

# 贵阳地铁 2 号线马王庙站北侧边坡危岩 稳定性及失稳特征研究

贺建军 张羽军

(中铁二院工程集团有限责任公司, 610031, 成都//第一作者, 工程师)

**摘 要** 贵阳地铁 2 号线马王庙站北侧废弃采石场高边坡, 坡顶陡坎分布较多裂隙, 坡面存在大量危岩落石, 对拟建车站及附属设施的安全性有一定影响。针对此边坡, 在详细调查测量的基础上, 分析其形成的主要原因和控制因素, 通过极射赤平投影法对其稳定性作出初步判断, 并采用静力分析法计算极端工况下边坡危岩的稳定性, 通过数值模拟软件分析其失稳后的运动特征。由分析计算结果可知, 马王庙站北侧的边坡危岩落石在极端工况下处于不稳定状态, 计算得到的落石失稳后理论落点距地铁车站附属结构极近, 给地铁及附属设施带来了安全隐患。针对不同高程的落石提出了工程治理措施。

**关键词** 地铁车站; 高边坡危岩; 稳定性; 失稳特征

**中图分类号** U213.1<sup>+</sup>3

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2022.04.028

## Stability and Instability Characteristics of Perilous Rock Mass on the North Side Slope of Mawangmiao Station of Guiyang Metro Line 2

HE Jianjun, ZHANG Yujun

**Abstract** The high slope of the abandoned quarry on the north side of Mawangmiao Station of Guiyang Metro Line 2 is extremely steep, and is covered with huge amount of cracks and perilous rock mass, causing certain degree of impact on the safety of the planned station and its ancillary facilities. Targeting this slope, based on detailed investigation and measurement, the main causes and control factors of the formation are analyzed. The slope stability is preliminarily judged by stereographic projection method. And the slope stability under extreme working conditions is calculated by static analysis method. The movement characteristics of the slope after instability are analyzed by numerical simulation software. From analysis calculation results, it is concluded that the perilous rock mass on Mawangmiao Station north side slope are unstable under extreme working conditions. The calculated theoretical rockfall position after instability is very close to the ancillary structures

of the metro station, bringing safety hazards to metro and the ancillary facilities. Engineering treatment measures are proposed for rockfalls at different heights.

**Key words** metro station; high slope perilous rock; stability; instability characteristics

**Author's address** China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., 610031, Chengdu, China

危岩落石是山区铁路、公路及城市轨道交通等工程面临的不良地质问题中较为突出的一类。

当下对于危岩落石的研究主要分为 3 个方向。一是针对稳定性、失稳模式、运动轨迹、冲击能量等危岩体本身特征的研究, 如: 文献[1-3]针对其进行了基于运动力学研究, 文献[4-7]对危岩的危险性、冲击能量、运动路径进行了模型试验及理论分析。二是针对危岩体的特征, 对危岩体失稳概率及造成危害等建立评价系统, 如: 加拿大等国的政府性评价体系<sup>[8-10]</sup>, 文献[11-12]等对危岩落石区段预测及综合预测提出了方法, 文献[13]对隧道洞口的危岩落石冲击风险进行了研究。三是针对危岩落石对具体工程的影响进行理论计算及数值模拟等分析评价研究, 并建议相关的防护措施, 如: 文献[14-19]针对成贵铁路所面临的危岩落石问题进行了数值模拟研究并提出了相应的治理措施。

本文针对贵阳地铁 2 号线马王庙站北侧采石场边坡(以下称为“马王庙边坡”)遗留的危岩落石问题, 在高精度勘察试验资料的基础上, 采用多种方法对马王庙站边坡危岩落石进行研究计算并综合分析评价对工程的影响, 以为类似工程危岩落石的分析、研究、计算提供参考。

