

Stability Analysis of Dangerous Rock Masses on Highway Slope in Mountainous Area—Taking the Collapse of Zhailing in Xingshan County, China as an Example

Zhengyu Wang¹ Zhongjun Zhang² Ruimin Tian²

1. Xingshan County Land Consolidation Center, Yichang, Hubei, 443799, China

2. Seventh Geological Brigade of Hubei Geological Bureau, Yichang, Hubei, 443100, China

Abstract

In view of the geological hazards caused by dangerous rock masses on highway slope in mountainous areas, taking Zhailing Collapse in Xingshan County as an example, through the investigation and analysis of the engineering geological conditions of the slope and the basic characteristics of dangerous rock masses, the failure mode and evolution process of dangerous rock masses are summarized, and its formation mechanism is analyzed. In addition, the stability of dangerous rock masses is analyzed qualitatively and quantitatively by means of Stereo-projection analysis and static method. The results show that the failure modes of dangerous rock masses all belong to toppling failure, and the formation mechanism is mainly affected by the development and cutting of structural plane, the high and steep terrain formed by slope excavation, strong weathering and rainfall. The four dangerous rock masses are in the understable state under the natural condition and the condition of rainstorm once in 20 years. Based on the analysis of the basic characteristics and deformation failure mode of Zhailing Collapse, it is expected to provide reference for the stability evaluation and prevention of the dangerous rock masses of highway slope in western Hubei Mountain area.

Keywords

highway slopes; dangerous rock masses; failure modes; stability

山区公路边坡危岩体稳定性分析——以兴山县寨岭崩塌为例

王正禹¹ 张中君² 田锐敏²

1. 兴山县国土整治中心, 中国·湖北 宜昌 443799

2. 湖北省地质局第七地质大队, 中国·湖北 宜昌 443100

摘 要

针对山区公路边坡危岩体形成的地质灾害,以兴山县寨岭崩塌为例,通过对其所在边坡工程地质条件和危岩体基本特征的调查与分析,总结危岩体的破坏模式及演化过程,并对其形成机理进行浅析;此外,采用赤平投影分析和静力法对危岩体的稳定性进行定性和定量分析。研究表明:危岩体的破坏模式均属于倾倒式破坏,其形成机理主要受结构面发育及切割作用、边坡开挖形成高陡地形、强烈的风化作用和降雨作用的影响;4处危岩体在天然工况下和在20年一遇暴雨工况下,均处于欠稳定状态。通过对寨岭崩塌的基本特征及变形破坏模式进行分析,以期对鄂西山区公路边坡危岩体的稳定性评价和防治提供参考。

关键词

公路边坡;危岩体;破坏模式;稳定性

1 引言

危岩体是指斜坡上受多组结构面切割,临空条件好,在重力、地应力等作用下与母岩逐渐脱离,发生坠落式、倾倒式、滑移式崩塌的岩体^[1]。随着中国经济的迅速发展,公路建设逐步走向山区。在山区修建公路等线状工程时,受到地形的制约,往往在建设过程中要开挖而形成高陡边坡。至此,高陡边坡的稳定性评价及防护工程的设计则变得尤为重

要。尤其在陡岩质边坡中,受到多组岩体结构面组合形成的危岩体,在重力、地震、水体等诱发因素作用下可能出现失稳破坏,其破坏力大、突发性高^[2],常对一定范围内公路重要工程造成重大威胁。边坡危岩体的成因和稳定性评价一直颇受重视,也有很多技术人员做过类似的分析与研究。张永梅等^[3]针对白马沟危岩体,初步总结出了危岩体的形成、分布规律及成灾机理,并计算了该区4个危岩体的运动特征;李艳^[4]基于无人机影像,采用赤平投影法和静力解析法分别分析了斜坡3处复杂危岩体和15个单体危岩体的稳定性;杨俭波等^[5]通过对基于黑岩屋崩塌危岩体的调查与分析,

