

文章编号: 1674—8247(2021)04—0082—05  
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2021.04.017

## 郑万铁路罗家山隧道高陡边仰坡危岩落石综合防护技术

甘目飞 刘科

(中铁二院成都勘察设计研究院有限责任公司, 成都 610031)

**摘要:**郑万铁路罗家山隧道横洞洞口分布大范围的危岩落石,对洞口施工人员及设备安全构成巨大威胁,本文采用Rockfall落石分析软件对坡面落石滚落弹跳高度、运动速度和冲击能量进行模拟分析,结合边仰坡实际情况,提出“落石清除及场地搬迁+混凝土明洞+高强波纹板棚洞+张口式帘式主动防护网+被动防护网”的综合措施,以减轻危岩落石危害,设计方案可为类似工程提供借鉴。

**关键词:**隧道;危岩落石;明洞;棚洞;波纹板;帘式网

中图分类号:U216.41<sup>+</sup>5 文献标志码:A

### Comprehensive Protection Technology of Dangerous Rock and Rockfall on High and Steep Side Slope of Luojiashan Tunnel of Zhengzhou-Wanzhou Railway

GAN Mufei LIU Ke

(CREEC(Chengdu) Survey, Design and Research Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

**Abstract:** A lot of overhanging rocks and rockfalls are distributed at the adit portals of Luojiashan Tunnel of Zhengzhou-Wanzhou Railway, posing a great threat to the safety of construction personnel and equipment. This paper uses Rockfall analysis software to simulate and analyze the jumping height, moving speed and impact energy of falling rocks on slope, and puts forward "clearing falling rocks and site relocation + concrete open-cut tunnel + high-strength corrugated board shed tunnel + open-mouth curtain active protective net + passive protective net" to reduce dangerous rockfalls. This design can provide a reference for similar tunnels in the future.

**Key words:** tunnel; overhanging rock and rockfall; open-cut tunnel; shed tunnel; corrugated board; curtain net

危岩落石防护一直是困扰铁路隧道,尤其是高速铁路隧道洞口施工及运营安全的关键性难题,为兼顾危岩落石防护工程中的安全性、合理性及经济性,近年来业内诸多学者及研究人员对铁路隧道洞口危岩落石防护在理论及工程实践方面均进行了大量研究。唐红梅<sup>[1]</sup>等对危岩落石初始运动状态、碰撞过程、滑动及滚动过程进行了深入研究,并提出了其运动的轨迹方程;丁浩江<sup>[2]</sup>等分析研究了成贵铁路坪上隧道进口危

岩落石的形成机理、失稳模式及破坏特征,确定了落石失稳滚落概率及路径,并提出了清除、落石槽、拦石墙、防撞桩板墙、柔性阻拦网、排水设施的综合处置措施;罗章波<sup>[3]</sup>对成昆铁路小平地隧道进口危岩落石进行模拟分析后,提出了“被动防护网+柔性钢棚洞”的设计方案;罗仁立<sup>[4]</sup>等对沪昆高速铁路长昆段桥隧连接危岩落石防护结构方案进行分析比较,得出了不同条件下适宜不同工点的接长防护方案;黄华<sup>[5]</sup>等根据成

收稿日期:2021-02-03

作者简介:甘目飞(1978-),男,高级工程师。

引文格式:甘目飞,刘科.郑万铁路罗家山隧道高陡边仰坡危岩落石综合防护技术[J].高速铁路技术,2021,12(4):82-86.

GAN Mufei, LIU Ke. Comprehensive Protection Technology of Dangerous Rock and Rockfall on High and Steep Side Slope of Luojiashan Tunnel of Zhengzhou-Wanzhou Railway[J]. High Speed Railway Technology, 2021, 12(4):82-86.

兰铁路某隧道出口危岩落石发育特征,研究了清除支顶、锚网喷防护、被动拦截及支挡措施。

危岩落石的发育特征不同,对应采取的应对方案也不同。本文以郑万铁路湖北段罗家山隧道横洞洞口危岩落石不良地质为背景,研究铁路隧道洞口陡倾边仰坡危岩落石整治措施。

## 1 工程概况

### 1.1 隧道概况

罗家山隧道位于保康站与神龙架站区间,进口里程 DK 514 + 180, 出口里程 DK 524 + 820, 全长 10 640 m, 最大埋深约 470 m。隧道设计纵坡为 20‰、-12‰、-30‰。隧道进口与桥台紧邻, 出口桥台进洞。为加快施工进度, 设置 3 处平导、1 处斜井及 1 处横洞进行分区施工。

