

文章编号: 1674—8247(2022)06—0084—08

DOI: 10.12098/j.issn.1674-8247.2022.06.016

高速铁路隧道洞口危岩落石灾害评价方法及工程对策研究

钟昌桂 张磊 周良

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

摘要: 贵南高速铁路穿越岩溶地貌区, 危岩落石成为影响隧道洞口安全的重要因素。本文将隧道洞口落石风险分为初始风险和残留风险, 考虑隧道洞口仰坡坡度、危岩高度、危岩发育程度、危岩大小、落石冲击力、落石区与铁路工程的位置关系等关键因素, 采用定性和定量相结合的方法构建初始风险评价方法; 根据落石上道、隧道洞口结构局部破损、整体倾覆破坏 3 种落石灾害类型, 结合落石运动规律计算和动力有限元数值分析, 建立了 I 期、II 期、III 期残留风险评估方法; 将本文建立的危岩落石灾害全过程评价方法应用于贵南高速铁路隧道洞口工程中, 确定了合理的工程措施及防护参数。

关键词: 隧道洞口; 落石灾害; 风险评估; 防护措施

中图分类号: U456.3+3

文献标识码: A

A Study on Evaluation Method and Engineering Countermeasures of Dangerous Rockfall Disaster at Tunnel Portal of High-speed Railway

ZHONG Changgui ZHANG Lei ZHOU Liang

(China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: Guiyang-Nanning High-speed Railway passes through the karst landform area, and dangerous rockfall has become an important factor affecting the safety of tunnel portals. In this paper, the risk of rockfall at the tunnel portal is divided into initial risk and residual risk. Considering the key factors such as the gradient of the heading slope at the tunnel portal, the height of dangerous rocks, the development degree of dangerous rocks, the size of dangerous rocks, the impact force of rockfall, and the positional relationship between the rockfall area and the railway project, the initial risk assessment method is constructed by combining qualitative and quantitative methods. According to the three types of rockfall disasters: rockfall on the track, local damage of tunnel portal structure, and overall overturning damage, combined with the calculation of rockfall movement law and dynamic finite element numerical analysis, the residual risk assessment methods of Phase I, Phase II, and Phase III are established. The whole-process evaluation method of dangerous rockfall disaster established in this paper is applied to the tunnel portal project of Guiyang-Nanning High-speed Railway, and reasonable engineering measures and protection parameters are determined.

Key words: tunnel portal; rockfall disaster; risk assessment; protective measures

贵南高速铁路穿越地貌单元属贵州高原斜坡带

及广西倾斜盆地, 地貌类型主要为溶蚀型、溶蚀侵蚀

收稿日期: 2022-05-24

作者简介: 钟昌桂(1987-), 男, 高级工程师。

引文格式: 钟昌桂, 张磊, 周良. 高速铁路隧道洞口危岩落石灾害评价方法及工程对策研究[J]. 高速铁路技术, 2022, 13(6): 84-91.

ZHONG Changgui, ZHANG Lei, ZHOU Liang. A Study on Evaluation Method and Engineering Countermeasures of Dangerous Rockfall Disaster at Tunnel Portal of High-speed Railway[J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(6): 84-91.

型及侵蚀型,地貌形态多属溶蚀峰丛洼地及溶蚀峰丛谷地地貌。峰丛地貌区危岩落石随处可见,单次危岩落石灾害以中小型为主,偶有大型危岩落石灾害发生,危岩拉裂破坏后以坠落及跳跃为主,个别地区有崩塌发生。附近的高速公路、国道及居民区近年发生过多起危岩落石灾害,危岩落石灾害发生频率高。

近年来,王玉锁等^[1]提出了隧道洞口落石风险评估方法;叶四桥等^[2]提出了隧道洞口段落石灾害危险性等级评价方法,对落石运动模式与运动特征进行了现场实验,并对多种落石冲击力计算方法进行了比较。目前,洞口危岩落石评价体系仅仅建立在初始风险评判上,未针对采取工程措施处理后的残留风险进行评估,危岩落石评价体系不够完善。

本文以贵南高速铁路隧道工程为依托,提出了定性、定量分析的危岩落石初始风险评估方法,引入了采取危岩落石处理措施后Ⅰ期、Ⅱ期、Ⅲ期残留风险评估方法;通过 ROCKFALL 建立危岩落石失稳模型,从危岩落石的运动轨迹、冲击能量等方面进行了系统研究;利用大型通用有限元软件 ABAQUS/explicit 模块,对明洞衬砌结构的抗冲击能力进行计算分析,提出了贵南高速铁路隧道洞口危岩落石综合防护措施。

1 建立危岩落石风险评价体系

1.1 危岩落石风险评价体系概述

为提高危岩落石防护的有效性和针对性,综合考虑地形地质条件、危岩落石与线位关系、防护措施可实施性、风险接受程度等因素,采用现场调查、评分、落石轨迹分析、防护结构计算等多种手段进行定性和半定量的分析,建立危岩落石风险分级评价体系^[3-6]。

