

基于倾斜摄影的高位危岩特征获取和稳定性评价

康尘云

Feature acquisition and stability evaluation of high dangerous rock mass based on oblique photography: A case study at Guanyinshan in Wanzhou, Chongqing Province

KANG Chenyun

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202203035>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

无人机载LiDAR和倾斜摄影技术在地质灾害隐患早期识别中的应用

The application of UAV LiDAR and tilt photography in the early identification of geo-hazards

贾虎军, 王立娟, 范冬丽 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 60-65

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

倾斜摄影测量技术在崩塌隐患调查评价中的应用

`\${suggestArticle.titleEn}`

郭学飞, 焦润成, 曹颖, 闫驰, 王晟宇, 赵丹凝 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(1): 65-69

河北阜平县石滩地村危岩体变形破坏模式及稳定性分析

`\${suggestArticle.titleEn}`

刘贺军, 吴玉涛, 李晓乐, 于鸿坤, 杨为民 中国地质灾害与防治学报. 2018, 29(4): 50-57

贵州纳雍岭镇危岩带稳定性及危害范围分析

`\${suggestArticle.titleEn}`

程宇, 张健, 陈进, 龙举 中国地质灾害与防治学报. 2019, 30(4): 9-15

云南鲁甸地震红石岩堰塞湖右岸特高边坡综合监测及变形特征分析

Comprehensive monitoring and deformation analysis of extra high slope on the right bank of Hongshiyan Dammed Lake in Ludian Earthquake

郭延辉, 杨溢, 高才坤, 杨志全 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 30-37



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202203035

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.

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

康尘云

(陕西铁道工程勘察有限公司, 陕西 西安 710043)

摘要: 观音山危岩带对拟建恩广高速万开段庙垭隧道、苕溪河特大桥和临近居民构成安全威胁, 急需调查治理, 但因危岩地处高位, 传统调查、评价手段难以实施。通过地质调查、钻孔取样和室内试验获取基础地质信息; 利用倾斜摄影对危岩进行识别、几何特征获取和边界条件分析; 以赤平投影法和刚体极限平衡法分别进行危岩带、危岩体的稳定性分析; 对不稳定危岩单体利用 Rocfall 软件进行运动学模拟。结果表明: 陡崖发育 6 处主要危岩单体, 体积 400 ~ 5 000 m³ 不等; 岩体受 2 组节理面切割和结构面组合控制, 整体稳定性较差, 易发生坠落式和倾倒式破坏; 其中 W3、W6 危岩体在暴雨工况下处于不稳定状态, 对拟建工程形成滚动冲击, 动能为 5 ~ 12 kJ 不等。研究结果可以为观音山危岩治理措施的选型、规模提供设计参数, 为高位危岩的调查防治提供参考, 对利用航测手段提高传统地质调查效率和精度做出了新思考。

关键词: 危岩; 倾斜摄影; 稳定性; 落石模拟; 防灾措施

中图分类号: P642

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2022)05-0066-10

Feature acquisition and stability evaluation of high dangerous rock mass based on oblique photography: A case study at Guanyinshan in Wanzhou, Chongqing Province

KANG Chenyun

(Shaanxi Railway Engineering Survey Co. Ltd., Xi'an, Shaanxi 710043, China)

Abstract: The Guanyin mountain dangerous rock belt poses a security threat to the Miaoya tunnel of the proposed Wankai section of the Enguang Expressway, as well as Zhuxihe Bridge and the neighboring residents. It is urgent to be investigated and controlled. Traditional investigation and evaluation methods are difficult to implement on the high dangerous rock mass. Basic geological information is obtained through geological survey, drilling sampling and experiments, identification, geometric feature acquisition and boundary condition analysis of the dangerous rock mass are carried out by oblique photography, stability analysis of the dangerous rock belts and the dangerous rock masses are carried out by stereographic projection method and rigid body limit balance method, respectively. Simulation is carried out by Rocfall software for unstable dangerous rock. The results show that the cliffs develop six main dangerous rock zones with a volume of 400–5 000 m³, and the rock mass is controlled by two groups of joint surfaces and structural surfaces combination, the overall stability is poor, prone to fall and tipping; among them, the W3 and W6 dangerous rock masses are in an unstable state under heavy rain conditions, forming a rolling impact on

收稿日期: 2021-12-03; 修订日期: 2022-07-05

投稿网址: <https://www.zgdzzhyfzxb.com/>

作者简介: 康尘云(1995-), 男, 陕西乾县人, 地质工程专业, 硕士, 工程师, 主要从事铁路、公路线路的勘察工作。

E-mail: kangchenyun@outlook.com

the proposed project, and the kinetic energy is 5–12 kJ. The research results can provide design parameters for the selection of the control measures of the dangerous rocks in Guanyin Mountain, and provide reference for the investigation and prevention of high dangerous rock mass, it puts forward new idea on the use of aerial survey methods to improve the efficiency and accuracy of traditional geological surveys.

Keywords: perilous rock; oblique photography; stability; rockfall simulation; disaster prevention measures

0 引言

万州区位于重庆市东北部,地处三峡库区腹心,危岩崩塌极为发育,分布广、数量多、危害大。观音山危岩带位于万州高粱镇焦家坪,危岩带顶部后缘、下部坡脚均有居民聚集区,且有拟建恩施至广元国家高速公路穿越,拟建庙垭隧道出洞口、芑溪河特大桥均位于该危岩带影响范围内,亟需对该危岩带展开调查工作,查明危岩单体的发育规模、失稳模式和危害性,提出建议治理措施,以保障交通建设和居民的安全。

据不完全统计,万州范围内分布有翠屏山、小湾、千家岭、太白岩等 30 余处危岩带,不同规模的危岩单体 3 000 多个,危岩的形成机理、破坏模式、防治技术和风险评价一直是该区域的研究热点^[1]。叶四桥等^[2]认为当地危岩发育的内因是深切的河谷、方山台地地貌、水平发育的岩层和泥岩软弱夹层;危岩失稳的激发因素则是风化作用、地下水、暴雨和人类活动;陈洪凯等^[3]将群发性危岩的演化过程概括为河流下切、差异风化、单体形成、单体崩落、群体形成及崩落 5 个阶段;刘广宁等^[4]对万州沿江危岩体进行调查,将其失稳方式分为剪切—滑移式、风化—坠落式、拉裂—倾倒式 3 种,并对其危害性做出了预估;邵其东^[5]通过万州区天生城危岩治理工程实例,提出了后缘裂缝注浆充填、锚索锚固危岩体、混凝土封填岩腔、爆破清除坡面孤石、坡脚设置拦石挡墙的工程措施,取得了良好效果;刘长春等^[6]针对戴家岩危岩,通过计算不同工况下的危岩稳定性,综合破坏概率和承灾体危害程度得出了风险评价模型,孙敬辉等^[7]利用 Rocfall 软件对甑子岩危岩体的危险性等级进行了划分。

