

文章编号: 1674—8247(2018)06—0065—05

# 高陡边坡铁路隧道洞口危岩落石整治措施研究

黄 华 姜 波 罗永刚 周跃峰

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

**摘 要:**文章以西南山区某高速铁路隧道洞口为工程背景,研究铁路隧道洞口高陡边坡危岩落石整治措施,首先通过现场调查和地质分析得到了危岩落石分布特征、形成原因以及稳定性;然后采用 ROCKFALL 软件选取坡面最不利断面研究危岩落石轨迹,得到了落石沿程冲击动能和弹跳高度包络图以及落石影响范围,为制定危岩落石防治措施提供依据;最后提出了“分区治理、分级防护、主动拦截、被动支挡”的综合处理措施,有效减小洞口危岩落石风险,可为类似工程提供参考。

**关键词:**隧道洞口;高陡边坡;危岩落石;处理措施

中图分类号:U453.1

文献标志码:A

## Study on Treatment Measures for Rockfall at Railway Tunnel Portal on High and Steep Slope

HUANG Hua JIANG Bo LUO Yonggang ZHOU Yuefeng

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

**Abstract:** based on the engineering background of a high-speed railway tunnel portal in southwest mountainous area, in the paper, the treatment measures are studied for rockfall at railway tunnel portal on high-steep slope. Firstly, the distribution characteristics, formation reasons and stability of rockfall are obtained through field investigation and geological analysis. Then, the most disadvantageous section of the slope surface is selected by ROCKFALL software to study the falling path of dangerous rocks and obtain the impact kinetic energy, the envelope diagram of bouncing height and the influence scope of rockfall along the course of rockfall, which provides the basis for the prevention and control of rockfall. Finally the comprehensive treatment measures of “zoning control, grading protection, active interception and positive retaining” are put forward, which can effectively reduce the risk of rockfall at tunnel portal and provide a reference for similar projects.

**Key words:** tunnel portal; high and steep slope; rockfall; treatment measures

山区铁路受选线制约,隧道洞口常面临危岩落石风险,高陡边坡危岩落石高差大、坡面陡,下落过程中动能大、破坏能力强,跌落至轨面或与高速运行的列车相撞,将产生严重的后果。

为减小危岩落石对铁路施工及运营期间的危害,需采取相应的整治措施,重点在于研究分析落石失稳

后的运动轨迹。落石失稳后一般沿垂直等高线的方向向下运动,与坡体或建(构)筑物发生碰撞后运动方向可发生改变。唐红梅等人<sup>[1-2]</sup>基于理论力学和运动学,建立了危岩落石运动方程,罗章波等人<sup>[3-4]</sup>采用 Rockfall 软件选择坡面最危险断面模拟得到了落石轨迹。郭书云<sup>[5]</sup>对石太线某路基危岩落石工点进行三

收稿日期:2018-11-12

作者简介:黄华(1989-),男,工程师。

引文格式:黄华,姜波,罗永刚,等.高陡边坡铁路隧道洞口危岩落石整治措施研究[J].高速铁路技术,2018,9(6):65-69.

HUANG Hua,JIANG Bo,LUO Yonggang,et al. Study on Treatment Measures for Rockfall at Railway Tunnel Portal on High and Steep Slope [J]. High Speed Railway Technology,2018,9(6):65-69.

维激光扫描,研究了落石轨迹、最大运动速度和冲击动能,并采用柔性防护网系统中的窗帘式防护系统对该工点进行处理。黄水亮<sup>[6]</sup>分析了蒙西铁路西峡站危岩落石失稳机制,并提出清除危岩、主动防护网和挡石墙的处理措施。

本文以某高速铁路隧道洞口危岩落石整治为工程背景,研究高速铁路隧道洞口危岩落石整治措施,并在现场应用。

## 1 工程概况

某隧道全长 9 913 m,出口段为双洞分修,位于茂县渭门乡核桃沟内。洞口紧临桥台,仰坡山体自然横坡较陡,基岩出露,出露为茂县群千枚岩地层,岩质软破碎、风化强烈,岩体节理裂隙发育、分层明显。左线洞口部分位于小型新生滑坡(溜坍)体内,洞口上方危岩落石发育,局部坡面自稳性差,崩塌剥落有逐年累积恶化发展的趋势。

