



移动阅读

冉涛, 宋志, 蒋正, 等, 2023. 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]. 沉积与特提斯地质, 43(4): 817–828. doi: [10.19826/j.cnki.1009-3850.2021.09006](https://doi.org/10.19826/j.cnki.1009-3850.2021.09006)

RAN T, SONG Z, JIANG Z, et al., 2023. Development characteristics, stability evaluation, and preventive measures of the dangerous rock zone at Sicengyan in Wanzhou District of the Three Gorges reservoir area[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 43(4): 817–828. doi: [10.19826/j.cnki.1009-3850.2021.09006](https://doi.org/10.19826/j.cnki.1009-3850.2021.09006)

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

冉涛¹, 宋志¹, 蒋正², 李丹¹, 胡健³

(1. 中国地质调查局成都地质调查中心(西南地质科技创新中心), 四川 成都 610218; 2. 四川省地质工程勘察院集团有限公司, 四川 成都 610072; 3. 成都理工大学环境与土木工程学院, 四川 成都 610059)

摘要: 三峡库区万州区是危岩灾害集中发育的典型地区, 位于主城区的四层岩陡崖带发育众多危岩单体, 对下方公路和居民区构成严重威胁。为了有效防治该危岩灾害, 首先, 基于详细的野外调查和勘查, 查明了危岩带发育的工程地质条件和基本特征, 危岩体形态可划分为块状、板状和不规则状3种; 体积从几十至几千立方米不等; 破坏模式可归纳为坠落式和倾倒式2类。通过分析危岩区的地质环境条件, 认为多级陡崖带地貌、上硬下软的岩性组合、结构面的组合切割、降雨和地下水作用以及植物根劈作用是导致危岩形成的主要因素。在此基础上, 采用赤平投影法对陡崖带宏观稳定性进行了定性分析; 进一步地, 采用刚体极限平衡法对危岩体在不同工况下的稳定性进行了定量评价。结果显示, 陡崖带目前整体处于稳定状态; 危岩体在天然状态下多处于基本稳定—稳定状态, 然而, 在暴雨和地震条件下, 危岩体的稳定性显著下降, 且地震作用的影响比暴雨更大。最后, 根据危岩体的发育特征、失稳模式及现场施工条件, 提出了清除危岩、嵌补和支撑岩腔、裂缝灌浆、锚固、被动防护网等防治措施建议。本文研究成果可以为类似的危岩灾害的研究和防治工作提供参考。

关键词: 危岩; 破坏模式; 稳定性评价; 赤平投影; 极限平衡法; 防治措施

中图分类号: P642.21

文献标识码: A

Development characteristics, stability evaluation, and preventive measures of the dangerous rock zone at Sicengyan in Wanzhou District of the Three Gorges reservoir area

RAN Tao¹, SONG Zhi¹, JIANG Zheng², LI Dan¹, HU Jian³

(1. Chengdu Center, China Geological Survey (Geosciences Innovation Center of Southwest China), Chengdu 610218, China; 2. Sichuan Institute of Geological Engineering Investigation Group Co., Ltd., Chengdu 610072, China; 3. School of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: Wanzhou District in the Three Gorges Reservoir Area is a representative area where dangerous rock disasters develop intensively. Numerous dangerous rocks have been found developing at Sicengyan cliff zone in the main urban area of Wanzhou,

收稿日期: 2021-04-08; 改回日期: 2021-09-09; 责任编辑: 黄春梅

作者简介: 冉涛(1985—), 男, 四川广元人, 博士, 高级工程师, 主要从事地质灾害与工程地质调查研究工作。

E-mail: rantaopaul@aliyun.com

资助项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20221811, DD20211379); 第二次青藏高原综合科学考察研究资助(2019QZKK0904)

which pose a great threat to the roads and residential areas below. To prevent and control the dangerous rock hazards effectively, the engineering geological conditions and development characteristics of the dangerous rock zone are determined through detailed field investigations and explorations. The shapes of the dangerous rocks are divided into three kinds: blocky, platy and irregular, with volumes ranging from dozens to thousands of cubic meters. The failure modes of dangerous rocks are classified into two types: falling mode and toppling mode. By analyzing the geo-environmental conditions of the dangerous rock zone, it is concluded that the main factors leading to the formation of the dangerous rocks are the topography of multi-level cliffs, the combination of upper hard rocks and lower soft rocks, and the rock mass structures formed by the cutting of the structural planes, the action of rainfall and groundwater, and the splitting effect of plant roots. On this basis, the macroscopic stability of the cliff zone has been analyzed qualitatively using stereographic projection technology, and furthermore, the stability of each dangerous rock under different conditions is evaluated quantitatively using the rigid body limit equilibrium method. The results show that the overall cliff zone is currently in a stable state, and the dangerous rocks are mostly in a basically stable to stable state in their natural state. However, the stability of them is likely to decrease significantly under heavy rainfall and earthquake conditions, and the earthquake action exhibits a greater impact than the heavy rainfall on the stability of the dangerous rocks. Finally, according to the development characteristics and instability modes of the dangerous rocks, as well as the construction conditions of the cliff belt, several preventive measures are suggested, such as the removal of the dangerous rocks, patching and supporting of the rock cavities, grouting of fissures, anchorage and passive protection net. This paper could provide a significant reference for research into and efforts to prevent similar dangerous rock hazards.

Key words: dangerous rock; failure mode; stability evaluation; stereographic projection; limit equilibrium method; preventive measures

0 引言

三峡库区是我国危岩灾害发育较为集中的地区,其数量多、分布广、危害严重,其中以位于库区腹地的万州区最具代表性(董好刚等, 2010; 邓珊珊等, 2012; 陈洪凯和王圣娟, 2017; 周云涛等, 2017; 黄达等, 2018; 廖伟杰等, 2018; 闫举生和谭建民, 2018; 肖瞳, 2019; 贺凯等, 2020; 唐红梅等, 2021)。据不完全统计,万州城区及周边分布有太白岩、天生城、枇杷坪、翠屏山、首立山、石峰、石门、龙冠山等 20 余处危岩带,大小危岩体 3 000 余个,对万州的城市安全造成巨大隐患(叶四桥等, 2007)。因此,许多学者对万州区的危岩崩塌灾害进行了研究,内容涉及危岩的形成机理、失稳模式、稳定性分析、防治措施以及风险评价等方面。

叶四桥等(2007)认为,地质构造、河谷阶地和方山台地地貌、软硬相间的砂泥岩互层、岩腔和裂隙发育等是万州区危岩形成的内在原因;河流切割、卸荷和风化作用是危岩发育的外部原因;暴雨和人类工程活动是危岩失稳的主要激发因素。陈洪凯等(2008)以万州区太白岩为例,将三峡库区群发性危岩的演绎过程归纳为河流下切—差异风化—危岩形成—单一危岩崩落—多个危岩形成及崩落 5

