

危岩带稳定性分析与落石轨迹预测

王渝源, 张友谊, 王云骏

Stability of dangerous rockmasses and prediction of rockfall trajectory: A case study at Wansui Mountain in Ganzi County of Sichuan Province

WANG Yuyuan, ZHANG Youyi, and WANG Yunjun

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202304020>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

北京雁栖镇典型危岩基本特征及稳定性分析

Basic characteristics and stability evaluation of dangerous rockmasses in Yanqi Town, Beijing

夏相骅, 刘德成, 李玉倩, 高雪媛 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(1): 28–34

三峡库区箭穿洞危岩体变形破坏模式与防治效果分析

Analyses on failure modes and effectiveness of the prevention measures of Jianchuandong dangerous rock mass in the Three Gorges Reservoir area

蒋文明, 王鲁琦, 赵鹏, 黄波林, 张枝华, 胡明军 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 105–112

基于理想点-可拓云模型的隧道围岩稳定性评价

Stability evaluation of tunnel surrounding rock based on ideal point-extension cloud model

何乐平, 罗舒月, 胡启军, 蔡其杰, 李浴辉 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 126–134

锚固的贯通节理岩体剪切破坏特性分析

Shear failure mode of anchored rock mass with through joints

宋洋, 张峰源, 李永启, 杜炎齐, 王韦颐 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(5): 133–140

基于指标变权重复合云模型的岩质边坡稳定性评价初探

A preliminary study on evaluation of rock slope stability based on index variable weight compound cloud model

陈忠源, 戴自航 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(6): 9–17

基于不同方法的江苏镇江地区下蜀土边坡稳定性分析与评价

Evaluation of Xiashu loess slope stability in Zhenjiang area using different methods

瞿婧晶, 陆燕, 吴曙光, 刘健, 苟富刚 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(1): 35–42



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202304020

王渝源, 张友谊, 王云骏. 危岩带稳定性分析与落石轨迹预测——以四川甘孜万岁山为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2024, 35(3): 12-25.

WANG Yuyuan, ZHANG Youyi, WANG Yunjun. Stability of dangerous rockmasses and prediction of rockfall trajectory: A case study at Wansui Mountain in Ganzi County of Sichuan Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2024, 35(3): 12-25.

危岩带稳定性分析与落石轨迹预测 ——以四川甘孜万岁山为例

王渝源¹, 张友谊¹, 王云骏²

(1. 西南科技大学土木工程与建筑学院, 四川 绵阳 621010; 2. 贵州黔程弘景工程咨询
有限责任公司, 贵州 贵阳 550000)

摘要: 甘孜县甘孜镇万岁山斜坡危岩带多年来时常有落石发生, 严重威胁到了下方居民的生命财产安全, 因此对万岁山斜坡进行危岩带稳定性分析与落石轨迹预测尤为重要。以万岁山斜坡的危岩带为对象, 利用无人机倾斜摄影结合现场调查获取了危岩带几何尺寸和三维形态, 分析了危岩带的发育特征和危岩体的分布特征, 对危岩稳定性进行了分析; 基于 RAMMS-ROCKFALL 考虑了危岩体的几何形状和三维地形, 模拟了危岩体崩塌后可能的落石运动路径。结果表明: (1) 斜坡整体性较完整, 受风化作用主要失稳模式为坠落式和倾倒式, 共发育有 7 处危岩带, 地震工况下为不稳定状态; (2) 通过模拟得到了滚落弹跳高度、速度、动能和轨迹、位置的关系, 并通过预测落石运动轨迹得到了危岩带的威胁范围、威胁对象, 预测结果表明万岁山斜坡对下方居民房屋和街道行人产生的威胁较大, 应该尽快采取治理措施。研究成果表明无人机倾斜摄影的利用, 有利于斜坡危岩体的稳定性分析, 弥补了传统调查的盲区, 提高了调查的效率与质量, 对危岩体的调查与落石轨迹分析提供了一个新思路, 对于减灾技术研究与危岩体的治理有积极意义。

关键词: RAMMS-ROCKFALL; 危岩体; 数值模拟; 稳定性评价; 落石轨迹

中图分类号: 642.21 文献标志码: A 文章编号: 1003-8035(2024)03-0012-14

Stability of dangerous rockmasses and prediction of rockfall trajectory: A case study at Wansui Mountain in Ganzi County of Sichuan Province

WANG Yuyuan¹, ZHANG Youyi¹, WANG Yunjun²

(1. School of Civil Engineering and Architecture Southwest, University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan
621010, China; 2. Guizhou Qiancheng Hongjing Engineering Consulting Co. Ltd., Guiyang, Guizhou 550000, China)

Abstract: The hazardous rock zone on the Wansui Mountain slope in Ganzi Town, Ganzi County, has experienced frequent rockfalls over the years, posing a serious threat to the lives and property of residents below. Therefore, it is crucial to conduct stability analysis of the hazardous rock zone and rockfall trajectory prediction for the Wansui Mountain slope. Focusing on the dangerous rock zone of Wansui Mountain's slope, the geometric dimensions and 3D morphology of the zone were obtained using drone oblique photography combined with field surveys. The development characteristics of the dangerous rock zone and

收稿日期: 2023-04-18; 修订日期: 2023-10-18

投稿网址: <https://www.zgdzzhyfzxb.com/>

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC1505401)

第一作者: 王渝源(1998—), 男, 四川绵阳人, 硕士研究生, 从事地质灾害防治与研究。E-mail: 2502518175@qq.com

通讯作者: 张友谊(1980—), 男, 四川绵阳人, 博士, 教授, 研究方向为地质灾害成因机理。E-mail: youyzh@126.com

the distribution characteristics of the dangerous rock bodies were analyzed, and the stability of the dangerous rocks was assessed. Based on RAMMS-ROCKFALL, considering the geometric shapes of the dangerous rocks and the 3D terrain, potential rockfall trajectories after the collapse of the dangerous rocks were simulated. The results show that: The slope is generally intact, with the main instability modes being falling and toppling due to weathering. A total of seven dangerous rock zones have developed, which are in an unstable state under seismic conditions; the simulation provided the relationships between rolling and bouncing heights, speeds, kinetic energy, trajectories, and positions. By predicting the rockfall trajectories, the threat range and targets of the dangerous rock zone were determined. The prediction results indicate a significant threat to the houses and pedestrians on the streets below the slope of Wansui Mountain, and remedial measures should be taken as soon as possible. The research results indicate that the use of drone oblique photography is beneficial for the stability analysis of dangerous rock bodies on slopes, compensating for the blind spots of traditional surveys, and improving the efficiency and quality of the investigation. This provides a new approach for the investigation of dangerous rock bodies and rockfall trajectory analysis, which has positive significance for disaster mitigation technology research and the management of dangerous rock bodies.

Keywords: RAMMS-ROCKFALL; dangerous rock mass; numerical simulation; stability evaluation; falling rock trajectory

0 引言

危岩体是指临空条件好,在重力作用下,受风化、地震和水流侵蚀等脱离母体发生倾倒、滑移和坠落的岩石。由于危岩体崩塌是一个非常迅速的过程,且发生时间不确定,几乎没有躲避的能力,因此,对下方人们的人身和财产造成了严重的危害。

国外学者对于危岩体的崩塌研究较早,最早 Volkwein 等^[1]以危岩体崩塌特征和结构防护展开研究,根据落石威胁区、落石源区和轨迹分析不同防护结构的效益;后来 Fityus 等^[2]关注到了岩石的形状,并展开研究,从地质风化和构造的概念考虑,研究结果表明,岩石母岩的种类、结构和风化情况直接影响了岩石的大小和形状;Leine 等^[3]提出一种考虑岩石形状并使用多体动力学和非光滑接触动力学的落石动力学全三维模拟技术,研究了岩石几何形状对落石动力学的影响;James^[4]研究了岩石形状在落石跳动动力学中的重要性,并说明了如果要模拟落石行为的可变性,那么岩石形状是极其重要的。随后国外学者们通过三维摄影等技术手段,展开了三维落石轨迹的研究, Kim 等^[5]基于精确的三维摄影测量边坡模型,结合现场落石试验,从三维和二维模拟中反向计算的恢复系数在数值分析和现场试验数据之间提供了一致的结果;Crosta 等^[6]对三维落石轨迹、冲击分布和强度以及所涉及的动态量的大小和可变性进行可靠和稳定的量化,研究了现代三维建模技术在落石危害和风险评估、对策选择、设计和优化中的应用实例;同时, Lan 等^[7]采用物理试验,在单个岩石块样品上重复进行的现场落石试验,研究结果表明,参数和条件的细微差异可

