

文章编号: 1674—8247(2020)05—0025—06
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2020.05.005

瓦斯沟至康定段铁路崩塌落石灾害发育分布规律研究

王剑锋¹ 李天斌¹ 曾鹏¹ 陈伟² 王栋³

(1. 成都理工大学, 成都 610059; 2. 四川藏区高速公路有限责任公司, 成都 610000;
3. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

摘要: 瓦斯沟—康定段铁路崩塌落石灾害突出, 严重威胁下部铁路施工及后期运营安全, 同时也为铁路选线带来了巨大困难。为探究该区域崩塌落石灾害发育分布规律, 本文根据遥感解译、无人机航拍和实地调查, 从灾害的高程、坡度坡向、坡体结构和断层距离四个方面, 采用贡献率法分析灾害分布规律。研究结果表明, 高程主要分布在 2 000 ~ 2 500 m, 坡度坡向优势方向为 $245^{\circ} \angle 58^{\circ}$, 平面分布主要沿瓦斯沟两岸分布, 坡体结构主要是似层状顺向坡, 与断层相距 2 km 为敏感区域。此研究结果可为川藏铁路选线提供一定的依据和科学参考。

关键词: 工程地质; 崩塌落石; 发育分布规律; 铁路选线

中图分类号: P642 文献标志码: A

Research on Development and Distribution Rules of Railway Collapse and Rockfall Disasters in Vasigou-Kangding Section

WANG Jianfeng¹ LI Tianbin¹ ZENG Peng¹ CHEN Wei² WANG Dong³

(1. Chengdu university of technology, Chengdu 610059 China;
2. Sichuan Tibetan Area Expressway Co., Ltd., Chengdu 610000 China;
3. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031 China)

Abstract: The conspicuous railway collapse and rockfall disasters in Vasigou-Kangding section seriously threaten the safety of substructure railway construction and later operation, and also bring great difficulties for railway location. In order to explore the development and distribution rules of collapse and rockfall disasters in the area, through remote sensing interpretation, aerial photography with Unmanned Aircraft System and field investigation, the distribution rules of disasters by the contribution rate method from four aspects: elevation, slope aspect, slope structure and fault distance are analyzed in the paper. The research results show that the elevation is mainly within 2 000 ~ 2 500 m, the slope in a predominant direction is $245^{\circ} \angle 58^{\circ}$, the disasters are mainly distributed along both banks of the Vasigou in plane, the slope structure is mainly a stratiform-like dip slope, and the sensitive area is 2km away from the fault. The research results can provide a certain basis and scientific reference for the Sichuan-Tibet Railway location.

Key words: engineering geology; collapse and rockfall; development and distribution rules; railway location

收稿日期: 2020-03-04

作者简介: 王剑锋(1994-), 男, 硕士研究生。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41772329); 中国铁路总公司科技研究开发计划课题(2017G008-F)

引文格式: 王剑锋, 李天斌, 曾鹏, 等. 瓦斯沟至康定段铁路崩塌落石灾害发育分布规律研究[J]. 高速铁路技术, 2020, 11(5): 25-30.

WANG Jianfeng, LI Tianbin, ZENG Peng, et al. Research on Development and Distribution Rules of Railway Collapse and Rockfall Disasters in Vasigou-Kangding Section[J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(5): 25-30.

瓦斯沟—康定段铁路位于康定市东北侧,区域内崩塌落石灾害尤为突出,对铁路的建设和运营安全造成了严重威胁。因此研究瓦斯沟—康定段崩塌落石灾害发育分布规律对铁路选线和危岩落石灾害防治具有重要意义。

由于滑坡、崩塌以及泥石流等地质灾害给人们的生命和财产安全带来了巨大威胁,胡厚田^[1-3]等学者对灾害的运动特征和地质力学模式等进行了研究;丁浩江^[4-9]等人对灾害的发育分布规律开展了研究。

目前,处于选线阶段的瓦斯沟—康定段铁路灾害发育尤为突出,给铁路选线带来了许多困扰。基于此,本文在遥感解译、实地地质调查和无人机航拍等的基础上,开展对瓦斯沟崩塌落石灾害在空间、平面、坡面结构以及断层发育分布规律等方面的研究,为瓦斯沟—康定段铁路选线以及灾害防治提供一定的科学依据和参考。

