

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.201906053

郑万高铁宜万段边坡危岩崩落破坏特征

黄海宁, 巨能攀, 黄 健, 张成强

(成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059)

摘要: 危岩是山区常见的地质灾害之一。以往研究缺少对危岩整体破坏导致危岩解体方面的关注, 而危岩在失稳崩落过程中的解体行为却是预测危岩影响范围和防治成效的关键所在。为此, 文章以郑万(郑州—万州)高铁宜万段沿线隧道洞口边坡危岩为研究对象, 从结构面角度出发, 对危岩崩落破坏特征进行研究。通过对 15 个隧道洞口边坡的调查, 首先从边坡坡度、岩性组合、相对高差三个方面总结了研究区危岩发育分布规律; 然后根据边坡岩体结构特征, 分析了危岩失稳模式, 并基于边坡上部危岩和下部落石的体积和形状对应关系, 进一步探讨了边坡危岩崩落破坏演化过程; 在此基础上, 利用 Rockfall 模拟软件对落石运动特征进行预测分析。结果表明: (1) 研究区边坡呈上陡下缓地形, 上部基岩裸露, 坡度基本上 $\geq 70^\circ$; 危岩主要发育于弱风化的灰岩和白云岩中; 边坡高差在 150 ~ 300 m 之间。(2) 边坡上部危岩将呈阶梯状方式逐渐沿基底结构面滑移或者沿后缘结构面拉裂坠落。(3) 研究区危岩崩落破坏模式主要为边坡上部岩体沿结构面解体破坏。(4) 大部分隧道洞口边坡落石危险性较大, 严重威胁隧道洞口的安全, 需要采取相应的防治措施。研究成果可为在建的郑万高铁宜万段隧道边坡危岩的有效防治提供参考。

关键词: 危岩; 边坡; 岩体结构; 崩落破坏模式; 郑万高铁

中图分类号: P642.21

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2020)03-0164-09

Caving failure characteristic of slope rockfall on Yiwan section of the Zhengzhou—Wanzhou high-speed railway

HUANG Haining, JU Nengpan, HUANG Jian, ZHANG Chengqiang

(State Key Laboratory of Geo-hazard Prevention and Geo-environment Protection,
Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: Because of the complex geological environment in mountainous area, rockfall has become one of the common geological hazards, and it is also the weak link of research. Previous studies have analyzed and discussed many aspects of rockfall. However, the research on the problem of rockfall disintegration caused by the whole failure of rockfall has been neglected. The disaggregation behavior of rockfall in the process of instability is the key to predict the influence range and control effect of rockfall. Therefore, this paper takes the rockfall of tunnel portal slope along Yiwan section of Zhengzhou—Wanzhou high-speed railway as the research object. From the point of view of structural plane, the caving failure characteristics of slope rockfall are examined. Based on the investigation of 15 tunnel portal slopes, the development and distribution laws of rockfall in the study area are firstly summarized from three aspects: slope gradient, lithological association and height difference. Then, according to the structural characteristics of slope rock mass, the failure modes of rockfall are analyzed. Based on the corresponding relationship between the volume and shape of the upper dangerous rock and the lower falling rocks of the slope, the caving failure evolution process of the slope

收稿日期: 2019-06-23; 修订日期: 2019-10-25

基金项目: 中铁二院工程集团有限公司科研项目(科 2017-15)

第一作者: 黄海宁(1995-), 男, 硕士研究生, 主要从事地质灾害防治研究。E-mail: 1246953821@qq.com

通讯作者: 巨能攀(1973-), 男, 教授, 博导, 主要从事地质工程和岩土工程教学和科研工作。E-mail: jnp@cduet.edu.cn

rockfall is further discussed, the motion features of the rockfalls are finally predicted and analyzed with the simulation software Rockfall. The results show that (1) the upper part of the slope is steep and the lower part is gentle in the study area. The upper bedrock is bare and the slope gradient is basically over 70°. Dangerous rocks are mainly developed in weakly weathered limestone and dolomite. Slope height difference is between 150 and 300 m. (2) Dangerous rock in the upper slope will gradually slide along the basal sliding plane or fall along the tension crack in a stepped mode. (3) The main caving damage mode of slope rockfall in the study area is that the rock masses in the upper slope disaggregate along the structural planes. (4) The rockfalls at most tunnel entrance slopes are highly dangerous. These dangerous rocks may threaten the safety of tunnel entrance. Therefore, it is essential to take appropriate measures for prevention and cure. The research results can provide reference for effective prevention and control of dangerous rock in Yiwan section of Zhengzhou-Wanzhou high-speed railway tunnels under construction.