现有的研究虽已涉及到危岩成因、评价、防治的各个方面,但仍存在一些问题,如:对人员难以到达的危岩如何提高调查的效率和精度?如何更精准的确定危岩的影响范围?其对构筑物的冲击方式、冲击能量几何?文中研究便针对这些问题,对高位危岩的特征获取、稳定性评价和运动学过程再现进行探究,以揭示此类灾害的成灾机理和危害规律,对于区域内的工程建设和灾害防治具有重要的参考价值。

1 研究区地质背景

研究区位于四川盆地东北缘,属川东平行岭谷,其地形地貌受区域地质构造的影响,山脉走向由北北东转向近东西,为构造侵蚀、剥蚀低山丘陵地貌,总体呈北西高南东低,一般海拔高度约 191 ~ 1 200 m,高差约 1 009 m。区内斜坡多呈折线形,顶部缓,居民聚集,中部为陡崖,危岩发育,下部再次变缓,多为崩坡堆积体。

研究区内由西北向东南近平行分布着假角山背斜、梁马河向斜、铁峰背斜、万县向斜、方斗山背斜等褶皱,为梳状高背斜和宽缓向斜相间排列成隔挡式分布区(图 1)。其中,万县向斜走向 NE20° ~ NE75°,核部产状平缓,翼部靠近背斜处产状变陡。新构造运动以来,万州地区地壳具有缓慢、间歇上升的特点,江河下切、阶地抬升,形成陡崖、陡坡,岩体产生卸荷回弹效应,节理裂隙等结构面发育,在风化、暴雨、地震等激发因素下易发生崩塌破坏。

区域内出露的基岩主要为侏罗系中统沙溪庙组(J_{2s})、侏罗系上统遂宁组(J_{3s})砂岩、泥岩,上覆残坡积(Q_{4^{el+dl}})、崩坡积(Q_{4^{col+dl}})、冲洪积(Q_{4^{al+pl}})等第四系松散堆积物。砂岩:灰色、灰绿色厚层水云母胶结的细—中粒岩屑长石砂岩,含泥砾,具交错层理,中厚—巨厚层状构造,岩质较硬;泥岩:紫红、砖红色,黏土矿物为主,泥质结构,含硅质钙质结核,局部见白色纤维状石膏,岩质较软;覆盖层多为可塑—硬塑粉质黏土、碎块石土,碎块石含量 30% ~ 60% 不等,厚度差异大。

危岩带以上地表水体不发达,主要零星的水塘、水田;地下水为第四系松散层孔隙水和碎屑岩类裂隙水,接受大气降水补给,水量较贫乏。

据四川省地震办公室《四川地震目录》(1977),临近区域内曾发生过 7 次较大的地震,最大为 1856 年 6 月 10 日发生的 6.3 级小南海地震,此后未发生过灾害性强震,区域地质环境处于相对稳定状态。

2 危岩带发育特征

2.1 平面分布特征

观音山危岩带位于万州区高粱镇,西起松石包,东

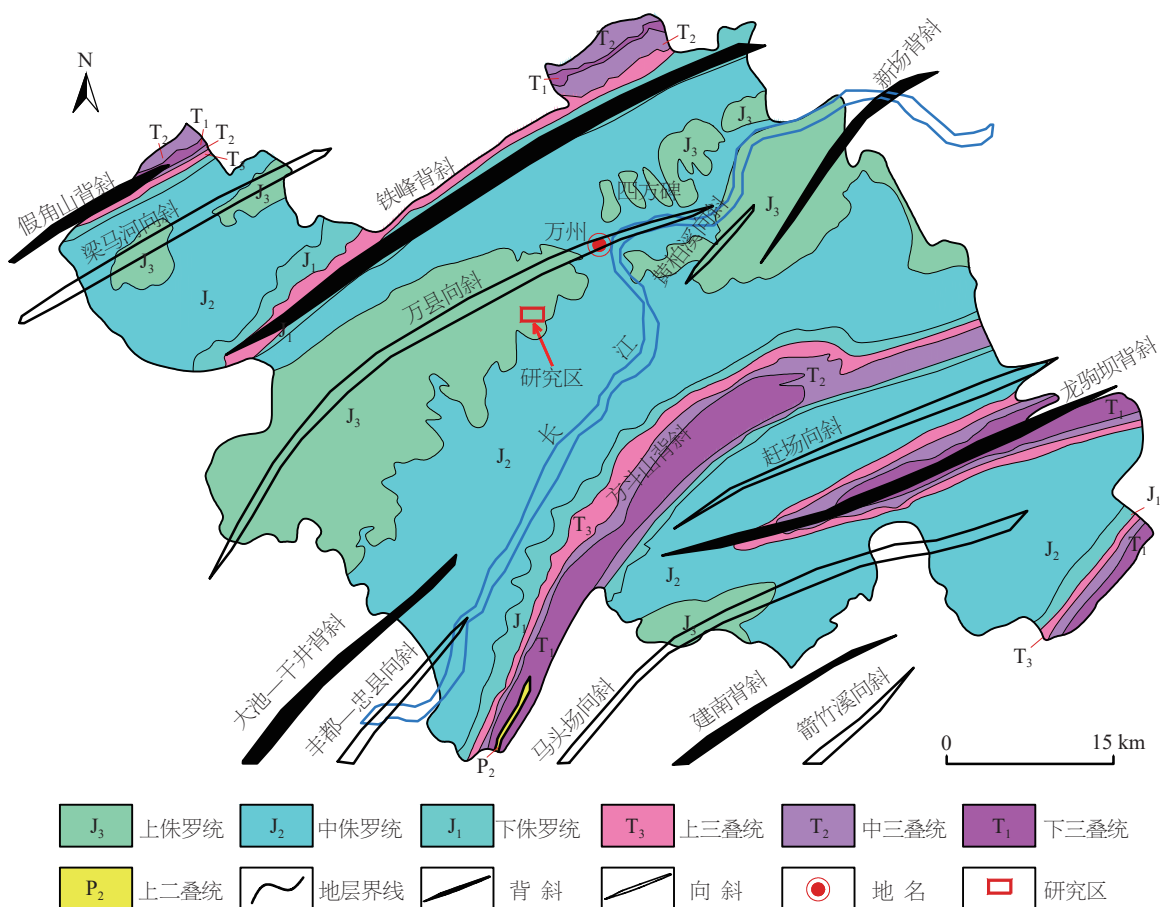
图 1 万州地区构造纲要图^[8]