个阶段。苏天明等(2006)从危岩体的岩性、崩塌运动方式、崩塌发展顺序、危岩形成的力学机制等方面对万州区高边坡失稳模式进行了详细分类。刘广宁等(2012)基于万州区 53 处危岩体的调查分析,将危岩失稳模式归纳为剪切—滑移式、风化—坠落式和拉裂—倾倒式 3 类。唐红梅等(2005)基于岩石蠕变本构关系建立了危岩微观链蠕变稳定时间计算式和陡崖长期稳定性预测方法,并计算得出太白岩陡崖微观链稳定时间在 891~15904 年之间、在 8 万年内将会有危岩体逐渐发育的结论。邵其东(2011)介绍了预应力锚索、排水沟、拦石墙等措施在万州天生城危岩治理中的应用,指出锚固技术是行之有效的主动防治危岩的技术。唐红梅(2005, 2006)对太白岩危岩带进行有限元数值模拟,发现“自重+暴雨状态裂隙水压力”是影响滑塌式和倾倒式危岩的最不利工况,从而为确定危岩治理工程的设计工况提供了依据。刘长春和殷坤龙(2014)以万州区戴家岩危岩为研究对象,建立了危岩灾害的风险评价模型,并提出了危岩灾害风险管理对策建议。

位于万州主城区的四层岩陡崖带发育众多危岩体,历史上崩塌落石时有发生,对下方的城市道路和居民区构成严重威胁。该危岩带作为发育在

三峡库区砂、泥岩互层地层中的典型危岩灾害,对其进行深入研究不仅可以进一步丰富库区危岩灾害的研究案例、深化对库区危岩灾害成灾机理和成灾规律的认识,而且可以减轻灾害带来的风险和损失,因此,亟需对其开展研究评价工作。本文基于详细的野外调查和勘查,查明了危岩带发育的工程地质条件以及危岩体的发育特征,分析了危岩形成的主要因素,并采用定性分析和定量计算相结合的方法,对危岩带的宏观整体稳定性以及危岩单体的稳定性进行了评价。最后,针对危岩体的发育特征、破坏模式以及场地施工条件,提出了相应的防治措施建议,以期对三峡库区类似危岩灾害的防治和研究提供参考。

1 区域地质环境背景

1.1 地形地貌

万州区属构造剥蚀、河流侵蚀低山丘陵地貌,境内最高点普子乡沙坪峰海拔 1762 m,最低点位于黄柏乡长江边,海拔 106 m。受岩性和构造控制,区内地貌形态总体呈台阶状,砂岩一般形成陡崖,泥岩形成缓坡平台。陡崖大致分布于高程 300~400 m 的区域,呈条带状分布,多与河道方向一致。河谷岸坡普遍分布崩塌、滑坡堆积物,崩塌、滑坡地貌特征明显。

1.2 地层岩性

万州区出露地层主要是侏罗系中统上沙溪庙组(J_2s)、侏罗系上统遂宁组(J_3sn)、以及不同成因的第四系松散堆积物(Q_4)。上沙溪庙组岩性主要为灰白—灰黄色巨厚长石石英砂岩和紫红色薄层泥岩、砂质泥岩、泥质粉砂岩等,是城区出露的主要地层。遂宁组岩性主要为紫红色泥岩、泥质粉砂岩与褐红色粉砂岩不等厚互层,夹紫灰色细粒长石砂岩,出露于城区陡崖带山顶地段。第四系堆积物包括残坡积、崩坡积、河流冲积、滑坡堆积和人工堆积等。

1.3 地质构造

区域构造上,万州区位于川东褶皱束万县复向斜北东端,北临铁峰山背斜,南靠方斗山背斜(图 1)。川东褶皱束走向北东,为一系列梳状高背斜和宽缓向斜相间排列,形成隔挡式构造。万县向斜走向 NE20°~NE75°,斜穿万州城区,核部地层极为平缓,两翼地层在靠近外围背斜核部处产状急剧变陡。城区断层不发育。

1.4 气象水文

万州区属亚热带季风气候,夏秋多暴雨,冬春多干旱(陈启国等, 2011)。区内年均气温 18.1℃,最高温度 43℃(2006 年 8 月 23 日),最低温度-3.7℃(1969 年 2 月 5 日)。降雨集中在每年 5~9 月,约占全年降雨量 70%。年均降雨量 1 191.3 mm,多年最大降雨量 1 635.7 mm(1982 年),城区最大日降雨量 243.3 mm(1982 年 7 月 16 日)。

研究区标高高于长江水面,且距长江较远,因此水文地质条件不受长江水位影响。场区内无地表水体,地下水主要为第四系松散层孔隙水和基岩裂隙水,水量贫乏。地下水主要接受大气降水补给,随季节变化较大。

1.5 新构造运动与地震

万州区新构造运动不强烈,第四纪以来表现为大面积间歇性抬升,无明显差异性活动。万县向斜内未发现活动断裂,区域构造整体稳定。根据《中国地震动参数区划图》(GB 18306-2015)(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会, 2015),本区地震基本烈度为 VI 度,属于弱震区。

2 危岩发育特征

2.1 危岩带总体特征

四层岩危岩带位于万州主城区金龙路西侧斜坡陡崖地带,南起半山国际名都弯道处,北至清风柳庄居民小区,全长约 1 km,呈条带状展布,总体走向 NW10°~NW20°。场地地势西高东低,高差约 116 m,从上到下呈平台—陡崖—斜坡相结合的地貌形态(图 2)。

四层岩从上到下共发育三级陡崖带:一级陡崖带高 26~37 m,坡度 70°~86°,顶部以上为缓坡平台,分布高程 412~436 m;二级陡崖带高 10~22 m,坡度 70°~85°;三级陡崖带高 15~27 m,坡度 72°~85°;三级陡崖带以下至金龙路之间为斜坡地形,分布高程 305~350 m,坡度 25°~35°(图 3)。

陡崖带出露地层为侏罗系中统上沙溪庙组(J_2s)灰白色巨厚层砂岩和紫红色薄层泥岩(图 3)。砂岩是构成陡崖带的主要岩性,其中发育多处危岩单体。泥岩分布于陡崖底部,易风化剥落,构成陡崖带的软弱基座。由于砂、泥岩风化速率不同,陡崖底部的泥岩中多形成空腔,深度 0.5~3 m,最深达 5 m 以上。各级陡崖之间以及下部斜坡区地表覆