## 1 工程概况

### 1.1 工程地质条件

贵阳地铁 2 号线马王庙站北侧 40 ~ 100 m 处为

人工采石场,形成了高度近 60 m 的高边坡,边坡自然坡度为  $32^{\circ} \sim 55^{\circ}$ 。坡面处分布大量的落石,边坡顶部分布危岩,边坡下方为拟建马王庙地铁站。该工程区属中低山溶丘地貌,现状为一孤丘,多分布低矮灌木。岩性为三叠系中统松子坎组( $T_2s$ )泥质白云岩夹泥岩地层(地貌见图 1)。



图 1 工程区地貌示意图

Fig. 1 Geomorphological condition picture of the engineering area

马王庙边坡处的岩层产状变化较大,其产状为  $N25^{\circ} \sim 49^{\circ}W/32^{\circ} \sim 40^{\circ}SW$ 。构造裂隙较为发育,优势裂隙主要发育以下 2 组:

L1:长 0.3 ~ 2.0 m,宽 1 ~ 5 cm,裂隙面平直,产状为  $N41^{\circ} \sim 75^{\circ}E/70^{\circ} \sim 80^{\circ}NW$ ;

L2:长 0.5 ~ 3.0 m,宽 10 ~ 30 cm,裂隙面平直,产状为  $N65^{\circ} \sim 75^{\circ}W/45^{\circ} \sim 90^{\circ}NE$ 。

## 1.2 危岩特征及成因分析

马王庙边坡高近 60 m,顶部近似直立。岩性为泥质白云岩夹泥岩,岩体性脆,层面外倾,张开型节理裂隙发育,易与层面形成不利结构面组合,切割岩体。加上降雨与人工采石场开挖爆破等因素,故岩体产生大量裂缝、高陡临空面等,极易发生危岩崩塌。

危岩近似呈南北向圆弧状分布,长约 120 m,宽 18 ~ 62 m。危岩体规模约  $1.4 \text{ 万 m}^3$ 。结合现场调查及危岩特征,将危岩范围分为 2 个区(见图 2)。

危岩 I 区:分布于高程 1 242 ~ 1 270 m 区段(编号 W5 ~ W13)。该区危岩体多呈不规则状;岩体多呈临空状,被多组节理裂隙切割,易发生滑移破坏。

危岩 II 区:分布于高程 1 270 ~ 1 303 m 区段(编号 W1 ~ W4、W14),边坡陡直。在层理、节理及卸荷裂隙的组合下,该区岩体被切割,易发生滑移破坏。

## 2 稳定性分析

### 2.1 稳定性初步分析结果

使用极射赤平投影法对危岩体边坡的稳定性

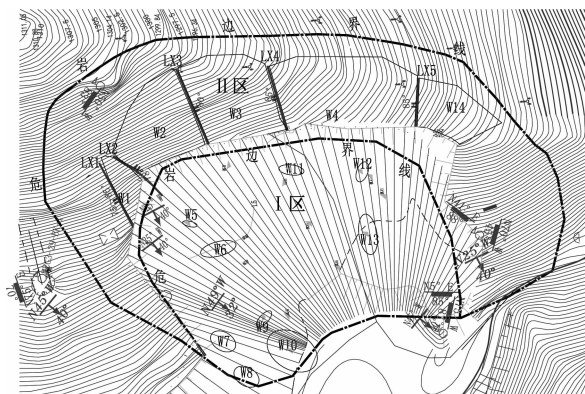


图 2 马王庙边坡危岩落石分布示意图

Fig. 2 Distribution diagram of rockfalls on Mawangmiao side slope

进行初步定性分析,如图 3 所示。

如图 3 a) 所示,危岩 I 区(高程为 1 242 ~ 1 270 m,斜坡):L1 与边坡面走向交角大于  $40^{\circ}$ ,为基本稳定结构;L2 与边坡面走向基本相反,属稳定结构;层面与边坡面走向相近,当坡面倾角大于层面时,属不稳定结构;L1 与 L2 结构面交点与坡面在同一侧,且位于投影弧内侧,属稳定条件;L1 与层面、L2 与层面组合交点局部可能落于坡面投影弧之间,且前端局部临空,构成不稳定条件。