### 1.1 地形、地貌

隧道出口段属邛崃山系岷山山脉构造剥蚀、深切割高中山地貌,沟谷纵横,地形起伏大,出口仰拱高度约 500 m,坡度  $35^{\circ} \sim 75^{\circ}$ ,局部陡壁。

### 1.2 地层岩性

隧道出口主要覆盖层为第四系全新统人工填土层碎石土,滑坡堆积层碎石土,坡崩积层碎石土,泥石流堆积层粗圆砾土、卵(碎)石土、漂(块)石土,下伏基岩为志留系茂县群第一组炭质千枚岩夹砂岩、灰岩。

### 1.3 地质构造及地震动参数

测区属龙门山华夏系构造体系之九顶山华夏系,本隧洞身穿越龙门山后山断裂-茂汶活动断裂,千枚岩呈千枚状构造,受区域构造影响,节理、层面发育,岩体破碎,遇水易软化。地震加速度峰值为 0.20 g,特征周期为 0.35 s。

## 2 分布特征、成因及稳定性

### 2.1 危岩落石分布特征

现场踏勘发现隧道洞口上方危岩落石可划分为 4 个区域分布示意如图 1 所示。1~3 号区域位于轨面以上 150~200 m,危岩零星分布,块体体积较小,长约 0.5~2.5 m,宽约 0.3~1.2 m,厚约 0.2~1.0 m。4 号危岩区,危岩以孤立的危石、风化卸荷岩体和坡面表层强风化松散岩体为主,位于坡体中下部陡坡段,沿山脊分布在内轨以上 10~60 m,其中最大的一块危岩高约 5 m,宽 5 m,厚 1~3 m,方量约 50 m<sup>3</sup>。



图1 坡面危岩落石分布示意图

### 2.2 成因分析

根据工程地质条件和现场调查,分析该洞口产生危岩落石的原因主要有:

#### (1) 岩性

坡面基岩主要为志留系茂县组第一组( $S_{mx}^1$ )炭质千枚岩夹砂岩、灰岩,其强度较低,在风化剥蚀和卸荷作用下易产生层理、节理裂隙。

#### (2) 构造

本隧道处于龙门山断裂带,穿越茂汶活动断裂构造复杂,岩体节理裂隙发育,呈现碎裂~块状结构。

#### (3) 地形

现场调查发现仰拱坡坡度  $40^{\circ} \sim 70^{\circ}$ ,局部近乎垂直,自然坡高度达 200~300 m,为危岩落石的形成和运动提供了有利地形条件。

#### (4) 地震

隧道处于地震频发区,历史上曾发生多次 7 级以上地震,包括 1933 年叠溪 7.5 级地震,2008 年汶川 8.0 级地震,2017 年九寨沟 7.0 级地震。地震不仅使坡面岩松散破碎,也为危岩失稳提供动力。

#### (5) 气候

隧区昼夜温差大,岩体长期在热胀、冷缩的循环作用下易产生裂隙,地下水进入裂隙进一步加速裂隙的形成和扩张。

### 2.3 危岩落石稳定性

在多组结构面相互切割和组合下形成的楔形危岩体,在风化、剥蚀、地下水作用以及地震等外力扰动下,稳定性将逐渐降低,岩体可能发生平移式或局部倾倒式崩塌坠落。

现场调查和宏观地质判断,1~3 号危岩区除零星

危岩处于欠稳定状态外,大部分危岩总体稳定,4号危岩总体上处于欠稳定状态,在不利条件可能出现失稳。通过分析发现发生较大规模破坏的可能性较小,但发生小规模失稳破坏的可能性较大,失稳模式有坠落和滑移破坏。由于危岩体位于洞口上方,一旦坠落至铁路线,对铁路工程危害很大,将对铁路施工及运营期安全造成巨大威胁。