Keywords: rockfall; slope; rock mass structure; caving failure model; Zhengzhou-Wanzhou high-speed railway

危岩是指位于陡坡上被岩体结构面切割且在重力、地震、降雨等诱发因素作用下处于稳定性状态较差的岩石块体及其组合,其失稳破坏将形成崩塌落石,是山区常见的地质灾害类型之一^[1-2]。危岩发育过程是累进破坏过程,且多具有高位隐蔽等特征,其失稳破坏往往具有突发性^[3]。即使危岩落石的规模不大,其后果也可能是灾难性的,严重威胁着山区居民、水电枢纽、道路、矿山及其它建(构)筑物的安全和正常运营^[4-5]。随着国家“一带一路”战略的实施,以高铁为代表的基础设施建设不断向山区推进,受地质灾害影响的问题日益凸显,提高道路交通安全性成为非常迫切的要求。

近年来,国内外学者对危岩崩塌进行了分析和探讨。胡厚田^[6]基于收集的大量铁路沿线主要崩塌工点资料和现场调查,按崩塌的形成机理将其划分为5个类型;徐伟等^[7]在对彝良县大石盘组崩塌开展应急调查和测量的基础上,对崩塌体的形成条件和破坏模式进行了分析,提出该崩塌的破坏过程分为4个阶段:初始震裂变形阶段、累积变形阶段、启动破坏阶段及稳定与堆积阶段;李明等^[8]以重庆市洪崖洞危岩为例,对危岩发育的链式机理进行了探讨,得出该区域危岩形成过程主要由陡崖带岩体结构特征演绎、岩体时效变形破坏和岩体破坏三个阶段构成;陈健云等^[9]在静力解析法的基础上,考虑裂隙水间接传递地震动的作用,探讨了动水压力对倾倒式危岩体稳定系数的影响,得出考虑动水压力会明显减小倾倒式危岩体的稳定系数的结论。裴向军等^[10]、程强等^[11]基于对汶川地震崩塌滚石的大量现场调查,通过统计分析,对强震作用下崩塌滚石运动特征进行了研究,总结了汶川地区落

石的运动特征。唐红梅等^[12]通过构建 AHP-Fuzzy 法的综合评价模型,开展灰岩地区崩塌体危险性评价方法研究,获得了较好的实际适用性。许强等^[13]在国内、外崩塌灾害风险性评估研究成果的基础上,提出了针对单体危岩崩塌的风险评价方法,并以丹巴县双拥路危岩崩塌为例进行了风险评价。黄海宁等^[14]将无人机遥感技术应用于高陡边坡危岩体调查中,对山区危岩体的调查方法开展了研究,取得了较好的成果。何思明等^[15]针对中国崩塌滚石灾害基础研究薄弱,减灾关键技术研发能力不足的问题,开展了崩塌滚石灾害防治新技术的研究,研发了系列耗能减震崩塌滚石灾害防治的新技术。以上研究取得了许多新进展和成果,但是,在这些危岩崩塌的各方面研究中,对于危岩解体问题的研究却很少,仅在少量的发表文章中有所提及^[16-17]。而危岩在失稳崩落过程中的解体行为却是预测崩塌灾害危险影响范围和危岩防治成效的关键所在。

为此,本文以郑万(郑州—万州)高铁宜万段沿线隧道洞口边坡危岩落石为研究对象,从结构面角度出发,对危岩崩落破坏特征进行研究。所得的认识可为在建的郑万高铁宜万段隧道边坡危岩的有效防治提供一定的参考。

1 研究区概况

研究区线路起于襄阳南漳县,止于恩施巴东县,全长约 166 km,线路主要位于荆山山脉左侧以及大巴山脉右侧,地势总体东西两侧低,中间高,地形起伏较大。古夫河及南阳河是研究区内主要水系,河流深切,多呈“V”字形沟谷,区内自然横坡坡度主要在 20° ~

受切割的块状岩体将沿结构面 J_3 (基底滑动面) 产生滑移失稳。

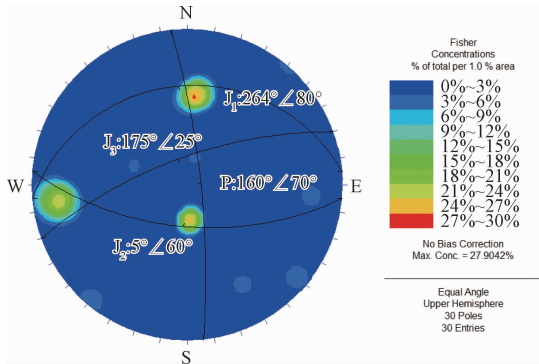


图 4 节理等密度图

Fig. 4 Equivalent density diagram of joint

采用上述的方法对 15 个隧道洞口边坡进行分析, 得到各边坡发育的控制性结构面产状, 将各边坡结构面绘制成赤平投影图 (图 6)。结合各边坡现场调查及赤平投影图结果对边坡结构面组合关系分析, 发现各边坡岩体均受多组大角度相交, 甚至近于正交的结构面切割, 形成了由若干小尺寸岩块组合而成的类砌体结构。根据陈洪凯提出的危岩链式发育规律, 位于陡