如图 3 b) 所示,危岩 II 区(高程为 1 270 ~ 1 283 m,陡壁):L1 与边坡面走向交角大于  $40^{\circ}$ ,为基本稳定结构;L2 与边坡面走向基本相反,属稳定结构;层面与边坡面走向相近,坡面倾角大于层面时,属不稳定结构;L1 与 L2 结构面交点与坡面在同一侧,且位于投影弧内侧,属稳定条件;L1 与层面、L2 与层面组合交点位于坡面投影弧之间,构成不稳定条件。

综上所述,危岩 I 区、II 区均存在不利于稳定的节理裂隙或节理裂隙组合。

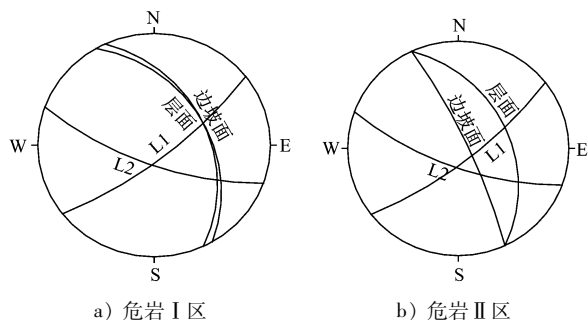


图 3 赤平投影法分析示意图

Fig. 3 Schematic diagram of stereographic projection method analysis

2.2 稳定性定量分析

根据地表调查访问结果,边坡及危岩体在目前自然工况下均处于基本稳定状态。但危岩体的稳定性受多种因素制约,其计算涉及较多参数和复杂的边界条件,为了深刻认识区内危岩的稳定性,满足危岩整治的需要,本文采用静力解析法对典型危岩崩塌体进行稳定性计算。

2.2.1 稳定性计算模型及公式

计算危岩稳定性时,结合危岩的失稳破坏方式选取合理的计算模型,本次研究区危岩属滑移式危岩破坏,参照《滑坡防治工程勘查规范》<sup>[20]</sup>中相关公式分析计算,公式如下:

$$F = \frac{(W \cos \theta - Q \sin \theta - V \sin \theta) \tan \varphi + cl}{W \sin \theta + Q \cos \theta + V \cos \theta}$$

(1)

$$V = \frac{1}{2} \gamma_w l h_w$$

(2)

$$Q = \xi W$$

(3)

式中:

- $F$ ——危岩稳定性系数;

$W$ ——危岩体重度,取 26.0 kN/m<sup>3</sup>;

$Q$ ——地震力,kN/m;

$\xi$ ——地震水平作用系数,取 0.05;

$C$ ——后缘裂隙黏聚力标准值;

$\varphi$ ——后缘裂隙内摩擦角标准值,当裂隙未贯通,取贯通段和未贯通段内摩擦角标准值按长度加权 and 加权平均值,未贯通段内摩擦角标准值取岩石内摩擦角标准值的 0.95 倍<sup>[17]</sup>;

$\theta$ ——结构面倾角(外倾取正,内倾取负);

$l$ ——危岩结构面长度;

$V$ ——后缘裂隙水压力;

$h_w$ ——裂隙充水高度,取裂隙深度的 1/2;

$\gamma_w$ ——水的重度,取 10 kN/m<sup>3</sup>。

2.2.2 计算工况

由于天然状态下危岩体处于稳定状态,故选取暴雨状态下工况进行计算,考虑饱和自重及裂隙水压力的影响。

2.2.3 计算参数选取及计算结果

根据现场测绘所得各危岩体及结构面的形状参数,以及相关试验结果,稳定性计算参数的选取如表 1 所示。

2.2.4 稳定性计算结果

危岩体稳定程度划分标准如表 2 所示。暴雨工

况下的危岩体稳定性系数及稳定性评价结果如表 3 所示。由表 3 可知,W1 ~ W4 滑移式危岩体在极端暴雨情况下处于不稳定状态,具有较大失稳风险。

表 1 稳定性计算参数表

Tab.1 Stability calculation parameters

编号	W/kN	$\theta/(^{\circ})$	C/kPa	$\varphi/(^{\circ})$	l/m
W1	20 800	32	40	30	10.0
W2	22 126	32	40	30	14.0
W3	89 856	32	40	30	16.0
W4	170 352	32	40	30	16.0