与目前的隧道风险评估保持一致,危岩落石风险等级分为初始风险和残留风险。初始风险指工程建设各阶段未采取风险处理措施前就已存在的风险,即对危岩落石不采取任何防护整治措施时(隧道洞口设于明暗分界处、不接任何明棚洞),铁路工程存在的风险。残留风险指对初始风险采取处理措施后自留或转移到下一阶段的风险,即在采取了清除及加固、主动及被动拦截和明(棚)洞防护后依然存在的风险。风险等级分为极高、高度、中度、低度4个等级。

1.1.1 危岩落石风险分类

危岩落石对线路的风险,具体分为落石上道风险、主体结构倾覆破坏风险和主体结构局部破损风险3种,具体为:

(1)落石上道风险是指落石经滚动、弹跳、飞溅等

多种运动状态,越过拦石墙、防护网,或击穿防护网、防护明洞(棚洞)等防护结构,直接落入线路,对运营车辆、轨道结构造成直接危害的风险,此类风险是不可接受和不期望的。

(2)主体结构倾覆破坏风险是指落石经滚动、弹跳、飞溅等多种运动状态,越过或击穿拦石墙、防护网等防护结构后,直接撞击明洞(棚洞)上部结构或桩柱等下部结构,造成整体结构倾覆破坏,进而对运营车辆、轨道结构等造成间接危害的情况,此类风险也是不可接受和不期望的。

(3)主体结构局部破损风险是指落石经滚动、弹跳、飞溅等多种运动状态,越过或击穿拦石墙、防护网等防护结构后,直接撞击明洞(棚洞)上部结构或桩柱等下部结构,造成主体结构局部开裂、混凝土局部剥落、结构微小变形等可修复的破损,但不会产生结构倾覆破坏、落石上道等破坏的情况,此类风险不会对运营车辆、轨道结构造成直接危害,是可接受的。

对于落石上道、主体结构倾覆破坏对运营车辆、轨道结构造成直接危害的风险,严重危害铁路运营安全,在设计阶段是不可接受的风险。首先应通过减灾选线,规避风险;对于无法避让的风险,应采取清除、加固、主被动拦截、进一步补强明(棚)洞结构等综合处理手段降低风险;对于仍然残留的风险,应采取异物源头、入侵及危害监测等手段,进一步降低,确保铁路运营安全。

1.1.2 危岩落石防治措施及风险分期

危岩落石的防护与整治措施分为清除及加固、主动及被动拦截、明(棚)洞防护3大类型,包括与初始风险对应的不采取任何防护措施的情况。根据具体工点情况,选择一种、两种或三种整治措施,将风险按整治措施和整治阶段进行分期,具体如下:

(1)零整治措施:对存在的危岩落石不采取任何整治措施,洞口位置设定为明暗分界处,不接长任何明洞或棚洞结构。此时存在的风险称为初始风险,主要表现为落石上道风险。

(2)清除及加固措施:对存在的危岩采取清除措施,或采取支顶、嵌补、锚网喷加固、锚索加固等多种加固方式,在危岩落石源头上降低风险。采取清除及加固措施后存在的风险,称为Ⅰ期残留风险,主要表现为落石上道风险。

(3)主动及被动拦截措施:对可能掉落的危岩落石采用主动防护网、被动防护网、帘式防护网、刚性格栅防护网、拦石墙、落石槽等措施,拦截危岩落石,或改变落石轨迹和运动状态,降低落石能量,在落石运

动过程中降低风险。采取主动及被动拦截措施后存在的风险,称为Ⅱ期残留风险,主要表现为落石上道风险。

(4)明(棚)洞防护措施(或桩基的防撞措施):设置危岩落石防护明(棚)洞,防止落石直接上道,危及车辆、设备和轨道安全,并采取增加缓冲层厚度、改进缓冲材料性能、优化结构受力等多种方式增强防护结构的抗冲击能力,提高主体结构抗冲击能力以降低风险。采取明(棚)洞防护措施后存在的风险,称为Ⅲ期残留风险,主要表现为落石上道风险、主体结构倾覆破坏风险和主体结构局部破损风险。

1.2 初始风险评估方法

初始风险评估主要考虑的风险因素有危岩高度、山体坡度、危岩发育程度、危岩(落石)大小、落石区与铁路工程的位置关系等5项因素。采用现场调查访问、综合评分的定性(半定量)方法,并采用 Rockfall 软件进行轨迹分析,根据落点概率与主体工程的关系、冲击力(或能量)大小等确定初始风险等级^[7-8]。

1.2.1 定性(半定量)评估方法

(1)主要风险因素评分

对各项风险因素进行评分,评分数值依次定义为 f_1 、 f_2 、 f_3 、 f_4 、 f_5 ,各项风险因素的评分参考如表1所示。

(2)主要风险因素影响程度评价

考虑各项风险因素在整个综合评分中的重要程度、影响程度,将风险因素分为无相关因素、弱相关因素、一般因素、重要因素和首要因素。量化各项风险因素的影响程度为影响因子,依次定义为0~1、1~2、2~3、3~4和4~5,5项风险因素的影响因子平均值为2,总和必须为10。结合各项风险因素的影响程度调整影响因子大小,影响因子评定如表2所示。