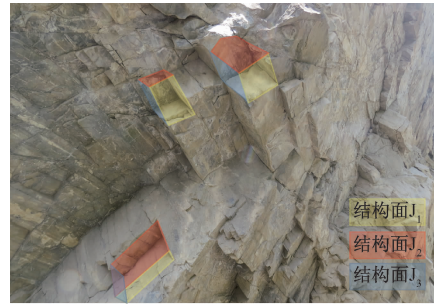


图 5 结构面发育特征

Fig. 5 Development characteristics of structural planes

崖上的岩石块体易于在重力、裂隙水压力或地震力作用下稳定性衰减而形成危岩^[20]。因此, 分析可知, 由于多组结构面的存在, 各边坡陡壁上完整岩体被切割成块状危岩, 当在外力作用下发生失稳时, 单体危岩或危岩组 (多块单体危岩组合) 将呈阶梯状方式逐渐沿基底结构面滑移破坏或沿后缘结构面拉裂坠落, 其失稳模式示意图分别见图 7(a)、(b)。

4 危岩崩落破坏特征分析

4.1 危岩与落石对比

对各边坡上部单体危岩体积进行测量, 由于单

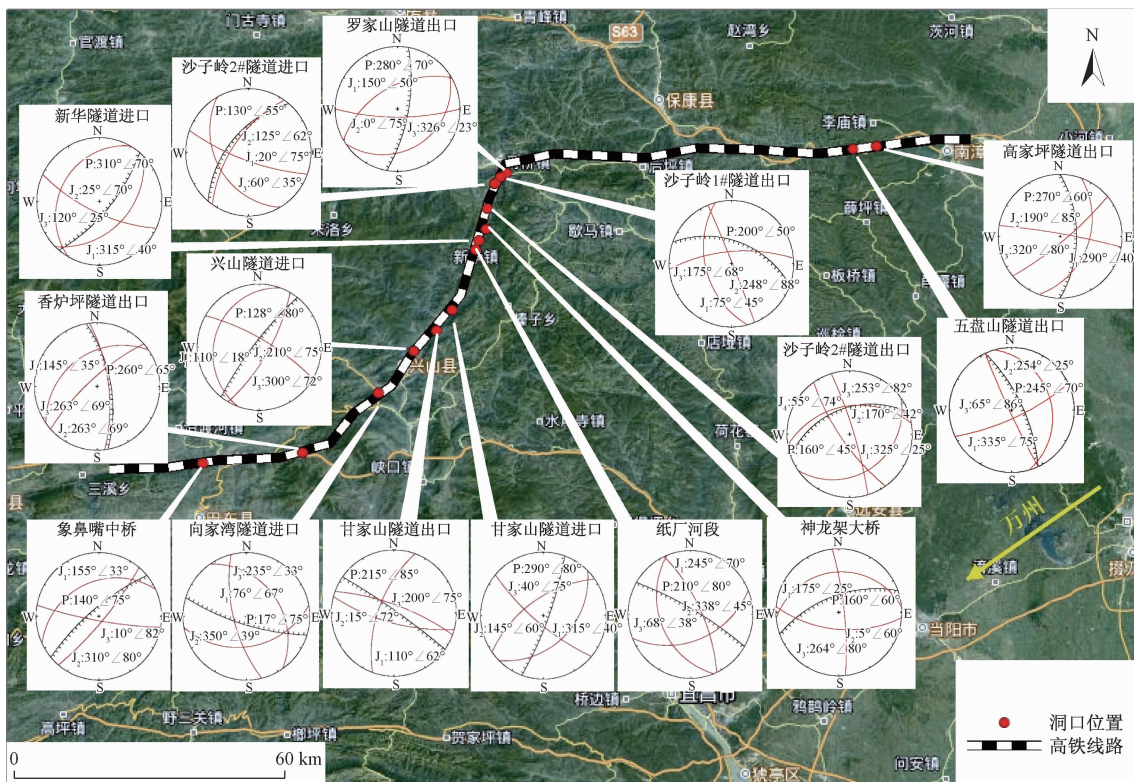


图 6 隧道洞口边坡赤平投影图

Fig. 6 Stereographic projections of the tunnel portal slopes

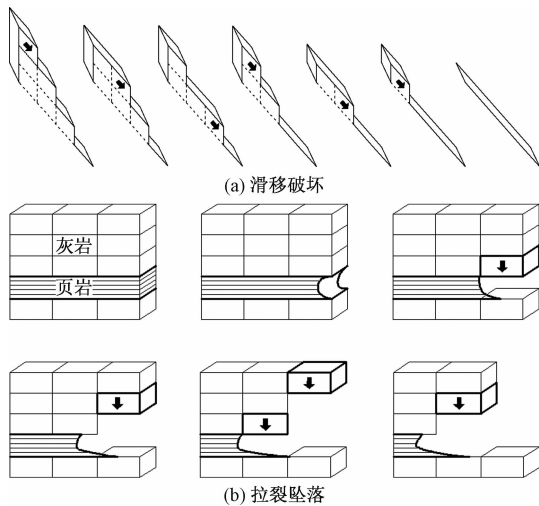


图7 危岩失稳模式示意图

Fig.7 Failure models of rockfall

体危岩被多组结构面切割成规则块体,将它们近似地看成长方体或者棱柱体来计算,体积(V) = 底面积(A) $\times$ 高(H),对于边坡上未掉落的单体危岩,直接测量其尺寸,而对于已掉落的危岩,根据边坡上产生的裸露面,以切割的结构面长度为边界,计算原始危岩体积(图8)。