【作者简介】王正禹(1987-),男,中国湖北宜昌人,硕士,工程师,从事生态修复及地质灾害治理研究。

综合评价该边坡的稳定性,并提出处置措施。以上研究为危岩体的成因机制和稳定性评价提供了一定的参考。

兴山县交通主干线沿线已查明地质灾害及隐患点 225 处,占地质灾害总数的 31.97%,其中崩塌 88 处,主要发育于县内各公路沿线边坡、河流河谷、少量采矿活动陡坡地带^[6]。论文以兴山县山区某公路边坡危岩体为研究对象,通过现场调查,查明了危岩体的基本特征,对危岩体的破坏模式和形成机理进行探讨。同时,从定性和定量两个角度对危岩体的稳定性进行评价,为防治设计提供建议。

2 危岩体基本特征及破坏模式分析

2.1 危岩体基本特征

兴山县寨岭崩塌位于兴山县峡口镇岩岭村,处于秭归盆地的东北边缘,系三叠系~侏罗系地层组成的单斜构造,属于构造剥蚀中低山区地貌,高程 660~730m;属于亚热带大陆性季风气候区,处于中亚热带和北亚热带的交汇地带,雨量丰沛,四季分明;边坡区出露地层为侏罗系中统下沙溪庙组(J_2xs),由灰黄、浅红、紫褐、灰绿及灰白色厚-巨厚层状粉砂岩,薄~厚层状砂质泥岩、泥质粉砂岩及长石石英砂岩互层或夹层组成。危岩体所在边坡为修建公路切坡而形成,长约 172m,坡向 35°,崩塌分布高程为 660~690m,分布面积约 4900m²。崩塌呈条状分布,坡度 60°~80°,局部呈直立。坡面地形陡峭,纵向裂缝贯穿,且上宽下窄,在节理切割作用下,坡体表面较破碎,距离路面高度 4m 以上形成危岩体。

该边坡主要包括 4 处典型危岩体(WY1、WY2、WY3、WY4)。崩塌区总面积为 900m²,其中 WY1 分布于崩塌区右侧,分布高程约为 669.5~675.5m,长宽高为 3×6×2m,体积约为 36m³,纵向裂缝贯穿,且上宽下窄,延伸 3m,微张;张开 5~10mm,并且近期发生过小规模崩塌破坏,形成滚石落在坡面。

WY2 与 WY1 毗邻,分布高程约 674~681m,长宽高为 3×7×2m,体积约为 42m³,该处危岩体结构破碎,节理发育,节理面风化严重,岩层产状为 160°∠31°。通过对崩塌区右侧出露岩体节理的测量,主要存在 2 组节理, J1: 20°∠65°; J2: 70°∠90°。

WY3 分布位于边坡中间顶部,分布高程 678.5-

681.5m,长宽高为 4×3×4m,体积约 48m³,该处危岩块体较大,纵向裂缝贯穿,张开程度为 1~3cm。

WY4 分布与边坡左侧顶部,分布高程 669.5~675.5m,长宽高约为 3×3×2m,体积约 18m³,裂缝张开程度为 5~8cm,该处危岩底部较为破碎,坡面基岩裸露,危岩自高处崩塌,在向下运动过程中分解,公路上松散堆积物较多,分布有较多浮石,且公路外侧及下方可见大量块石及土体方量 0.5~1.0m³ 不等,路面、路基及公路护栏处均可见滚石砸落痕迹。通过对崩塌区左侧出露岩体节理的测量,主要存在 2 组节理, J3: 11°∠70°; J4: 91°∠90°。

危岩体分布图见图 1。



图 1 危岩体分布图

2.2 危岩体破坏模式及演化过程分析

根据危岩体失稳破坏的方式,一般将危岩体的失稳模式划分为滑移式、倾倒式和坠落式三种^[6]。不同的破坏模式具有不同的发育特征。其中,滑移式破坏发育与临空面倾向一致的缓倾结构面,在重力及后缘裂隙水压力作用下沿结构面发生滑移破坏;出现倾倒式破坏的危岩体在后缘发育陡倾结构面,在重力及后缘裂隙水压力作用下绕着底部某一点发生倾倒破坏;坠落式危岩体受主控结构面的切割,上面已基本与母岩分离,下部尚未完全脱离母岩,但底部临空,在重力作用或外力扰动下将直接发生坠落。危岩体三种失稳模式示意图见图 2。