1 崩塌落石灾害发育分布概况

瓦斯沟区域地貌上属高山峡谷地貌,地形起伏较大。在隧道进出口处以及危岩落石发育的岩质斜坡地段,坡脚海拔在1 300~2 500 m之间,山体大多陡峭,坡度大多在48°~70°之间,高差在350~800 m之间。由于瓦斯河谷深切以及风化卸荷的作用,节理裂隙发育,两侧斜坡大多发育顺坡节理,多处可见楔形体、倒悬体,节理多为密闭型—微张型,部分为张开型节理,少量充填物。节理面多平直粗糙,延伸较好,一般为0.5~2 m之间,有的已经贯穿连通,长达10 m,沿节理破裂面外侧可见挤压岩块与岩石碎屑。代表性节理产状为N20°E/30°SE、N55°W/45°NE。崩源区、落石源区位于斜坡中、上部,前缘高程为1 400~2 600 m之间,高差300~700 m之间,潜在崩塌体体积最大可达 $2\,000\times 10^5\text{ m}^3$ 。基岩为澄江—晋宁期($\gamma_2^{(4)}$)斜长花岗岩,灰白、灰黑色,厚层块状结构,粗粒状构造,主要成分为斜长石、石英,其次为黑云母、白云母。此类基岩为硬质脆性花岗岩,风化后容易形成掉块,现场可见不同层面的陡坎状外貌。

现场调查共计20处落石灾害,其中崩塌隐患点16处,占比66.7%;落石隐患点8处,占比33.3%。瓦斯沟崩塌落石灾害分布如图1所示。

左、右岸崩塌落石灾害统计如图2所示。由图2可以看出,瓦斯沟左岸发育崩塌落石灾害17处,占总灾害数的70.8%,崩塌发育12处,落石发育5处。右岸发育崩塌落石灾害7处,占总灾害数的29.2%,崩

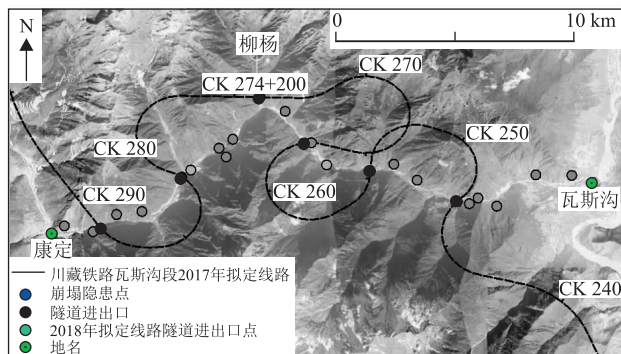


图1 瓦斯沟至康定段崩塌落石灾害分布图

塌发育4处,落石发育3处。左岸发育的崩塌落石地质灾害较多,推测和左岸的坡体结构相关,左岸坡体结构多发育似层状顺向坡,右岸多发育似层状逆向坡。

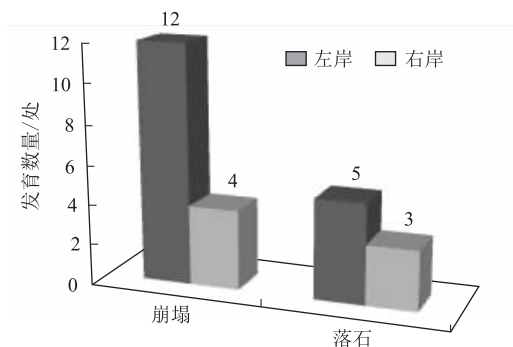


图2 左、右岸崩塌落石灾害统计图

瓦斯沟—康定段崩塌落石灾害特征统计如表1所示。由表1可知,瓦斯沟地质灾害多发育崩塌落石灾害,这与该地区的高陡地形有关。规模大于 $100\times 10^5\text{ m}^3$ 的特大型崩塌发育5处,占崩塌灾害总数的31%;规模在 $10\sim 100\times 10^5\text{ m}^3$ 之间的大型崩塌发育11处,占崩塌灾害总数的69%。由此可知,瓦斯沟崩塌落石灾害多为大型及以上规模。

2 崩塌落石灾害空间发育分布规律

2.1 崩塌落石灾害发育分布与高程的关系

高程对崩塌落石灾害的发育有一定影响,特别是在发生地震的时候。高程高的斜坡会放大地震波的加速度,加剧坡体的变形破坏,甚至会直接将斜坡上的岩体水平或向上斜抛出去,破坏力十分惊人。据调查资料显示,瓦斯沟崩塌落石灾害大多发育在高程1 400~2 600 m之间,为能更好地反应高程对崩塌落石灾害发育的影响,本文取灾害隐患区前缘高程作为统计对象,将高程1 400~2 500 m划分成11个区间,每个区间以100 m间隔,分别为 $h_1\sim h_{12}$ (如1 400~