同理,对边坡坡脚区域内分布的大小落石进行调查,通过对比坡顶危岩和坡脚落石的体积和形状,发现两者存在以下相似特点:(1)各落石形状基本上呈较规则的长方体或棱柱体,落石的各个表面也较平直(除了原本存在的面),并且各表面所形成的组合模式正好对应于各边坡结构面组合关系(图9)。(2)坡脚落石体积与边坡上部单体危岩体积存在几何对应关系,落石要么与单体危岩体积基本相同,要么体积数倍于单体危岩。

以兴山隧道进口边坡为例,该边坡坡脚高程约



图8 危岩体积测量

Fig.8 Volume measurement of the dangerous rocks

340 m,坡顶高程约540 m,高差200 m,坡向为128°,边坡为典型的上陡下缓地形,上部为裸露岩壁,高约40 m,坡度约82°,中下部为缓坡,坡度25°~35°,植被茂密,地层岩性主要为震旦系中统灯影组(Z_2dn)白云岩。根据调查,该边坡主要发育三组结构面,分别为层面 $C:110^\circ \angle 18^\circ$,间距0.5~1 m;节理 $J_1:210^\circ \angle 75^\circ$,间距0.6~1 m;节理 $J_2:300^\circ \angle 80^\circ$,间距1~2 m。崖壁岩体被三组相互近正交的结构面切割成规则危岩块体,对边坡上各单体危岩体积进行测量统计,测得单体危岩体积为0.4~2 m³;对下方斜坡区域内分布的危岩进行调查,共统计了30块落石,各落石体积见表1,其分布位置见图10。观察发现,W19和W26落石形状不规则,表面粗糙,且体积远小于单体危岩体积;其他落石形状均较规则,仅存在少许棱角缺失状况,其中,W5、W8、W14、W23和W29落石体积远大于单体危岩体积,且岩体内有多条节理分布。根据这些特征,初步推测危岩崩落过程中主要是沿结构面破坏。

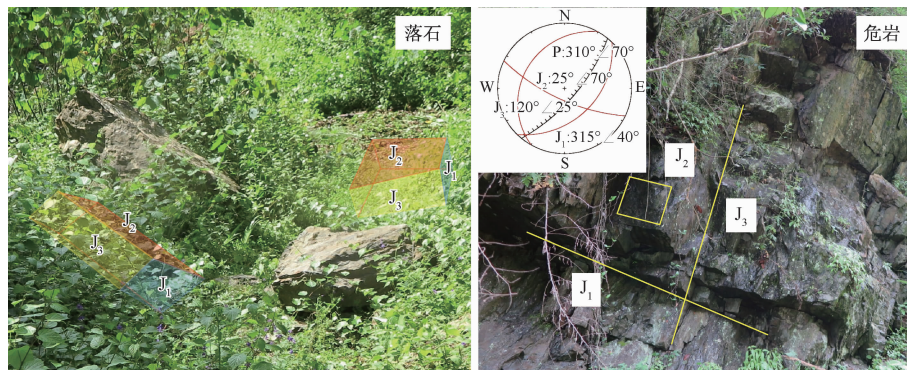


图9 纸厂沟边坡危岩与落石

Fig.9 Dangerous rock and rockfall of the Zhichanggou slope

表1 兴山隧道进口边坡落石尺寸

Table 1 Size of rockfall at the entrance slope of the Xingshan tunnel

编号	长/ m	宽/ m	高/ m	体积/ m ³	编号	长/ m	宽/ m	高/ m	体积/ m ³
W1	1.6	1.2	0.9	1.7	W16	1.5	0.7	0.7	0.7
W2	1.0	0.8	0.5	0.4	W17	2.0	0.8	0.9	1.4
W3	1.0	1.0	0.5	0.5	W18	1.5	2.0	0.6	1.8
W4	1.0	1.6	0.7	1.1	W19	0.7	0.6	0.3	0.1
W5	2.0	1.2	2.0	4.8	W20	1.5	1.2	0.5	0.9
W6	1.5	0.7	1.0	1.1	W21	1.6	1.2	0.7	1.3
W7	0.7	1.0	1.2	0.9	W22	1.6	1.0	0.6	1.0
W8	2.0	3.0	1.0	6.0	W23	3.0	1.5	2.0	9.0
W9	1.5	1.0	1.0	1.5	W24	1.0	1.0	1.0	1.0
W10	1.2	0.8	0.6	0.6	W25	1.2	0.8	0.6	0.6
W11	1.8	1.0	0.8	1.4	W26	0.3	0.4	0.6	0.1
W12	2.0	1.0	1.0	2.0	W27	1.0	0.8	1.5	1.2
W13	0.5	1.0	1.0	0.5	W28	1.2	0.8	0.7	0.7
W14	3.0	1.6	1.0	4.8	W29	2.4	1.8	1.0	4.3
W15	1.5	0.7	1.0	1.05	W30	0.5	0.8	2.0	0.8