能导致落石轨迹的显著不确定性,因此建议在数值模型中表示落石轨迹的随机性,以便更好地进行风险评估。

国内学者在理论研究上较丰富,周游等^[8]采取了刚体极限平衡法和 FOSM 法,研究了危岩体分别在不同工况下的稳定安全系数与失稳概率;贺凯等^[9]针对高陡岩体底部压裂失稳模式,引入损伤理论,提出了考虑底部薄弱区域损伤演化的稳定性评价方法;孙琪皓等^[10]分析了危岩体的地质背景、基本发育特征和可能存在的变形破坏机理,通过块体理论和离散元相结合的方法,对危岩体在自重和地震共同作用下的动力响应和稳定性进行了分析;张继旭等^[11]基于模糊失效准则和可靠度理论建立了危岩模糊可靠度计算模型和方法,选取了三种类型危岩稳定性的随机变量来预测危岩崩塌的发生。同时也有部分国内学者关注到了危岩体和边坡的三维形状,采用无人机倾斜摄影等先进技术对三维落石轨迹进行了研究,马显东等^[12-13]以云南鲁甸国道公路沿线崩塌危岩体为例,利用无人机倾斜摄影技术采用 Rockyfor^{3D} 研究不同落石冲击形式下防护网的动态响应规律,并提取点云,对结构面进行三维重建提取岩石结构面特征和空间分布,分析运动学和判断危岩块体的失稳破坏模式;姚富潭等^[14]提出一种无人机贴近摄影测量技术的结构面提取方法,为分析危岩体稳定性提供可靠的基础数据;谢金等^[15]提出运用无人机倾斜摄影采集数据,通过 Agisoft Photo-Scan 软件处理数据,进行三维建模,并用 rockfall 对危岩体进行运动规律模拟;刘福臻等^[16]根据历史崩塌反演垫面参数,通过倾斜摄影创立的三维模型,对研究区危岩进行了落石运动轨迹、速度及弹跳高

度的模拟;康尘云^[17]、何宇航等^[18]、张永海等^[19]基于倾斜摄影和 rockfall 数值模拟对高位危岩的稳定性进行了评价和危险范围预测及风险性评价;黄海宁等^[20]将无人机摄影测量技术应用于高陡边坡危岩体调查中,结果表明该技术在高陡边坡地区落石灾害调查中具有明显的可行性和优越性;汪莹鹤等^[21]通过遥感解译、三维激光扫描、现场调查等方法,利用落石模拟软件 Rockfall 对隧道洞口的落石进行了模拟,分析了落石下落过程的能量、速度、弹跳高度以及影响范围。

上述研究从不同方面研究了危岩崩塌,国外学者对危岩体的崩塌研究较早,最开始关注于危岩体崩塌特征和结构防护,随后开始关注岩石和边坡的三维特征,建立并优化了三维落石轨迹的研究。国内学者的理论研究相当丰富,建立了可靠度计算模型和研究方法,随后有部分学者采用了三维摄影等先进的技术手段调查危岩,进行了理论分析和数值模拟^[22~24],充实了分析理论,也提出了多种多样的研究方法。本文基于前人研究,以万岁山斜坡为研究对象,通过无人机倾斜摄影建立三维地形,并获取危岩三维几何特征和分布特征,通过理论分析采用 RAMMS-ROCKFALL 进行数值模拟,开展对万岁山斜坡的危岩带稳定性分析与落石轨迹预测,并分析模拟结果,为相应的地质灾害治理提供理论指导和参考。

1 危岩体特征

1.1 研究区概况

危岩体所在万岁山斜坡位于甘孜州甘孜县甘孜镇解放街。据调查,斜坡区整体地貌侵蚀堆积地貌,属雅砻江左岸Ⅲ—Ⅳ级阶地,地势呈西高东低,地形变化相对较大,斜坡前缘紧邻甘孜镇解放街上街,斜坡走向呈

南北向,坡体前后缘高程为 3 336~3 401 m,斜坡最大高差约 61 m,整个危险区范围面积约为 $4.5 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。研究区整体地貌为自然斜坡,坡体平面形态呈“长条”状,坡脚处由于城市建设建房人工开挖坡脚,居民用房紧靠坡脚,坡体南段顶部建有香根时轮佛塔,佛塔 7 层高约 40 m,2014 年竣工建成。危害对象主要为坡体下方的甘孜镇聚集区 178 户 598 人及坡顶香根时轮佛塔。如果该斜坡发生失稳,会严重危害到坡体下方老公安局、养老中心、藏医院、及解放街两侧分散户及顶部甘孜香根时轮佛塔的安全,该隐患点直接威胁财产约 20 000 万元,潜在威胁财产约 40 000 万元。甘孜县甘孜镇解放街万岁山斜坡特征全貌图见图 1。

1.2 研究区地质条件

万岁山斜坡体上部主要由第四系更新统冰川—冰水堆积层(Q_p^{gl+fgl}):上部淡黄色亚黏土层,中部为块碎石土、泥砾层夹亚黏土透镜体,呈半胶结状。坡体中下部由上三叠统(T_3)砂板岩、砂岩、变质砂岩组成,斜坡中下部揭露基岩多呈碎裂-镶嵌状结构,斜坡底部可见中风变质砂岩,中层镶嵌-块状结构。基岩产状为 $185^\circ \sim 210^\circ \angle 20^\circ \sim 35^\circ$,部分区域小规模褶皱和岩体节理裂隙较为发育,斜坡上时常有崩塌崩落的岩石,严重威胁到下方居民住房和街道上过往的行人。斜坡地质剖面线如图 1 所示,斜坡地质剖面图见图 2。

1.3 危岩带分布及特征

据勘查,万岁山斜坡体上共发育 7 处危岩带 WY01、WY02、WY03、WY04、WY05、WY06、WY07,坡体南侧见图 3,位于解放街 109~135 号段边坡中部及下部,分布高程 3 343~3 383 m,相对高差约 40 m,面积约 $1.6 \times 10^4 \text{ m}^2$,坡体坡度大于 70°,具备坡体近直立,分布有 WY04、WY05、WY06、WY07 四条危岩带。坡体北侧



图 1 甘孜县甘孜镇解放街万岁山斜坡全貌图

Fig. 1 Panoramic view of Wansui Mountain slope, Jiefang Street, Ganzi Town, Ganzi County

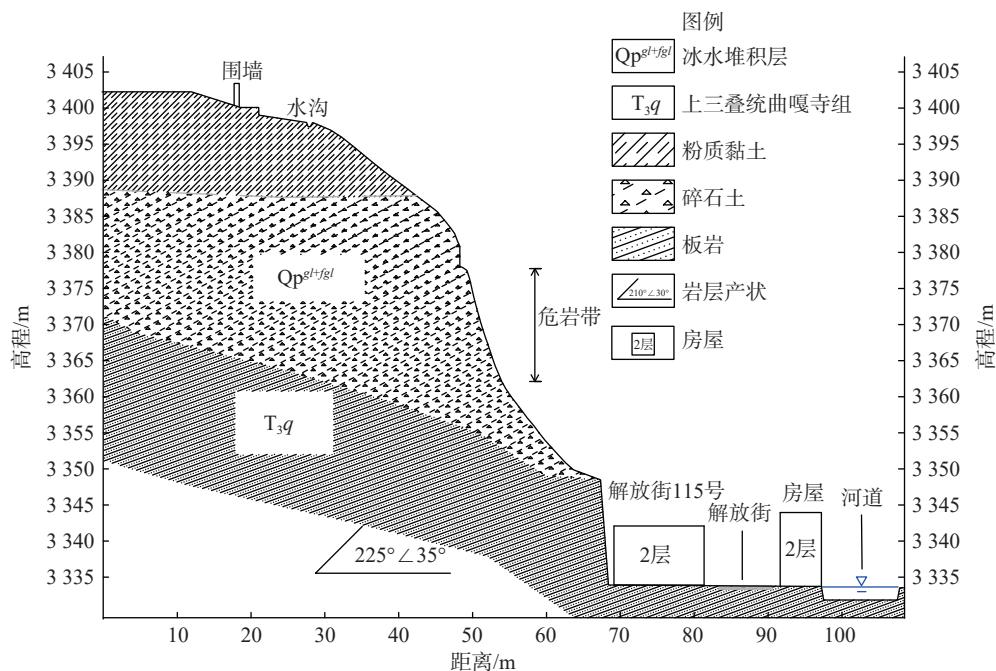


图 2 斜坡地质剖面图

Fig. 2 Geological cross-section profile of the slope

见图4,老公公安局-中心敬老院-藏医院区段:崩塌、危岩主要分布在坡体的中下部,该段坡体表层风化强烈,节理及小型褶曲构造较发育,坡体表层岩体在重力卸

荷作用下,表层岩体松动,危岩、落石较发育,分布有WY01、WY02、WY03三条危岩带。根据实地勘查和倾斜摄影数据提取的特征见表1。



图 3 南侧危岩带分布示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the distribution of hazardous rock zone on the south side