(3)综合评分计算方法及初始风险评价

将上述5个因素的评分作为乘数、影响因子作为权重计算5项风险因素评分的加权几何平均数,计算公式为:

$$f = \sqrt[10]{f_1^{\gamma_1} f_2^{\gamma_2} f_3^{\gamma_3} f_4^{\gamma_4} f_5^{\gamma_5}} \tag{1}$$

其中:

$$\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 + \gamma_4 + \gamma_5 = 10 \tag{2}$$

根据上述计算的综合评分进行初始风险评级,对应关系参考如表3所示。

1.2.2 定量分析评价方法

采用 Rockfall 软件进行落石轨迹分析,依据落石分区和落石冲击能量(或冲击力)两个因素进行综合评分,定量分析评价方法如表4所示。

表1 定性(半定量)评估方法表

序号	风险因素	风险概况	风险评分	
1	危岩高度 h/m	0 ~ 50	f_1	0 ~ 3
		50 ~ 100		3 ~ 6
		100 ~ 200		6 ~ 8
		200 m 以上		8 ~ 10
2	山体坡度 $\alpha/(\text{^\circ})$	0 ~ 30: 线路上方具有较长缓坡平台	f_2	0 ~ 3
		30 ~ 50: 线路上方具有一定缓坡		3 ~ 6
		50 ~ 70: 线路上方缓坡段较短		6 ~ 8
		70 以上: 线路上方几乎无缓坡段		8 ~ 10
3	危岩发育程度(危岩掉落可能性)	不发育: 岩体完整、节理裂隙不发育	f_3	0 ~ 3
		较发育: 节理裂隙较发育,或现场调查推测坡脚落石滚落时间久远		3 ~ 6
		发育: 节理裂隙发育,切割严重,岩面较新鲜,或现场调查推测坡脚落石为近期掉落		6 ~ 8
		极发育: 节理裂隙极发育,切割极严重,岩面新鲜,现场调查访问有危岩时常滚落,对当地房屋、道路等已造成危害		8 ~ 10
4	单块落石最大体积 V/m^3	0 ~ 0.5: 坡脚落石的最大体积或估算危岩体积	f_4	0 ~ 3
		0.5 ~ 3.0: 坡脚落石的最大体积或估算危岩体积		3 ~ 6
		3.0 ~ 10: 坡脚落石的最大体积或估算危岩体积		6 ~ 8
		10 以上: 坡脚落石的最大体积或估算危岩体积,可能存在深层节理面地段		8 ~ 10
5	铁路工程与落石区的位置关系	非落石区: 现场调查基本无落石,推测危岩滚落难以到达区域	f_5	0 ~ 3
		次要落石区: 现场调查分布少量零星落石,推测少量大块危岩滚落偶尔到达区域		3 ~ 6
		主要落石区: 现场调查分布较多落石,推测较多危岩滚落经常到达区域		6 ~ 8
		直接落石区: 位于陡崖、陡壁、倒悬体正下方,危岩掉落直接到达区域		8 ~ 10

表2 主要风险因素影响程度评价表

序号	重要程度	参考影响因子
1	无相关因素	0 ~ 1
2	弱相关因素	1 ~ 2
3	一般因素	2 ~ 3
4	重要因素	3 ~ 4
5	首要因素	4 ~ 5

表3 初始风险等级评价表

综合评分	0 ~ 2分	2 ~ 5分	5 ~ 8分	8 ~ 10分
初始风险等级	低度	中度	高度	极高

综合评分计算为:

$$f = \sqrt{f_1 f_2} \tag{3}$$

综合评分与初始风险等级的对应关系同前。

上述两种方法如较接近,取高值,如差异较大,综合比较后评定。

表 4 定量分析评价方法表

序号	风险因素	风险概况	风险评分
1	冲击能量 (冲击力)/kJ	0 ~ 100;	0 ~ 3
		100 ~ 1 000;	3 ~ 6
		1 000 ~ 3 000;	6 ~ 8
		3 000 以上;	8 ~ 10
2	铁路工程与 落石区的位置关系	非落石区: 计算落石轨迹极少到达区域	0 ~ 3
		次要落石区: 计算落石轨迹较少到达区域	3 ~ 6
		主要落石区: 计算落石轨迹经常到达区域	6 ~ 8
		直接落石区: 计算落石轨迹几乎完全到达区域	8 ~ 10

1.3 I 期残留风险评价方法

I 期残留风险是指对存在的危岩采取清除措施,或采取支顶、嵌补、锚网喷加固、锚索加固等多种加固方式后,仍然存在的风险,主要考虑落石上道风险。

I 期残留风险的评价方法、评价标准与初始风险相同。采用定性(半定量)的方法主要对风险因素的评分进行适当折减或影响因子进行调整,如表 5 所示。

表 5 I 期残留风险评价方法表

序号	采取措施及效果	可折减评分的风险因素
1	无法清除或非重点局部清除	不能折减
	重点清除	酌情较大幅度折减岩体高度、危岩发育程度、落石体积的评分
	全面清除	酌情大幅度折减岩体高度、山体坡度、危岩发育程度、落石体积、落石分区的评分
2	无法加固或非重点局部加固	不能折减
	重点加固(重点区域采取支顶、嵌补、锚喷、锚索加固等措施且效果良好)	酌情较大幅度折减岩体高度、危岩发育程度、落石体积的评分
	全面加固(全面采取支顶、嵌补、锚喷、锚索加固措施且效果良好)	酌情大幅度折减岩体高度、山体坡度、危岩发育程度、落石体积、落石分区的评分