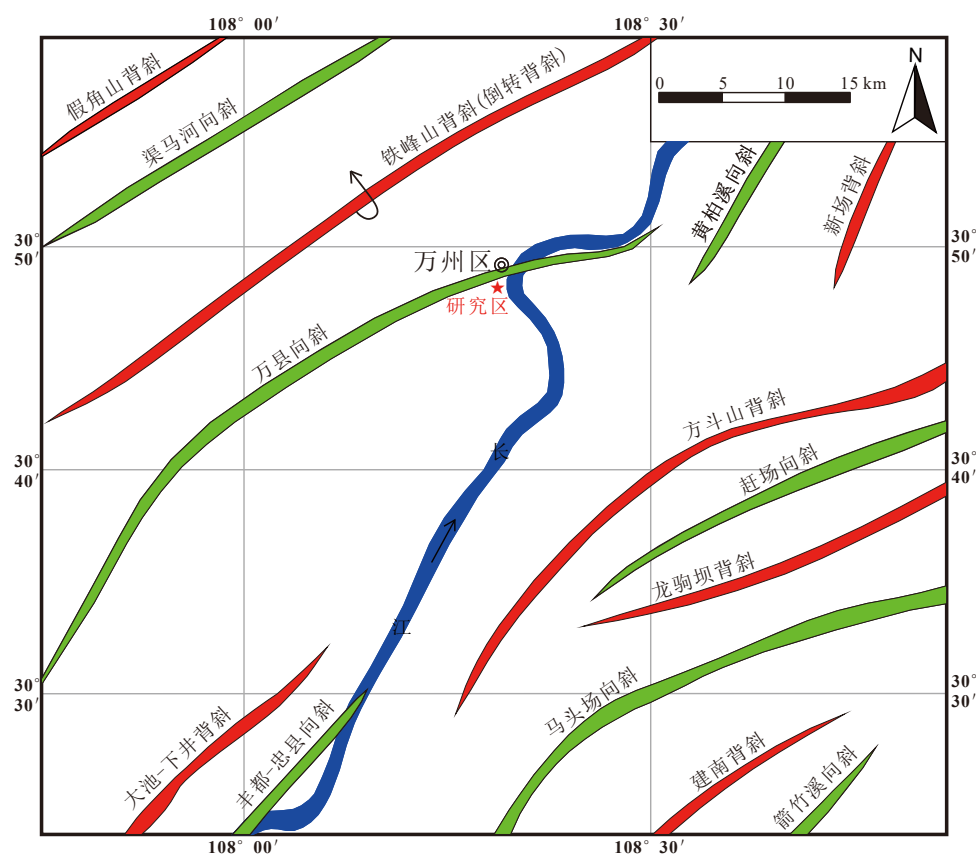
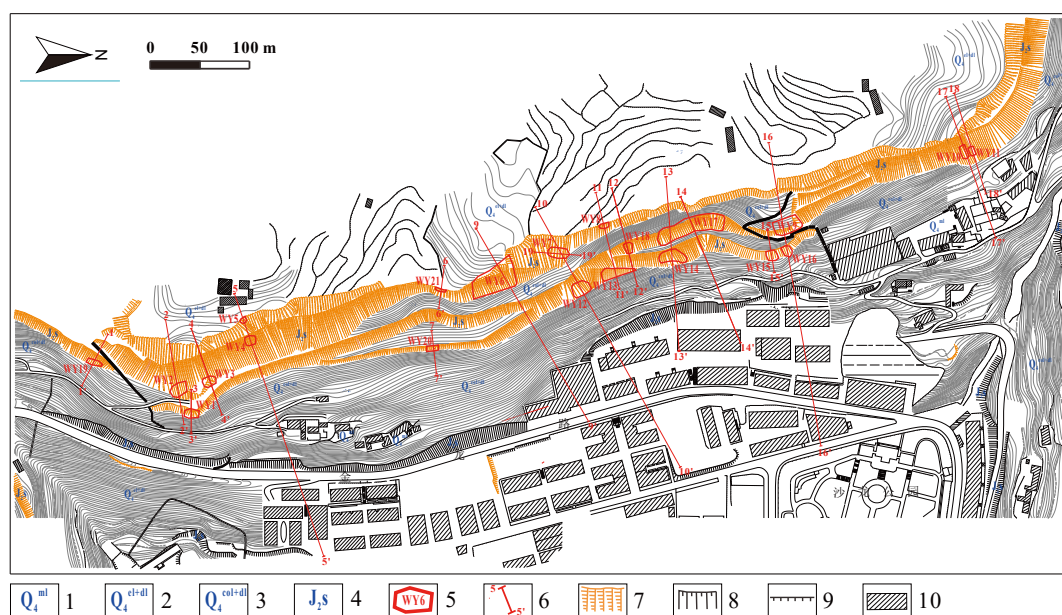


图1 万州区构造纲要图(修改自重庆市高新工程勘察设计院有限公司, 2016)

Fig. 1 Structure outline map of Wanzhou District (modified from Chongqing Gaoxin Engineering Survey and Design Institute Co., Ltd., 2016)



1—第四系人工堆积; 2—第四系残坡积; 3—第四系崩坡积; 4—侏罗系中统上沙溪庙组; 5—危岩体范围及编号; 6—剖面线及编号; 7—陡崖带; 8—人工切坡; 9—围墙; 10—房屋建筑。

图2 四层岩危岩带工程地质平面图(重庆市高新工程勘察设计院有限公司, 2016, 有改动)

Fig. 2 Engineering geological plan of Sicengyan Dangerous Rock Zone (revised according to Chongqing Gaoxin Engineering Survey and Design Institute Co., Ltd., 2016)

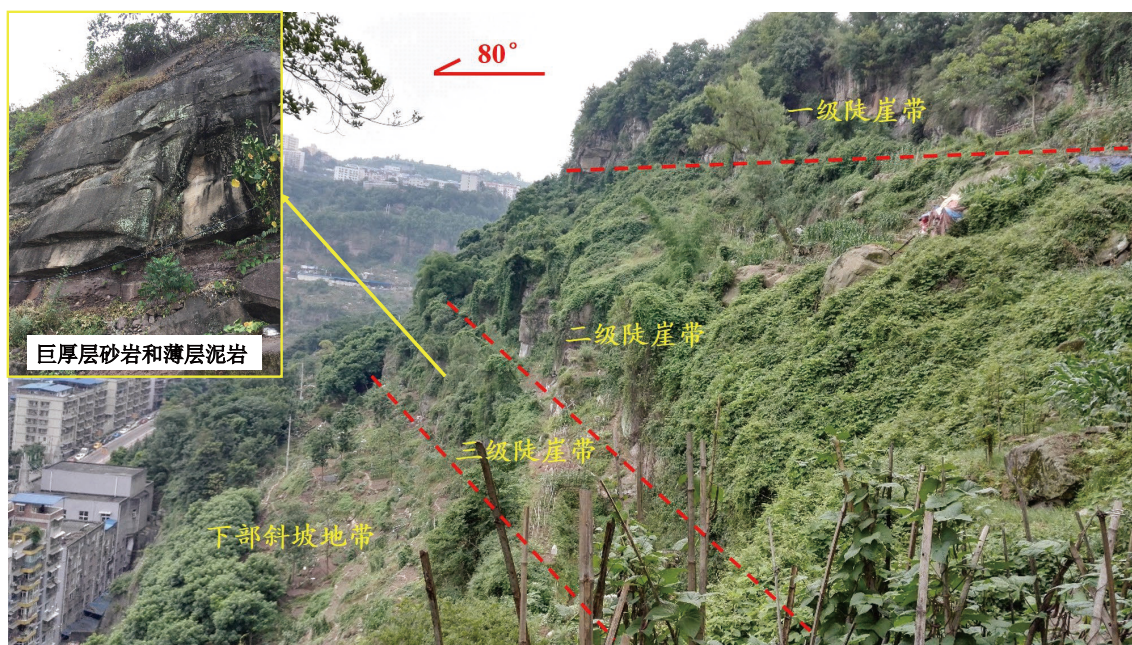


图3 四层岩危岩带侧视图(插图:构成陡崖带的巨厚层砂岩和薄层泥岩)