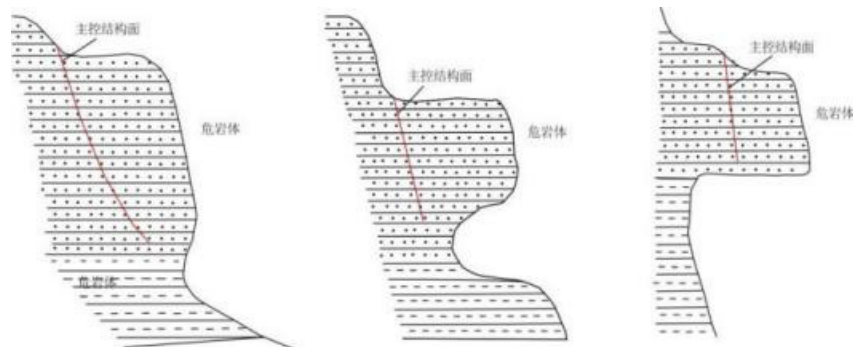


图 2 危岩体三种失稳模式示意图

根据现场调查,综合以上分析结果,边坡区4处危岩体(WY1、WY2、WY3、WY4)均属于倾倒式破坏。后缘发育的陡倾构造裂隙将岩体与母岩分离,其次岩体底部岩体破碎且风化作用强烈,逐步形成凹腔,特别是底部为软弱岩体,差异风化作用下凹腔能更快形成;在降雨作用下,后缘裂隙静水压力增大,裂隙向下扩展,推挤危岩体向临空方向变形,同时底部凹腔进一步增大,危岩体与后壁及底部母岩之间的潜在破裂面处应力超过其抗拉强度,破裂面发生拉张破坏,导致危岩体以根部为转折点向临空方向倾倒,其演化过程如图3所示。

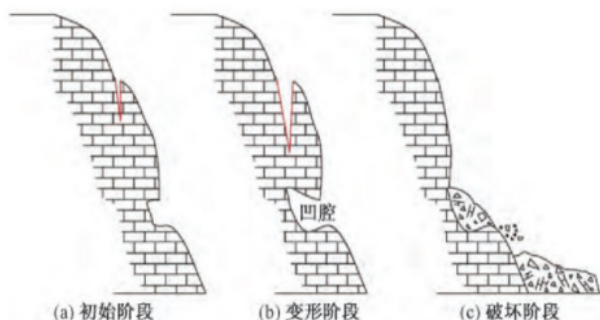


图3 危岩体倾倒破坏演化过程图

3 危岩体形成机理分析

现场调查表明,崩塌区危岩体的发育形成,主要受结构面发育及切割作用、边坡开挖形成高陡地形、强烈的风化作用和降雨作用的影响。危岩体所在边坡为修建道路开挖形成的高陡边坡,坡高20~35m,坡度约65°,为危岩体的形成提供良好的临空条件;边坡区出露侏罗系中统下沙溪庙组(J₂xs)粉砂岩,产状为160°∠11°,为横向坡,表面强风化及中等风化,节理裂隙发育,多处切割岩体,且切割部位岩体松散破碎,并且主要以陡倾裂隙为主,在重力卸荷作用下发生变形扩张,为危岩体的形成提供物质来源;边坡区内地下水主要为孔隙水和基岩裂隙水两类,当雨季连续暴雨时,雨水沿着砂岩裂隙入渗,产生向临空面的静水压力,使得危岩体形成过程大幅加快,促使危岩体向临空面发生倾倒式破坏,对公路上的行人和车辆造成威胁。