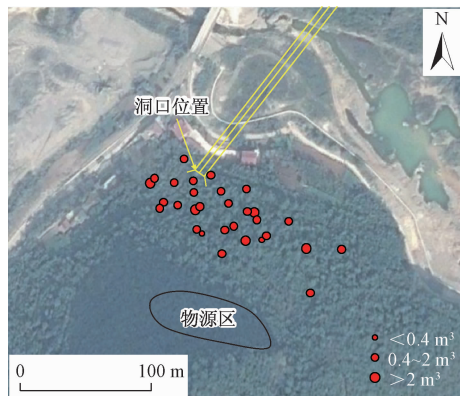


图10 落石位置分布图

Fig. 10 Location distribution map of rockfall

4.2 危岩崩落破坏模式

危岩崩落破坏模式的定义^[21]为:从边坡上部崖壁上分离的岩体可能由单体危岩或危岩组组成,危岩崩落破坏模式分为破裂和解体,破裂是指危岩沿着岩体内部微小裂隙或软弱面发生无规律碎裂形成不规则落石,解体则是指危岩组沿着岩体结构面发生分解行为形成多个单体危岩,不产生额外的岩块。对于单体危岩,当撞击地面时,如果冲击能量较低,岩体可以保持完整;如果冲击能量较高,岩体可能发生破裂,碎裂成多块形状不规则碎块(图11a和b)。而在危岩组中,由于节理组的相互交叉,存在不同尺寸和形状的单块体,当碰撞产生的冲击能量较低时,危岩组中各岩块可能沿着结构面发生部分或全部解体,危岩组分解成单体危岩;当冲击能量较高时,危岩组可能同时发生破裂和解体(图11c和d)。

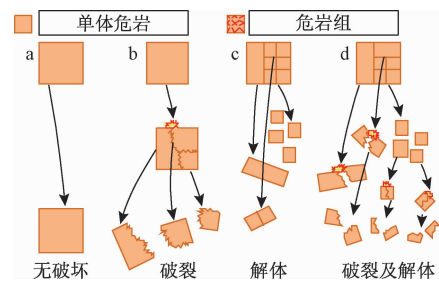


图11 危岩崩落破坏模式

Fig. 11 Caving damage mode of rockfall

根据调查结果,兴山隧道进口边坡分布的30块落石中,W19和W26落石是由危岩破碎形成,约占总数的6.7%;W5、W8、W14、W23和W29落石为危岩组崩落后未发生全部解体所形成的,其他落石除了岩体棱角缺失可能是由于在与坡面碰撞过程中脱落,其他特征都符合单体危岩。此外,边坡中下部植被发育,坡面有覆盖层,降低了危岩与坡面撞击产生的冲击力。综上所述,可判断兴山隧道进口边坡上部单体危岩或危岩组发生崩落时,岩体主要沿结构面解体破坏形成坡脚落石,危岩组失稳崩落破坏演化过程示意图见图12。崖壁危岩失稳掉落,与坡面发生第一次碰撞时,由于冲击力较大,危岩沿着结构面发生不完全解体破坏,形成小危岩组和单体危岩。由于植被和坡表覆盖层的影响,在后续的碰撞过程中,有的小危岩组未发生解体,以危岩组形式停留于坡表;部分小危岩组则沿着结构面进一步发生解体破坏,最终分解成单体落石,覆于坡脚处。对于单体危岩,危岩与落石的体积基本相同;而对于危岩组,由于在撞击,翻滚过程中,有块体沿着结构面脱落,最终落石体积与原始危岩体积相差较大。

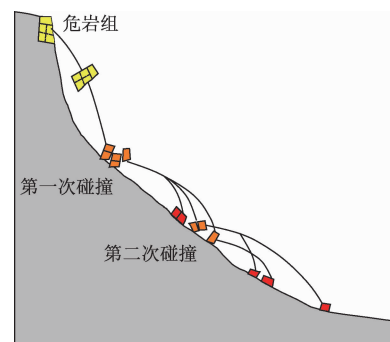


图12 危岩崩落破坏演化过程

Fig. 12 Evolution process of caving failure of rockfall

对15个隧道洞口边坡上部危岩与下部落石的体积和形状关系进行分析,发现除了2个地层岩性为页岩夹砂岩的边坡,其危岩崩落破坏模式既有破裂又有

解体,其他各边坡上部危岩和下部落石基本上都符合这种对应关系,危岩崩落破坏模式主要是岩体解体。

总结可得,研究区内,若边坡为上陡下缓地形,高差分布于 150~300 m 之间,出露基岩主要为弱风化灰岩、白云岩等硬质岩,边坡上部危岩崩落破坏模式主要以解体为主。