定量分析方法主要是对落石的高度、体积等参数进行调整,对地面线进行修正后,采用 Rockfall 软件重新分析落石轨迹及冲击能量(冲击力),并进行相应评级。

1.4 II 期残留风险评价方法

II 期残留风险是指对可能掉落的危岩落石采用主动防护网、被动防护网、帘式防护网、刚性格栅防护网、拦石墙、落石槽等措施后存在的风险,主要考虑落

石上道风险。根据具体工点情况和施工条件,确定合理、有效的主被动拦截措施,无效的措施不纳入考虑。

II 期残留风险的定性(半定量)的评价方法同前,但对相应的评分进行折减,参考评价标准如表 6 所示。

表 6 II 期残留风险评价方法表

序号	采取措施及效果	可折减评分的风险因素
1	拦石墙、落石槽	酌情折减落石区的评分
2	主动防护网	酌情折减危岩发育程度(危岩掉落的可能性)的评分
3	帘式防护网	酌情折减落石区的评分
4	被动防护网、刚性格栅防护网	酌情折减落石区的评分

落石轨迹分析作为一种定量分析方法,指设置了拦石墙、被动网等拦截措施后,采用 Rockfall 软件重新分析落石轨迹及冲击能量(冲击力),进行相应评级,并对被动网等的抗冲击能力提出要求。

另一种定量分析方法是采用理论方法和有限元软件对拦石墙的稳定性、强度进行计算,提出相关设计要求,根据拦石墙的拦截能力进行风险评价。

1.5 III 期残留风险评估方法

III 期残留风险是指采取了明(棚)洞防护措施后存在的风险,主要表现为落石上道风险、主体结构倾覆破坏风险和主体结构局部破损风险。

落石上道风险的评价方法、评价标准同前,对相应的评分进行折减,如表 7 所示。

表 7 III 期残留风险评估方法表

序号	采取措施及效果	可折减评分的风险因素
1	明洞	结合明洞长度、填土厚度、结构形状,酌情折减落石区的评分
2	棚洞	结合明洞长度、填土厚度、结构形状,酌情折减落石区的评分

主体结构倾覆破坏风险和局部破损风险主要采用有限元软件对明洞、棚洞结构及相应的桩基等基础结构进行静力或动力计算后对其抗冲击能力进行评价,参考评价标准如表 8 所示。

2 工程应用

2.1 永兴一号隧道出口概况

以永兴一号隧道出口为例,隧道出口上方危岩落石最大高差约 150 m,地形险峻陡峭,岩体为弱风化的灰岩、白云岩,石质坚硬,节理裂隙、裂缝较发育,由于不断被溶蚀、结构面切割、风化分离,表面岩体完整性较差,局部形成孤石,坡面分布 0 ~ 2 m 崩积的松散块石,出口危岩较严重,危石运动主要以落石形式发生,崩塌次之。出口采用双耳墙明洞门,明洞长度 80 m。

表 8 主体结构风险等级评价表

序号	主体结构部位	承载力或裂缝	风险类型	风险等级
1	明洞的拱墙、仰拱结构,棚洞的盖板、横梁、立柱结构	整体稳定性系数小于1,或承载能力不足(安全系数小于1)	倾覆破坏	极高
			局部破损	极高
2		承载能力安全储备不足(安全系数大于等于1且小于2.0)	倾覆破坏	高度
			局部破损	极高
3		承载能力安全储备满足要求、裂缝不满足要求但不大于2mm	倾覆破坏	中度
			局部破损	高度
4		承载能力安全储备有一定富余、裂缝不满足要求但不大于2mm	倾覆破坏	低度
			局部破损	高度
5		承载能力满足要求、裂缝满足要求	倾覆破坏	中度
			局部破损	中度
6		承载能力及裂缝均有一定富余	倾覆破坏	低度
			局部破损	低度
7	桩基基础结构	基本同以上评价方法,如为群桩基础,考虑局部桩断裂破坏对整体稳定性的影响。		
8	条带型混凝土扩大基础结构	整体抗倾覆、抗滑移稳定性不足(稳定性系数小于1)	倾覆破坏	极高
9		整体抗倾覆、抗滑移稳定性安全储备不足(稳定性系数大于1,但小于规范值)	倾覆破坏	高度
10		整体抗倾覆、抗滑移稳定性满足规范要求	倾覆破坏	中度
11		整体抗倾覆、抗滑移稳定性有一定富余	倾覆破坏	低度