万岁山斜坡由于陡峻的地形条件,受降雨的影响,斜坡中部横向裂隙非常发育,坡体多阶错落台阶都为降雨的入渗提供了良好通道,地表岩土已经松散,斜坡向外凸起,部分地区出现了塌方,严重威胁坡脚分散农户、甘孜县老公公安局、中心敬老院、藏医院等的安全。发育两组节理裂隙,裂隙内充填少量泥质,节理裂隙特

征见表2。

2 稳定性分析

2.1 定性分析

各危岩带的整体性较完整,节理裂隙较为发育,发育有两组节理裂隙,受风化作用局部呈破碎状,表面有

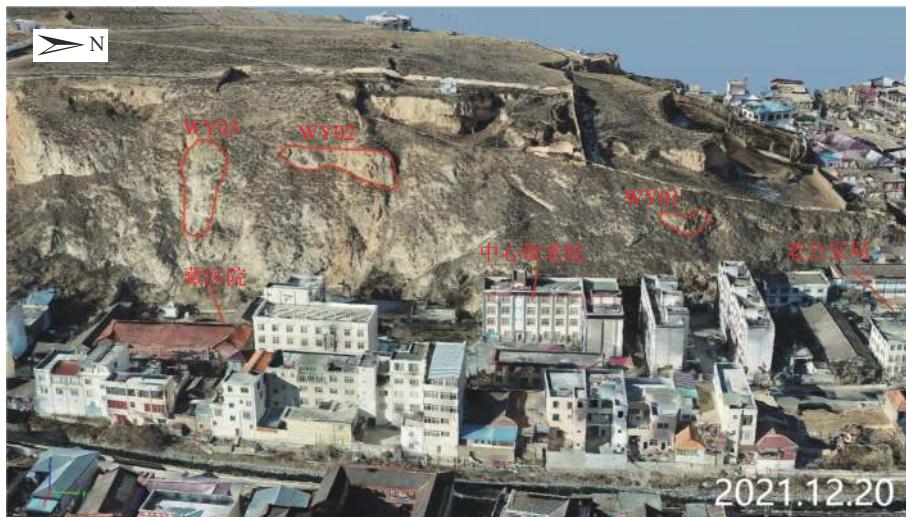


图 4 北侧危岩带分布示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the distribution of hazardous rock zone on the north side

表 1 基本特征表

Table 1 Basic characteristics table

编号	长度/m	分布高程/m	平均宽度/m	面积/m ²	平均厚度/m	体积/m ³	物质组成
WY01	35	3 355 ~ 3 366	10	358.7	3.5	1 255.45	
WY02	105	3 340 ~ 3 370	30	328.1	3	9 849.3	
WY03	45	3 341 ~ 3 368	20	907.4	3.5	3 174.9	
WY04	50	3 363 ~ 3 391	12	607.4	3	1 822.2	由碎裂状砂岩、板岩组成
WY05	70	3 360 ~ 3 382	18	1 215.2	3.5	4 253.2	
WY06	40	3 365 ~ 3 380	10	396.1	3.5	1 291.85	
WY07	60	3 343 ~ 3 354	5	252.7	3.5	989.45	

表 2 节理裂隙特征表

Table 2 Joint fracture characteristics table

编号	平均坡度/(°)	坡向/(°)	岩层产状	岩性	节理裂隙		失稳模式
WY01	70	85	210°∠30°		①组: 210°∠30°, 裂隙延伸长度约0.5~1.0 m, 局部张开度1 cm	②组: 310°∠45°, 裂隙延伸长度约0.4~0.9 m, 局部张开度2 cm	倾倒式
WY02	70	92	180°∠20°		①组: 205°∠34°, 裂隙延伸长度约0.6~1.2 m, 局部张开度1.5 cm	②组: 306°∠44°, 裂隙延伸长度约0.5~1.0 m, 局部张开度3 cm	坠落式
WY03	70	92	180°∠20°		①组: 205°∠32°, 裂隙延伸长度约1.1~1.5 m, 局部张开度1.5 cm	②组: 304°∠40°, 裂隙延伸长度约1~2.0 m, 局部张开度5 cm	坠落式
WY04	70	92	180°∠20°	薄-中厚层状板岩	①组: 209°∠31°, 裂隙延伸长度约0.8~1.2 m, 局部张开度3 cm	②组: 308°∠41°, 裂隙延伸长度约0.9~2.1 m, 局部张开度4 cm	坠落式
WY05	72	101	180°∠20°		①组: 207°∠33°, 裂隙延伸长度约0.6~1.2 m, 局部张开度4 cm	②组: 306°∠45°, 裂隙延伸长度约1.3~2.7 m, 局部张开度6 cm	坠落式
WY06	76	107	180°∠20°		①组: 211°∠32°, 裂隙延伸长度约0.7~1.5 m, 局部张开度5 cm	②组: 312°∠41°, 裂隙延伸长度约0.8~2.2 m, 局部张开度6 cm	倾倒式
WY07	72	101	180°∠20°		①组: 201°∠34°, 裂隙延伸长度约0.5~1.2 m, 局部张开度4 cm	②组: 308°∠44°, 裂隙延伸长度约1.2~2.5 m, 局部张开度4 cm	倾倒式

较多较小的岩石块主要失稳模式为坠落式和倾倒式。L1: 201°~211°∠30°~34°延展长度约0.5~1.5 m, 局部张开度1~5 cm, 存在较少泥土填充; L2: 304°~312°∠40°~45°延展长度约0.4~2.5 m, 局部张开度2~6 cm, 存在较少泥土填充。采用岩体结构面的赤平投影图和

节理玫瑰花图进行定性分析如图5。根据赤平投影图分析两个结构面的交线位于边坡外侧, 倾向与坡向大致相同, 不利于危岩稳定性。因此分析各个危岩带的结构面, WY01 处于基本稳定, WY02、WY03、WY04、WY05、WY06、WY07 处于欠稳定状态。