### 1.2 洞口危岩落石概况

#### 1.2.1 发育特征

罗家山隧道危岩落石不良地质主要发育在其横洞及出口洞口范围内, 尤其横洞为甚。

罗家山隧道横洞位于线路左侧, 线路左侧地形陡峭, 岩性以白云岩夹页岩等硬质岩为主, 地质构造发育, 沿阳岩河一带危岩落石密布, 块径 0.5 ~ 5 m, 局部形成多处危岩体, 易发生失稳坠落, 并在陡崖下缓坡地带形成多处岩堆体。岩堆体坡度相对较缓, 坡表以第四系土壤覆盖层为主, 边坡中上部坡度相对坡底变化较大, 为近直立的悬崖峭壁, 岩石表面风化较强, 节理裂隙极为发育, 边坡顶部为植被覆盖区, 坡度较陡, 落差近 400 m。

#### 1.2.2 成因机制

由于本隧道隧址区内断层和褶皱较发育, 受构造节理裂隙、溶蚀裂隙影响, 岩体裂隙较发育, 节理裂隙产状主要为 N30°W/85°NE、N68°W/85°NE, 以陡倾节理裂隙为主。受节理裂隙和层面切割影响, 沿线沿陡崖边坡为构造节理裂隙密集带, 且随机裂隙较发育, 极易分割基岩块体形成危岩体, 在地形斜坡陡峭、自然坡度 60° ~ 80° 条件下, 受卸荷应力释放、重力牵引等影响危岩体向下坠落形成落石。

#### 1.2.3 工程影响

由于横洞洞口危岩落石体位置高、规模大、块径大, 发生崩塌落石的随机性较大, 对洞口施工人员及设备形成巨大的安全威胁, 必须采用适当的处理措施。

## 2 落石模拟分析

### 2.1 分析概况

采用 Rockfall 落石分析软件进行落石模拟分析,

分析内容包括落石的弹跳高度、运动速度和冲击能量等。为确保方案准确, 采用三维激光扫描仪对该处边坡进行了三维扫描, 以获取边坡三维模型。

在具有落石风险的地区从右至左切出 1K0 ~ 11K0 共 11 个断面, 其中横洞顶部横断面为 8K0, 最具有代表性。落石计算时输入条件如下:

- (1) 落石初始条件: 在斜面顶部的下落, 水平初速度和竖向初速度均为 0。
- (2) 落石计算半径 0.5 m, 体积 0.523 m<sup>3</sup>。
- (3) 落石密度 2 500 kg/m<sup>3</sup>, 落石重量 1 308 kg。
- (4) 跌落次数 1 000 次。

### 2.2 模拟结果

根据 1 000 次的落石滚落计算统计结果, 选择横洞顶部横断面 8K0 计算结果进行分析, 分析内容包括落石运动轨迹、落石弹跳高度、落石冲击能量、落石平移速度、落石落点统计等, 如图 1 ~ 图 5 所示。