3 工程措施研究

3.1 落石运动模式

根据现场调查结果,结合隧道出口段地形,危岩落石的运动模式可分为自由落体、滚动(滑动)和碰撞弹跳三种。

(1) 自由落体运动

当危岩在外力扰动下脱离基岩,下落过程中只受重力作用,不计空气阻力,则落石速度:

$$v = \sqrt{2gh}$$
 (1)

式中: $h$ ——落石下落高度;

$g$ ——重力加速度。

(2) 滚动或滑动模式

当落石沿坡面以滚动(滑动)模式运动时,运动过程中除受重力作用外,还受到坡面摩擦力作用,运动速度的变化主要受坡面角和坡面材料摩擦系数控制,假设坡面由多个直线段组成,则落石速度<sup>[7]</sup>:

$$v_{21} = \sqrt{v_{20}^2 + 2aL}$$
$$a = (\sin\beta_2 - \lambda\cos\beta_2)g$$
$$v_{20} = v_1\cos(\beta_1 - \beta_2)$$
 (2)

式中: $v_{20}$ ——当前段起点的落石速度;

$v_1$ ——上一段终点处的落石速度;

$\beta_1$ ——上一段的坡面角;

$\beta_2$ ——当前段的坡面角;

$g$ ——重力加速度;

$a$ ——当前段落石运动加速度;

$L$ ——落石沿坡面运动距离;

$\lambda$ ——当前坡面动摩擦系数。

(3) 弹跳模式

弹跳运动模式下,运动轨迹为各触地点间落石运动抛物线段的组合,运动速度的大小和方向均受坡面阻尼作用的影响,碰撞后落石速度<sup>[7]</sup>:

$$v_{1x} = k_1\cos\beta - k_2\sin\beta$$
$$v_{1y} = -k_1\sin\beta - k_2\cos\beta$$
$$k_1 = R_t(v_{0x}\cos\beta - v_{0y}\sin\beta)$$
$$k_2 = R_n(v_{0x}\sin\beta + v_{0y}\cos\beta)$$
 (3)

式中: $\beta$ ——计算点的坡面角;

$v_{0x}$ ——落石碰撞前水平速度;

$v_{0y}$ ——落石碰撞前垂直速度;

$v_{1x}$ ——落石碰撞后水平速度;

$v_{1y}$ ——落石碰撞后垂直速度;

$R_t$ ——坡面的切向摩擦系数;

$R_n$ ——坡面的法向摩擦系数。

3.2 危岩落石轨迹分析

为合理制定危岩落石防治措施,采用 Rockfall 二维落石分析软件选取典型断面对坡面落石轨迹进行模拟。

在出口地形图上选取最危险的地面线作为计算断面,落石块径通过落石体积换算成等效直径。

碰撞系数及动摩擦系数应根据斜坡面的岩性、坡面覆盖层和植被特征确定,计算中参考 TB 10035 - 2002《铁路特殊路基设计规范》<sup>[8]</sup>选取法向系数( $R_n$ )和切向系数( $R_t$ ),考虑坡面凹凸不平及低矮植被动的影响,摩擦系数取 0.7,各系数如表 1 所示。

表 1 碰撞系数及动摩擦系数

碰撞系数	强风化千枚岩	回填土
法向系数( $R_n$ )	0.35	0.22
切向系数( $R_t$ )	0.84	0.65
动摩擦系数	0.7	0.7

为使模拟工况与实际情况更加吻合,计算时上表中参数通过给定标准差进行动态调整。选取 3 号危岩落石区域进行模拟,落石密度取 22 kN/m<sup>3</sup>,体积取 2 m<sup>3</sup>,共 1 000 个块体作为计算样本,假定各个样本初速度为 0,1 000 个落石轨迹及各落石位置统计如图 2 所示,弹跳高度包络图如图 3 所示,最大冲击能包络图如图 4 所示。