2.2 初始风险评估

根据危岩高度、山体坡度、危岩发育程度、危岩(落石)大小、落石区与铁路工程的位置关系等5项因素进行定性(半定量)评估。

(1)危岩高度:本隧隧道出口上方山体最大高差约150 m,根据表1,此项评分 $f_1=7$ 。

(2)山体坡度:根据图1,本隧出口山体陡峻,平均坡度 60° 以上,此项评分 $f_2=6$ 。

(3)危岩发育程度:岩体为弱风化的灰岩、白云岩,石质坚硬,节理裂隙、裂缝较发育,危岩发育程度为严重,但现场调查坡脚落石为近期掉落,且未对当地房屋、道路等已造成危害,故此评分 $f_3=7$ 。

(4)危岩(落石)大小:坡面分布0~2 m崩积的松散块石,对应表1,此项评分 $f_4=6$ 。

(5)落石区与铁路工程的位置关系:本隧洞口位

于陡崖正下方,危岩掉落直接到达区域为隧道洞口附近,故此评分 $f_5=9$ 。

根据本隧危岩落石主要风险因素评估,认为危岩落石发育程度为重要影响因素,其参考影响因子分别取值为 $\gamma_1=2$ 、 $\gamma_2=2$ 、 $\gamma_3=3$ 、 $\gamma_4=1$ 、 $\gamma_5=2$;危岩落石综合评分为:

$$f = \sqrt[10]{7^2 \times 6^2 \times 7^3 \times 6^1 \times 9^2} = 7.03$$

根据表3,初始风险等级评价等级为高度风险,为不可接受风险,需采取措施后降至中度(可接受)及低度(接受)风险。

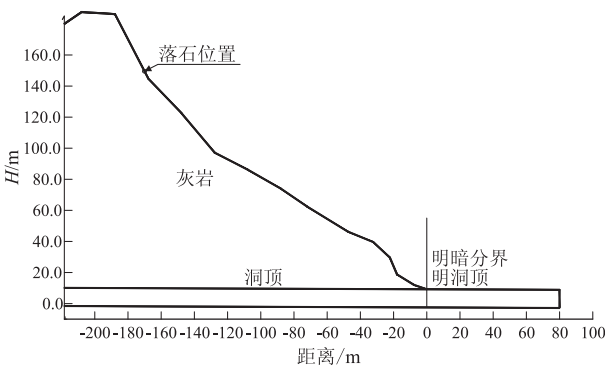


图 1 永兴一号隧道出口纵断面示意图

2.3 危岩落石防护措施

2.3.1 清方

出口仰坡范围,线路纵向长度100 m,隧道中线左侧70 m,右侧100 m范围内进行逐点排查,对松动岩体、坡面落石进行清方,清除后局部采用浆砌片石嵌补。

2.3.2 拦截

(1)帘式网

帘式网覆盖在山体表面,将落石控制在一定范围内运动,防止落石弹跳,将落石引导至非危害区域。

考虑隧道仰坡高陡,落石落差大且对线路危害较大,于隧道仰坡范围50 m,隧道中线左侧56 m,右侧83 m范围内1道张口式帘式网,帘式防护网柱高5 m,防护坡面长度约38 m,防护平均宽度约132 m。

(2)被动网

被动网用于拦截斜坡上的滚落石,避免下方主体结构遭受破坏,或缓冲落石运动,降低能量。

考虑出口洞顶坡度较陡,落石落差大,为规避帘式防护网引导的高位落石向线路方向滚落形成灾害的风险,于左线线路中线左侧66 m,左线线路中线右侧80 m范围设置1道被动防护网,柱高6 m,防护长度约159 m。

2.4 残留风险评估

2.4.1 I期残留风险评价

根据 I 期残留风险评价原则,考虑清方及局部加固后对落石的高度、体积等参数进行调整,采用 Rockfall 软件重新分析落石轨迹及冲击能量(冲击力),进行相应评级折减。

按两种工况进行考虑,工况 1 为不考虑清方,体积为 2 m³ 落石从危岩区 150 m 处脱离,并向下滚落;工况 2 为考虑清方及加固后,体积为 1 m³ 落石从危岩区 150 m 处脱离,并向下滚落,模型中计算参数如表 9 所示。

表 9 计算参数表

坡面	切向阻尼系数 Rt	法向阻尼系数 Rn
灰岩面	0.712	0.315
植被覆盖面	0.55	0.34
明洞顶面	0.62	0.3

落石水平初速取 0.1 m/s,随机抛掷 50 次,落石落点位置,未考虑清方落石运动轨迹主要集中于距离明暗分界 70~100 m 处,如图 2 所示;最大冲击能量为 5 300 kJ,如图 3 所示;考虑清方后落石运动轨迹变化不大,如图 4 所示;最大冲击能量为 2 530 kJ,如图 5 所示;以上分析说明清方后能够有效减少落石冲击能量。