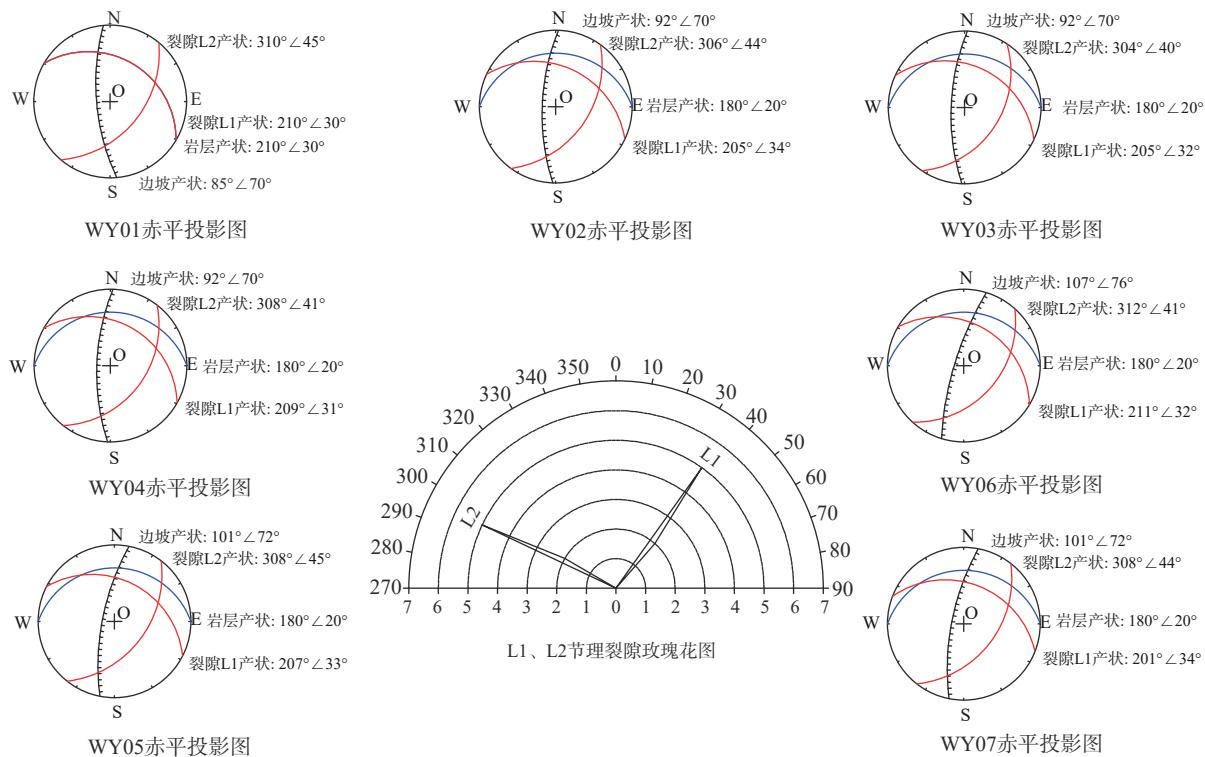


图 5 赤平投影图和节理裂隙玫瑰花图

Fig. 5 Stereographic projection map and rose diagram of joint fissure

2.2 定量分析

(1) 参数确定

本次勘查对斜坡体内主要土层进行了取样及室内测试。在钻孔和探槽中采取粉质黏土 6 组、碎块石土 4 组和基岩 12 组, 并且在规定的时间内进行封口和打上标签, 将其存放在阴凉、干燥的地方, 然后运输到室内进行直剪试验, 可满足稳定性评价要求, 综合室内试验及参数反演, 获得了各土层的物理力学参数, 见表 3。

表 3 岩土物理力学参数取值

Table 3 Values of geotechnical physical and mechanical parameters

岩土层	重度指标		抗剪强度指标			
	天然状态 / (kN·m ⁻³)	饱水状态 / (kN·m ⁻³)	天然状态		暴雨状态	
			黏聚力 / kPa	内摩擦角 / °	黏聚力 / kPa	内摩擦角 / °
粉质黏土	19.0	20.5	19	20	15	17
碎石土	20.5	21.5	12	32	10	28.5
强风化板岩	23.9	24.1	-	-	-	-
中风化板岩	24.9	25.8	425	38.2	-	-

(2) 危岩体计算

选取危岩倾倒式和危岩坠落式的计算模型, 结合万岁山斜坡的 7 个危岩带对危岩体进行稳定性计算, 选取

天然状态、暴雨状态、地震状态三种工况进行计算分析, 计算模型如下:

① 倾倒式危岩稳定性计算

当危岩破坏由后缘岩体抗拉强度控制, 且危岩体重心在倾覆点之外时, 危岩稳定性系数:

$$K = \frac{\frac{1}{2}f_{lk} \frac{H}{\sin\beta} \left[\frac{2}{3} \frac{H-h}{\sin\beta} + \frac{b}{\cos\theta} \cos(\beta-\theta) \right]}{W \cdot a + Q \cdot h_0 + V \left[\frac{H-h}{\sin\beta} + \frac{h_w}{3 \sin\beta} + \frac{b}{\cos\theta} \cos(\beta-\theta) \right]} \quad (1)$$

危岩体重心在倾覆点之内时, 危岩稳定性系数:

$$K = \frac{\frac{1}{2}f_{lk} \cdot \frac{H-h}{\sin\beta} \cdot \left[\frac{2}{3} \frac{H-h}{\sin\beta} + \frac{b}{\cos\theta} \cos(\beta-\theta) \right] + W \cdot a}{Q \cdot h_0 + V \left[\frac{H-h}{\sin\beta} + \frac{h_w}{3 \sin\beta} + \frac{b}{\cos\theta} \cos(\beta-\theta) \right]} \quad (2)$$

式中: V —裂隙水压力 / (kN·m⁻¹), $V = \frac{1}{2}\gamma_w h_w^2$;

Q —地震力 / (kN·m⁻¹), 按公式 $Q = \xi_e \cdot W$ 确定, 式中地震水平作用系数 6 级烈度地区 ξ_e 取 0.05;

h —后缘裂隙深度 / m;

h_w —后缘裂隙充水高度 / m;

H —后缘裂隙上端到未贯通段下端的垂直距离 / m;

a ——危岩体重心到倾覆点的水平距离/m;
 b ——后缘裂隙未贯通段下端到倾覆点之间的水平距离/m;
 h_0 ——危岩体重心到倾覆点的垂直距离/m;
 f_{lk} ——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;
 θ ——危岩体与基座接触面倾角/(°), 外倾时取正值, 内倾时取负值;
 β ——后缘裂隙倾角/(°);
 W ——危岩体自重/kN。

当危岩的破坏由底部岩体抗拉强度控制时, 按下式计算:

$$K = \frac{\frac{1}{3}f_{lk} \cdot b^2 + Wa}{Q \cdot h_0 + V \left(\frac{1}{3} \frac{h_w}{\sin \beta} + b \cos \beta \right)} \quad (3)$$

式中各符号意义同前。

对于孤立具有缓倾软弱结构面的危岩体, 后缘无裂隙水压力, 其计算时要考虑风力作用, 稳定性按下式计算:

$$K = \frac{\frac{1}{3}f_{lk} \cdot b^2 + Wa}{(Q + F_{风}) \cdot h_0} \quad (4)$$

式中: $F_{风}$ ——风力, $F = \rho S (v \sin \omega)^2$;

ρ ——空气密度, 标准状态下 $\rho = 1.293 \text{ kg/m}^3$;

S ——迎风面积;

v ——风速, 计算时取 $v = 10 \text{ m/s}$;

ω ——风向与迎风面积间的夹角/(°)。

其他各符号意义同前。

②坠落式危岩稳定性计算

对后缘有陡倾裂隙的崩塌式危岩按下列二式计算, 稳定性系数取两种计算结果中的较小值:

$$K = \frac{c(H-h) - Q \tan \varphi}{W} \quad (5)$$

$$K = \frac{\zeta \cdot f_{lk} \cdot (H-h)^2}{Wa_0 + Qb_0} \quad (6)$$

式中: ζ ——危岩抗弯力矩计算系数, 依据潜在破坏面形态取值, 一般可取 $1/12 \sim 1/6$, 当潜在破坏面为矩形时可取 $1/6$;
 a ——危岩体重心到潜在破坏面的水平距离/m;
 b_0 ——危岩体重心到过潜在破坏面形心的铅垂距离/m;
 f_{lk} ——危岩体抗拉强度标准值/kPa, 根据岩石抗拉强度标准值乘以0.20的折减系数确定;
 c ——危岩体黏聚力标准值/kPa;
 φ ——危岩体内摩擦角标准值/(°)。

其他符号意义同前。

对后缘无陡倾裂隙的倾倒式危岩按下列二式计算, 稳定性系数取两种计算结果的较小值:

$$K = \frac{cH_0 - Q \tan \varphi}{W} \quad (7)$$

$$K = \frac{\zeta \cdot f_{lk} \cdot H_0^2}{W \cdot a_0 + Q \cdot b_0} \quad (8)$$

式中: H_0 ——危岩体后缘潜在破坏面高度/m;

f_{lk} ——危岩体抗拉强度标准值/kPa, 根据岩石抗拉强度标准值乘以0.30的折减系数确定。

其他符号意义同前。

计算工况共取三种工况进行计算分析:

1)天然状态(自重+裂隙水压力, 其中裂隙充水高度取裂隙深度的 $1/5 \sim 1/2$);

2)暴雨状态(饱和自重+裂隙水压, 其中裂隙充水高度取裂隙深度的 $1/2 \sim 2/3$);

3)地震状态(自重+裂隙水压力+地震力, 其中裂隙充水高度取裂隙深度的 $1/2 \sim 2/3$)。

计算结果见表4。

表4 危岩稳定性系数及稳定性评价

Table 4 Stability coefficients and stability evaluation of hazardous rocks

编号	WY01	WY02	WY03	WY04	WY05	WY06	WY07
天然状态	稳定系数	1.35	0.92	1.11	0.71	1.14	0.71
	稳定性评价	基本稳定	不稳定	欠稳定	不稳定	不稳定	欠稳定
暴雨状态	稳定系数	1.31	0.90	1.10	0.69	1.09	0.69
	稳定性评价	基本稳定	不稳定	欠稳定	不稳定	不稳定	欠稳定
地震状态	稳定系数	1.12	0.76	0.97	0.53	0.91	0.53
	稳定性评价	欠稳定	不稳定	不稳定	不稳定	不稳定	不稳定

3 危岩失稳后的落石运动轨迹预测

3.1 计算模型

RAMMS-ROCKFALL 模块是由苏黎世联邦理工学院力学中心和 WSL 雪地和雪崩研究所开发的,可用于研究岩石滚落过程中的刚体运动,预测三维地形中的岩石轨迹,与现有的落石模块不同,因为岩石与地面之间的相互作用并非完全由简单的回弹力学来控制,而是由摩擦(耗散)的岩石和地面相互作用来控制着岩跳的发生。该模块的计算模型有三个落石的平移速度和三个旋转速度共六个状态变量,采用硬接触的刚体拉格朗日力学模型。

在自由飞行中岩石旋转和陀螺力的三维运动方程是

$$\mathbf{M}\mathbf{u} - h(q, u) = 0 \quad (9)$$

$$h(q, u) = \begin{bmatrix} F_g + D \\ G \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中: \mathbf{M} ——常数和对角质量矩阵(包含质量和三个惯性矩 \mathbf{I}), 矢量 \mathbf{u} 包含岩石的三个平移速度和三个旋转速度;

F_g ——重力加速度, 取 9.8 m/s^2 ;

D ——实施阻力, 表示树木、灌木丛和土壤变形的影响;

G ——陀螺力, 可以使不规则形状的岩石变得直立并围绕滚动轴旋转。

使用非光滑接触动力学方法, 将接触建模为具有库仑摩擦的硬单边约束, 对于接触的情况, 运动的控制方程变成

$$\mathbf{M}\mathbf{u} - h(q, u) = \lambda W(q) \quad (11)$$

式中: λ ——接触力;

$W(q)$ ——接触力的方向。

根据接触点处岩体的配置, 可能存在许多主动接触力, 正是这些接触力组合模拟落石固有的复杂旋转和轨迹偏差, 这种硬接触刚体方法的优点是, 接触力直接施加在这些接触点周围, 与冲击的配置(方向和动力学)有关。

在刚体方法中的接触算法考虑了接触时岩石的旋转速度, 因为力施加在远离质心的点上, 并且方向与具有三个平移和旋转自由度、力矩和力矩的物体的冲击配置有关, 所以力臂可以起作用, 产生代表真正冲击力学的旋转和回弹。

RAMMS: ROCKFALL 模块中有地面接触期间地形变形引起的黏塑性阻力和植被阻力这两种阻力。引入

了一个额外的滑移相关阻力, 以解释岩石冲击下软土发生的黏塑性变形, 在较硬的基底材料(如砂浆层)中也会遇到较大的黏塑性变形, 砂浆层颗粒之间的摩擦会耗散能量, 黏塑性地面阻力公式为

$$F_v = -\frac{m}{2} C_v v_s^2 \quad (12)$$

岩石在地形表面上滑动, 阻力(F_v)与岩石速度(v_s^2)的平方以及岩石质量(m)成比例, 较重、移动速度较快的岩石在穿透地表时会比较小、移动速度较慢的岩石受到更多的阻力, 阻力与岩石的总动能成正比, 阻力系数(C_v)在 0.0 m^{-1} (硬)和 1.0 m^{-1} (软)之间变化。

传统方法中选取的 Rockfall 软件是一款二维数值模拟软件, 通过对危岩和边坡剖面的基本参数进行多次模拟和概率统计, 得到的模拟结果, 存在剖面选取是否合理和模拟结果缺少三维空间分析等问题。相比之下, RAMMS: ROCKFALL 是一款三维数值模拟软件, 该软件结合危岩和边坡的三维参数进行数值模拟, 得到的数据更加精确、有效, 还能得到三维轨迹图, 该轨迹图有利于预测危岩崩塌后的空间分布和划分威胁区。

3.2 模拟参数选取

RAMMS-ROCKFALL 模型考虑到真实的岩石形状, 计算出它们在三维空间中的运行轨迹, 包括弹跳高度、落石运动和旋转速度、总动能和接触点的冲击力。对广义岩石形状进行建模, 将真正的岩石形状引入到 ROCKFALL 模型中, 可以更好地包含由不同地质背景产生的岩石形状和大小的自然变化。利用这一点, 可更接近于模拟岩石坠落的运行行为的真实性质, 整合岩石形状和现场特定岩石坠落危险的释放运动学特征。提取危岩的三维点云, 建立三维模型见图 6。

地形选取中等硬度, 存在岩石碎屑和浅表层土壤, 较少植被。根据 7 处危岩带的形态, 危岩坠落初期速度很小, 初速度取 0, 落石质量根据三维点云取值。根据已识别的 7 个危岩带, 在三维地形上标记为释放区域, 每处落石选取 10 个随机方向。模拟结果包括速度、动能、跳跃高度和旋转速度, 以及落石运动轨迹和平面分布图等。

3.3 模拟结果分析和评价

从倾倒和坠落两种失稳模式进行模拟, 得到图 7 危岩崩落轨迹图。从模拟动画、数据和轨迹分析, 危岩失稳后可分为启动、运动弹跳、堆积减速三个阶段, 启动阶段危岩失稳崩落后以自由落体下坠; 运动弹跳阶段危岩碰撞坡面后开始弹跳和翻滚; 堆积减速阶段危岩空中飞行到较缓坡面处后开始滚动下滑, 最后堆积于平坦处。

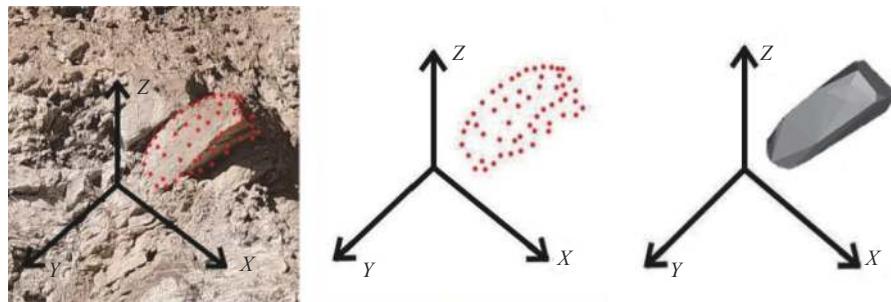
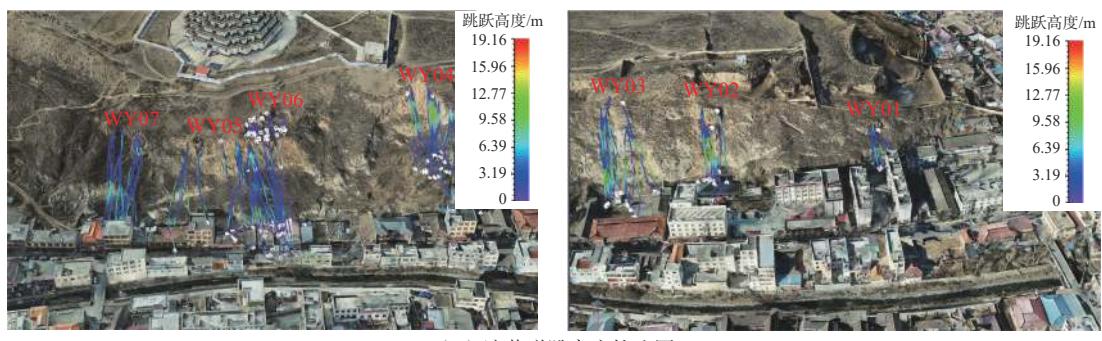
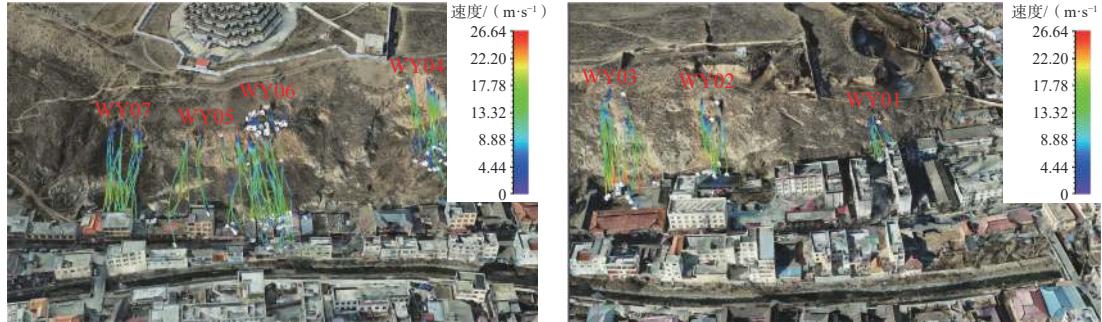


