和各危险因子的替代数值均介于0~1,其转换函数见表1。

取值见表2,然后根据换算值 H ,依据泥石流的危险度划分的五个等级,得到上述泥石流冲沟的危险度评价结果见表3。

表 1 刘希林评价模型的转换函数及取值

评价因子 及转换值 (0~1)	转换函数($m, f, s_1, s_2, s_3, s_6, s_9$ 为相应因子的实际值)
泥石流规模 $M/(10^3\text{ m}^3)$	$M=0$, 当 $m\leq 1$ $M=\lg m/3$, 当 $1< m\leq 1000$ $M=1$, 当 $m>1000$
泥石流发生 频率 $F/\%$	$F=0$, 当 $f\leq 1$ $F=\lg f/2$, 当 $1< f\leq 100$ $F=1$, 当 $f>100$
流域面积 $S_1/(\text{km}^2)$	$S_1=0.2458s_1^{0.3495}$, 当 $0\leq s_1\leq 50$ $S_1=1$, 当 $s_1>50$
主沟长度 $S_2/(\text{km})$	$S_2=0.2093s_2^{0.5372}$, 当 $0\leq s_2\leq 10$ $S_2=1$, 当 $s_2>10$
流域相对 高差 $S_3/(\text{km})$	$S_3=2s_3/3$, 当 $0\leq s_3\leq 1.5$ $S_3=1$, 当 $s_3>1.5$
流域切割 密度 $S_6/(\text{km}^{-1})$	$S_6=0.05s_6$, 当 $0\leq s_6\leq 20$ $S_6=1$, 当 $s_6>20$
不稳定沟床 比例 S_9/km	$S_9=s_9/60$, 当 $0\leq s_9\leq 60$ $S_9=1$, 当 $s_9>60$

从表 3 可知,此次程海区域冲积扇调查结果表明杨家凹冲沟、八代村冲沟泥石流危险度为中度危险,栗山冲沟接近中度危险。

表 2 单沟泥石流危险度评价因子实际值及其转换值

地点	数值性质	$M/10^3\text{ m}^3$	$F/\%$	S_1/km^2	S_2/km	S_3/km	S_6/km	S_9/km	H
杨家凹	实际值	30	20	8	2	0.5	0.3125	2	—
	转换值	0.492	0.651	0.433	0.304	0.333	0.016	0.033	0.405
栗山沟	实际值	30	20	5	2	0.3	0.56	2	—
	转换值	0.492	0.651	0.367	0.304	0.200	0.028	0.033	0.390
八代村	实际值	30	20	5	2	0.6	1.2	6	—
	转换值	0.492	0.651	0.367	0.304	0.400	0.060	0.100	0.407

表 3 泥石流冲沟的危险度评价结果

H	$0<H<0.2$	$0.2<H<0.4$	$0.4<H<0.6$	$0.6<H<0.8$	$0.8<H<1$
危险度	极低危险	低度危险	中度危险	高度危险	极高危险
杨家凹结果	—	—	0.405	—	—
栗山冲沟结果	—	0.390	—	—	—
八代村结果	—	—	0.407	—	—

根据上述调查的活动强度、活动规模、发生频率和堵塞程度,依据致灾体的综合致灾能力 F 分级量化表,将这三处冲沟的综合致灾能力 F 进行量化分级,分级结果见表 4。然后,根据上述致灾体的综合致灾能力 F 分级量化评分,形成致灾体的综合致灾能力 F 评估结果,见表 5。

3.2 泥石流危险程度 D 评价

本节泥石流危险程度的评价,多数依据《泥石流灾害防治工程勘查规范》^[13](DZT—0220—2006)的有关规定,限于篇幅规范表格不再一一罗列。根据规范^[13],关于泥石流规模划分表、发生频率判据和动力学特征,此三处泥石流规模基本属于中大型泥石流;泥石流发生频率均为中等频率泥石流(中频泥石流:1次/(5年~20年))。

根据规范^[13],关于泥石流堵塞程度划分标准表,此次调查三处冲沟,沟槽较顺直,沟段宽窄较均匀,局部有陡坎,但卡口不多。主支沟交角多小于 60°,形成区较为分散。河床堵塞情况一般,因此均属于表 6 中的中等堵塞程度,堵塞系数 D_e 取值 1.5~2.5。

根据规范^[13],依据泥石流强度划分表,结合沟谷现场调查估算情况来看,这三处冲沟堆积扇规模较大,山坡下方河道微弯,坡面和扇顶后方山区均有松散物,松散物储量约 $(5\sim 10)\times 10^4\text{ m}^3/\text{km}^{-2}$,雨季降雨集中,总体来看,活动强度属于表中第二类,即强。