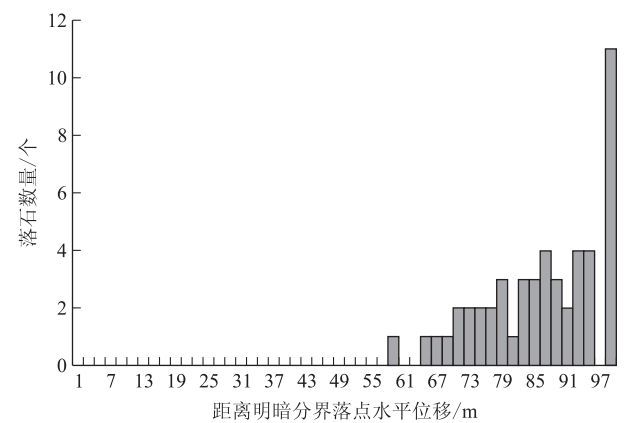


图 2 工况 1 落石运动距离示意图

2.4.2 II期残留风险评价

根据 II 期残留风险评价原则,考虑设置合理、有效的主被动拦截措施后,采用 Rockfall 软件重新分析落石轨迹及冲击能量(冲击力),进行相应评级折减。

考虑体积为 1 m³ 落石从危岩区 150 m 处脱离,并向下滚落。落石水平初速取 0.1 m/s,随机抛掷 50 次,落石落点位置,考虑拦截措施落石运动轨迹主要集中于距明暗分界 30~70 m 处,如图 6 所示;最大冲击能量为 1 850 kJ,如图 7 所示。以上分析说明通过清方