Fig. 1 Geotectonic map of Wanzhou District

至焦家坪,全长约 2 km,呈弧形条带状分布,地势总体上西南高、东北低,地形呈缓(缓坡平台)—陡(砂岩陡崖)—缓(缓坡平台)的地形;区内分布的砂岩陡崖,高度一般 3.8~29 m。该区域最高点位于陡崖带顶部,高程约 403 m;最低点位于南东侧斜坡坡脚,高程约 270 m,相对高差 133 m。陡崖带倾角约为 82°,局部近垂直,下部斜坡整体坡角约为 30°~50°。

拟建恩施至广元国家高速公路从南向北穿越危岩带,庙垭隧道出口位于研究区南部危岩带正下方,经现场调查和航测手段识别,出口上方分布 W1、W2、W3 危岩体,出口下方分布孤石 GS1—GS5;芭溪河特大桥左线 5~9#桥墩、右线 7~11#桥墩位于研究区北部危岩带正下方,桥位上方分布 W4、W5、W6 危岩体,边坡中下部分布孤石 GS6—GS11(图 2)。孤石为崩塌形成,直径约 1~8 m,崩塌积体碎块石土经钻探揭露的最大厚度为 17.8 m,因此推断危岩在暴雨、施工扰动等不利工况下处于欠稳定或不稳定状态,对拟建隧道、桥梁的建设和安全运营产生威胁。

2.2 危岩发育机理

危岩带出露基岩为侏罗系中统沙溪庙组(J_{2s})青灰色厚—巨厚层砂岩和紫红色薄—中厚层泥岩,岩层呈单斜产出,较平缓,产状为 327°∠10°、335°∠9°,主要发育两对四组构造节理,多为垂直边坡走向和沿边坡走向的组合。I-L1: 65°∠80°,平直,张开 3~11 cm,间距 1~4 m,延伸 1~2 m; I-L2: 170°∠83°,较平直,张开 2~13 cm,间距 2~5 m,延伸 1~2 m; II-L1: 173°∠80°,略有起伏,张开 6~14 cm,间距 1~3 m,延伸 1~3 m; II-L2: 85°∠71°,较平直,张开 5~12 cm,间距 2~4 m,延伸 4~8 m,以上节理多被黏土、碎石等碎屑物充填。

砂岩是构成危岩体的主要岩性,泥岩多分布于砂岩底部,泥岩属软质岩,抗风化能力弱,受差异风化作用,往往形成凹腔,凹腔深度 0.3~5 m。危岩的演化过程可大致概括为以下 4 个阶段(图 3):

(1)第四纪以来,长江流域内河谷的强烈侵蚀下切形成了大量的陡峻岸坡,为高位危岩的形成奠定了地形地貌基础;

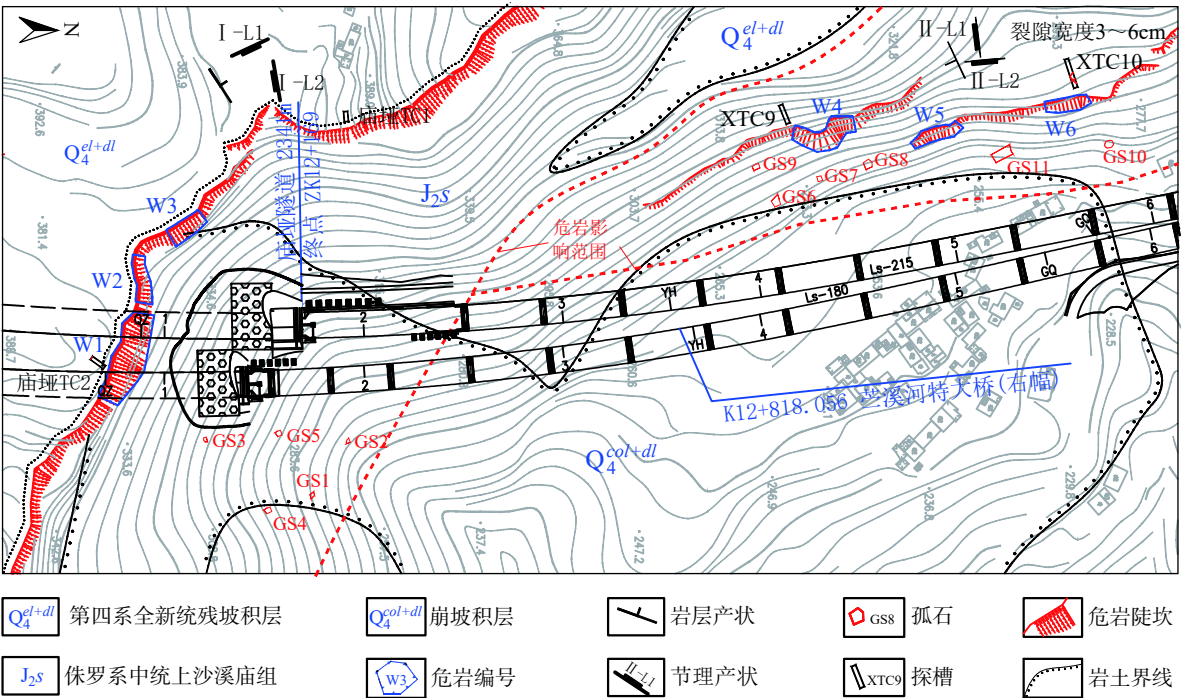


图 2 观音山危岩带工程地质平面图

Fig. 2 Engineering geological map of Guanyin Mountain dangerous rock belt

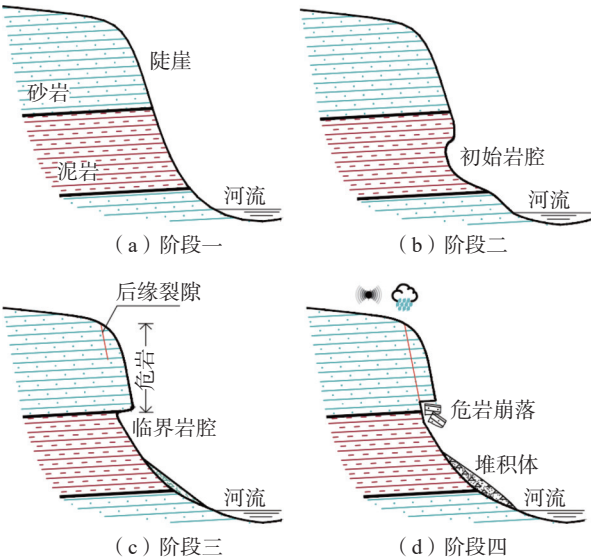


图 3 危岩演化过程示意图

Fig. 3 Evolution process of dangerous rock

(2) 由于硬质砂岩、软质泥岩抗风化能力存在明显的差异, 据万州某地 6 年间的现场观测表明, 砂岩风化速率为 $(0.071 \sim 0.083) \times 10^{-2} \text{ cm/d}$, 泥岩风化速率为 $(1.0 \sim 1.6) \times 10^{-2} \text{ cm/d}$, 两者差距约 20 倍^[3], 因此在下部的泥岩中形成了初始岩腔;