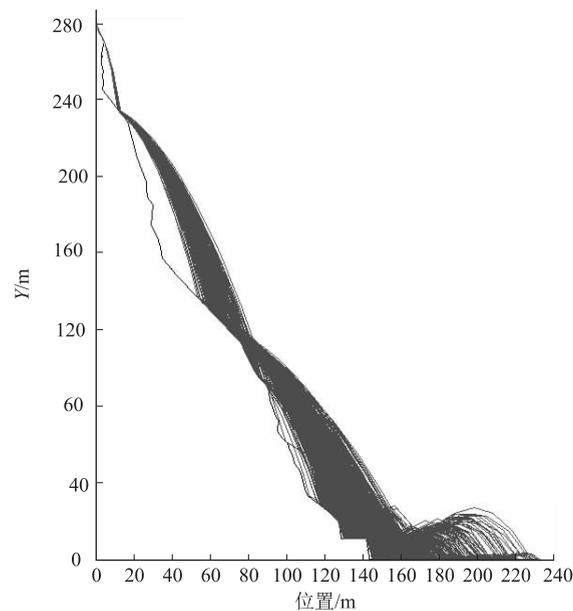


图1 8K0断面落石运动轨迹图

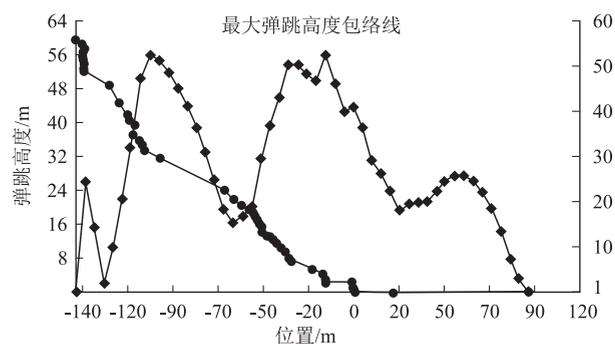


图2 8K0断面落石弹跳高度曲线图

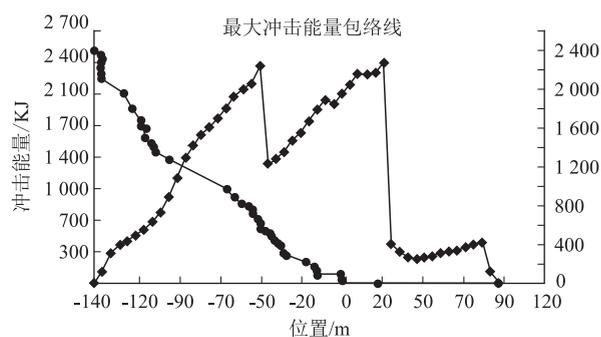


图3 8K0断面落石冲击能量曲线图

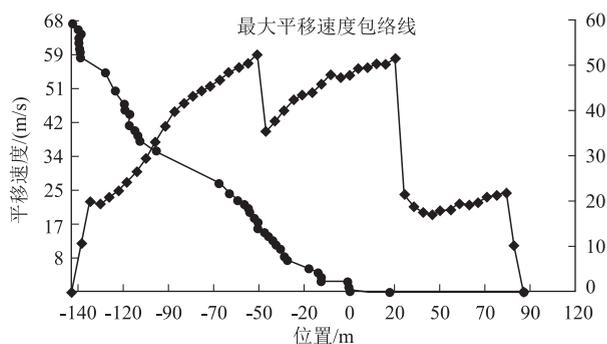


图4 8K0断面落石平移速度曲线图

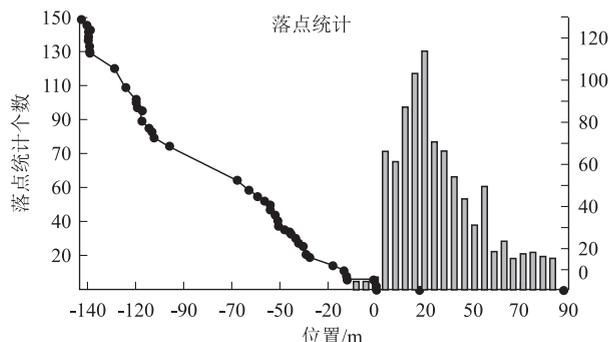


图5 8K0断面落石落点统计柱状图

由图1~图5计算结果可知,落石从边坡顶部发生滚落运动过程中产生的最大弹跳高度为56 m,最大冲击能量约为2 400 kJ,落石最大冲击速度约为59 m/s,落石落点位于横洞洞口所在范围。落石运动至横洞洞口附近时弹跳高度为32~48 m,冲击能量为2 000~2 300 kJ,冲击速度为51~58 m/s;由落石落点统计柱状图可知,落石入侵横洞洞口0~30 m所在区域的概率较大,落石侵入该区域将直接威胁到人身及设备安全,需对其边坡进行危岩落石防护。

### 3 危岩落石防护设计

#### 3.1 设计原则

罗家山隧道横洞洞口危岩落石防护设计遵循安全

性、适用性、环保美观及经济性的原则。

#### (1) 安全性

安全性是危岩落石防护方案设计首要原则。本洞口防护方案重点考虑防止边坡危岩坠落,确保施工期间从横洞进出的人员、设备不受到山体落石的危害以及运营期洞口落石防护。为此,在防护方案选取上力求科学,在力学计算中力求精准,在防护能力上要保证足够安全系数,以消除危岩落石危害<sup>[6-8]</sup>。

#### (2) 适用性

防护措施应与边仰坡实际地形情况相适应,充分考虑边坡实际情况选择合适的防护方案,既确保能防住落石又能便于施工,同时不破坏边仰坡所在地原有地形地貌,防护后边坡表面视觉效果良好。

#### (3) 环保美观

为满足环评要求,必须选用环保材料,保证工程实施后,美观大方,有利于植被自然恢复。

#### (4) 经济性

本工程为隧道横洞洞口,不直接涉及到运营期间列车的正常运行,但施工及运营维护期间人员和设备会在此出入,设计方案同样应能达到长久治理效果,工程措施应具有足够使用年限,在使用年限内尽量做到无需维护或易于维护,在达到防护功效的前提下尽量节约资金,体现防护工程的经济性。