表 1 瓦斯沟至康定段崩塌落石灾害特征统计

序号	灾害名称	地理位置/°	岸别	前缘高程/m	灾害发育体积/($\times 10^5 \text{ m}^3$)	规模
1	崩塌隐患点 1	E:102.1570 N:30.0749	左岸	1 537	144	特大型
2	崩塌隐患点 2	E:102.1450 N:30.0763	左岸	1 474	48	大型
3	崩塌隐患点 3	E:102.1300 N:30.0685	右岸	1 554	12.6	大型
4	崩塌隐患点 4	E:102.1240 N:30.0670	左岸	1 589	30.8	大型
5	崩塌隐患点 5	E:102.1200 N:30.0654	右岸	1 659	90	大型
6	崩塌隐患点 6	E:102.1000 N:30.0748	左岸	1 829	52	大型
7	崩塌隐患点 7	E:102.0900 N:30.0799	左岸	1 871	12	大型
8	崩塌隐患点 8	E:102.0590 N:30.0893	左岸	2 031	2000	特大型
9	崩塌隐患点 9	E:102.0510 N:30.1008	左岸	2 130	1500	特大型
10	崩塌隐患点 10	E:102.0330 N:30.0892	左岸	2 193	300	特大型
11	崩塌隐患点 11	E:102.0290 N:30.0865	右岸	2 227	20	大型
12	崩塌隐患点 12	E:102.0270 N:30.0867	左岸	2 300	90	大型
13	崩塌隐患点 13	E:101.9970 N:30.0600	左岸	2 437	1440	特大型
14	崩塌隐患点 14	E:101.9890 N:30.0599	左岸	2 483	61.6	大型
15	崩塌隐患点 15	E:101.9800 N:30.0573	右岸	2 498	36.8	大型
16	崩塌隐患点 16	E:101.9710 N:30.0574	左岸	2 567	20	大型
17	2017 年拟定线路隧道进出口 1	E:102.1165 N:30.0681	左岸	1 737	—	—
18	2017 年拟定线路隧道进出口 2	E:102.0838 N:30.0788	右岸	1 933	—	—
19	2017 年拟定线路隧道进出口 3	E:102.0589 N:30.0896	左岸	2 134	—	—
20	2017 年拟定线路隧道进出口 4	E:102.0430 N:30.1071	左岸	2 244	—	—
21	2017 年拟定线路隧道进出口 5	E:102.0139 N:30.0766	右岸	2 364	—	—
22	2017 年拟定线路隧道进出口 6	E:101.9828 N:30.0580	左岸	2 501	—	—
23	2018 年拟定线路隧道进出口 1	E:102.0643 N:30.0749	左岸	1 914	—	—
24	2018 年拟定线路隧道进出口 2	E:102.0154 N:30.0843	右岸	2 333	—	—

1 500 m为 h_1)。瓦斯沟崩塌落石灾害高程分布如图 3 所示。

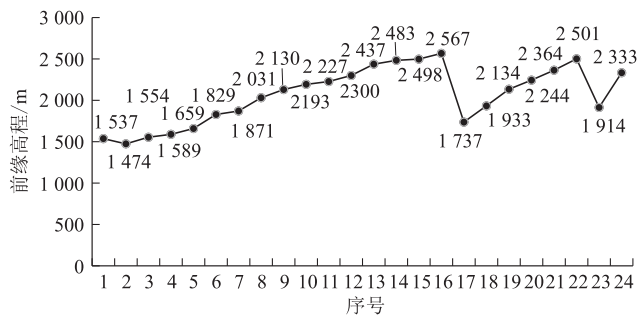


图 3 崩塌落石灾害高程分布图

为研究高程和崩塌落石灾害发育两者之间的关系,本文从崩塌落石灾害的数量和体积与高程的定量关系出发,采用贡献率的方式统计,最终得到高程和崩塌落石灾害的综合贡献率,以此方法研究高程对崩塌落石灾害的影响。

2.1.1 不同高程的数量贡献率 Q_1

对 24 个崩塌落石灾害点进行归纳统计,得到不同

高程崩塌落石灾害发育的数量及其对应的数量贡献率 Q_1 ,如图 4 所示。

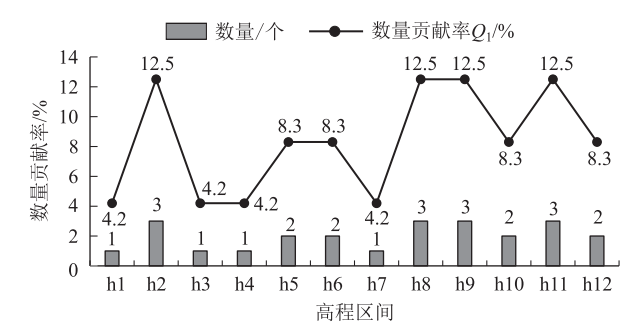


图 4 不同高程区间的灾害数量及贡献率图

从图 4 可总结出不同高程区间崩塌落石灾害数量贡献率 Q_1 为以下关系:

$$\begin{aligned} Q_1(h_2) &= Q_1(h_8) = Q_1(h_9) = Q_1(h_{11}) > \\ Q_1(h_5) &= Q_1(h_6) = Q_1(h_{10}) = Q_1(h_{12}) > \\ Q_1(h_1) &= Q_1(h_3) = Q_1(h_4) = Q_1(h_7) \end{aligned} \quad (1)$$