表 2 危岩稳定程度划分

Tab.2 Division of stability degree of perilous rock mass

危岩类型	危岩稳定状态			
	不稳定	欠稳定	基本稳定	稳定
滑移式	$F < 1.0$	$1.0 \leq F < 1.3$	$1.3 \leq F < 1.5$	$F \geq 1.5$

表 3 暴雨工况下危岩体稳定系数及稳定性评价

Tab.3 Stability coefficient and stability evaluation under heavy rain working conditions

编号	$F$	稳定性评价
W1	0.854	不稳定
W2	0.862	不稳定
W3	0.838	不稳定
W4	0.834	不稳定

3 运动特征深度的数值模拟分析

为了更有针对性地分析马王庙边坡危岩落石失稳情况及落石失稳后的运动轨迹特征,本文使用 Rockfall 软件进行数值模拟计算分析。

3.1 模拟原理

Rockfall 软件是在落石运动模拟分析中使用较为广泛的数值模拟软件。针对设定的边坡参数、落石参数,可模拟落石在边坡上的运动轨迹、能量、弹跳高度和最大运动距离<sup>[21]</sup>,还可直观地展示落石失稳后对工程的影响,以作为设计防护的有力参考。

3.2 计算参数选取及计算结果

选取马王庙边坡最具代表性断面进行模拟计算。根据边坡的实际情况,将计算剖面分为 6 段,并分别赋予与实际情况相应的计算参数。参数依据 Rockfall 软件建议值及 TB 10035—2018《铁路特殊路基设计规范》<sup>[22]</sup>选取(见表 4)。经过 100 次的数值模拟计算后,得到计算成果图如图 4 及图 5 所示。

表 4 落石模拟计算参数

Tab.4 Simulation calculation parameters of rockfalls

段落	$\varphi/(^{\circ})$	$R_n$	$R_t$	$k$	坡面特征
A-B	38	0.42	0.92	0.33	基岩裸露,岩质较硬,无植被
B-C	66	0.42	0.92	0.33	基岩裸露岩质较硬,无植被
C-D	49	0.42	0.92	0.33	基岩裸露岩质较硬,无植被
D-E	39	0.33	0.85	0.55	分布少量崩塌堆积的块石及少量灌木
E-F	6	0.31	0.83	0.55	分布少量崩塌堆积的块石及少量灌木、庄稼
F-G	1	0.30	0.80	0.48	主要为土层及碎石,为采石场作业平台