4 稳定性计算与评价

4.1 危岩体稳定性宏观分析

根据现场勘查,主要依据节理面的发育情况、岩体完整程度,采用赤平投影分析法对研究区内危岩体的稳定性进行宏观评价。经对研究区4处危岩体节理裂隙的调查,其发育的节理产状基本一致,因此以WY2为例进行赤平投影分析,如图4所示。节理L1为主控结构面,倾向与坡向相近,倾角略小于坡脚,易沿节理L1发生倾倒破坏;节理L1和L2、节理L1和层面及节理L2和层面交合线均与坡体倾向大角度相交,发生楔形破坏的可能性小,但会发生局部的破

坏和掉块现象,综合判定该边坡4处危岩体处于欠稳定状态。

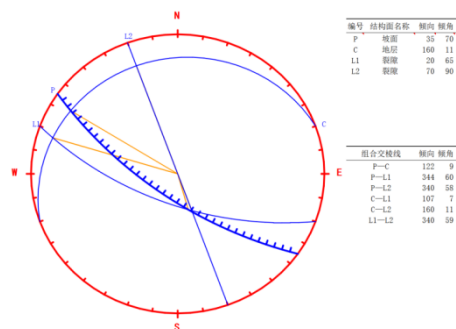


图4 赤平投影分析图

4.2 危岩体稳定性定量分析

4.2.1 危岩体稳定性计算模型

4处危岩体均的破坏模式属于倾倒型,且为底面部分悬空型,即底界临空条件好,在变形破坏时,危岩体的顶部首先脱离母体,然后沿基座支点转动,从而发生倾倒式破坏,如图5所示。

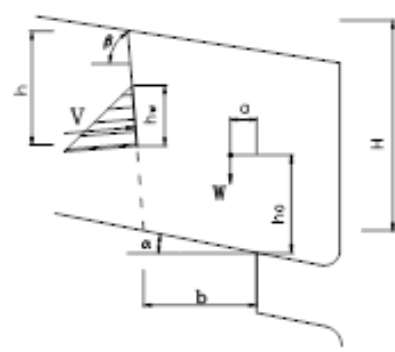


图5 倾倒式危岩体计算模型示意图

由于其危岩体的稳定性主要受到后缘岩体抗拉强度的控制,危岩体重心在倾覆点内,计算力学模型如图,计算公式见式(1)~(2)。

$$F = \frac{\frac{1}{2} f_k \cdot \frac{H-h}{\sin \beta} \cdot \left(\frac{2}{3} \frac{H-h}{\sin \beta} + \frac{b}{\cos \alpha} \cos(\beta-\alpha) \right) + W \cdot a}{V \left(\frac{H-h}{\sin \beta} + \frac{h_w}{3 \sin \beta} + \frac{b}{\cos \alpha} \cos(\beta-\alpha) \right)} \quad (1)$$

$$V = \frac{1}{2} \gamma_w h_w^2 \quad (2)$$

其中,W为危岩体自重(kN);V为裂隙水压力(kN/m);H为后缘裂隙上端到未贯通段下端的垂直距离(m);h为后缘裂隙深度(m);h_w为后缘裂隙充水高度(m);a为危岩体重心至倾覆支点C的水平距离(m);b为危岩体主控结构面底端B至倾覆支点C的水平距离(m);h₀为危岩体重心至倾覆支点C的垂直距离(m);α为危岩体与基座接触面倾角(°),外倾时取正值,内倾时取负值;β为后缘裂隙倾角(°);f_k为危岩体抗拉强度标准值(kPa),根据岩石抗拉强度标准值乘以0.4的折减系数确定;γ_w为水重度,取10kN/m。

4.2.2 计算工况及参数取值

参考有关规范及参考资料，结合危岩的实际情况，拟定了 2 种工况组合：工况 1—自重（天然状态），工况 2—自重 +20 年一遇暴雨。根据当地区域岩体试验资料，岩体的天然重度（ γ ）取为 26kN/m³，因危岩体位于地表陡崖中上部、大气降水时不可能使其处于饱和状态，故二种工况均采用天然重度进行计算。其它几何参数均基于现场调查获取。考虑暴雨工况时，后缘裂隙充水高度按 1/4 考虑。4 处危岩体稳定性计算参数如表 1 所示。