(3) 初始岩腔不断向上扩展, 直至抵达砂岩层面, 向上的风化变缓, 转而沿着层面向内侵蚀, 交界面处凹腔不断扩大(图 4), 由于凹腔被掏空, 砂岩失去部分支撑,



图 4 泥岩软弱基座和节理切割

Fig. 4 Mudstone weak base and joints cutting

顶部后缘形成卸荷带, 产生拉张裂隙, 处于向外的受拉应力状态;

(4) 砂岩中的风化裂隙逐渐增多, 顶部拉张裂隙进一步向下贯通, 这些结构面和构造节理、层面一同将岩体切割破碎, 在降雨、震动等不利因素影响下, 危岩体发生局部或整体的崩塌, 并在坡脚形成崩塌堆积体^[9]。

3 危岩体识别与统计

3.1 倾斜摄影的应用

传统的危岩评价需要进行地面调查, 查明陡崖岩性、结构面产状、力学属性、水文情况, 以及临空面的组合关系, 岩腔与洞穴状况和人类工程活动等, 主要依靠罗盘、皮尺、GPS 等工具, 对于相对高度小于 15 m 的

低位危岩,可以取得较好的现场基础资料。但观音山危岩带多分布相对高度 15~100 m 的中位、高位危岩,人员难以到达进行相关数据的获取,近些年来,不断成熟的无人机和航片信息处理技术为解决上述问题提供了新的解决途径。

本次勘察期间利用倾斜摄影技术,通过三维实景建模技术构建了危岩带的 3D 模型,可直接进行相关结构

面和体积的测量,极大提高了获取危岩稳定性评价相关参数的便利性和准确性。倾斜摄影的主要工作步骤包括以下几点:

(1) 系统组成。倾斜摄影航测系统以 KWT-X6L-15 型多旋翼无人机为飞行平台、搭载遥感设备和相机云台、通过地面控制终端控制飞行路线和地物信息获取,见图 5(a)。

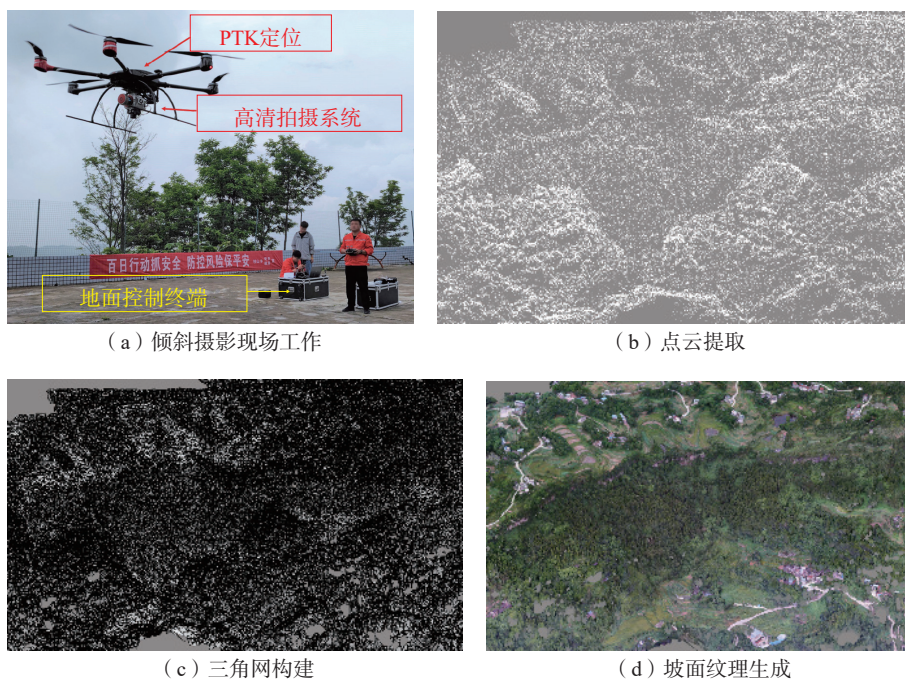


图 5 三维模型建立

Fig. 5 3D model establishment

(2) 调查流程。现场踏勘后,选择开阔场地,进行设备检查;然后设定航拍参数,即可开始飞行航拍。

(3) 数据获取。对陡崖同时采取倾斜拍摄和垂直拍摄,充分利用侧视影像来获取危岩的边界信息。

(4) 三维模型建立。利用 SFM (Structure From Motion) 新型数字摄影测量方法处理航拍数据,通过点云提取,见图 5(b);构建三角网格,见图 5(c);最终生成坡面纹理,见图 5(d)^[10]。

(5) 模型精度评价。对模型中的检查点数据进行提取,与外业实测数据进行求差,根据测量结果统计,平面误差为 7.2 cm,高程误差为 8.9 cm,均符合规范的精度要求(平面<30 cm,高程<50 cm)。

3.2 单体规模统计

利用 Acute3D Viewer 软件对高位危岩进行分析:通过肉眼识别岩腔、结构面、边界条件,利用软件对其规模进行多次量测取均值,测量精度可达厘米级,并据此

划分出危岩单体,得到稳定性评价所需的参数(图 6)。经分析,得出 6 处危岩体的发育特征(表 1)。

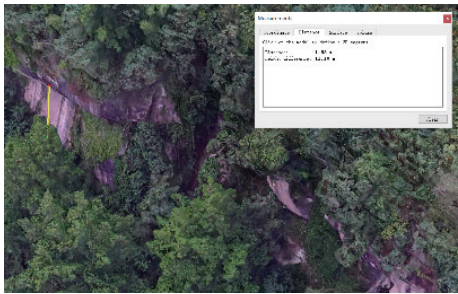
4 危岩体稳定性分析和评价

4.1 危岩带的宏观稳定性

危岩带的宏观稳定性主要受控于地层结构、结构面发育程度。因岩腔侵蚀产生的卸荷裂隙、岩体内部原生的构造节理、沉积界面组合共同将岩体切割,破坏其完整性,形成大小不等的块体,是崩塌发生的基础。暴雨、地震、人类工程活动则是危岩失稳崩落的首要诱发因素。