注: $R_n$  为法向摩擦系数, $R_t$  为切向摩擦系数, $k$  为动摩擦系数, $\varphi$  为坡面角度。

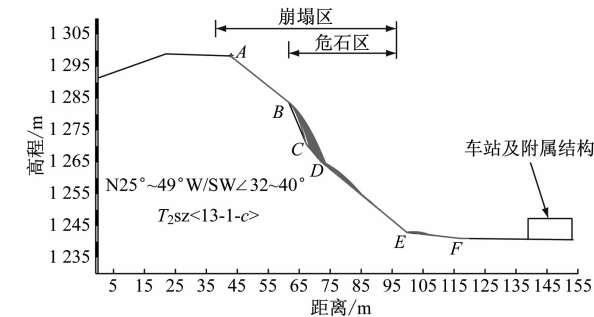


图 4 落石运动轨迹模拟图

Fig.4 Simulation diagram of rockfall movement track

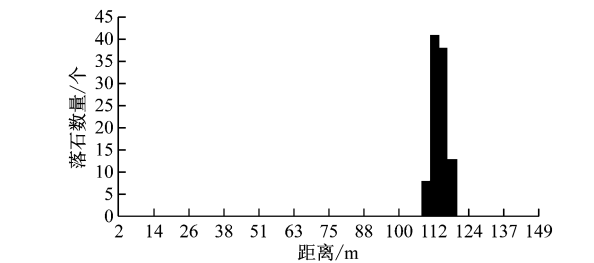


图 5 落石水平运动距离分布图

Fig.5 Distribution of horizontal movement distance of rockfalls

3.3 结果分析

从 Rockfall 数值模拟结果(见表 5)可以看出:在模拟次数为 100 的情况下,马王庙边坡落石失稳后沿坡面滚动的水平距离具有高度的集中性,其最后主要集中停留在断面 E-F 段(坡脚下缓坡段),距离地铁车站及附属结构约 15~25 m。

表 5 危岩失稳模拟计算结果

Tab.5 Rockfall instability simulation calculation results

参数类别	数值	分布段落
危岩块体下滑最大动能/kJ	$2.2 \times 10^3$	D-E
最大弹起高度/m	6.4	B-C
最大水平距离/m	76.6	E-F
最大平动速度/(m/s)	22.3	D-E

4 落石的影响与防治措施

4.1 落石的影响

马王庙站主体结构位于危岩区南东侧(见图 6),呈北西-南东向展布。临近危岩区的主要结构为 2 号风亭新风井及排风井,属于车站附属结构。风亭距离危岩区坡脚约 40 m。

根据模拟结果,落石沿坡面滚落至坡脚后最大剩余平动距离约为 20 m。按危岩落石最远平动距离,落石虽未能触及地铁车站及附属结构,但仅有约 20 m 的距离,在极端情况下可能会更接近地铁设施,也可能对地铁产生撞击、掩埋等破坏影响,具有一定威胁,故应采取防护措施。

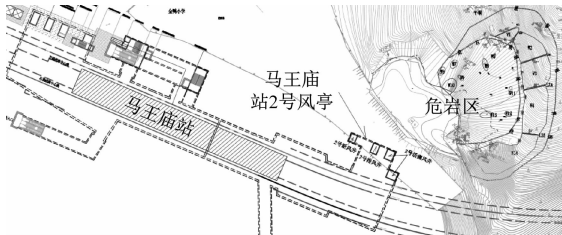


图 6 危岩区与工程位置关系图

Fig.6 Location relation between perilous rock mass area and the project

4.2 防治措施

鉴于马王庙边坡危岩在极端暴雨工况下处于不稳定状态,且失稳后危岩落石体对地铁及附属结构有一定影响,建议采取以下防治措施:

- 1) 对高程为 1 242~1 270 m 斜坡表层危石块进行清除;
- 2) 对高程为 1 270 m 以上体积较大的危岩体进行清除处理;
- 3) 在 1 242 m 平台,落石运动轨迹末端设置被动拦石网、防撞桩板墙或滚石槽;

4) 对尚未贯通且规模较大的卸荷裂隙、溶蚀裂隙进行封闭处理,定期监测陡崖的稳定性。

## 5 结语

本文通过成因分析、赤平投影、静力分析、数值模拟等手段对马王庙边坡进行了较为全面多样的分析,得出以下结论:

1) 马王庙边坡危岩落石形成原因主要为人工开挖、结构面切割及雨水侵蚀等;

2) 根据极射赤平投影法的初步分析结果,高程为 1 242 ~ 1 270 m 的斜坡及高程为 1 270 ~ 1 283 m 的陡壁均存在不利于稳定的节理裂隙或节理裂隙组合;

3) 根据静力计算结果,在极端暴雨的工况下,危岩体处于不稳定状态,失稳可能性较大;

4) 根据数值模拟计算结果,危岩体失稳后最大水平运动距离可达 76.6 m,离地铁及附属结构较近,仅有 20 m 左右的距离;