从上述分析可以看出,不同高程区间对应的数量贡献率的变化比较平稳,说明高程对灾害发育数量的

影响规律不明显。

2.1.2 不同高程的体积贡献率 Q_2

为进一步研究高程对崩塌落石灾害发育的影响,本文对16个崩塌落石灾害点体积进行归纳统计,得到不同高程区间崩塌落石灾害发育体积及其对应的体积贡献率 Q_2 ,如图5所示。

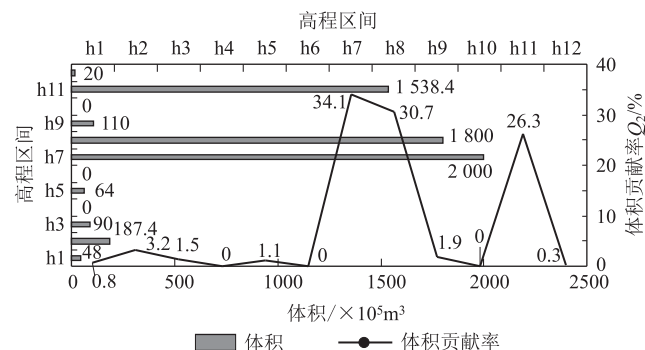


图5 不同高程区间的灾害发育体积及其贡献率图

从图5可总结出不同高程崩塌落石灾害发育体积贡献率 Q_2 为以下关系：

$$\begin{aligned} Q_2(h_7) &> Q_2(h_8) > Q_2(h_{11}) > \\ Q_2(h_2) &> Q_2(h_9) > Q_2(h_3) > \\ Q_2(h_5) &> Q_2(h_1) > Q_2(h_{12}) > \\ Q_2(h_4) &= Q_2(h_6) = Q_2(h_{10}) \end{aligned} \quad (2)$$

其中,高程区间 h_7 (2 000 ~ 2 100 m)、 h_8 (2 100 ~ 2 200 m) 和 h_{11} (2 400 ~ 2 500 m) 的体积贡献率较大,分别为 34.1%、30.7% 和 26.3%,其总和为 91.1%。高程区间 h_4 (1 700 ~ 1 800 m)、 h_6 (1 900 ~ 2 000 m) 和 h_{10} (2 300 ~ 2 400 m) 的体积贡献率为 0。由此可见,不同高程的体积贡献率变化很剧烈。

2.1.3 不同高程的综合贡献率 Q_0

为更准确直观地评价高程对崩塌落石灾害发育分布的影响,本文采取综合贡献率 Q_0 指标来评价。综合贡献率 Q_0 是根据式(1)和式(2),对不同高程区间的贡献率按表2从小到大进行赋值,计算出平均贡献指数,可得不同高程区间对应的综合贡献指数 Q ,然后再由式(3)求解得出。其最终结果如图6所示。

表2 贡献指数赋值表

贡献类型	高程区间及赋值					
Q_1	h_1	h_2	h_3	h_4	h_5	h_6
	1	3	1	1	2	2
	h_7	h_8	h_9	h_{10}	h_{11}	h_{12}
Q_2	1	3	3	2	3	2
	h_1	h_2	h_3	h_4	h_5	h_6
	2	4	3	0	3	0
	h_7	h_8	h_9	h_{10}	h_{11}	h_{12}
	9	8	3	0	7	1

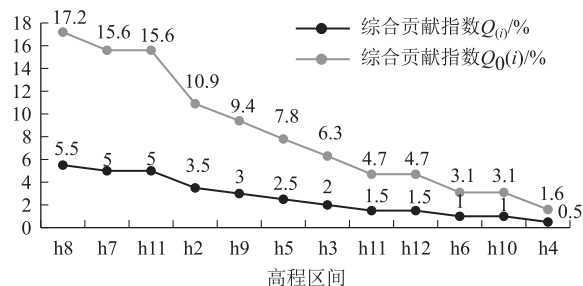


图6 综合贡献指数及综合贡献率图

$$Q_0(i) = Q(i) / T \times 100\% \quad (3)$$

式中: $Q_0(i)$ ——各个不同高程区间的综合贡献率;

$Q(i)$ ——各个不同高程区间的综合贡献指数;

T ——各个高程区间综合贡献指数的总和。

综合分析可知,高程区间 h_8 (2 100 ~ 2 200 m)、 h_7 (2 000 ~ 2 100 m)、 h_{11} (2 400 ~ 2 500 m) 和 h_2 (1 500 ~ 1 600 m) 的综合贡献率最高,其和为 59.4%。以上4个高程区间的崩塌落石灾害的数量贡献率和为 41.7%,体积贡献率和为 94.3%。由此可见,这4个高程区间的数量贡献率和相对不高,体积贡献率和增长却相对较快,表明崩塌落石灾害在这4个高程区间内发育规模较大,受高程的影响较大。