根据现场调查,以赤平投影法对危岩带的整体稳定性做宏观分析:

(1) W1、W2、W3 所在陡崖岩层产状为 $327^{\circ} \angle 10^{\circ}$,主要发育两组节理, L1: $65^{\circ} \angle 80^{\circ}$; L2: $170^{\circ} \angle 83^{\circ}$,节理面平直,贯通性较好,存在泥质碎屑充填物。经赤平投



(a) 单体参数测量



(b) 边界条件分析（水文）

图 6 三维模型分析
Fig. 6 3D model analysis

影分析(图 7): 岩层倾向与边坡夹角 33° , 为切向坡; L1 与岩层面的组合交线 L1—C 倾向坡外, 夹角为 23° , 倾角与层面接近, 为不利结构面, 易发生沿组合面的楔形体滑动, 其余结构面及其组合面对岩体的稳定性产生的影响较小。

(2) W4、W5、W6 所在陡崖岩层产状为 $335^\circ \angle 9^\circ$, 主要发育两组节理, L1: $173^\circ \angle 80^\circ$; L2: $85^\circ \angle 71^\circ$, 节理面稍有起伏, 贯通性较好, 亦存在泥质碎屑充填物。经赤平投影分析(图 8), 岩层倾向与边坡夹角 97° , 为切向坡; L2 的倾向与边坡夹角为 7° , 倾向坡外, 易发展成为边坡后缘裂隙, 不利于整体的稳定性, 其余结构面及其组合面对岩体的稳定性产生的影响较小。

综上, 节理、层面及其组合面等结构面会对危岩体的稳定性产生不利影响, 在暴雨、震动等不利工况下可能会发生楔形体滑动、平面滑动, 对下方构筑物 and 居民区产生安全威胁。

4.2 危岩体稳定性计算

4.2.1 计算模型

采用《重庆地质灾害防治工程勘查规范》中给出的危岩体评价方法, 运用刚体极限平衡原理, 根据不同的危岩破坏类型和边界条件选择适当的模型, 据表 1 统

表 1 危岩体发育特征

Table 1 Development characteristics of dangerous rocks

编号	分布高程/m	形态	危岩体尺寸(长×厚×高)/m	体积/m ³	凹腔尺寸(高×深)/m	失稳模式	类别
W1	340~386	不规则	46.0×9.7×12.4	5 532.88	14.0×4.7	坠落式	高位/特大型
W2	345~381	长方形	24.3×6.2×7.0	1 054.62	8.5×3.8	坠落式	高位/特大型
W3	350~380	长方形	19.4×8.5×9.8	1 616.02	11.0×4.0	坠落式	高位/特大型
W4	280~300	不规则	13.4×7.2×5.0	482.40	2.0×1.5	倾倒式	低位/特大型
W5	270~280	长方形	25.0×6.8×4.5	765.00	1.5×1.2	倾倒式	低位/大型
W6	280~285	长方形	22.0×7.0×3.7	569.80	1.0×0.8	倾倒式	低位/大型

注: 类别划分依据《重庆地质灾害防治工程勘查规范》(DB 50/ T 143—2018)。

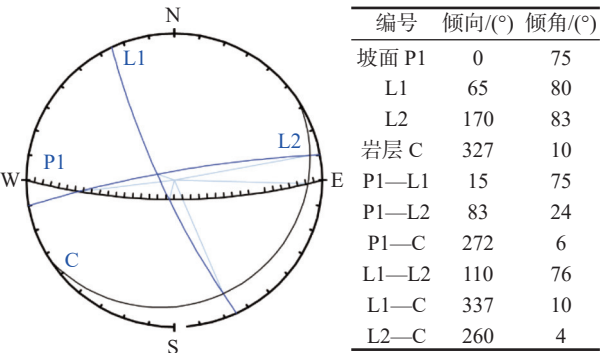


图 7 危岩 W1、W2、W3 宏观稳定性分析

Fig. 7 Macroscopic stability analysis of the W1, W2 and W3 dangerous rocks

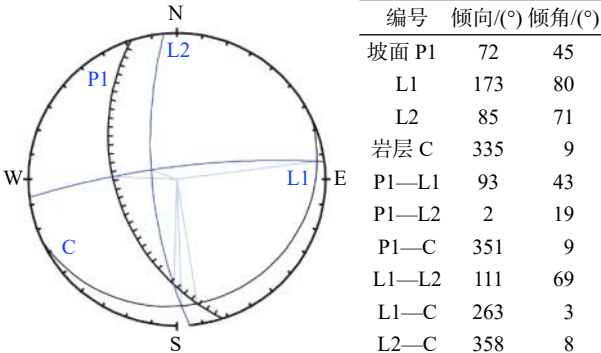


图 8 危岩 W4、W5、W6 宏观稳定性分析

Fig. 8 Macroscopic stability analysis of the W4, W5 and W6 dangerous rocks

计, W1、W2、W3 的失稳模式为坠落式, 其对应的计算模型为:

$$F = \frac{\zeta \sigma_t (H - h)^2 B}{(G + G_b) a_0 + Q b_0 + V \left[\frac{1}{3} h_w + \frac{1}{2} (H - h) \right]}$$

(1)

式中: ζ ——危岩抗弯力矩计算系数;
 σ_t ——岩体抗拉强度/kPa;
 H ——后缘裂隙上端到未贯通段下端的垂直距离/m;
 h ——后缘裂隙深/m;
 B ——后缘裂隙未贯通段沿裂隙走向平均宽度/m;
 G ——危岩自重/kN;
 G_b ——危岩竖向附加荷载/kN;
 a_0 ——危岩体竖向荷载(包括危岩体重力和危岩体上竖向附加荷载)作用点与后缘铅垂面中点的水平距离/m;
 Q ——危岩水平荷载(不含后缘陡倾裂隙水压力)/kN;
 b_0 ——危岩体上水平荷载作用点与后缘铅垂面中点的垂直距离/m;
 V ——后缘陡倾裂隙水压力/kN;
 h_w ——后缘陡倾裂隙充水高度/m, 根据裂隙情况及汇水条件确定。