Fig. 3 A lateral view of Sicengyan Dangerous Rock Zone (the inset showing the cliff consisted of thick-layered sandstone and thin-layered mudstone)

盖第四系崩坡积物,成分为粉质粘土夹碎块石,碎块石粒径一般 1~4 m。钻探揭露崩坡积层厚度 0.3~10.2 m,局部土层较厚的区域在暴雨条件下易发生土溜。

研究区位于万县向斜南东翼近轴部,岩层平缓,产状为 $(305^{\circ}\sim 315^{\circ})\angle(2^{\circ}\sim 6^{\circ})$ 。岩体中发育两组和坡面斜交或垂直的构造节理 S_1 和 S_2 ,以及一组顺坡向的卸荷裂隙 S_3 (图 4)。其中, S_1 产状为 $(325^{\circ}\sim 357^{\circ})\angle(73^{\circ}\sim 86^{\circ})$,间距 2~5 m,延伸约 10 m,张开 1~10 mm,局部植物根系充填; S_2 产状为 $(250^{\circ}\sim 267^{\circ})\angle(71^{\circ}\sim 88^{\circ})$,间距 4~6 m,延伸约 7 m,张开 10~30 mm,局部钙质、泥质充填; S_3 产状为 $(94^{\circ}\sim 104^{\circ})\angle(79^{\circ}\sim 87^{\circ})$,间距 1~4 m,延伸约 10 m,闭合无充填。

2.2 危岩体发育特征

根据现场调查,四层岩危岩带共发育危岩单体 21 处,编号 WY1~WY21。其中,一级陡崖带发育 5 处,二级陡崖带 8 处,三级陡崖带 8 处(表 1)。

2.2.1 形态特征

由于岩体中的岩层面、构造节理、卸荷裂隙等结构面相互组合,切割出形态各异的危岩体,其形态特征大致可以划分为块状、板状及不规则状 3 类。

(1) 块状危岩体

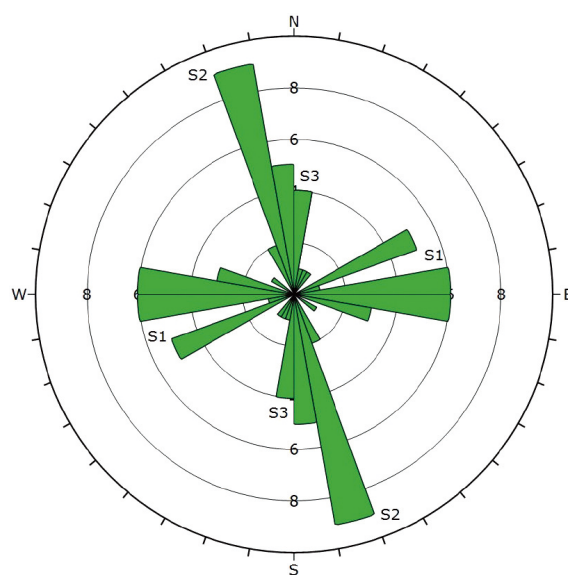


图4 节理走向玫瑰花图

Fig. 4 The rosette diagram of strikes of the joints

此类危岩体的形态特征是纵长、横宽以及竖高三个方向的尺寸差别不大,正面形态大致呈矩形(图 5a)。四层岩危岩带大多数危岩体属于这类形态。

(2) 板状危岩体

此类危岩体的形态特征是纵长方向尺寸显著小于横宽和竖高两个方向的尺寸,其厚度薄,厚高

表 1 危岩体基本特征统计表
Table 1 Characteristics of the dangerous rocks

编号	形态	体积/m ³	发育位置	破坏模式
WY1	块状	578	三级陡崖带	倾倒
WY2	不规则状	555	二级陡崖带	坠落
WY3	块状	399	二级陡崖带	倾倒
WY4	块状	422	二级陡崖带	坠落
WY5	块状	191	一级陡崖带	倾倒
WY6	块状	3 092	一级陡崖带	坠落
WY7	块状	116	一级陡崖带	倾倒
WY8	块状	118	一级陡崖带	坠落
WY9	块状	8 752	二级陡崖带	倾倒
WY10	板状	78	二级陡崖带	坠落
WY11	不规则状	76	二级陡崖带	坠落
WY12	块状	123	三级陡崖带	坠落
WY13	不规则状	145	三级陡崖带	倾倒
WY14	不规则状	92	三级陡崖带	坠落
WY15	块状	490	三级陡崖带	倾倒
WY16	块状	556	三级陡崖带	倾倒
WY17	块状	872	二级陡崖带	坠落
WY18	块状	231	二级陡崖带	坠落
WY19	块状	1 616	三级陡崖带	坠落
WY20	块状	789	三级陡崖带	坠落
WY21	块状	345	一级陡崖带	坠落

比一般小于 1/6, 侧面形态为窄长方形, 危岩体 WY10 属于此类形态(图 5b)。这类危岩体通常后缘卸荷裂隙陡立, 且延伸较远。

(3) 不规则状危岩体

此类危岩体多受方位随机的风化裂隙切割影响, 正面和断面形态呈不规则多边形(图 5c)。危

岩体 WY2、WY11、WY13、WY14 属于此类形态。

2.2.2 规模特征

四层岩陡崖带发育的危岩体的体积规模相差较大, 最大的 WY9 达 8 752 m³, 最小的 WY11 仅 76 m³。据统计, 四层岩发育的 21 处危岩单体总体积约 19 636 m³(表 1)。根据《三峡库区地质灾害防治工程地质勘察技术要求》(三峡库区地质灾害防治工作指挥部, 2014)中的危岩分类表, 四层岩危岩带的规模属于中型。

2.3 危岩体破坏模式

根据四层岩危岩体的发育特征, 可将危岩体的破坏模式归纳为坠落式和倾倒式 2 类(表 1)。

2.3.1 坠落式

此类危岩体主要发育在陡崖中上部的巨厚层砂岩中。危岩体左右两侧受构造节理切割而脱离母岩, 后缘受陡倾坡外的卸荷裂隙控制。由于陡崖下部的岩体先行坠落, 导致危岩体底部临空, 其主要依靠未贯通的岩桥和裂隙的抗剪强度暂时稳定。随着风化、地下水、植物根劈等环境因素持续作用, 裂隙最终贯通, 危岩体在自身重力作用下发生自由落体运动, 形成坠落式崩塌(图 6a)。四层岩危岩带发育的坠落式危岩共有 13 处, 占整个危岩体破坏模式的比例为 61.9%。