5 落石运动特征预测

在危岩崩塌灾害预测与防治中,落石运动距离是一个重要参考指标^[22]。但是,由于受块石形态、坡高、坡度、坡面植被发育情况等多种因素影响,危岩失稳崩落后的运动轨迹无法定量预测,目前,落石运动距离的预测方法主要有理论计算法、经验分析法和数值模拟法等^[23]。本文主要采用 Rockfall 软件对落石运动进行模拟。

以五盘山隧道出口边坡为例(图 13),该边坡危岩被缓倾坡外的层面和两组正交的陡倾节理共同切割成块状岩体,稳定性差,在重力、降雨等作用下,危岩块体容易沿层面发生滑移失稳破坏。由于危岩物源区主要位于隧道洞口边坡上部陡壁,因此直接以过物源区和洞口的断面为计算剖面。通过对已有落石进行反分析来获取各段边坡的计算参数。图中 A—A' 剖面为模拟路径,以物源区最高点作为启动位置,以调查的最大落石作为模拟危岩体积,崩落体质量取 13 800 kg,模

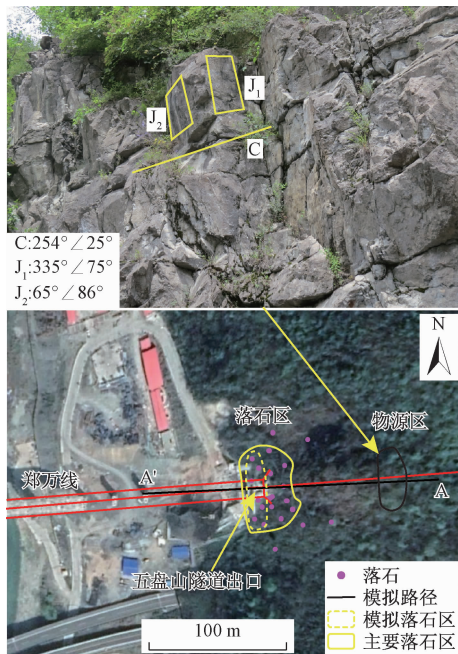


图 13 五盘山隧道出口边坡危岩和落石分布情况

Fig. 13 Distribution of dangerous rock and rockfall at the outlet slope of Wupanshan tunnel

拟 1 000 次,计算参数见表 2。计算结果表明(图 14),危岩崩落后弹跳高度很小,最大弹跳高度约 1.3 m,位于 33 m 处,落石主要沿着陡坡滚落;落石止落位置都分布于 105~115 m 距离之间,而隧道洞口位于 105 m 左右,危岩崩落后将严重威胁隧道洞口安全。根据实际的调查结果,大部分落石都位于隧道洞口附近,实际落石区范围要远大于模拟落石区,其中,实际落石最大止落位置与模拟结果大致相同。

表 2 落石模拟计算参数

Table 2 Parameters used in simulation of rockfall

	法向恢复系数	变异系数	切向恢复系数	变异系数	摩擦角/(°)	变异系数
坡段 1 灰岩岩体	0.40	0.04	0.85	0.04	30	2
坡段 2 植被发育	0.35	0.04	0.80	0.04	30	2

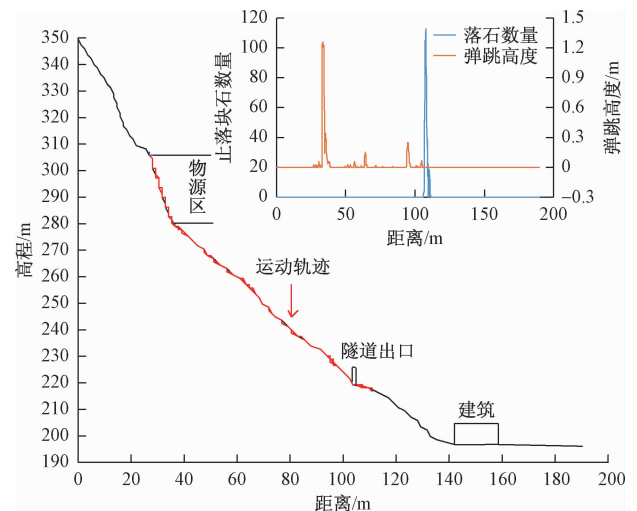


图 14 剖面 A—A' 模拟结果

Fig. 14 Simulation result of section A—A'

综上所述,危岩崩落后受地形地貌、树木拦挡作用等影响,部分落石未滚落到模拟结果中的位置就已经能量耗尽而停止,落石最小止落位置远小于模拟结果中的 105 m,危岩实际影响范围远大于模拟结果,但落石最大止落距离基本一致,变化的只是最小止落位置范围。可知,落石预测结果与实际结果较为符合,方法具有可行性。因此,当模拟结果中大多数落石最大止落位置大于隧道洞口位置时,即使有树木的拦挡,实际上还是会有部分落石滚落到隧道洞口区域,危险性较大。

采用相同方法分析其他边坡落石运动特征,结果见表 3。沙子岭 2# 隧道进口边坡没有落石超过洞口位置,基本无影响;甘家山隧道出口边坡和向家湾隧道进口边坡只有少部分落石超过洞口位置,危险性小;神龙架大桥边坡和纸厂河段边坡落石在洞口处弹跳较高,