W4、W5、W6 的失稳模式为倾倒式, 其对应的计算模型为:

$$F = \frac{2 \zeta \sigma_t \frac{(H - h)^2}{\cos^2 \alpha} B_1}{(G + G_b) a + Q h_0 + V \left[\frac{1}{3} \frac{h_w}{\sin \beta} + \frac{H - h}{\sin \beta} + \frac{b \cos(\beta - \alpha)}{\cos \alpha} \right]}$$

(2)

式中: a ——危岩体竖向荷载作用点到转动点的水平距离/m;
 B_1 ——危岩体底面垂直失稳方向宽度/m;
 β ——后缘陡倾结构面倾角/(°);
 h_0 ——危岩体水平荷载作用点到转动点的垂直距离/m;
 α ——危岩体与基座接触面倾角/(°);
 b ——后缘裂隙的延伸段下端到转动点的水平距离(即块体与基座接触面长度的水平投影)/m;
其余各符号意义同上式。

4.2.2 计算工况和参数

计算危岩在天然工况、暴雨工况下的稳定系数, 暴

雨工况采用 20a 重现期的暴雨强度, 以此判定危岩稳定性是否满足要求。选取通过危岩重心的典型剖面(图 9)进行计算, 以 W1 为例, 危岩稳定性的计算剖面如下:

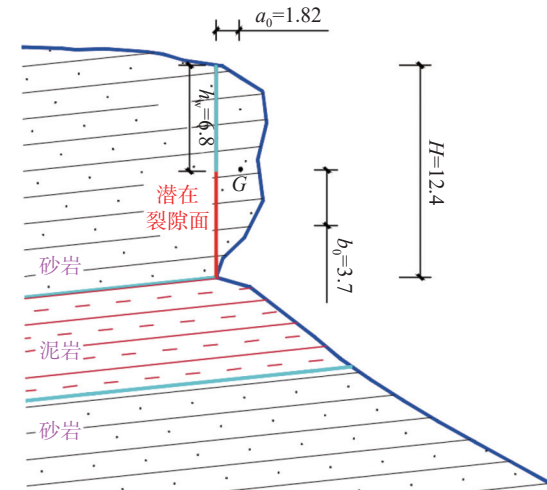


图 9 危岩稳定性计算示例
Fig. 9 Stability calculation example of dangerous rocks

各危岩体的计算参数根据现场钻孔取样、室内试验、并参考地区经验得到, 因岩体本身的不均匀性, 单点室内试验得到的抗剪强度对危岩体的代表性有局限, 因此根据区域多个工点的试验结果(表 2), 计算不同参数下危岩体的稳定性, 得到安全系数的平均值, 以消除过程中的偶然性, 计算结果见表 3。

表 2 岩体物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of rock mass

岩性	工况	$\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$	f_{ik}/kPa
J ₂ S 砂岩	天然	24.6 ~ 25.2	737 ~ 1 034	32.9 ~ 35.1	280 ~ 580
	暴雨	24.9 ~ 25.8	643 ~ 976	31.6 ~ 34.8	220 ~ 495

表 3 岩体稳定性计算结果

Table 3 Rock mass stability calculation results

编号	工况	断面面积/m ²	危岩高度/m	F_s	评价
W1	天然	120.3	12.40	1.385	基本稳定
	暴雨			1.162	欠稳定
W2	天然	43.40	7.00	1.741	稳定
	暴雨			1.368	基本稳定
W3	天然	83.30	9.80	1.169	欠稳定
	暴雨			0.895	不稳定
W4	天然	36.00	5.00	1.389	基本稳定
	暴雨			1.102	欠稳定
W5	天然	30.60	4.50	1.483	稳定
	暴雨			1.169	欠稳定
W6	天然	25.90	3.70	1.083	欠稳定
	暴雨			0.925	不稳定

4.2.3 结果分析

结果显示：

(1)研究区南部,隧道上方危岩中,暴雨工况下,危岩体处于“不稳定-基本稳定”状态,危岩的稳定性 $W3<W2<W1$,其中 $W3$ 在暴雨工况下处于“不稳定”状态。

(2)研究区北部,桥梁上方危岩中,暴雨工况下,危岩体处于“不稳定-欠稳定”状态,危岩的稳定性 $W6<W5<W4$,其中 $W6$ 在暴雨工况下处于“不稳定”状态。

暴雨工况下的不稳定危岩急需治理,为确定防护网等措施的设置位置、类型,为设计提供参数,进行了危岩的运动学模拟。

4.3 危岩运动学模拟

危岩运动学模拟可以重现落石的三维运动轨迹,确定弹跳高度、运动距离和冲击动能,为防护措施设计提供参考。采用 Rocfall 落石动态模拟软件,软件基于硬接触的刚体拉格朗日力学模型,并在回弹力学之外,考虑了摩擦耗散的岩石/地面相互作用,可较好的预测岩石的滑动、滚动和跳跃^[10]。

4.3.1 参数与初始条件

模拟所需的坡面恢复系数 R_n 、 R_t ,滚动摩擦系数。参数根据重庆市地质灾害规范、文献等综合确定,具体取值见表4—6。

表 4 恢复系数

Table 4 Coefficient of restitution

碰撞系数	地面岩性				
	坚硬岩、较硬岩	较软岩、软岩、极软岩	硬土	普通土	松土
法向回弹系数 R_n	0.4	0.35	0.3	0.26	0.22
切向回弹系数 R_t	0.86	0.84	0.8	0.75	0.65

表 5 滚动摩擦系数

Table 5 Coefficient of rolling friction

坡面特征	滚动摩擦系数	摩擦角/(°)
光滑岩面、混凝土表面	0.30 ~ 0.60	21.8 ~ 31.0
块石堆积坡面	0.55 ~ 0.70	28.8 ~ 35.0
密实碎石堆积坡面、硬土坡面、 植被(灌木丛为主)发育	0.55 ~ 0.85	28.8 ~ 40.4
软土坡面、植被不发育或少量杂草	0.50 ~ 0.85	26.6 ~ 40.4

表 6 模拟参数选取

Table 6 Selection of simulation parameters

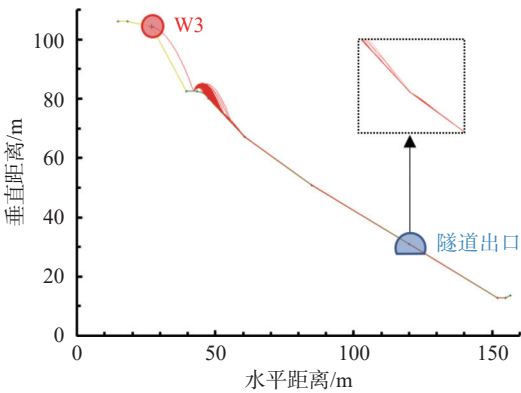
边坡部位	R_n/S_t	R_t/S_t	φ/S_t	粗糙度
上部基岩裸露区	0.4/0.03	0.86/0.04	25.1/0.03	2.42
下部堆积区	0.3/0.03	0.84/0.02	31/0.02	3.00