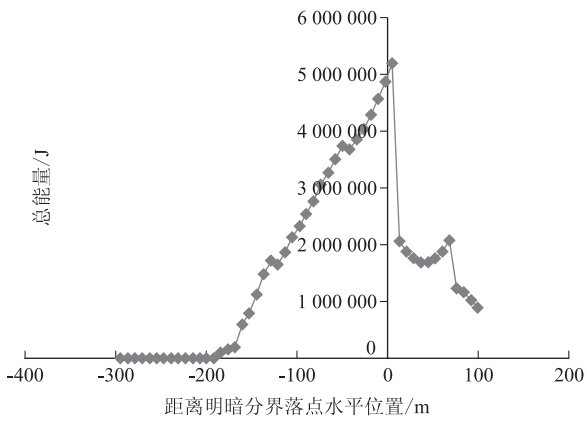


图 3 工况 1 最大冲击能量包络线示意图

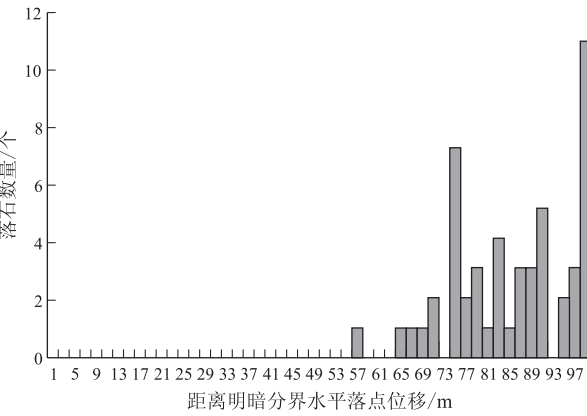


图 4 工况 2 落石运动距离示意图

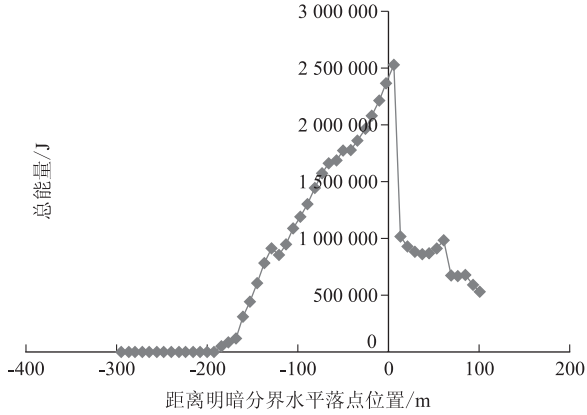


图 5 工况 2 落石运动距离示意图

后的落石在采取有效拦截措施以后,能有效控制减少落石最远运动距离,并能减少残余冲击能量。

2.4.3 III期残留风险评价

根据 III 期残留风险评价原则,采取明洞防护措施后是否存在明洞防护长度不足、明洞结构抵抗落石冲击能力不足的风险。

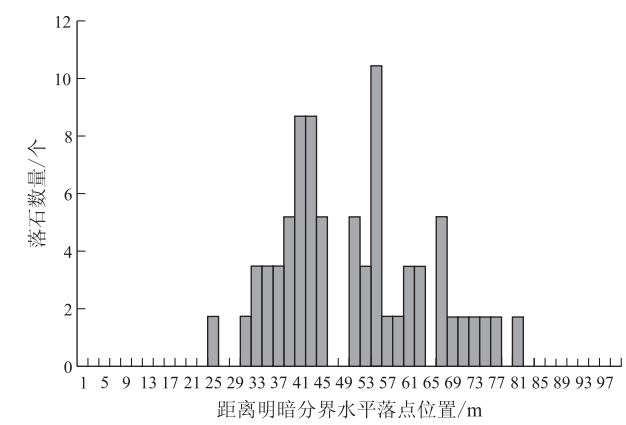


图 6 落石运动距离示意图

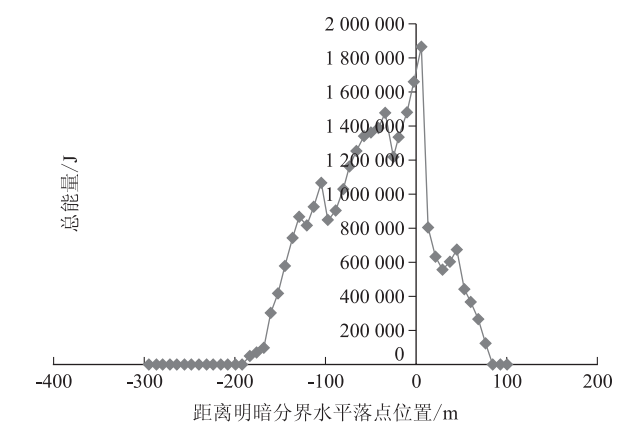


图 7 最大冲击能量包络线示意图

根据上述计算成果,考虑帘式网及被动网拦挡后,落石最终运动范围主要集中于距明暗分界 30~70 m 处,说明考虑有效的拦截措施后,永兴一号隧道进口明洞长度 80 m 是合理的。

采用大型通用有限元软件 ABAQUS/explicit 模块双耳墙式明洞结构进行动力计算,建立二维平面应变模型。明洞上回填土层按 3 m 考虑,下部围岩边界约束垂直方向位移,左右围岩边界约束水平位移。

计算结果从结构受压和受拉两方面的性能进行考虑,受拉性能以钢筋拉应力作为评判依据,全环钢筋最大应力达到 400 MPa (HRB400 钢筋弹性极限) 认为钢筋破坏,受压性能以混凝土压损伤结果作为判据,局部素混凝土部位以混凝土受拉损伤结果作为参考,混凝土损伤因子达到 0.8 以上认为结构因出现宏观裂缝而失效。大量计算结果表明,在明洞承受落石冲击的过程中,破坏是从拱顶开始,并且在上述 3 种失效判据中,多数情况是钢筋首先破坏。

分别模拟落石以 10 m/s、15 m/s、20 m/s、25 m/s、28 m/s、30 m/s 的速度冲击结构,不同速度下对应的钢筋最大应力如图 8 所示,混凝土拉压损伤如图 9 所示。

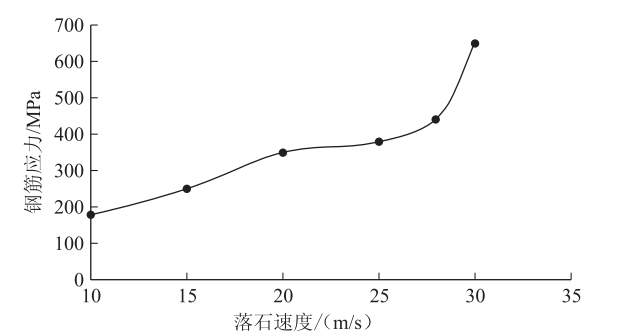


图 8 偏压式明洞落石速度 - 钢筋应力曲线

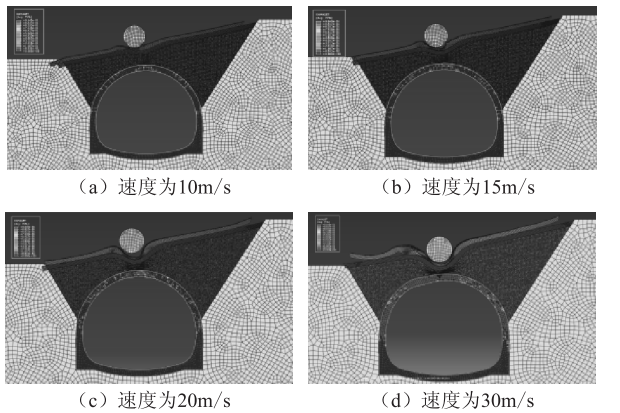


图 9 混凝土拉压损伤结果示意图

从以上结果可以看出,随着落石速度的增大,钢筋最大应力也不断增加,落石最终“嵌入”的深度也在增加;当落石速度达到 25 m/s 左右时,钢筋开始屈服;当速度达到 28 m/s 左右时,钢筋接近抗拉极限强度,结构开始受拉破坏;同时,混凝土结构拱顶受拉和受压裂缝几乎同时完全贯通。

动力学计算表明,常规明洞结构最大能承受的 3 m³ 的落石 25 m/s 的速度的冲击,对应 2 453 kJ 的冲击能量。根据前述计算结果,明洞范围内落石最大冲击能力为 200~1 850 kJ,均小于常规明洞结构承受 2 453 kJ 的冲击能量。