### 3.2 防护措施

根据Rockfall落石分析软件计算结果以及大量方案比选后,在横洞洞口上方设计采用“落石清除及场地搬迁+混凝土明洞+高强波纹板棚洞+张口式帘式主动防护网+被动防护网”分级减能组合防护措施,以减轻落石危害。

#### 3.2.1 落石清除及场地搬迁

为避免隧道施工期间坡面危石对施工人员及机具造成安全威胁,将洞口附近施工场地、人员营地及设备搬迁至安全地带,避开横洞洞口危岩落石影响区域。对于坡面明显的危岩落石,且施工人员及机具能达到区域,在确保下方构筑物安全的前提下,采取全部清除处理;对于部分危石尚未脱离母岩且清除困难地段,在保证人员及机具安全施工的前提下,采取M10浆砌片石或者C20混凝土柱(墩)支顶处理;对于未能清除地段或清除安全风险极大的地段采取综合防护整治措施。

#### 3.2.2 混凝土明洞及高强波纹板棚洞

为减小危岩落石危害,在原设计基础上接长明洞及棚洞,洞口里程由原设计HDK 0+817调整为

HDK 0 + 844,接长明洞采用混凝土明洞 + 高强波纹板棚洞形式,如图6所示。

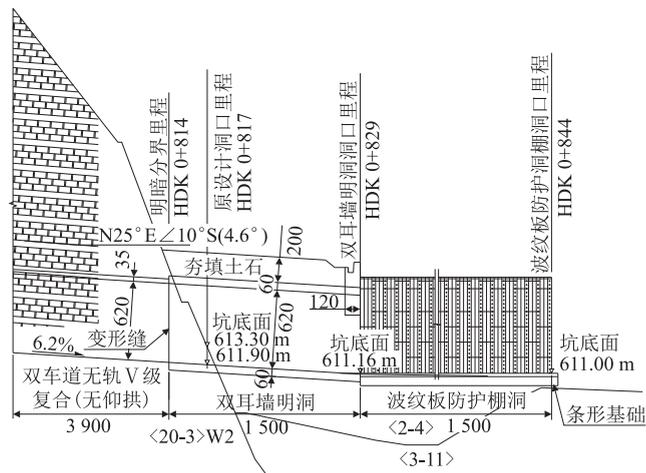


图6 横洞洞口接长明洞纵断面图(cm)

(1) 混凝土明洞

混凝土明洞采用双耳墙明洞型式,如图7所示, HDK 0 + 814 ~ HDK 0 + 829段采用双耳墙明洞衬砌。明洞基底采用 C25 混凝土铺砌,厚 30 cm;明洞衬砌顶部夯填土石以缓冲落石冲击,顶部覆盖黏土进行隔水处理。

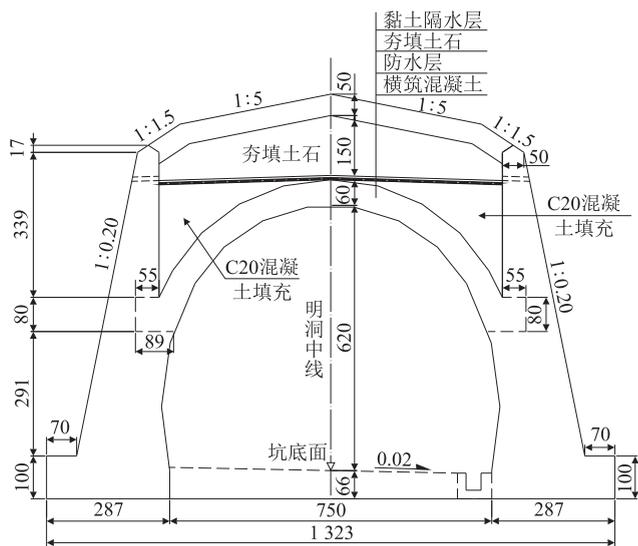


图7 双耳墙明洞断面图(cm)

横洞洞口坡面直立陡峻,原设计锚杆框架梁施工难度较大,考虑明洞增设后,洞口施工条件得到一定改善,取消原设计洞口锚杆框架量工程,但需对洞口仰坡 10 m 范围内裸露基岩部分进行锚网喷。喷 C25 混凝土厚 10 cm,  $\phi 6$  钢筋网,网格间距 25 cm  $\times$  25 cm,  $\phi 22$  砂浆锚杆,间距 1.2 m  $\times$  1.2 m,长 2.5 m。