表 1 危岩体稳定性计算参数一览表

参数	$W/(kN)$	$V/(kN)$	H/m	h/m	hw/m	a/m	b/m	h_0/m	$\alpha/(^{\circ})$	$\beta/(^{\circ})$	f/kPa
WY1	972	45	2	2	3	0.2	4	1	24	80	6000
WY2	1134	42	2	2	3	0.2	5	1.2	23	79	6000
WY3	1296	48	4	4	4	0.3	4.1	1.6	24	79	6000
WY4	486	18	2	2	1.8	0.13	3.7	1.5	26	77	6000

表 2 危岩稳定性计算成果表

危岩体编号	工 况			
	天然		自重 + 20 年一遇暴雨	
	稳定系数	稳定性评价	稳定系数	稳定性评价
WY1	1.247	欠稳定	1.242	欠稳定
WY2	1.244	欠稳定	1.235	欠稳定
WY3	1.238	欠稳定	1.189	欠稳定
WY4	1.225	欠稳定	1.116	欠稳定

5 结论

- ①通过对边坡区 4 处危岩体（WY1、WY2、WY3、WY4）基本特征的分析，4 处危岩体（WY1、WY2、WY3、WY4）的破坏模式均属于倾倒式破坏。
- ②4 处危岩体（WY1、WY2、WY3、WY4）危岩体的发育形成，主要受结构面发育及切割作用、边坡开挖形成高陡地形、强烈的风化作用和降雨作用的影响，促使危岩体向临空面发生倾倒式破坏。
- ③通过对 4 处危岩体的定性和定量分析，危岩体 WY1、WY2、WY3、WY4 在天然工况下和在 20 年一遇暴雨工况下，均处于欠稳定状态。
- ④公路边坡危岩体典型破坏模式为倾倒式，其破坏演化过程可概化为初始阶段、变形阶段、破坏阶段等三个阶段，公路边坡防治工作中可根据危岩体所处不同阶段有针对性的采取锚固、混凝土支撑、危岩体清除等不同类型的工程

4.2.3 稳定性计算结果

根据危岩体稳定性系数计算结果，按照《三峡库区地质灾害治理工程地质勘察技术要求》^[7]中危岩体稳定程度等级划分表，评价三种工况下各危岩体的稳定性见表 2。通过计算，危岩体 WY1、WY2、WY3、WY4 在天然工况下，稳定系数分别为 1.247、1.244、1.238、1.225，均处于欠稳定状态；在 20 年一遇暴雨工况下，稳定系数分别为 1.242、1.235、1.189、1.116，均处于欠稳定状态。这与危岩体稳定性宏观分析结果一致。

措施。

参考文献

[1] 胡显明,晏鄂川,杨建国,等.巫溪南门湾危岩体稳定性分区研究[J].工程地质学报,2011,19(3):397-403.

[2] 夏相骅,刘德成,李玉倩,等.北京雁栖镇典型危岩基本特征及稳定性分析[J].中国地质灾害与防治学报,2021,32(1):28-34.

[3] 张永海,谢武平,罗忠行,等.四川名山白马沟危岩体稳定性评价与落石轨迹分析[J].中国地质灾害与防治学报,2022,33(4):37-46.

[4] 李艳.某铁路隧洞口高陡边坡危岩体识别及稳定性分析[J].四川建材,2021,47(12):254-256.

[5] 杨俭波,郑卫军,陈雪,等.黑岩屋崩塌的成因及稳定性分析[J].资源环境与工程,2020,34(S1):67-71.

[6] 吴军,杨涛,罗莉威,等.兴山县地质灾害风险调查评价成果报告[R].武汉:湖北省地质环境总站,2022.

[7] 徐邦栋.滑坡分析与防治[M].北京:中国铁道出版社,2001.