表 4 致灾体的综合致灾能力 F 分级量化评分

因素	评 分		
	杨家凹	栗山	八代村
强度	3	3	2
规模	3	3	2
频率	2	2	2
堵塞程度	3	3	3
总分	11	11	9

表 5 致灾体的综合致灾能力 F 评估结果				
冲沟 名称	致灾体综合致灾能力 F			
	$F=16\sim13$ 很强	$F=12\sim10$ 强	$F=9\sim7$ 较强	$F=6\sim4$ 弱
杨家凹	—	强	—	—
栗 山	—	强	—	—
八代村	—	强	—	—

另一方面,根据大永高速修建的公路等级及技术水准要求,根据规范受灾体(建筑物)的综合承(抗)灾能力 E 四因素分级量化标准,大永高速八代村段受灾体(建筑物)的综合承(抗)灾能力 E 评分结果统计列于表 6,大永高速八代村段受灾体(建筑物)的综合承(抗)灾能力 E 总分值判别结果统计列于表 7。

表 6 受灾体(建筑物)的综合承(抗)灾能力 E 评分结果			
因素	评 分		
	杨家凹	栗山	八代村
设计标准	4	4	4
工程质量	4	4	4
区位条件	3	3	3
防治工程和辅助工程的工程效果	3	3	3
总分	11	11	11

表 7 受灾体(建筑物)的综合承(抗)灾能力 E 总分值判别				
冲沟 名称	致灾体的综合致灾能力 F			
	$E=4\sim6$ 很差	$E=7\sim9$ 差	$E=10\sim12$ 较好	$E=12\sim16$ 很好
杨家凹	—	—	较好	—
栗 山	—	—	较好	—
八代村	—	—	较好	—

依据规范^[13]建议的泥石流危险性 D 计算公式:
 $D = F/E$
式中: D 为泥石流危险程度或灾害的发生几率; F 为泥石流的致灾能力; E 为受灾体抵抗泥石流能力。该区泥石流危险程度或灾害发生的几率计算结果统计列于表 8。

表 8 泥石流危险程度或灾害的发生几率判断结果			
冲沟名称	危险性(D)		
	D 小于 1 成灾可能性小	D 大于 1 成灾可能性大	D 约等于 1 要警惕
杨家凹	—	—	要警惕
栗 山	—	—	要警惕
八代村	—	—	要警惕

3.3 泥石流影响区估算

泥石流危害范围的预测,对减轻泥石流灾害的直接损失、制定避难具有重要的意义。泥石流暴发后,其携带的大量固体物质将在冲洪积扇前缘淤积下来,这种淤积短时间内可能不会产生较大影响,但长时间的淤积,不但会影响到居民财产生命安全,也将对在高速公路工程造成危害。大永高速通过此区域时基本位于冲洪积扇腰部或前缘,因此有必要大致计算出泥石流的危害范围,从而判断其对高速公路影响程度。简化计算方法主要是根据不同的暴雨设计频率下一次泥石流冲出固体物质总量,以各沟堆积扇最新一期堆积物厚度为预测堆积扇厚度(取近似平均值 50 cm),假设堆积扇呈椭圆形(长轴方向沿着主沟流向,短轴方向垂直主沟流向),长轴长度为短轴长度 2 倍,大致推算泥石流堆积长度和宽度如表 9 所示。

表 9 爆发泥石流设计频率 5 年条件下在沟口形成冲蚀、堆积影响范围预测				
冲沟名称	杨家凹	栗山	八代村	
一次冲出固体物质总量 $Q/10^4\text{ m}^3$	6.6 ~ 19.8	5.7 ~ 17.1	4.5 ~ 13.5	
泥石流堆积宽度 B/m	290 ~ 502	270 ~ 466	240 ~ 415	
泥石流堆积长度 L/m	580 ~ 1005	539 ~ 933	479 ~ 830	

4 结论与建议

针对大永高速程海镇区域冲积扇的地质调查表明,这一区域冲沟较为发育,为合理评估其潜在地质风险。结合现场调查结果,采取两种方式进行了泥石流风险的评价,形成主要结论如下:

(1) 工程区典型冲沟冲积扇顶物源充足,雨季降雨集中,地表局部形成滑坡及陡坡,总的来看这一区域冲积扇及地表冲沟仍处于发育过程中。从冲沟规模来看,杨家凹冲沟和栗山冲沟断面较大,斜坡坡度约 $15^\circ\sim30^\circ$,已成为泥石流通道;八代村冲积扇地表冲沟侵蚀严重,易形成新的泥石流通道。

(2) 从已建成的冲沟构筑物来看,原有拦石坝已冲毁,新建拦石坝较快被填满,且有局部冲毁,并越顶或冲毁冲沟两侧拦泥坝。证明冲沟受雨水作用造成的地表侵蚀严重,冲沟泥石流作用强烈。

(3) 刘希林模型和泥石流危险度评价方法的计算结果显示,杨家凹、栗山和八代村三处冲沟风险程度相当,均需警惕这一区域可能发生的泥石流地质风险。

参考文献:

- [1] 王永伟,李晓文,杨有贵,等. 高压旋喷锚索在某深基坑支护中的应用研究[J]. 建筑科学,2015,31(7):23-28.
- [2] 王家权,王 维,李文平,等. 泥炭土深基坑支护工程高压旋喷扩体锚索施工工艺[J]. 施工技术,2015,44(7):99-109.
- [3] 王国辉,祁建永,勒力勇,等. 高压旋喷锚索在淤泥质地层基坑支护工程中的应用[J]. 勘察科学技术,2017(S1):104-107.
- [4] 彭 超,余建民. 高压旋喷锚索与灌注桩支护结构三维数值分析[J]. 水利与建筑工程学报,2018,16(1):194-197.
- [5] 刘 魁,徐龙帅,高路皓. 高压旋喷锚索在软土地区的应用研究[J]. 岩土工程技术,2018,32(2):64-68.
- [6] 何江飞,姚磊华,魏乐军,等. 排桩-旋喷锚索支护结构在紧邻地铁站复杂深基坑中的应用[J]. 施工技术,2018,47(24):113-116.
- [7] 丁 毅,邢艳如. 超长、超大基坑开挖对邻近地铁结构安全影响的数值模拟分析[J]. 水利与建筑工程学报,2017,15(2):170-175.
- [8] 刘熙媛,陈中倩,付士峰,等. 某深基坑工程监测与变形影响因素有限元分析[J]. 辽宁工程技术大学学报,2016,35(8):852-858.
- [9] 建筑基坑工程监测技术规范:GB 50497—2009[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2009.
- [10] 华建新,郑建国. 工程地质手册[M]. 5 版,北京:中国建筑工业出版社,2018:719-721.
- [11] 于得水. 黄土基坑中旋喷锚索支护结构工作性状研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2017.
- [12] 张兆强,曹 帅,姚 勇,等. 高压旋喷扩体锚索在膨胀土深基坑工程中的应用[J]. 施工技术,2019,48(7):13-17.
- [13] 刘 波,张 功,杨伟红. 扩大头锚索在饱和粉细砂层中的受力特性[J]. 地下空间与工程学报,2016,12(2):412-419.
- [14] 王振刚,陈文玲,李琦瑛. 黄土层中锚索预应力的影响因素分析[J]. 水利与建筑工程学报,2014,12(1):30-33.
- [15] 孙 克,李美梅. 关于高压旋喷锚索与普通锚索的对比试验研究[J]. 煤炭工程,2016,48(9):84-86.
- [16] 付文光,卓志飞,任晓光. 土层锚索浆体与筋体黏结强度的试验研究[J]. 岩土工程学报,2018,40(7):1300-1308.

(上接第 55 页)

参考文献:

- [1] 侯兰功,崔 鹏. 单沟泥石流灾害危险性评价研究[J]. 水土保持研究,2004,11(2):125-128.
- [2] 张怀珍,范建容,郭芬芬,等. 中国单沟泥石流危险度评价模型比较研究[J]. 水土保持研究,2011,18(4):20-26,31.
- [3] 孙兴伟,刘云鹏. 大古与街需水电站工程区泥石流基本特征及冲击力试验研究[J]. 水利与建筑工程学报,2018,16(2):167-172.
- [4] 李长顺,谢吉尊,廖 维. 西昌鹅掌河泥石流发育特征及成因分析[J]. 水利与建筑工程学报,2016,14(4):36-41.
- [5] 刘希林. 我国泥石流危险度评价研究:回顾与展望[J]. 自然灾害学报,2002(4):1-8.
- [6] 李 阔,唐 川. 泥石流危险性评价研究进展[J]. 灾害学,2007,22(1):106-111.
- [7] 铁永波. 强震区城镇泥石流灾害风险评价方法与体系研究[D]. 成都:成都理工大学,2009.
- [8] 王术桁,云南省倘甸两区金源乡集镇泥石流风险评价[D]. 成都:成都理工大学,2017.
- [9] 谭炳炎. 泥石流沟严重程度的数量化综合评判[J]. 水土保持通报,1986,6(1):51-57.
- [10] 杜国梁,高金川,李瑞冬. 基于模糊综合评价法和熵值法的泥石流危险度评价[J]. 安全与环境工程,2013,20(5):15-17.
- [11] 沈 简,饶 军,傅旭东,等. 基于模糊综合评价法的泥石流风险评价[J]. 灾害学,2016,31(2):171-175.
- [12] 刘希林. 泥石流危险性评价[M]. 北京:科学出版社,2004.
- [13] 泥石流灾害防治工程勘察规范:DZ/T 220—2006[S]. 北京:中华人民共和国国土资源部,2006.
- [14] 万石云,李华宏,胡 娟. 云南省滑坡泥石流灾害危险区划[J]. 灾害学,2013,28(2):60-64.
- [15] 刘成清,许城杰,陈 鑫,等. 泥石流柔性防护系统破坏原因分析与设计对策[J]. 水利与建筑工程学报,2017,15(5):6-11.