落石由静止开始做自由落体运动,水平、竖直初速度均为 0,落石质量选择中等大小的 2 000 kg,软件的模

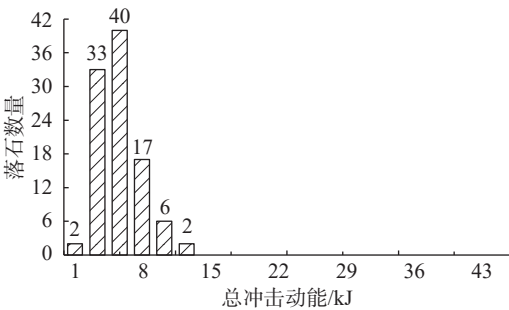
拟为随机过程,符合落石运动的不确定性,模拟次数设置为 100 次,以此进行概率统计。

4.3.2 落石运动模拟与分析

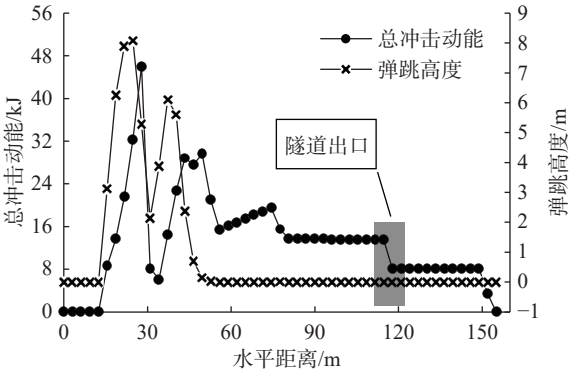
危岩 W3 发生崩塌时,其运动轨迹、弹跳高度及能量分布如图 10 所示。



(a) 落石的二维运动轨迹



(b) 隧道出口处落石的冲击动能分布



(c) 落石弹跳高度和总冲击动能包络线

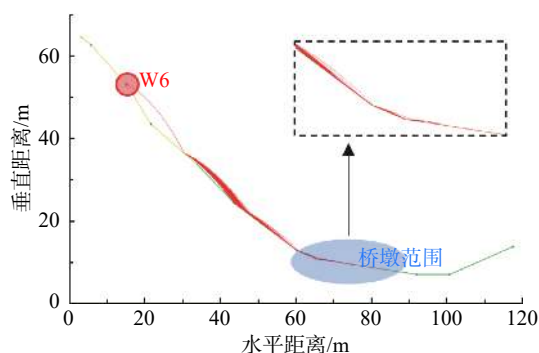
图 10 危岩 W3 运动学分析

Fig. 10 Kinematics analysis of the W3 dangerous rock

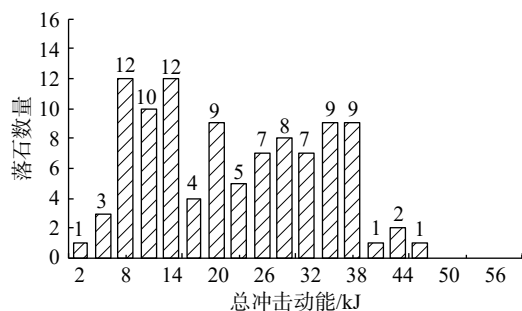
危岩 W6 发生崩塌时,其运动轨迹、弹跳高度及能量分布如图 11 所示。

结果显示：

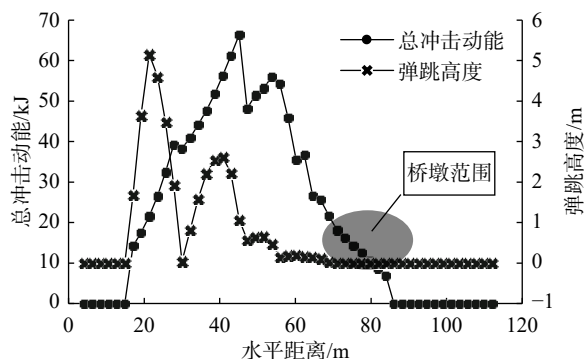
(1)从二维运动轨迹可以看出,落石在脱离母岩后,速度和动能快速增加,随后由于受到坡面植被、松散堆积体的摩擦耗散作用,弹跳高度和动能逐渐减弱,在坡



(a) 落石的二维运动轨迹



(b) 桥墩范围处落石的冲击动能分布



(c) 落石弹跳高度和总冲击动能包络线

图 11 危岩 W6 运动学分析

Fig. 11 Kinematics analysis of the W6 dangerous rock

面滚动一定距离后停止^[11-12]。

(2) W3 落石最后均穿过隧道出口, 止于其下方, 水平落距大于 150 m; 最大总冲击动能为 29 kJ, 出现在斜坡上部平台处, 隧道出口处的落石冲击动能集中在 5 ~ 8 kJ, 相比最大动能消散约 75%; 最大弹跳高度约 8.1 m, 在距离崩落点平距 50 m 处转变为滚动运动(图 10)。

(3) W6 落石最终止于桥墩范围内, 水平落距约 70 ~ 85 m; 最大总冲击动能为 55.9 kJ, 出现在斜坡中部距崩落点 54 m 处, 桥墩范围内的落石冲击动能集中在 8 ~ 12 kJ, 相比最大动能消散约 82%; 最大弹跳高度约 5.2 m, 在距离崩落点平距 71 m 处转变为滚动运动(图 11)。

(4) 通过 W3(坠落式)和 W6(倾倒式)的对比发现, 坠落式危岩的最终落距约为倾倒式的 2 倍, 最大弹跳

高度约为倾倒式的 1.5 倍, 具有更大的冲击动能和破坏性。

5 讨论

倾斜摄影在高位危岩调查中的优势明显, 可将效率提高 5 倍以上, 且测绘精度大幅提高, 但受限于其影像精度和植被遮挡, 仍难以代替实地调查, 尤其在结构面产状量测、边界条件分析等精度要求较高部分, 因此必须两者结合开展工作。

在地面调查时, 隧道标高以下发现 5 处较大孤石, 桥墩上部发现 6 处较大孤石(图 2), 孤石的分布范围与数值模拟的吻合性较好。因计算和模拟中存在较多理想化的假设, 故现场孤石的调查和崩坡积体厚度的查验是十分必要的, 可以直接检验稳定性分析和运动学模拟的准确性。