5) 为保证结构安全,建议对马王庙边坡危岩落石体采取清除及设立拦石网、防撞墙、滚石槽等措施进行防护。

## 参考文献

- [1] AZZONI A, BARBERA G L, ZANINETTI A. Analysis and prediction of rockfalls using a mathematical model[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts, 1995, 32(7): 709.
- [2] DAY R W. Case studies of rockfall in soft versus hard rock[J]. Environmental & Engineering Geoscience, 1997(3): 133.
- [3] CHAU K T, WONG R H C, WU J J. Coefficient of restitution and rotational motions of rockfall impacts[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2002, 39: 69.
- [4] 叶四桥. 隧道洞口段落石灾害研究与防治[D]. 成都: 西南交通大学, 2008.  
YE Siqiao. Research and mitigation of rockfall hazards at tunnel entrance and exit[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008.
- [5] 叶四桥, 陈洪凯, 唐红梅. 落石冲击力计算方法的比较研究[J]. 水文地质工程地质, 2010(2): 59.  
YE Siqiao, CHEN Hongkai, TANG Hongmei. Comparative research on impact force calculation methods for rockfalls[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2010(2): 59.
- [6] 叶四桥, 陈洪凯, 唐红梅. 落石运动过程偏移与随机特性的试验研究[J]. 中国铁道科学, 2011(3): 74.  
YE Siqiao, CHEN Hongkai, TANG Hongmei. Research on the offset and random characteristics of the rockfall during the falling process by field tests[J]. China Railway Science, 2011(3): 74.
- [7] 叶四桥, 唐红梅, 祝辉. 基于 AHP-Fuzzy 方法的危岩危险度评价[J]. 武汉理工大学学报(交通版), 2006(5): 800.  
YE Siqiao, TANG Hongmei, ZHU Hui. Dangerous degree estimation of perilous rock based on AHP-Fuzzy method[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2006(5): 800.
- [8] PRITCHARD M, PORTER M, SAVIGNY W, et al. CN rockfall hazard risk management system: experience, enhancements, and future direction[C]// Landslide Risk Management: Proceedings of the International Conference on Landslide Risk Management. 18<sup>th</sup> Annual Vancouver Geotechnical Society Symposium. Vancouver, BC. London: Taylor & Francis, 2005.
- [9] Federal Highway Administration, US. Department of Transportation. Rockfall hazard rating system: participant's manual; NHI course no. 130220. (FHWA SA-93-057)[M]. Washington, D. C.: National Highway Institute (US.), 1993.
- [10] STOVER B. Highway rockfall research final report[R]. Denver: Colorado Geological Survey Department of Natural Resources, 1990.
- [11] 胡厚田, 陈彪. 崩塌落石区段预测的研究[J]. 铁道学报, 1996(4): 95.  
HU Houtian, CHEN Biao. Study on regional prediction of landfall and rockfall[J]. Journal of The China Railway Society, 1996(4): 95.
- [12] 胡厚田. 崩塌落石综合预测方法的研究[J]. 铁道工程学报, 1996(2): 182.  
HU Houtian. Synthetical prediction of landfall and rockfall[J]. Journal of Railway Engineering Society, 1996(2): 182.
- [13] 刘洪亮, 胡杰, 李利平, 等. 隧道洞口段落石崩塌落石冲击风险评价研究[J]. 铁道工程学报, 2017(5): 65.  
LIU Hongliang, HU Jie, LI Liping, et al. Rockfall shock risk assessment study of a tunnel portal section[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2017(5): 65.
- [14] 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(12): 7.  
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(12): 7.
- [15] 曾永红, 丁兆锋, 李宁. 贵广铁路深路堑陡坡危岩落石整治方案设计[J]. 高速铁路技术, 2017(2): 20.  
ZENG Yonghong, DING Zhaofeng, LI Ning. Renovation scheme design for rockfall in the high steep-slope cutting of Guiyang-Guangzhou Railway[J]. High Speed Railway Technology, 2017(2): 20.
- [16] 曾舜. RockFall 软件在危岩崩塌处治设计中的应用[J]. 中国水运, 2011(1): 211.  
ZENG Shun. Application of RockFall software in treatment design of rockfall[J]. China Water Transport, 2011(1): 211.

(下转第 141 页)