图 6 岩石三维形状建立

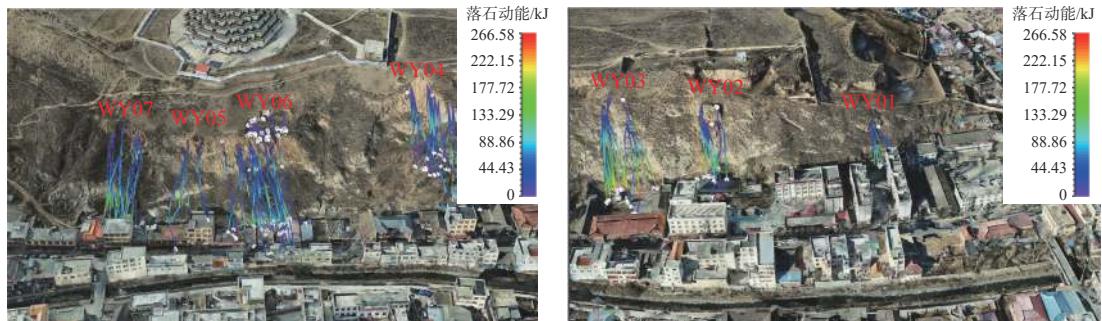
Fig. 6 Establishment of three-dimensional shape of rock



(a) 滚落弹跳高度轨迹图



(b) 滚落速度轨迹图



(c) 滚落动能轨迹图

图 7 危岩体崩落轨迹图

Fig. 7 Hazardous rock mass falling trajectory diagram

由于万岁山斜坡整体坡度较大,结合图 7(a)滚落弹跳高度轨迹图和图 8 滚落弹跳高度-位置关系曲线分析,斜坡上的落石在运动弹跳阶段前期达到最大弹跳高度。由图 7(b)和图 7(c)分析落石在运动弹跳阶段后期

速度和动量最大,晚于最大滚落弹跳高度。通过图 8 滚落速度-位置关系曲线和滚落动能-位置关系曲线发现,滚落最大的速度和动能基本保持一致,最大弹跳高度对其有一定的影响,且不是完全的。

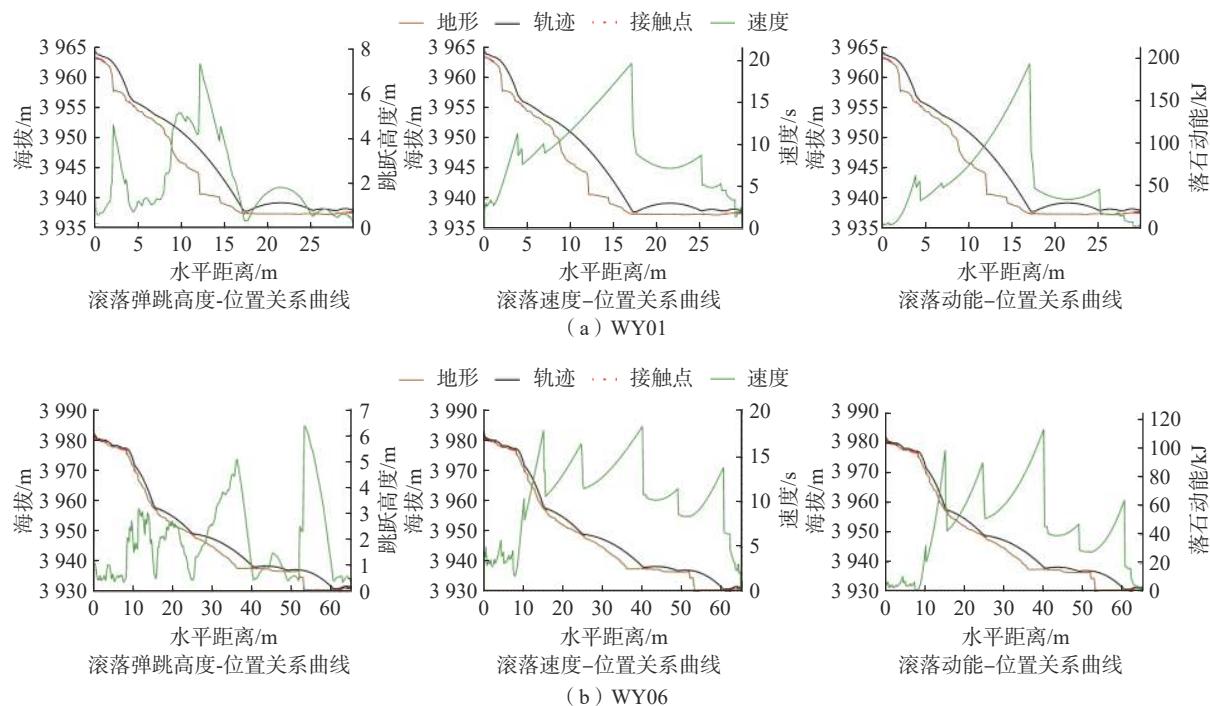


图 8 危岩体崩落曲线图

Fig. 8 Dangerous rock mass caving curve diagram

分析轨迹图发现,居民房屋与斜坡位置关系不同,威胁程度和对象也不同。如果下方居民在靠近斜坡处修建后院,落石则落入院内,则落石威胁院内人员,如 WY01、WY03、WY04;如果居民房屋靠近斜坡且有一定距离,那么落石大部分落于房屋与斜坡之间,如 WY02、WY07;如果居民房屋紧靠斜坡修建,那么落石大部分落于房顶,且有少部分在房顶弹跳后落入街道,如 WY05、WY06。

选取 WY01 和 WY06 位置关系曲线分析, WY01 的弹跳高度、速度和动能均出现了三次峰值,其原因是坡面较陡,整体坡度约 60° ,启动后落石撞击坡体,增加了水平方向速度,使落石远离坡面直接落入威胁区,如果下方有植被,会迅速削弱速度和动能;WY06 处由于坡面较缓,整体坡度约 40° ,落石启动后,会在坡面发生持续翻滚,位置曲线关系图出现多个峰值,在低于 30° 的坡面上减速,高于 30° 坡面上加速。

由上述分析可得,落石每次在坡体上发生弹跳,会在一定程度上削弱落石的能量,增加落石的水平速度,若坡度为 $0^\circ \sim 30^\circ$,则落石在坡体上弹跳次数较多,能量削弱也增多,落石做减速运动,造成的伤害较小;若坡度为 $30^\circ \sim 60^\circ$,则落石在坡体上发生弹跳次数较少,削弱的能量少,落石做加速运动,造成的伤害较大;若坡度为 $60^\circ \sim 90^\circ$,则落石大部分时间做自由落体运动,造成