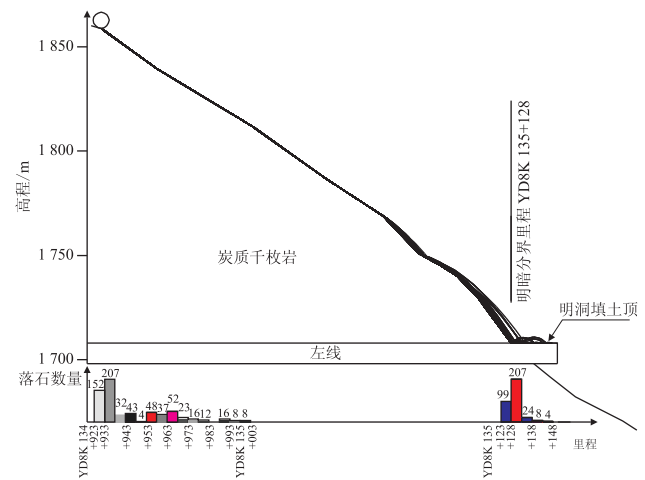


图 2 落石轨迹及位置图

通过分析发现,落石主要集中在 YD8K 134 + 928 ~

YD8K 135 + 003 和 YD8K 135 + 123 ~ YD8K 135 + 148 两区域,其中越过明暗分界里程的落石占 24%,未达

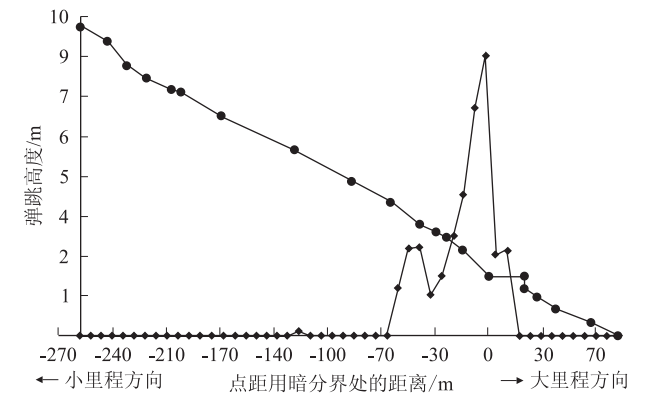


图3 弹跳高度包络图

从图3可以看出,落石在坡面线变化不大时,基本是贴坡向下运动,当坡面变陡时,出现飞离坡面运动,在明洞顶运动一定距离后静止。从图4可看出,落石到达明洞前,冲击动能基本是随着高差增加而增加,但在缓坡段有明显下降趋势。因此,综合分析弹跳高度包络图和最大冲击动能包络图,被动防护网宜布置在