落石可能从洞口上方飞过,危险性相对较小;其余边坡落石危险性则都较大。综合考虑现场调查以及模拟计算等各种因素的情况,洞口部位需要采取一些防治措施以降低风险。

表3 危岩危险性评价

Table 3 Risk evaluation of the dangerous rocks

边坡名称	≥洞口位置的 落石比值/%	洞口处回弹 高度/m	洞口处最大 总动能/kJ	危险性定 性评价
高家坪	94	0	1 172	较大
五盘山	100	0	2 063	较大
罗家山	84	1.0	1 100	较大
沙子岭 1#进口	100	0.1	3 094	较大
沙子岭 2#进口	0	0	0	无影响
沙子岭 2#出口	100	1.6	1 166	较大
神龙架大桥	97	3.7	2 297	较小
新华	100	0	1 872	较大
纸厂沟	86	3.5	816	较小
甘家山进口	100	0.3	2 129	较大
甘家山出口	22	0	1 011	小
兴山	70	0.1	1 676	较大
向家湾	32	0	0	小
香炉坪	100	0.1	1 213	较大
象鼻嘴中桥	84	0	2 010	较大

6 结论

(1)研究区危岩发育分布规律为:边坡呈上陡下缓地形,上部坡度基本上 $\geq 70^\circ$,基岩陡壁裸露;中下部坡度较缓,坡表植被发育,覆土层较厚。危岩主要发育在弱风化的灰岩和白云岩等硬质岩中。边坡高差基本上分布于150~300 m之间。

(2)边坡岩体均受多组大角度相交,甚至近于正交的结构面切割,形成了由若干小尺寸岩块组合而成的类砌体结构,发生失稳时,单体危岩或危岩组(多块危岩组合)将呈阶梯状方式逐渐沿基底结构面滑移破坏或沿后缘结构面拉裂坠落。

(3)研究区内危岩崩落破坏模式主要为边坡上部岩体沿结构面解体破坏。

(4)沙子岭 2#隧道进口边坡落石基本无影响;甘家山隧道出口边坡和向家湾隧道进口边坡落石危险性小;神龙架大桥边坡和纸厂河段边坡落石危险性相对较小;其余边坡落石危险性较大,严重威胁隧道洞口的安全,需要采取相应的防治措施。

参考文献 (References):

[1] 周文皎,习奇,申文军,等. 丰沙线危岩落石风险评估及整治[J]. 铁道建筑,2018,58(6):100-103.
[ZHOU W J, XI Q, SHEN W J, et al. Rockfall analysis and risk assessment for Fengtai-Shacheng Railway[J]. Railway Engineering, 2018, 58(6):

100-103. (in Chinese)]

[2] 田耘,王林峰. 基于 PFC 离散元的多层岩质陡坡危岩崩落序列[J]. 科学技术与工程,2019,19(19):301-309. [TIAN Y, WANG L F. Study on the collapse sequence of rocky steep slope dangerous rock based on Particle Discrete Element [J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(19):301-309. (in Chinese)]

[3] 陈洪凯,董平,唐红梅. 危岩崩塌灾害研究现状与趋势[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版),2015,32(6):53-60. [CHEN H K, DONG P, TANG H M. The status quo and trends of perilous rock and collapse disaster [J]. Journal of Chongqing Normal University(Natural Science Edition), 2015, 32(6):53-60. (in Chinese)]

[4] 杨丹,胡卸文,胡亚运. 硐室片状危岩体病害机理分析与评价方法[J]. 水文地质工程地质,2018,45(3):138-145. [YANG D, HU X W, HU Y Y. Mechanism analyses and evaluation methods of schistose dangerous rock mass in cavern [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45(3):138-145. (in Chinese)]

[5] 乐琪浪,孙秀娟,蔡玲玲,等. 三峡库区望霞危岩体地质模式及变形破坏过程[J]. 水文地质工程地质,2015,42(6):154-158. [LE Q L, SUN X J, CAI L L, et al. Geological model and deformation failure process of the Wangxia unstable rock mass in the Three Gorges Reservoir [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, 42(6):154-158. (in Chinese)]

[6] 胡厚田. 崩塌落石研究[J]. 铁道工程学报,2005,22(增刊1):387-391. [HU H T. Research on the collapse and falling stone [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2005, 22(Sup1):387-391. (in Chinese)]

[7] 徐伟,冯文凯,郭少文,等. 彝良县大石盘组崩塌机理及防治对策[J]. 安全与环境工程,2018,25(4):33-40. [XU W, FENG W K, GUO S W, et al. Cause analysis and prevention countermeasures of Dashipan Group collapse in Yiliang County[J]. Safety and Environmental Engineering, 2018, 25(4):33-40. (in Chinese)]

[8] 李明,陈洪凯,叶四桥. 重庆市洪崖洞危岩发育机理[J]. 中国地质灾害与防治学报,2008,19(2):1-6. [LI M, CHEN H K, YE S Q. Failure mechanism of Hongyadong dangerous rockmass, Chongqing City [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2008, 19(2):1-6. (in Chinese)]