(2) 高强波纹板棚洞

罗家山隧道横洞洞口接长 15 m 高强波纹板棚洞,高强波纹板防护棚洞设计防护能级为 500 kJ,结构主要组成部件为波纹板、连接件及钢筋混凝土基础。净空尺寸为 9.0 m(宽)  $\times$  7.5 m(高),棚洞基础采用高 90 cm、宽 100 cm 的 C35 钢筋混凝土条形基础,基础内预埋 M30 地脚螺栓。波纹板首环安装时,采用整环吊装方式,其他环采用分片安装或者整环吊装,分片安装时波纹板按照单侧或者两侧同时安装。高强波纹板设计断面图及现场施工图如图8、图9所示。

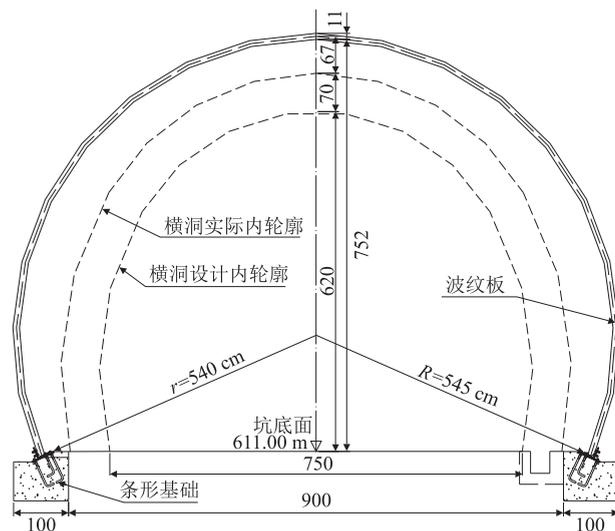


图8 高强波纹板设计断面图(cm)



图9 高强波纹板现场施工图

3.2.3 主动防护网

根据落石轨迹及落点计算结果,设计采用主动防护网技术进行处理。在横洞中线左侧 30 m 至右侧 20 m 范围内的坡面上部危岩落石采用张口式帘式网,帘式网最大防护粒径 1.5 m,防护能级 2 000 kJ,帘式网防护顶标高 886 ~ 900 m,防护底部标高 630 ~ 637 m,网设置具体位置根据现场地势适当调整,张口式帘式网防护宽度 50 m,防护高度约 260 m。并对帘式网覆盖范围内的孤危石进行打刷,采用 C25 片石混凝土对危石进行零星嵌补及支撑。

防护网施工完成应加强山体定期巡查及监控,对于大于防护粒径(1.5 m)及山体崩塌应采取应急避让措施或清除措施。

### 3.2.4 被动防护网

为尽可能减轻危岩落石危害,在采用主动防护网处理后,再辅以被动防护网阻拦底部落石。在横洞中线左侧37 m至右侧33 m,在罗家山横洞既有明洞顶坡脚处设置3道被动柔性防护网(防护能级750 kJ),被动网基座标高626~630 m及以上,防护实际宽度60 m,高6 m,用于拦截上部张口式帘式网未能防护到的区域的落石。

施工及运营期间加强横洞口巡逻,定期检查防护网,进行更换并及时清理防护网拦截的落石,确保施工及运营安全。

## 4 结论

本文基于地质勘察资料,通过理论分析、三维扫描、落石轨迹模拟等,得到以下主要结论:

(1)根据罗家山隧道横洞口坡面危岩落石发育特征,该区域危岩落石对工程施工及运营影响巨大,必须采用适当的处理措施。

(2)通过软件模拟落石轨迹可知,高陡边坡高区危岩弹跳高度、冲击能量及平移速度一般较大,落点一般距离坡脚较远,防护措施设计时宜根据反复计算后的概率统计结果综合考虑,并遵循安全、适用、经济、环保的原则。

(3)基于Rockfall软件模拟结果所提出的“落石清除及场地搬迁+混凝土明洞+高强波纹板棚洞+张口式帘式主动防护网+被动防护网”组合防护措施,有效地减小了落石的安全威胁。

## 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 Architecture University, 2003, 25(1): 17-23.

[2] 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.

[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].

[4] 罗仁立,郇亚军.长昆线桥隧相接段危岩落石防护结构方案研究[J].铁道工程学报,2016,33(2):59-63.

LUO Renli, LI Yajun. Research on the Rockfall Protection Structure for Junction Area between Bridge and Tunnel in the Changsha-Kunming Railway Line[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2016, 33(2): 59-63.

[5] 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.

[6] 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(下半月),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.

[7] 王广坤,叶四桥.基于泊松分布的落石灾害风险评估与决策[J].路基工程,2014(2):19-23.

WANG Guangkun, YE Siqiao. Risk Evaluation of Rockfall Hazard and the Decision-Making Based on Poisson [J]. Subgrade Construction, 2014(2): 19-23.

[8] 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.