的伤害最大。位置关系曲线出现峰值次数即落石撞击坡体次数,不仅仅与坡体坡度有关,还与高度、坡形、坡体组成物质、岩石形状等有关。

3.4 理论计算

根据《崩塌与落石》中的落石运动速度计算 WY06 处的落石速度^[25]。取图 8 里 WY06 处剖面,进行边坡简化并提取边坡参数见图 9。

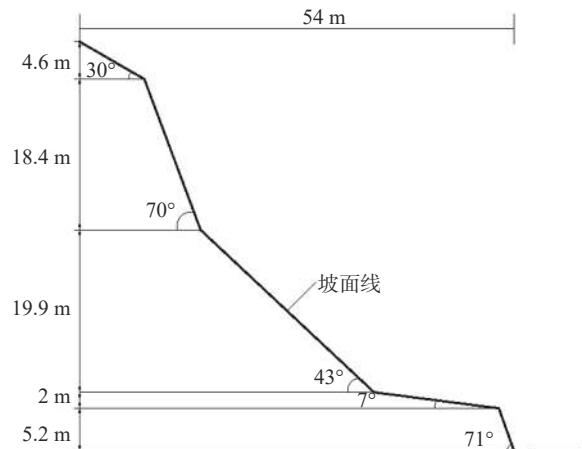


图 9 WY06 坡面简化图

Fig. 9 WY06 slope simplified map

根据苏联尼·米·罗依尼什维里教授的落石速度计算方法,该坡面为折线山坡其中缓坡小于 30° ,陡坡大于

30°且小于等于60°。第一个坡段为单一斜坡运动,计算公式为

$$V = \sqrt{2gH(1 - K \cot \alpha)} \quad (13)$$

式中: H —落石坠落高度/m;

g —重力加速度/(m·s⁻²);

α —坡度/(°);

K —落石沿斜坡运动受到的有关阻力特征系数,取值如表5。

表5 阻力特征系数 K 值计算公示表

Table 5 Calculation table for coefficient K of resistance characteristic

顺序	山坡坡度角/(°)	K 值计算公式
1	0~30	0.41+0.004 3a
2	30~60	0.543-0.004 8a+0.000 162a ²
3	60~90	1.05-0.012 5a+0.000 002 5a ²

其余坡段终端速度计算公式为

$$V_j(i) = \sqrt{V_0(i) + 2gH(1 - K_i \cot \alpha_i)} \quad (14)$$

式中: $V_0(i)$ —第 i 段坡段起点落石的初速度,若 $\alpha_{i-1} > \alpha_i$, 则 $V_0(i) = V_j(i-1) \cos(\alpha_{i-1}) - \alpha_i$; 若 $\alpha_{i-1} < \alpha_i$, 则 $V_0(i) = V_j(i-1)$;

α_i —第 i 段坡段的坡度。

将计算所得到的速度-位置曲线代入图8中WY06的滚落速度-位置曲线图得到图10。根据图10的对比,理论计算得到的速度变化率更大,变化频率小,落石与坡面碰撞次数较少,因此岩石的形状和边坡的坡形对于落石速度大小及方向影响较大。

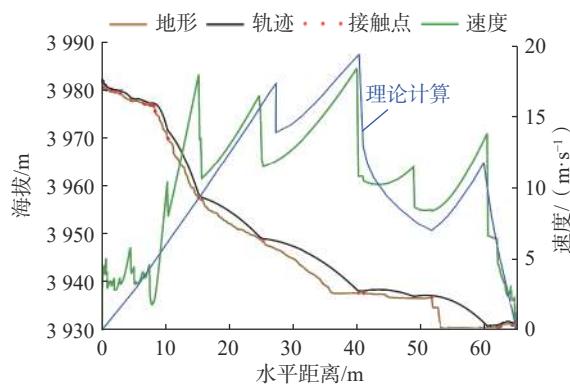


图10 WY06 滚落速度-位置曲线图

Fig. 10 WY06 rolling speed-position curve

理论计算对坡体和落石进行了简化处理,减少了坡面及落石对落石轨迹的影响,存在剖面选取是否合理和计算结果缺少三维空间分析等问题,相比较于理论计算, RAMMS-ROCKFALL 考虑的落石影响因数更多,得

到的计算结果更加合理,更加接近实际情况,并且能得到落石在三维空间中的运行轨迹,计算结果更加有利于精确预测落石,并有效地采取防治措施。

3.5 威胁区识别

根据模拟结果,在三维图中分别圈出下方威胁区域居民房屋、院内、街道,通过软件 Menu Statistics → Reach Probability (Source) 导出各区域到达概率,整理得到表6,其中:

$$\text{到达概率} = \frac{\text{指定区域停止的岩石数量}}{\text{危岩带生成的岩石总量}} \times 100\% \quad (15)$$

危岩带下方的地形直接影响到落石的威胁对象和到达威胁区概率,由表6和轨迹图WY04和WY06处可看出,落石下方有缓坡和植被的情况下可在一定程度上削弱最大弹跳高度、最大速度和截获部分落石,并且能改变落石轨迹。由于RAMMS-ROCKFALL模拟时考虑了三维地形和岩石三维形状,模拟时发现并不是全部的落石落入威胁区,部分落石停留在斜坡上缓和坡段,模拟中虽然未统计到威胁中,但并不代表这些落石的威胁消除,今后可能发展成新的危岩。根据落石到达的轨迹图,识别出斜坡危岩威胁范围见图11。

表6 落石威胁对象和到达威胁区概率

Table 6 Rockfall threat object and probability of arrival at threat zones

编号	威胁对象	到达威胁区概率/%	合计/%
WY01	居民房屋	41.33	96.8
	院内人员	55.47	
WY02	居民房屋	88.32	95.62
	院内人员	7.30	
WY03	居民房屋	11.25	96.91
	院内人员	85.66	
WY04	居民房屋	26.66	26.66
	居民房屋	81.78	
WY05	街道行人和汽车	15.45	97.23
	居民房屋	35.19	
	街道行人和汽车	22.37	
WY06	居民房屋	99.51	57.56
	街道行人和汽车	22.37	
WY07	居民房屋	99.51	

4 结论及建议

本文以万岁山斜坡上的危岩带作为研究对象,通过倾斜摄影分带,然后在不同危岩带上识别出典型危岩,并采用了定性定量分析的方法对危岩带上的典型危岩进行了稳定分析,并借助RAMMS-ROCKFALL对各处危岩进行了运动轨迹的模拟,得到以下结论及建议:



图 11 危岩威胁区

Fig. 11 Distribution of hazardous rock zone

(1)斜坡整体性较完整,发育有两组裂隙,受风化作用表面有较多较小的岩石块主要失稳模式为坠落式和倾倒式。共发育有7处危岩带,对危岩带上危岩进行了定性定量分析,天然工况下WY01处于基本稳定状态,WY03、WY05、WY07为欠稳定状态,WY02、WY04、WY06为不稳定状态。暴雨工况下WY01为基本稳定状态,WY03、WY05、WY07为欠稳定状态,WY02、WY04、WY06为不稳定状态。地震工况下WY01为不稳定状态,WY02、WY03、WY04、WY05、WY06、WY07为不稳定状态。

(2)用RAMMS-ROCKFALL模拟危岩的滚动轨迹,得出了滚动弹跳的高度、速度、动能与轨迹、位置之间的关系。分析得到居民房屋与斜坡位置关系不同,威胁程度和对象也不同;落石下方有缓坡和植被的情况下可在一定程度上削弱最大弹跳高度、最大速度和截获部分落石,并且能改变落石轨迹,直接影响到落石的威胁对象和到达威胁区概率;位置关系曲线出现峰值次数即落石撞击坡体次数及落石运动情况,不仅与坡体坡度有关,还与高度、坡形、坡体组成物质、岩石形状等有关。通过理论计算对比发现RAMMS-ROCKFALL考虑了三维地形和岩石三维形状,得到的模拟结果更加合理,更加接近现实情况。RAMMS-ROCKFALL是一款模拟斜坡落石风险的软件,得到的模拟结果对于落石灾害研究和落石灾害治理工程具有很好的参考价值。

(3)结合落石轨迹分析及危岩稳定性评价,万岁山斜坡对下方居民房屋和街道行人产生的威胁较大,应该尽快采取治理措施。结合斜坡区地形地貌、地质结构和变形破坏特征及斜坡的长度、斜体上分布的保护对