- [9] 陈健云,岳红原,徐强. 复杂环境下倾倒式危岩体的动力稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2016,35(10):1965-1974. [CHEN J Y, YUE H Y, XU Q. Dynamic stability analysis of perilous toppling rock in complex environment[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(10): 1965-1974. (in Chinese)]
- [10] 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 X J, HUANG R Q, PEI Z, 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. (in Chinese)]
- [11] 程强,苏生瑞. 汶川地震崩塌滚石坡面运动特征[J]. 岩土力学,2014,35(3):772-776. [CHENG Q, SU S R. Movement characteristics of collapsed stones on slopes induced by Wenchuan earthquake[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(3): 772-776. (in Chinese)]
- [12] 唐红梅,韩明明,王林峰. 基于 AHP-Fuzzy 法的灰岩地区崩塌体失稳危险性评价[J]. 灾害学,2019,34(3):1-7. [TANG H M, HAN M M, WANG L F. Hazard assessment of collapsed rock mass in limestone Area based on AHP-Fuzzy method[J]. Journal of Catastrophology, 2019, 34(3): 1-7. (in Chinese)]
- [13] 许强,陈伟. 单体危岩崩塌灾害风险评价方法——以四川省丹巴县危岩崩塌体为例[J]. 地质通报, 2009,28(8):1039-1046. [XU Q, CHEN W. Risk assessment method for single rockfall geo-disaster: a case study on the rockfall in Danba County, Sichuan, China[J]. Geological Bulletin of China, 2009, 28(8): 1039-1046. (in Chinese)]
- [14] 黄海宁,黄健,周春宏,等. 无人机影像在高陡边坡危岩体调查中的应用[J]. 水文地质工程地质, 2019,46(6): 149-155. [HUANG H N, HUANG J, ZHOU C H, et al. Application of UAV images to rockfall investigation at the high and steep slope[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(6): 149-155. (in Chinese)]
- [15] 何思明,王东坡,吴永,等. 崩塌滚石灾害的力学机理与防治技术[J]. 自然杂志,2014,36(5):336-345. [HE S M, WANG D P, WU Y, et al. Formation mechanism and key prevention technology of rockfalls[J]. Chinese Journal of Nature, 2014, 36(5): 336-345. (in Chinese)]
- [16] 何晓英,陈洪凯,唐红梅. 长江巫峡望霞危岩破坏解体特征分析[J]. 人民长江, 2013,44(9):24-28. [HE X Y, CHEN H K, TANG H M. Study on damage disintegrating characteristic of Wangxia perilous rock in Wu Gorge of Yangtze River[J]. Yangtze River, 2013, 44(9): 24-28. (in Chinese)]
- [17] 王贺,陈洪凯,王小委. 类砌体型危岩解体破坏模型试验[C]//2016 年全国工程地质学术年会论文集. 成都:中国地质学会工程地质专业委员会, 2016:727-733. [WANG H, CHEN H K, WANG X W. Tests for formatted collapse disaster of quasi-masonry structure perilous rock [C]//Papers Collection of 2016 National Academic Conference. Chengdu: Engineering Geology Committee of China Geological Society, 2016:727-733. (in Chinese)]
- [18] 喻渝,李老三. 郑万高铁湖北段隧道风险评估与控制对策综述[J]. 隧道建设(中英文),2019,39(1):157-163. [YU Y, LI L S. Review on risk assessment and control measures for tunnels on Hubei Section of Zhengzhou-Wanzhou High-speed Railway[J]. Tunnel Construction, 2019, 39(1): 157-163. (in Chinese)]
- [19] 赵忠海. 赤平投影法在北京门头沟某公路边坡稳定性分析中的应用[J]. 资源环境与工程,2015,29(2):190-192. [ZHAO Z H. Application of stereographic projection on analyzing stability of the slope along the road in Mentougou County of Beijing[J]. Resources Environment & Engineering, 2015, 29(2): 190-192. (in Chinese)]
- [20] 陈洪凯. 三峡库区危岩链式规律的地貌学解释[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2008,27(1):91-95. [CHEN H K. Geomorphology research on chained regularity of perilous rock in the area of the Three Gorges Reservoir[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University(Natural Science), 2008, 27(1): 91-95. (in Chinese)]
- [21] ROGER R C, JORDI C, OLGA M. A fractal fragmentation model for rockfalls[J]. Landslides, 2017, 14(3):875-889.
- [22] WANG X L, FRATTINI P, CROSTA G B, et al. Uncertainty assessment in quantitative rockfall risk assessment[J]. Landslides, 2014, 11(4):711-722.
- [23] 韩振华,陈鑫,王学良,等. 四川罗家青杠岭崩塌风险的定量评价研究[J]. 工程地质学报,2017,25(2):520-530. [HAN Z H, CHEN X, WANG X L, et al. Risk assessment for Luoiaqinggangling rockfall[J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(2): 520-530. (in Chinese)]