2.3.2 倾倒式

此类危岩体主要发育在泥岩凹腔上部。同样地, 危岩体左右两侧受构造节理切割而脱离母岩, 后缘受陡倾坡外的卸荷裂隙切割, 但尚未完全与母岩分离。随着风化、地下水、植物根劈等环境因素

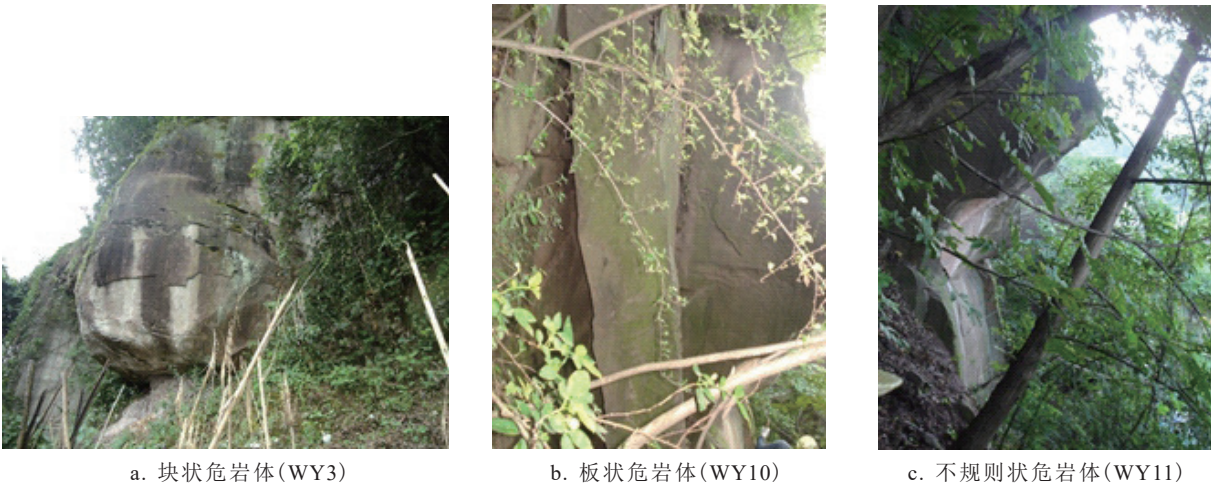


图 5 危岩体的三种典型形态
Fig. 5 Three kinds of typical shapes of dangerous rocks

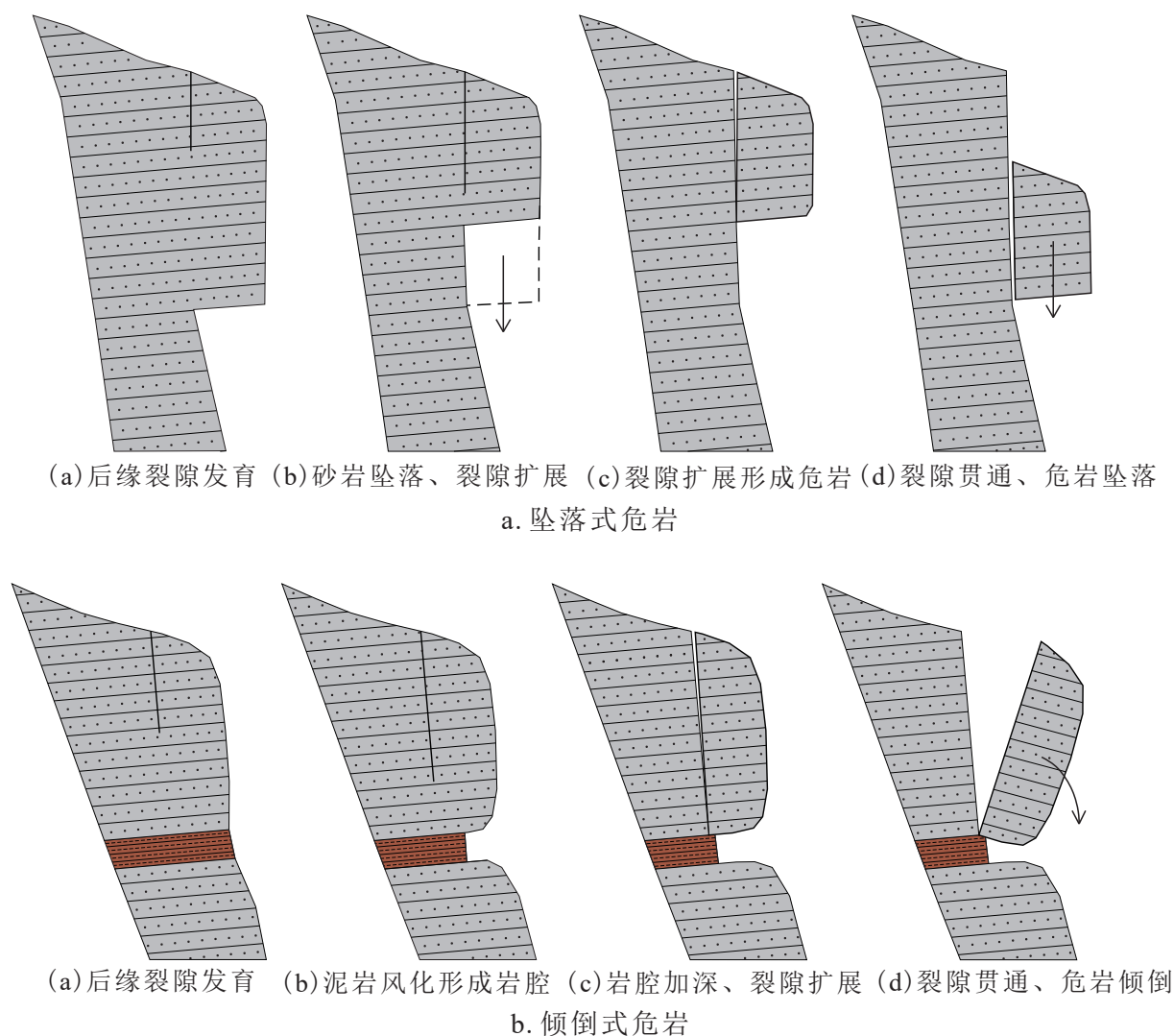


图6 两类危岩的形成演化过程

Fig. 6 Formation and evolution process of the two kinds of dangerous rocks

持续作用,以及泥岩剥蚀、崩解导致岩腔加深,危岩体重心逐渐移向坡外,后缘裂隙张拉扩展,此时危岩体主要依靠后缘裂隙下部岩桥暂时稳定。当后缘裂隙完全拉断后,危岩体将以泥岩基座顶部为支点向临空方向发生转动,形成倾倒式崩塌(图6b)。四层岩危岩带发育的倾倒式危岩共有8处,占整个危岩体破坏模式的比例为38.1%。