到明暗分界里程的落石占 76%,落石最远达到 YD8K 135 + 144。

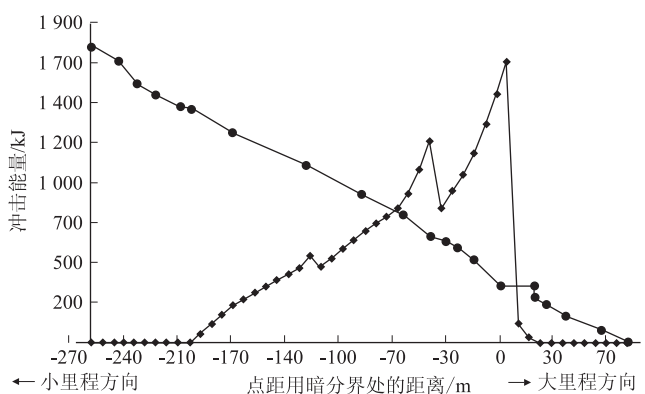


图4 最大冲击能包络图

落石分布区域内,并尽早设置,宜设置在缓坡段,并结合落石运动长度,考虑多道设防。

3.3 危岩落石处理措施

结合计算结果,隧道出口坡面危岩落石处理按照“分区治理、分级防护”的原则处理。整治平面图如图5所示。

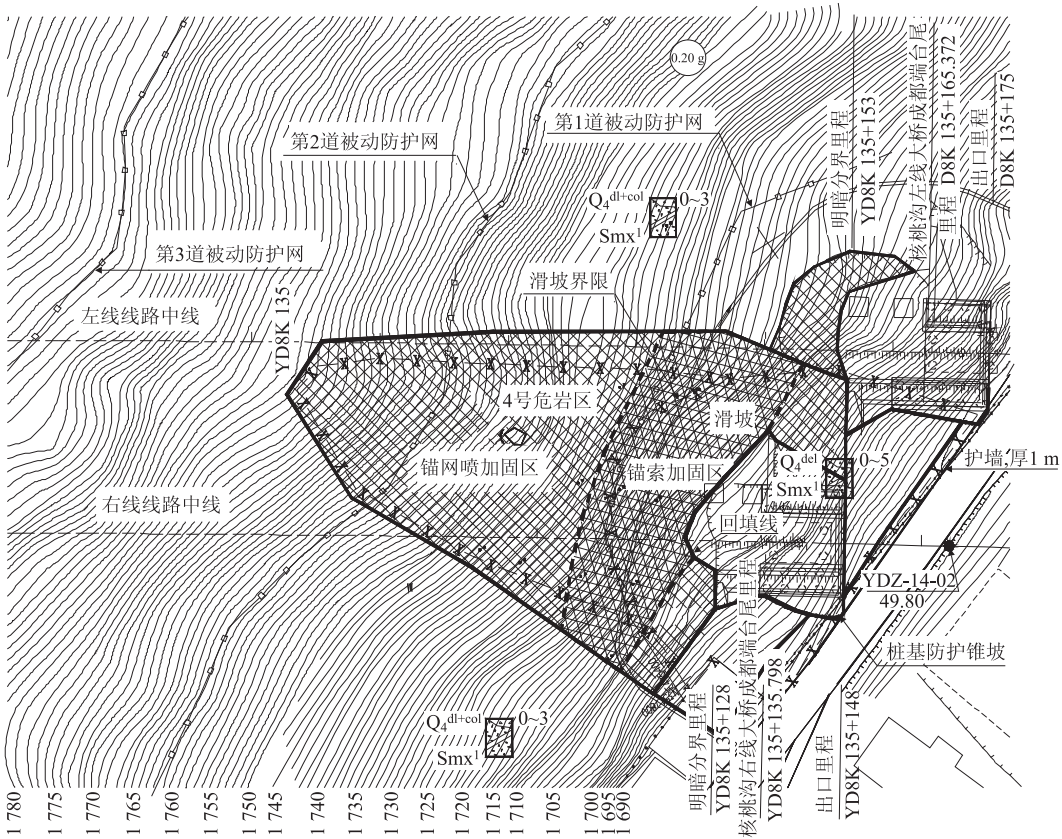


图5 现场采用的主要措施

(1)清除、支顶  
对工程影响较大4号危岩区内的危岩进行清除平

整,危岩清除后采取锚网喷进行防护。对仰坡高处的1号、2号、3号危岩区内松动危岩进行清除,难以清除

时采用片石混凝土支顶、嵌补。

## (2) 锚网喷防护

对4号危岩区清方后岩面采用锚网喷防护,具体措施如下:

### ①普通锚网喷防护

防护范围为4号危岩区及新生滑坡体坡面相对平整,节理裂隙发育相对较少的区域。具体防护参数为喷厚12 cm混凝土,采用 $\phi 8$ 钢筋网,间距25 cm $\times$ 25 cm;采用大小锚杆交错布置,大小锚杆间距均为4 m $\times$ 4 m。小锚杆采用 $\phi 22$ 砂浆锚杆,长5 m。大锚杆采用2根 $\phi 25$ HRB400螺纹钢制作,长度为12 m。

### ②锚索+锚网喷防护

该区域自然坡面较陡,局部风化凹地形,分布有一组不利节理面,且节理裂隙发育,岩体易风化崩落。具体防护参数为喷厚12 cm C25混凝土,采用 $\phi 8$ 钢筋网,网格间距25 cm $\times$ 25 cm,矩形布置,节点间距4 m $\times$ 4 m;锚索长20 m,其中自然段长12 m,锚固段长8 m。锚索节点间设置锚杆,锚杆间距4 m $\times$ 4 m,采用2根 $\phi 25$ HRB400螺纹钢制作,长度均为12 m。