2.2 崩塌落石灾害发育分布与斜坡坡度坡向的关系

斜坡的坡度与崩塌落石灾害的发生之间存在一些关系,坡度不同,发生灾害的概率也会不同。对于同一个斜坡来说,大多数情况下,坡度越高,发生灾害的概率越大;坡度越低,发生灾害的概率就越小。因此,对瓦斯沟—康定段崩塌落石灾害发育的斜坡坡度进行整理研究是很有必要的,可为瓦斯沟—康定段铁路选线提供参考。

崩塌落石灾害发育的斜坡坡向主要受地质构造运动影响,瓦斯沟地区断层的发育与运动影响了灾害斜坡坡向的发育。此外,灾害斜坡坡向还受降水、冰雪消融以及温差等因素影响,以上因素共同影响斜坡坡向发育的方向。瓦斯沟—康定段崩塌落石灾害斜坡坡度坡向发育分布(以每 20° 为一个统计范围)如图7所示。

从图7可以看出,瓦斯沟崩塌落石灾害斜坡坡向整体为 SW 和 NW 方向,这和灾害发育分布的岸别有很大关系。崩塌隐患点3、崩塌隐患点5、崩塌隐患点11、崩塌隐患点15、2017年拟定线路隧道进出口2、2017年拟定线路隧道进出口5与2018年拟定线路隧道进出口2的坡向为 NW 向,范围为 $280^\circ \sim 350^\circ$,坡度在 $48^\circ \sim 61^\circ$ 之间,且均发育在右岸;其余较多灾害隐患点发育在左岸,坡向为 SE 向和 SW 向,主要优势方

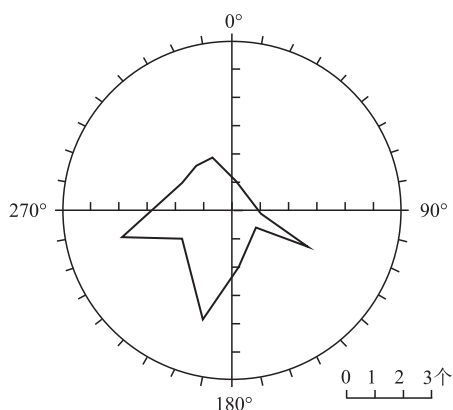


图7 坡度坡向发育分布图

向为 $245^{\circ} \angle 58^{\circ}$ 。瓦斯沟主沟流向方向为 $N72^{\circ}E$,与灾害发育斜坡的优势方向斜交,不利于斜坡的稳定。

3 崩塌落石灾害发育分布与坡体结构的关系

坡体结构与岩体结构不同,它是在边坡结构和岩体结构基础上发展来的一个更能反映斜坡地质情况的综合概念。之所以要提出坡体结构这一综合概念,是因为其重点分析了临空面和控制性结构面两者之间的一些组合关系。目前,许多学者把坡体结构和边坡稳定性分析联系起来,并且提出了大量不同的地质力学模型。如唐世强^[10]分析了反倾向岩质边坡的变形破坏特征,总结了一些规律,说明坡体结构在一定程度上影响地质灾害的发育。

3.1 不同坡体结构的数量贡献率 P_1

不同坡体结构的数量贡献率统计如表3所示。从表3可以看出,崩塌落石灾害发育在似层状顺向坡较多,有18处,占75%,这与河谷卸荷作用有一定的关系;其余灾害发育在似层状逆向坡,有6处,占25%,两者发育数量差距较大。

表3 不同坡体结构的数量贡献率统计表

坡体结构	崩塌落石灾害发育数量/处	数量贡献率/(%)
似层状顺向坡	18	75
似层状逆向坡	6	25

3.2 不同坡体结构的体积贡献率 P_2

根据表1可统计分析得到不同坡体结构崩塌落石灾害发育的体积和体积贡献率,如表4所示。

表4 不同坡体结构的体积贡献率统计表

坡体结构	灾害发育体积/($\times 10^5 \text{ m}^3$)	体积贡献率/(%)
似层状顺向坡	4 109.8	70.2
似层状逆向坡	1 748	29.8

分析表4可知,似层状顺向坡崩塌落石灾害发育体积很大,达到 $4\,109.8 \times 10^5 \text{ m}^3$,体积贡献率为70.2%;而似层状逆向坡灾害发育体积较小,为 $1\,748 \times 10^5 \text{ m}^3$,体积贡献率为29.8%。两者的体积贡献率差别也很大。