3 危岩形成因素

导致危岩体形成的因素通常包括地形地貌、地层岩性、地质构造、降雨、地震以及人类工程活动等(胡厚田, 1989)。通过分析四层岩危岩带发育的工程地质条件与环境因素,认为危岩体的形成主要受以下因素影响。

3.1 多级陡崖带地貌特征

万州区第四纪以来经历了大面积地壳抬升,在长江下切过程中,城区及周缘形成了多级地形高而陡的陡崖带。四层岩陡崖带坡度普遍达 70° 以上,局部近于直立,单级陡崖最高达37 m。因此,高陡的地形地貌为危岩的形成和失稳运动提供了良好的地形条件。

3.2 上硬下软的岩性组合特征

四层岩陡崖带由上部的巨厚层砂岩和下部的薄层泥岩组成。砂岩强度高、抗风化能力强;泥岩强度低、易风化剥蚀。由于砂、泥岩的差异风化,泥岩中多形成空腔,从而导致上部砂岩失去支撑而形成危岩。因此,陡崖带上硬下软的岩性组合为危岩的形成提供了物质基础。

3.3 结构面的组合切割

研究区靠近万县向斜核部,陡崖带地层近水平。平缓的岩层面通常构成危岩体的顶底边界。在长江下切过程中,岸坡岩体产生卸荷变形,岩体中形成陡倾坡外的卸荷裂隙,构成危岩体的后缘控制性边界。此外,岩体中还普遍发育2组和坡面垂直或斜交的构造节理,构成危岩体的左右侧边界。这些结构面相互组合,切割出形态和规模各异的危岩体。

3.4 水的作用

万州区雨量充沛,雨季通常是当地崩塌落石灾害的多发季节(叶四桥等,2007)。万州区的红层泥岩由于富含蒙脱石、伊利石等亲水性粘土矿物,具有遇水软化、浸水崩解的特殊水理性质(简文星等,2005)。在水的作用下,泥岩逐渐崩解、剥落,致使岩腔范围增大,在其上部形成危岩。砂岩中的节理裂隙是降雨入渗的良好通道,雨水一方面软化、溶解充填物,降低裂隙强度;另一方面产生静水压力挤压壁岩,导致裂隙扩展、贯通(冉涛等,2012)。

3.5 植物根劈作用

四层岩陡崖带植被茂盛,深入岩缝的植物根系挤压两侧壁岩,导致裂隙扩展、贯通。另外,位于危岩上方的树木会增加危岩荷重,还向其传递风荷载,促进危岩破坏。

4 危岩稳定性评价

4.1 陡崖带宏观稳定性分析

现场调查和勘查揭示,四层岩陡崖带后缘在横向上未发育整体贯通性裂缝,也不存在整体变形破坏迹象,因而判断陡崖带整体目前处于稳定状态。

根据陡崖面及岩体结构面的产状要素作赤平投影图(图7)。从图中可以看出,陡崖面大体上与卸荷裂隙 S_3 呈顺向关系,与构造裂隙 S_2 呈反向关系,与构造裂隙 S_1 呈垂直关系,陡崖面、 S_1 、 S_2 及 S_3 易组合切割形成危岩单体。危岩体受 S_3 控制易发生倾倒破坏,受 S_1 和 S_3 的交线控制易发生坠落破坏。

4.2 危岩单体稳定性评价

4.2.1 计算模型

采用《三峡库区地质灾害防治工程地质勘察技术要求》(三峡库区地质灾害防治工作指挥部,2014)给出的危岩体稳定性计算模型进行计算,各危岩体根据其破坏模式、边界条件及受力状态选择相应

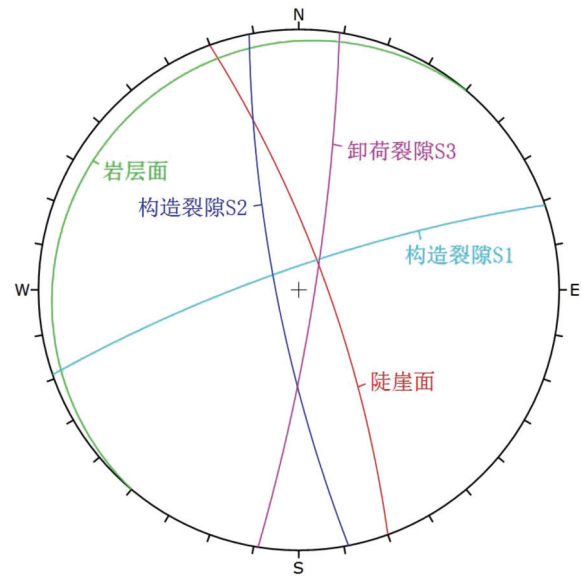


图7 陡崖带赤平投影图

Fig. 7 The stereographic projection of the cliff zone

的计算模型。

(1) 倾倒式危岩计算模型 1

危岩体后缘裂隙未贯通、稳定性由未贯通的砂岩抗拉强度控制(图8a),按下列二式计算:

a. 危岩体重心在倾覆点之外

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

b. 危岩体重心在倾覆点之内

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

(2) 倾倒式危岩计算模型 2

危岩体后缘裂隙已贯通、稳定性由底部泥岩抗拉强度控制。四层岩发育的此类危岩体重心均在倾覆点之外(图8b),稳定性按以下公式计算:

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

(3) 坠落式危岩计算模型

四层岩发育的坠落式危岩,其后缘均存在陡倾裂隙(图8c),危岩体稳定性由后缘裂隙未贯通的砂岩抗拉强度控制。按下列二式计算稳定系数,结

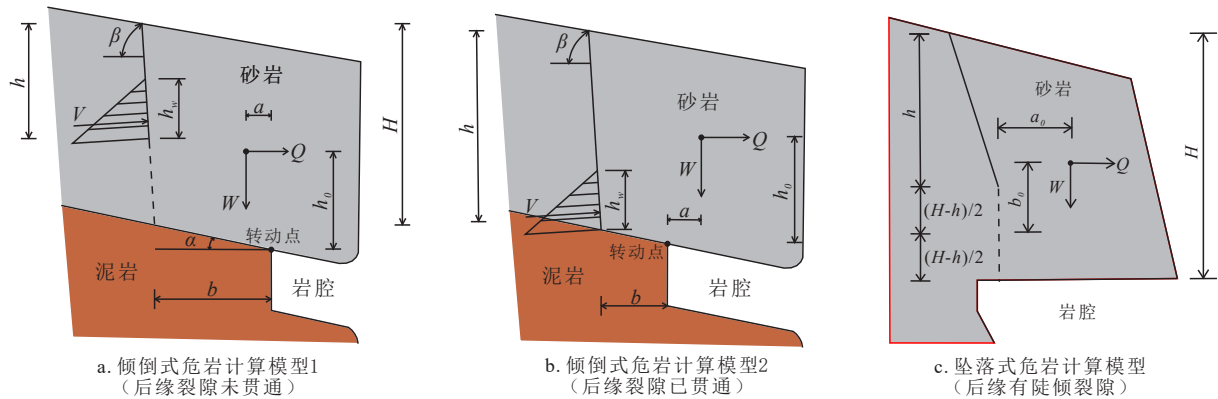


图8 危岩稳定性计算模型

Fig. 8 The Calculated models for stability evaluation of the dangerous rocks

果取二者的较小值:

$$F = \frac{c(H-h) - Q \tan \varphi}{W} \quad (4)$$

$$F = \frac{\zeta \cdot f_{lk} \cdot (H-h)^2}{W \cdot a_0 + Q \cdot b_0} \quad (5)$$