## (3) 主动拦截

结合落石轨迹、弹跳高度、冲击能量图,对仰坡高处无法探明的小型危岩落石及运营期间局部风化作用产生的新生危岩落石,设3道被动防护网进行防护。

分析落石轨迹图,65.8%的落石停止在YD8K 134+928~YD8K 135+003段,为防止其受干扰继续下落,同时可以拦截其余部分落石或减小其下落速度和能量,在YD8K 135+000附近设置第3道被动防护网。分析落石轨迹、弹跳高度、冲击能量图,落石在YD8K 135+060之后出现飞离坡面现象,冲击能量逐渐增大,为低成本、高效拦截落石,应在落石弹跳高度和冲击能量较小时设置被动防护网,结合现场地形条件,在YD8K 135+070附近设置第2道被动防护网,在YD8K 135+110附近设置第1道被动防护网。

## (4) 被动支挡

根据rockfall软件对落石轨迹模拟的计算结果,落石到达最远位置为明暗分界后16 m,结合地形条件,左线隧道洞口明洞长度设为22 m,右线隧道洞口明洞长度设为20 m。

# 4 结论

本文基于地质勘察资料,通过现场调查、理论分析和数值计算,得到如下主要结论:

(1)落石在坡面线变化不大时,基本上沿坡面向

下运动,当坡面由缓变陡时,出现飞离坡面运动,当坡面由陡变缓出现碰撞和弹跳运动。

(2)被动防护网宜布置在落石分布区域内,尽早设置,同时应结合仰坡坡度情况设置在缓坡段,并结合坡面长度,考虑多道设防。

(3)对于危岩落石整体清除区域,在清方后为防止基岩面风化、剥蚀再次形成危岩落石,应对岩面进行封闭,可采用锚网喷防护。

(4)高陡边坡的危岩落石防护,可根据地形情况,遵循“分区治理、分级防护、主动拦截、被动支挡”的理念,对不同区域的危岩区采用清除、支顶、加固、拦截、接长明洞等综合处理措施。

# 参考文献:

- [1] 唐红梅,易朋莹.危岩落石运动路径研究[J].重庆建筑大学学报,2003,25(1):17-23.  
TANG Hongmei, YI Pengying. Research on Dangerous Rock Movement Route [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2003, 25(1): 17-23.
- [2] BOZZNI A, LA BARBERA G, ZANINETTI A. Analysis and Prediction of Rockfalls Using a Mathematical Model [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 1995, 32(7): 709-724.
- [3] 罗章波.小平地隧道进口危岩落石分析及整治设计[J].隧道建设,2013,33(9):768-773.  
LUO Zhangbo. An Analysis and Design for the Treatment of Rock Falls at the Entrance Portal of Xiaopingdi Tunnel [J]. Tunnel Construction, 2013, 33(9): 768-773.
- [4] 曾舜. RocFall 软件在危岩崩塌处治设计中的应用[J].中国水运,2011,11(1):211-212.  
ZENG Shun. Applications of Rockfall Software in the Treatment Design of Unstable Rock Collapse [J]. China Water Transport, 2011, 11(1): 211-212.
- [5] 郭书云.石太线路基边坡危岩落石整治方案研究[J].铁道标准设计,2014,58(2):4-7.  
GUO Shuyun. Research on Treatment Scheme of Perilous Rocks and Falling Rocks for Protecting Subgrade Slope of Shijiazhuang-Taiyuan Railway [J]. Railway standard design, 2014, 58(2): 4-7.
- [6] 黄水亮.蒙西铁路西峡站危岩落石综合治理[J].路基工程,2015,34(4):234-238.  
HUANG Shuilang. Comprehensive Treatment of Rockfall at Xixia Station on Mengxi Railway [J]. Subgrade Engineering, 2015, 34(4): 234-238.
- [7] 韦启珍,雷秀丽.崩塌落石运动参数的数值模拟研究[J].中国水运,2008,8(3):165-166.  
WEI Qizhen, LEI Xiuli. Study on Numerical Simulation of Motion Parameters of Collapsed Rockfalls [J]. China Water Transport, 2008, 8(3): 165-166.
- [8] TB 10035-2002 铁路特殊路基设计规范[S].  
TB 10035-2002 Code for Design on Special Subgrade of Railway [S].

(编辑:刘会娟 张红英)