3.3 不同坡体结构的综合贡献率 P_3

根据以上所得数量、体积贡献率的大小,计算得到综合贡献指数与综合贡献率,如表5所示。

表5 不同坡体结构的综合贡献率统计表

坡体结构	综合贡献指数	综合贡献率/(%)
似层状顺向坡	7.2	72
似层状逆向坡	2.8	28

综合分析可知,不同坡体结构发育的瓦斯沟崩塌落石灾害数量和规模差别很大。从表5可以看出,瓦斯沟似层状顺向坡发育的崩塌落石灾害的综合贡献率很高。究其原因,首先是与瓦斯沟沟谷的发育形态、走向以及下切卸荷作用有关,斜坡体临空面和沟谷走向、岩层产状斜交;其次是与瓦斯沟附近的断层活动和地震活动有关,这两者给崩塌落石提供了主要的动力条件,使斜坡构造结构面大量发育,并造成斜坡坡体较破碎。

4 崩塌落石灾害发育分布与断层的关系

断层在崩塌落石灾害的发育分布上会发挥控制性的作用,学者们已经取得了大量的研究成果。瓦斯沟附近断层走滑活动形成的挤压应力区与拉张应力区对两侧岩层造成一定程度的损伤破坏,也会形成大量的构造裂隙,使斜坡体岩体结构破碎,还会形成对地下水活动有利的空间。本文根据遥感解译、踏勘及断层分布图,研究崩塌落石灾害发育分布与断层之间的关系。崩塌落石灾害发育分布与断层之间距离统计如图8所示,崩塌落石灾害发育分布和断层关系如图9所示。

从图中可以看出,发育在断层两盘附近的崩塌落石地质灾害共计24处;其中发育在断层NE盘较多,有15处,占比62.5%;SW盘发育的灾害相对少一点,有9处,占比37.5%。

崩塌落石灾害“距离效应”比较明显。在距断层1 km 之内的灾害数量有8处,占总数的33.4%;大多数灾害发育在距断层2 km 以内,总计达21处,占比87.5%;距断层2 km 以外的地质灾害较少,仅有3处,占总数的12.5%。由此可知,与断层相距2 km 以内的距离是崩塌落石灾害发育的敏感集中区域,伴随着

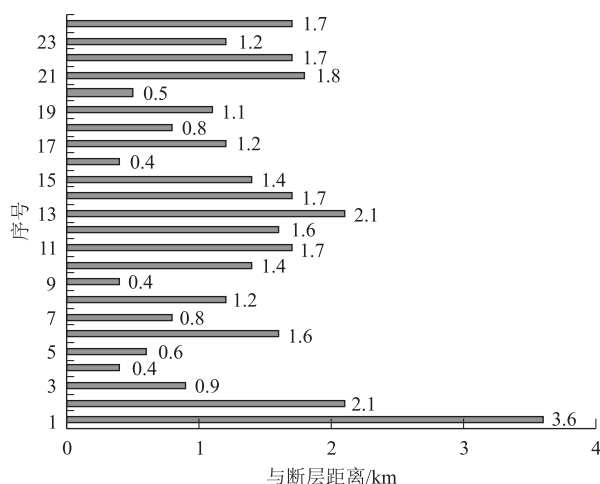


图8 崩塌落石灾害发育分布与断层之间距离统计图

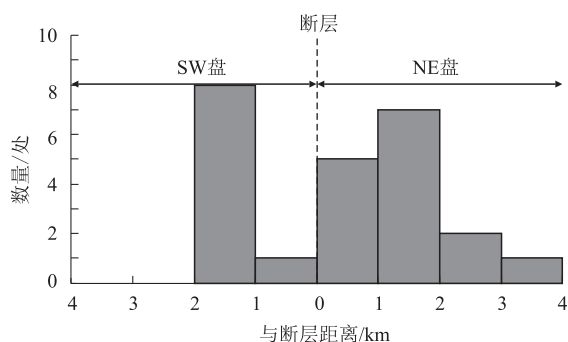


图9 崩塌落石灾害发育分布和断层关系图

距离增大,断层的活动性也逐渐减弱,崩塌落石灾害发育也逐渐减弱。

进一步统计分析可知,发育在断层SW盘的崩塌落石灾害体积总计为 $2\,474 \times 10^5 \text{ m}^3$, 占总体积的42.2%;发育在断层NE盘的危害体积相对较大,总计为 $3\,383.8 \times 10^5 \text{ m}^3$, 占总体积的57.8%。发育在断层SW盘且规模为特大型的灾害有2处,其余3处特大型规模的灾害发育在断层NE盘。

通过对距断层不同距离的地质灾害的数量以及体积进行统计分析,发现发育在断层NE盘的危害数量相对较多,体积相对较大,且多为大型、特大型规模的灾害;断层SW段发育的灾害数量、体积规模均相对较小。总体来讲,瓦斯沟崩塌落石灾害沿断层发育分布具有一定的规律性。

5 结论

瓦斯沟段铁路发育崩塌落石灾害共计24处。从发育数量方面来说,瓦斯沟左岸发育数量比右岸多;从发育规模方面来说,多为大型及以上规模的崩塌落石灾害。统计分析可得其发育分布规律如下:

(1) 高程区间 h_8 (2 100 ~ 2 200 m)、 h_7 (2 000 ~ 2 100 m)、 h_{11} (2 400 ~ 2 500 m) 和 h_2 (1 500 ~ 1 600 m) 的崩塌落石灾害综合贡献率较高,其和为59.4%。以上4个区间崩塌落石灾害发育规模大且集中,受高程影响较大。较多灾害发育在左岸,主要优势方向为 $245^\circ \angle 58^\circ$ 。瓦斯沟主流流向方向为 $N72^\circ E$,与灾害发育斜坡的优势方向斜交,不利于斜坡的稳定。

(2) 瓦斯沟似层状顺向坡发育的崩塌落石灾害的综合贡献率最高。这首先与瓦斯沟沟谷的发育形态、走向以及下切卸荷作用有关,斜坡临空面与沟谷走向、岩层产状斜交;其次与瓦斯沟附近的断层活动和地震活动有关。

(3) 瓦斯沟崩塌落石灾害发育分布受其附近断层的影响,其“距离效应”比较明显。与断层相距2 km以内的距离是崩塌落石灾害发育的敏感集中区域,伴随着距离增大,断层的活动性也逐渐减弱,崩塌落石灾害发育也逐渐减弱。

参考文献:

- [1] 胡厚田. 崩塌落石研究[J]. 铁道工程学报, 2005(S1):387-391.
HU Houtian. Research on the Collapse and Falling Stone[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2005(S1):387-391.
- [2] 裴向军, 黄润秋, 裴钻, 等. 强震触发崩塌滚石运动特征研究[J]. 工程地质学报, 2011, 19(4):498-504.
PEI Xiangjun, HUANG Runqiu, PEI Zuan, et al. Analysis on the Movement Characteristics of Rolling Rock on Slope Caused by Intensive Earthquake[J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19(4):498-504.
- [3] FERRERO A M, MIGLIAZZA M, RONCELLA R, et al. Rock Cliffs Hazard Analysis Based on Remote Geospatial Surveys: The Campione Del Garda Case Study (Lake Garda, Northern Italy)[J]. Geomorphology, 2011, 125(4):457-471.
- [4] 丁浩江, 张广泽, 岳志勤. 坪上隧道口危岩落石失稳模式及运动特征分析[J]. 铁道工程学报, 2015, 32(12):7-11.
DING Haojiang, ZHANG Guangze, YUE Zhiqin. Analysis of Unstable Models and Movement Characteristics of Unstable Rockfall at Pingshang Tunnel Entrance [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2015, 32(12):7-11.
- [5] 荆翔, 杨志强. 天山公路北段崩塌发育规律及变形失稳模式研究[J]. 公路, 2017, 62(6):297-302.
JING Xiang, YANG Zhiqiang. Research on Development Rules of Collapse and Deformation and Failure Mechanism on North Section of the Tianshan Highway[J]. Highway, 2017, 62(6):297-302.
- [6] 李培, 范文, 梁鑫, 等. 陕南矿产资源开采区斜坡灾害失稳模式及影响因素分析[J]. 灾害学, 2018, 33(3):106-110.
LI Pei, FAN Wen, LIANG Xin, et al. Types and Impact Factors of Slope Hazard in South Shaanxi Mining Area [J]. Journal of Catastrophology, 2018, 33(3):106-110.

(下转第62页)

13 km,施工前进行了贯通误差估计,并采取措施提高施工控制网的测量精度。工程实践证明,洞外 GNSS 点采取强制对中观测墩并构成多条进洞联系边,洞内导线增加边长长度并采取强制对中装置等措施是行之有效的,也是确保隧道顺利贯通的关键因素。巴玉隧道施工控制网的成功经验,对后续超长铁路隧道的建设具有借鉴意义。陀螺定向值仅用于导线方向值检核,其成果对隧道贯通精度的增益及参与平差定权的方法等还有待后续进一步研究。

参考文献:

- [1] 白国峰. 高原深埋硬岩隧道岩爆特征及施工方法研究[J]. 施工技术, 2020, 49(1): 87-92.
BAI Guofeng. Study on Characteristics of Rockburst and Construction Methods in Deep and Hard Rock Tunnel in Plateau Area[J]. Construction Technology, 2020, 49(1): 87-92.
- [2] TB 10601-2009 高速铁路工程测量规范[S].
TB 10601-2009 Code for Engineering Survey of High Speed Railway[S].
- [3] TB 10101-2018 铁路工程测量规范[S].
TB 10101-2018 Code for Railway Engineering Survey[S].
- [4] 陈光金, 刘海江, 付宏平, 等. 隧道 GNSS 施工控制网复测若干问题探讨[J]. 铁道标准设计, 2017, 61(1): 60-64.
CHEN Guangjin, LIU Haijiang, FU Hongping, et al. Discussion on Repetition Survey of Tunnel Construction GNSS Control Network[J]. Railway Standard Design, 2017, 61(1): 60-64.
- [5] 付宏平, 郭际明, 张正禄. 特长隧道贯通误差预计方法研究[J]. 测绘通报, 2015(2): 80-83.
FU Hongping, GUO Jiming, ZHANG Zhenglu. Research on the Method of Extra-long Tunnel Breakthrough Error Estimates[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2015(2): 80-83.
- [6] 李伟超, 张兴福, 陈智伟, 等. 利用大地水准面模型计算垂线偏差的方法及精度分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2019, 39(8): 843-848.
LI Weichao, ZHANG Xingfu, CHEN Zhiwei, et al. Method and Accuracy Analysis of Calculating Deflection of the Vertical Based on Geoid Model[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2019, 39(8): 843-848.
- [7] 邹进贵, 朱勇超, 童魁. 精密三角高程测量技术在高海拔山区的应用[J]. 测绘地理信息, 2013, 38(6): 6-9.
ZOU Jingui, ZHU Yongchao, TONG Kui. Application of Precise Trigonometric Leveling Technology at High Altitude[J]. Journal of Geomatics, 2013, 38(6): 6-9.
- [8] 李飞战, 尹伟言, 陈真, 等. GYROMAT-3000 型高精度陀螺仪定向精度探讨[J]. 测绘标准化, 2018, 34(2): 41-43.
LI Feizhan, YIN Weiyan, CHEN Zhen, et al. On the Orientation Accuracy of GYROMAT-3000 Gyro[J]. Standardization for Surveying and Mapping, 2018, 34(2): 41-43.
- [9] 许江涛, 陈长春, 庞尚益, 等. GYROMAT3000 陀螺仪工作原理及其检测方法[J]. 北京测绘, 2014(4): 131-134.
XU Jiangtao, CHEN Changchun, PANG Shangyi, et al. Working Principle of the GYROMAT3000 Gyro and Its Calibration Method[J]. Beijing Surveying and Mapping, 2014(4): 131-134.
- [10] 周林根, 叶捍东, 姚连璧, 等. 高精度陀螺仪在长隧道贯通测量中的应用[J]. 工程勘察, 2011, 39(7): 81-85.
ZHOU Lingen, YE Handong, YAO Lianbi, et al. Application of High Accuracy Gyrotheodolite in Long Tunnel Piercing Measurement[J]. Journal of Geotechnical Investigation & Surveying, 2011, 39(7): 81-85.
- [11] 孙元亚, 姚连璧. 雅砻江锦屏水电站交通辅助洞施工控制与精度分析[J]. 现代测绘, 2008, 31(6): 5-8.
SUN Yuanya, YAO Lianbi. Construction Control Survey and Accuracy Analysis of Jingpin Hydroelectric Power Station's Transportation Tunnel on Yalong River[J]. Modern Surveying and Mapping, 2008, 31(6): 5-8.
- [12] 时丕旭. 高精度陀螺仪在超长铁路隧道贯通误差预计中的应用研究[J]. 铁道勘察, 2019, 45(3): 25-29.
SHI Pixu. Applied Research of High-precision Gyroscope in Prediction of Penetration Error of Super-long Railway Tunnel[J]. Railway Investigation and Surveying, 2019, 45(3): 25-29.

(上接第30页)

- [7] 郭沉稳, 姚令侃, 段书苏, 等. 汶川、芦山、尼泊尔地震触发崩塌滑坡分布规律[J]. 西南交通大学学报, 2016, 51(1): 71-77.
GUO Chenwen, YAO Lingkan, DUAN Shusu, et al. Distribution Regularities of Landslides Induced by Wenchuan Earthquake, Lushan Earthquake and Nepal Earthquake[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2016, 51(1): 71-77.
- [8] 李源亮, 任光明, 黄细超, 等. 攀西黑水河流域北部地区崩塌与滑坡分布规律[J]. 长江科学院院报, 2016, 33(10): 57-62.
LI Yuanliang, REN Guangming, HUANG Xichao, et al. Spatial Distribution of Rockfalls and Landslides in Northern Area of Heishui River Basin in Panzhihua-Xichang Region[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2016, 33(10): 57-62.
- [9] 黄艺丹, 姚令侃, 郭沉稳, 等. VII-IX度烈度区地震触发崩塌滑坡分布规律[J]. 应用基础与工程科学学报, 2015, 23(1): 92-102.
HUANG Yidan, YAO Lingkan, GUO Chenwen, et al. Distribution Law of Landslides Triggered by Earthquake from VII to IX Seismic Intensity Zone[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2015, 23(1): 92-102.
- [10] 唐世强. 反倾向岩质边坡变形机制分析及治理设计[D]. 成都: 成都理工大学, 2007.
TANG Shiqiang. Deformation Mechanism Analysis and Optimization Design Study of Obsequent Rocky Slopes[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2007.