以上公式中: F —危岩稳定系数; W —危岩自重(kN/m); f_{lk} —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 —后缘裂隙贯通深度(m); h_w —后缘裂隙充水高度(m); h_0 —危岩重心到倾覆点的垂直距离(m); γ_w —水的重度, 10 kN/m^3 ; V —后缘裂隙水压力(kN/m), $V=(1/2)\gamma_w \cdot h_w^2$; α —水平地震系数, 水平地震力 $Q = \alpha \cdot W$ (kN/m); ζ —危岩抗弯力矩系数, 依据破坏面形态取 $1/12 \sim 1/6$; a —危岩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的水平距离(m); a_0 —危岩重心到潜在破坏面的水平距离(m); b_0 —危岩重心到过潜在破坏面形心的垂直距离(m); c —砂岩粘聚力(kPa); φ —砂岩内摩擦角($^\circ$).

4.2.2 计算工况和计算参数

根据研究区的地质环境条件, 计算中考虑天然、暴雨和地震三种工况。天然工况考虑危岩自重和天然状态裂隙水压力; 暴雨工况考虑危岩饱和自重和暴雨状态裂隙水压力; 地震工况考虑危岩自重、天然状态裂隙水压力和地震力。

其中, 危岩自重为危岩体积与重度的乘积。裂

隙水压力按照最危险情况取值, 即天然状态裂隙充水高度取 $1/3$ 裂隙深度, 暴雨状态取 $2/3$ 裂隙深度(刘长春和殷坤龙, 2014)。地震作用主要考虑水平地震力, 为危岩自重与水平地震系数的乘积, 万州区地震基本烈度为 VI 度, 水平地震系数取值 0.05 (中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局和中国国家标准化管理委员会, 2015)。其他岩体物理力学参数通过室内试验获得(表 2)。

4.2.3 稳定性计算评价

采用上述计算模型和计算参数, 对各危岩单体在三种工况下的稳定系数进行计算, 并按照表 3 对危岩体在不同工况下的稳定状态进行评价。表 3 中倾倒式和坠落式危岩的安全系数(F_t)取值, 以及危岩稳定状态划分标准均参照《三峡库区地质灾害防治工程地质勘察技术要求》(三峡库区地质灾害防治工作指挥部, 2014)。

4.2.4 计算结果分析

基于危岩体稳定性计算评价结果, 对不同工况下、不同稳定状态的危岩体数量进行统计分析, 如图 9 所示。从图中可以看出, 在天然状态下, 没有处于不稳定状态的危岩体; 处于基本稳定—稳定的危岩体有 13 处(占比 68.4%), 而处于欠稳定的仅 6 处(占比 31.6%), 由此可见, 天然状态下多数危岩体的稳定性较好。

表 2 岩体物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of the rock masses

岩性	重度/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)		抗压强度/MPa		抗拉强度/MPa	抗剪强度	
	天然	饱和	天然	饱和		c/MPa	$\phi/^\circ$
砂岩	23.8	24.2	19.54	14.76	0.40	1.88	36.4
泥岩	24.7	25.1	6.16	3.97	0.19	0.92	33.8

表3 危岩稳定状态划分标准

Table 3 The classification standard for the stability states of the dangerous rocks

危岩类型	危岩稳定状态			
	不稳定	欠稳定	基本稳定	稳定
倾倒式	$F < 1.00$	$1.00 \leq F < 1.25$	$1.25 \leq F < F_t$	$F \geq F_t$
坠落式	$F < 1.00$	$1.00 \leq F < 1.35$	$1.35 \leq F < F_t$	$F \geq F_t$

注：倾倒式： $F_t=1.50$ ；坠落式： $F_t=1.60$ 。

在暴雨条件下,没有处于不稳定和稳定状态的危岩体,处于基本稳定的危岩体有9处,比天然状态减少了1处,而处于欠稳定的有10处,比天然状态增加了4处。因此,在暴雨条件下,危岩体稳定性总体有所降低。

在地震条件下,新增了4处不稳定状态的危岩体,处于欠稳定状态的危岩体数量和暴雨条件下持平,而处于基本稳定状态的仅有4处,较天然状态和暴雨条件下分别减少了6处和5处。由此可见,在地震作用下,危岩体稳定性总体同样降低。

另外,地震作用下处于不稳定状态的危岩体数量较暴雨条件下增多,而处于基本稳定状态的危岩体数量却较暴雨条件下大幅减少,虽然地震条件下新增了1处稳定状态的危岩体,但是总体来看,地震作用下稳定性差(不稳定+欠稳定)的危岩体数量较暴雨条件下增多(14比10),而稳定性好(基本稳定+稳定)的危岩体数量却较暴雨条件下减少(5比9),因此,地震作用对危岩体稳定性的影响比暴雨更大。

天然状况下处于欠稳定的危岩体,其破坏面已基本形成,在暴雨、地震等外力作用下失稳破坏的可能性较大。而处于基本稳定—稳定的危岩体,其破坏面尚未完全形成,但在风化、降雨、植物根劈等因素持续作用下,破坏面将逐渐贯通,因此需要加强监测并及时进行工程治理。

5 防治措施建议

综合考虑四层岩危岩带的发育特征、破坏模式以及场地施工条件,提出以下防治措施建议:

对于规模较小、易于清理的危岩体,如 WY2、WY4、WY5、WY7、WY8、WY10、WY11、WY21,建议将其清除。

陡崖底部的岩腔对危岩体稳定性具有重要影响,应对其进行加固治理。对于范围较小的岩腔,建议采用浆砌片石(或块石)对其进行嵌补,如 WY1、WY13、WY15、WY16;对于规模较大者,建议采用钢筋砼支撑对其进行加固,如 WY3、WY9、WY12、WY14、WY18、WY19、WY20。