2.4.4 残留风险评价

根据 I 期、II 期、III 期残留风险评价结果,对危岩高度、山体坡度、危岩发育程度、危岩(落石)大小、落石区与铁路工程的位置关系等 5 项因素进行重新评分。

(1) 危岩高度:考虑隧隧道出口山高坡陡,将所有危岩落石进行全部清方及加固处理施工难度大,故本隧隧道出口上方山体最大高差评分不修正,仍为 $f_1=7$ 。

(2) 山体坡度:本隧出口山体陡峻,未进行大规模

刷坡,故不对山体坡度进行修正,此项评分仍为 $f_2=6$ 。

(3)危岩发育程度:考虑清方及加固后,应对此项适当折减,故此项评分修正为 $f_3=4$ 。

(4)危岩(落石)大小:考虑设置帘式网以及被动网后,大体积落石能被有效拦截,应对此项评分进行适当折减,此项评分修正为 $f_4=4$ 。

(5)落石区与铁路工程的位置关系:考虑明洞结构防护长度大于落石运动轨迹,且有一定富余,难以直接达到铁路洞口,故此项评分修正为 $f_5=2$ 。

根据修正后落石主要风险因素评估,其参考影响因子不做调整,修正后危岩落石综合评分为:

$$f = \sqrt[10]{7^2 \times 6^2 \times 4^3 \times 4^1 \times 2^2} = 4.22 \quad (3)$$

根据表4,修正后残留风险等级评价等级为中度风险,为可接受风险。

3 结论

(1)通过现场调查、评分、落石轨迹分析、防护结构计算等多种手段进行定性和半定量的分析,建立危岩落石风险分级评价体系是合理的,能有效识别风险和分析问题。

(2)采用ROCKFALL等软件分析落石轨迹,根据落石运动距离确定合理的明洞长度是十分有必要的。从经济性考虑,落石运动距离不应忽略拦截处理措施后对其的影响,否则设计过于保守,代价较大。

(3)采用混凝土压损伤结果和钢筋受拉屈服两方面的性能指标评价明洞结构抵抗落石冲击能力是较为合理的。贵南高速铁路隧道明洞结构抵抗落石冲击能量最大值为2 453 kJ,对于能量大于此值的落石应采取清除、拦挡、明(棚)洞防护等综合治理手段。

参考文献:

[1] 王玉锁,杨国柱. 隧道洞口段危岩落石风险评估[J]. 现代隧道

技术, 2010, 47(6): 33-39.

WANG Yusuo, YANG Guozhu. Rockfall Risk Assessment for a Tunnel Portal Section [J]. Modern Tunnelling Technology, 2010, 47(6): 33-39.

[2] 叶四桥,陈洪凯,唐红梅. 危岩落石防治技术体系及其特点[J]. 公路, 2010, 55(7): 80-85.

YE Siqiao, CHEN Hongkai, TANG Hongmei. Rockfall Mitigation Techniques and Its Characteristics [J]. Highway, 2010, 55(7): 80-85.

[3] 章照宏. 边坡落石灾害评价与风险分析[J]. 路基工程, 2007(1): 158-160.

ZHANG Zhaohong. Hazard Assessment and Risk Analysis of Slope Rockfall [J]. Subgrade Engineering, 2007(1): 158-160.

[4] 钱七虎,戎晓力. 中国地下工程安全风险管理的现状、问题及相关建议[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(4): 649-655.

QIAN Qihu, RONG Xiaoli. State, Issues and Relevant Recommendations for Security Risk Management of China's Underground Engineering [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(4): 649-655.

[5] 蒋树屏,刘元雪,黄伦海,等. 环保型傍山隧道结构研究[J]. 中国公路学报, 2006, 19(1): 80-83.

JIANG Shuping, LIU Yuanxue, HUANG Lunhai, et al. Research on Environmental Friendly Structure of Tunnel Adjacent to Mountain [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(1): 80-83.

[6] 叶四桥,陈洪凯,唐红梅. 基于落石计算的半刚性拦石墙设计[J]. 中国铁道科学, 2008, 29(2): 17-22.

YE Siqiao, CHEN Hongkai, TANG Hongmei. Design of Semi-Rigid Rockfall Barrier Wall Based on Rockfall Simulation [J]. China Railway Science, 2008, 29(2): 17-22.

[7] Q/CR 9247-2016 铁路隧道工程风险管理技术规范[S].

Q/CR 9247-2016 Technical Code for Risk Management of Railway Tunnel Engineering [S].

[8] Q/CR 9006-2014 铁路建设工程风险管理技术规范[S].

Q/CR 9006-2014 Technical Code for Risk Management of Railway Construction Engineering [S].

(上接第78页)

合,体现绿色温馨与经济艺术的和谐统一。

参考文献:

[1] 邓秋意. 藏式建筑与现代建筑的融合与发展[J]. 江西建材, 2014(18): 19.

DENG Qiuyi. Development of Tibetan Architecture and Its Fusion with Modern Architecture [J]. Doors & Windows, 2014(18): 19.

[2] 罗勇,左俊玲. 试述藏源文化与山南的关系[J]. 西藏发展论坛, 2018(2): 78-80.

LUO Yong, ZUO Junling. On the Relationship Between Tibetan Culture and Shannan [J]. The Theoretical Platform of Tibetan Development, 2018(2): 78-80.

[3] 陈蔚,萧依山. 西藏林芝地区传统民居建筑特征研究——以工布地区碉房为例[J]. 建筑学报, 2015(S1): 134-139.

CHEN Wei, XIAO Yishan. Research On The Characteristics of The Traditional Residential Buildings In Nyingchi District of Tibet: Case Study of the Blockhouse in Gongbu Area [J]. Architectural Journal, 2015(S1): 134-139.