象等,建议采用主动防护网+锚杆护坡+坡面清危的治理方案。

参考文献(References):

- [1] VOLKWEIN A, SCHELLENBERG K, LABIOUSE V, et al. Rockfall characterisation and structural protection—a review [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2011, 11(9): 2617–2651.
- [2] FITYUS S G, GIACOMINI A, BUZZI O. The significance of geology for the morphology of potentially unstable rocks [J]. *Engineering Geology*, 2013, 162: 43–52.
- [3] LEINE R I, SCHWEIZER A, CHRISTEN M, et al. Simulation of rockfall trajectories with consideration of rock shape [J]. *Multibody System Dynamics*, 2014, 32(2): 241–271.
- [4] HARVEY G J M. Rock-shape and its role in rockfall dynamics [D]. Durham, North East England, UK: Durham University, 2015
- [5] KIM D H, GRATCHEV I, BERENDS J, et al. Calibration of restitution coefficients using rockfall simulations based on 3D photogrammetry model: A case study [J]. *Natural Hazards*, 2015, 78(3): 1931–1946.
- [6] CROSTA G B, AGLIARDI F, FRATTINI P, et al. Key issues in rock fall modeling, hazard and risk assessment for rockfall protection [M]. *Engineering Geology for Society and Territory - Volume 2*. Cham: Springer International Publishing, 2015: 43–58.
- [7] LAN Hengxing, LI Langping, WU Yuming. Stochasticity of rockfall trajectory revealed by a field experiment repeated on a single sample [M] // *Engineering Geology for Society and Territory - Volume 2*. Cham: Springer International Publishing,

- 2015; 1713 – 1721.
- [8] 周游, 黄静美, 谢红强. 西南地区某高速公路边坡危岩体稳定可靠性评价 [J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(增刊2): 1022 – 1029. [ZHOU You, HUANG Jingmei, XIE Hongqiang. Reliability evaluation of stability of dangerous rock mass on a highway slope in southwest China [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(Sup 2): 1022 – 1029. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 贺凯, 高杨, 殷跃平, 等. 基于岩体损伤的大型高陡危岩稳定性评价方法 [J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(4): 82 – 89. [HE Kai, GAO Yang, YIN Yueping, et al. Stability assessment methods for huge high-steep unstable rock mass based on damage theory [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(4): 82 – 89. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 孙琪皓, 马凤山, 刘港, 等. G109国道拉萨—羊八井段喀努纳危岩体变形破坏模式及稳定性分析 [J]. 工程地质学报, 2021, 29(2): 495 – 507. [SUN Qihao, MA Fengshan, LIU Gang, et al. Deformation failure mode and stability analysis of Kanuna unstable rock mass in Lhasa-Yangbajing section of G109 national highway [J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(2): 495 – 507. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 张继旭, 王林峰, 夏万春. 基于模糊失效准则的危岩稳定可靠度计算 [J]. 防灾减灾工程学报, 2022, 42(4): 695 – 704. [ZHANG Jixu, WANG Linfeng, XIA Wanchun. Reliability calculation of perilous rock stability based on fuzzy failure criterion [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(4): 695 – 704. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 马显东, 周剑, 张路青, 等. 基于崩塌滚石运动特征的防护网动态响应规律 [J]. 地球科学, 2022, 47(12): 4559 – 4573. [MA Xiandong, ZHOU Jian, ZHANG Luqing, et al. Dynamic response laws of flexible rockfall barriers based on movement characteristics of rockfall [J]. Earth Science, 2022, 47(12): 4559 – 4573. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 马显东, 周剑, 张路青, 等. 强震区公路沿线崩塌危岩体特征提取及失稳分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(增刊1): 2901 – 2914. [MA Xiandong, ZHOU Jian, ZHANG Luqing, et al. Feature extraction and instability analysis of collapse rock mass along highway in strong earthquake area [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(Sup 1): 2901 – 2914. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 姚富潭, 吴明堂, 董秀军, 等. 基于贴近摄影测量技术的高陡危岩体结构面调查方法 [J]. 成都理工大学学报 (自然科学版), 2023, 50(2): 218 – 228. [YAO Futan, WU Mingtang, DONG Xiujun, et al. Investigation method of discontinuity in high and steep dangerous rock mass based on nap of the object photogrammetry [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2023, 50(2): 218 – 228. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 谢金, 杨根兰, 覃乙根, 等. 基于无人机与Rockfall的危岩体结构特征识别与运动规律模拟 [J]. 河南理工大学学报 (自然科学版), 2021, 40(1): 55 – 64. [XIE Jin, YANG Genlan, QIN Yigen, et al. Structural feature recognition and motion law simulation of dangerous rock mass based on UAV and Rockfall [J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2021, 40(1): 55 – 64. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 刘福臻, 李旭德, 王军朝, 等. 基于无人机和Rockfall Analyst的崩塌落石特征分析与运动学模拟——以察雅县崩塌落石为例 [J]. 自然灾害学报, 2021, 30(3): 171 – 180. [LIU Fuzhen, LI Xude, WANG Junchao, et al. Characteristic analysis and kinematic simulation of rockfall based on UAV and Rockfall Analyst: A case study of rockfall in Chaya County [J]. Journal of Natural Disasters, 2021, 30(3): 171 – 180. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 康尘云. 基于倾斜摄影的高位危岩特征获取和稳定性评价——以重庆万州观音山危岩带为例 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(5): 66 – 75. [KANG Chenyun. Feature acquisition and stability evaluation of high dangerous rock mass based on oblique photography: A case study at Guanyinshan in Wanzhou, Chongqing Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(5): 66 – 75. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 何宇航, 裴向军, 梁靖, 等. 基于Rockfall的危岩体危险范围预测及风险评价——以九寨沟景区悬沟危岩体为例 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(4): 24 – 33. [HE Yuhang, PEI Xiangjun, LIANG Jing, et al. Risk assessment and range prediction of dangerous rockmass based on rockfall: A case study of the Xuangou Collapse [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(4): 24 – 33. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 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. [ZHANG Yonghai, XIE Wuping, LUO Zhongxing, et al. Stability evaluation and rockfall trajectory analysis of the Baimagou dangerous rock mass in Mingshan County of Sichuan Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(4): 37 – 46. (in Chinese with English abstract)]

- [20] 黄海宁, 黄健, 周春宏, 等. 无人机影像在高陡边坡危岩体调查中的应用 [J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(6): 149 – 155. [HUANG Haining, HUANG Jian, ZHOU Chunhong, et al. Application of UAV images to rockfall investigation at the high and steep slope [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(6): 149 – 155. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 汪莹鹤, 李时亮, 李炜, 等. 张吉怀铁路土峪隧道危岩落石特征及防护措施研究 [J]. 铁道标准设计, 2023, 67(11): 126 – 133. [WANG Yinghe, LI Shiliang, LI Wei, et al. Study on the characteristics and protection design of Tuyu tunnel rockfall on Zhangjiajie-Jishou-Huaihua railway [J]. Railway Standard Design, 2023, 67(11): 126 – 133. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 庞鑫, 袁明, 卢渊, 等. 基于无人机 LiDAR 仿地飞行技术的高陡边坡危岩体快速识别方法 [J]. 地质科技通报, 2023, 42(6): 21 – 30. [PANG Xin, YUAN Ming, LU Yuan, et al. Rapid identification method for the dangerous rock mass of a high-steep slope based on UAV LiDAR and ground imitation flight [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(6): 21 – 30. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 王朋伟, 安玉科. 基于倾斜摄影与 InSAR 技术的高位崩塌风险识别 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(5): 169 – 180. [WANG Pengwei, AN Yuke. High-level collapse risk identification based on oblique photography and InSAR technology [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(5): 169 – 180. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 曾启强, 王立朝, 刘伟, 等. 广州地区岩质边坡崩塌影响范围计算方法初探 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(5): 159 – 168. [ZENG Qiqiang, WANG Lichao, LIU Wei, et al. Calculation methods of the collapse influence range of a simple rock slope in the Guangzhou Area [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(5): 159 – 168. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 胡厚田. 崩塌与落石 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1989. [HU Houtian. Collapse and falling rocks [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1989. (in Chinese)]