坠落式危岩破坏后做自由落体运动, 相对于倾倒式危岩沿坡面的滚动, 因不受坡面摩擦力影响, 接触地面时往往具有较大的速度和反弹速度; 在与构筑物同等距离时, 其产生的冲击动能和破坏性也更大; 但对于危岩单体, 由于危岩规模、坡面形态、影响范围的差异性, 在实践中仍需进行针对性分析。

稳定性计算和运动学模拟结果中的安全系数、弹跳高度、冲击动能、滚落距离等可以为危岩防治措施的选型、规模大小、设置范围、位置提供设计参数, 精细化的勘察不仅确保了工程的安全建设和运营, 也直接节约了工程成本, 是行业的发展方向。

文中研究仅限于稳定性评价和影响范围研究, 未考虑增加防护措施后的落石运动轨迹和能量消散规律, 后续的研究可在运动学模拟中增加各类防护措施, 进一步评价其服役性能。

6 结论

(1) 倾斜摄影可以高效的获取高位危岩的几何特征、岩腔发育状态和边界条件, 为稳定性分析和运动学模拟提供参数。

(2) 节理 I-L1 与岩层面的组合交线、节理 II-L2 形成了倾向坡外的不利结构面, 影响着陡崖带的整体稳定性。

(3) 观音山危岩带发育高位坠落式危岩 W1、W2、W3, 倾倒式危岩 W4、W5、W6, 体积 400 ~ 5 000 m³ 不等, W3、W6 在暴雨工况下不稳定, 危及拟建工程。

(4) W3、W6 崩塌后均会影响到拟建隧道或桥梁, 最大弹跳高度 5.2 ~ 8.1 m, 在拟建工程范围内以滚动运

动为主,总冲击动能为 5~12 kJ;坠落式危岩一般具有更大的冲击能和破坏性。

参考文献(References):

- [1] 冉涛,宋志,蒋正,等.三峡库区万州区四层岩危岩带发育特征、稳定性评价及防治对策[J/OL].沉积与特提斯地质: 1-13 [2022-03-03]. [RAN Tao, SONG Zhi, JIANG Zheng, et al. Development characteristics, stability evaluation and control measures of the four-layer rock-hazardous rock belt in Wanzhou District of the Three Gorges Reservoir area[J/OL]. Sedimentation and Tethys Geology: 1-13 [2022-03-03]. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 叶四桥,唐红梅,祝辉.万州地区危岩发育的典型成因[J].水力发电,2007,33(2): 31-33. [YE Siqiao, TANG Hongmei, ZHU Hui. Typical formation causes of dangerous rock development in Wanzhou area[J]. Water Power, 2007, 33(2): 31-33. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 陈洪凯,鲜学福,唐红梅,等.三峡库区危岩群发性机理与防治——以万州太白岩为例[J].重庆大学学报(自然科学版),2008,31(10): 1178-1184. [CHEN Hongkai, XIAN Xuefu, TANG Hongmei, et al. A massive development mechanism and countermeasures for perilous rocks in the Three Gorges Reservoir area of P. R. China: The example of the Taibaiyan cliff at Wanzhou[J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 2008, 31(10): 1178-1184. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 刘广宁,陈州丰,黄波林.三峡库区万州段沿江危岩失稳模式及影响因素分析[J].西部探矿工程,2012,24(12): 14-17. [LIU Guangning, CHEN Zhoufeng, HUANG Bolin. Analysis of the instability pattern and influencing factors of dangerous rocks along the Wanzhou section of the Three Gorges Reservoir area[J]. Western Prospecting Engineering, 2012, 24(12): 14-17. (in Chinese)]
- [5] 邵其东.三峡库区万州区天生城危岩滑坡治理技术[J].西部探矿工程,2011,23(2): 51-53. [SHAO Qidong. Control technology for landslide of Tianshengcheng perilous rock in Wanzhou District of Three Gorges Reservoir area[J]. West-China Exploration Engineering, 2011, 23(2): 51-53. (in Chinese)]
- [6] 刘长春,殷坤龙.重庆市万州区戴家岩危岩灾害风险分析[J].水文地质工程地质,2014,41(6): 128-133. [LIU Changchun, YIN Kunlong. Risk analysis for the Daijiayan perilous rock in Wanzhou District of Chongqing[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, 41(6): 128-133. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 孙敬辉,石豫川.重庆甑子岩崩塌落石动力学特征及危险性分区[J].中国地质灾害与防治学报,2019,30(3): 6-11. [SUN Jinghui, SHI Yuchuan. Dynamics and hazard zoning of collapse and rockfall in Zhengziyan, Chongqing[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(3): 6-11. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 林松,王薇,邓小虎,等.三峡库区典型滑坡地球物理实测及其意义:以万州区四方碑滑坡为例[J].地球科学,2019,44(9): 3135-3146. [LIN Song, WANG Wei, DENG Xiaohu, et al. Geophysical observation of typical landslides in Three Gorges Reservoir area and its significance: A case study of Sifangbei landslide in Wanzhou District[J]. Earth Science, 2019, 44(9): 3135-3146. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 陈洪凯,唐红梅,王林峰,等.危岩崩塌演化理论及应用[M].北京:科学出版社,2009. [CHEN Hongkai, TANG Hongmei, WANG Linfeng, et al. Evolution theory and application of perilous rock collapse[M]. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese)]
- [10] 张治平,夏志雄,金昶睿,等.基于摄影测量的落石路径获取及被动防护网服役性能评估[J].岩石力学与工程学报,2021,40(增刊2): 3274-3283. [ZHANG Zhiping, XIA Zhixiong, JIN Changrui, et al. Acquisition of rockfall path and service performance analysis of passive protective net based on photogrammetry[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(Sup 2): 3274-3283. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 重庆市质量技术监督局.地质灾害防治工程勘查规范: DB 50/T 143—2018[S].2018. [Chongqing Municipal Bureau of Quality and Technical Supervision. Code for investigation of geological hazard control engineering: DB 50/T 143—2018[S]. 2018. (in Chinese)]
- [12] 王翔,牌立芳,吴红刚.拉林铁路变坡面倾角崩塌落石对桥梁结构破坏作用的模拟分析与试验研究[J].岩石力学与工程学报,2020,39(8): 1622-1633. [WANG Xiang, PAI Lifang, WU Honggang. Simulation analysis and experimental study on the damage of bridge structure caused by tilt collapse and rockfall on the slope of Lalin railway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(8): 1622-1633. (in Chinese with English abstract)]