对于控制危岩体稳定性的长大裂隙,应进行灌浆处理,以增加岩体完整性和防止降雨入渗。对于规模较大(体积大于 $1\,000\text{ m}^3$)以及稳定性较差(三种工况下均处于欠稳定—不稳定状态)的危岩体,如 WY6、WY8、WY9、WY10、WY11、WY14、WY18、WY19、WY21,建议增加适当的锚固工程,以提高危岩的安全储备。

此外,建议在陡崖带下方的斜坡段布设1~2排

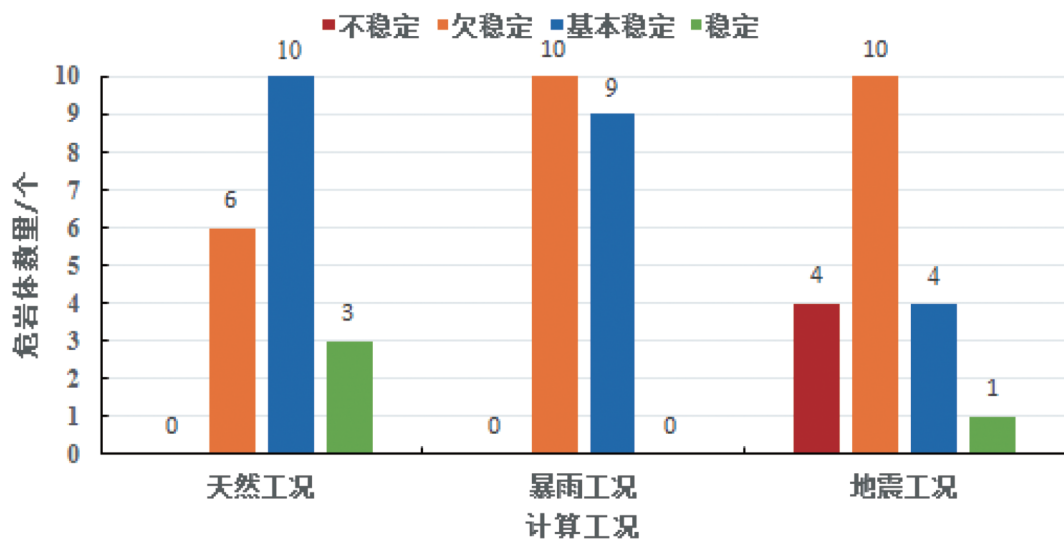


图9 不同工况下危岩稳定状态统计

Fig. 9 Statistical stability states of the dangerous rocks under different calculation conditions

柔性防护网,以拦截上方的崩塌落石及坡面的不稳定孤石。

6 结论

(1) 位于三峡库区万州主城区的四层岩自上而下发育 3 级陡崖带,发育大小危岩体 21 处。危岩体形态可划分为块状、板状和不规则状 3 类,体积规模从几十至几千方不等,破坏模式可归纳为坠落式和倾倒式 2 类,危岩带规模等级属于中等。

(2) 多级陡崖带地貌特征、上硬下软的岩性组合特征、结构面的组合切割、降雨和地下水作用以及植物根劈作用是导致危岩形成的主要因素,这些因素分别为危岩的形成提供了地形条件、物质和结构基础以及外动力地质作用。

(3) 采用定性分析和定量计算相结合的方法对四层岩陡崖带和危岩单体进行稳定性评价,结果表明:陡崖带目前整体处于稳定状态;危岩体在天然状态下多处于基本稳定—稳定状态,在暴雨和地震条件下,其稳定性显著下降,多处于欠稳定—不稳定状态,地震的影响比暴雨更大。

(4) 基于危岩体的发育特征、破坏模式以及场地施工条件,提出了清危、嵌补和支撑岩腔、裂隙灌浆、锚固、被动防护网等防治措施建议。对于规模较小的危岩体建议清除,对于规模较大和稳定性较差的,建议采取岩腔加固+裂隙灌浆+锚固的综合治理措施。

References

- Chen H K, Xian X F, Tang H M, et al., 2008. 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*, 31 (10): 1178 – 1184 (in Chinese with English abstract).
- Chen Q G, Zheng W M, Chang X J, 2011. An approach to the relationship between recharge, runoff and drainage of groundwater in the typical red beds: An example from Rongchang in Chongqing[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 31 (3): 107 – 112 (in Chinese with English abstract).
- Chongqing High-tech Engineering Survey and Design Institute Co., Ltd., 2016. Geological disaster prevention project in the Three Gorges reservoir area of Chongqing — supplementary exploration report of the Sicengyan dangerous rocks zone and lower slope in Wanzhou District[R]. Chongqing: Chongqing High-tech Engineering Survey and Design Institute Co., Ltd..
- Chen H K, Wang S J, 2017. Study on sinking-disintegration evolution mechanism of perilous rock for rock slope in limestone area of Three Gorges reservoir area: taking Zhenziyan cliff of Jinpo Mountain in Chongqing City as an example[J]. *Journal of Chongqing Normal University (Natural Science)*, 34 (3): 38 – 43 (in Chinese with English abstract).
- Dong H G, Chen L D, Huang C S, 2010. Influence factors and stability assessment of dangerous rocks in Yunyang–Jiangjin on Three Gorges reservoir[J]. *Journal of Engineering Geology*, 18 (5): 645 – 650 (in Chinese with English abstract).
- Deng S S, Chen H K, You L F, 2012. Developing mechanics for perilous rock in karst area: taking the Hailuo Bay in the Three Gorges as an example[J]. *Journal of Chongqing Normal University (Natural Science)*, 29 (6): 35 – 38 (in Chinese with English abstract).
- Hu H T, 1989. Rockfall and falling rock[M]. Beijing: China Railway Publishing House.
- Huang D, Yang W D, Chen Z Q, 2018. Collapse mechanism of Wangxia dangerous rock mass considering weathering effect of underlying soft rock[J]. *Yangtze River*, 49 (6): 64 – 69+78 (in Chinese with English abstract).
- He K, Gao Y, Yin Y P, et al., 2020. Stability assessment methods for huge high-steep unstable rock mass based on damage theory[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 47 (4): 82 – 89 (in Chinese with English abstract).
- Jian W X, Yin K L, Ma C Q, et al., 2005. Characteristics of incompetent beds in Jurassic red clastic rocks in Wanzhou[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 26 (6): 901 – 906 (in Chinese with English abstract).
- Liao W J, Nie B L, He Y M, et al., 2018. Analysis of formation mechanism and countermeasures of Lianziyan rock collapse in Badong County of Three Gorges reservoir area[J]. *Resources Environment & Engineering*, 32 (4): 642 – 647 (in Chinese with English abstract).
- Liu G N, Chen Z F, Huang B L, 2012. Instability modes and influencing factors of dangerous rock in Wanzhou section of Three Gorges reservoir area[J]. *Exploration Engineering in Western China*, 24 (12): 14 – 17 (in Chinese with English abstract).
- Liu C C, Yin K L, 2014. Risk analysis for the Daijiayan perilous rock in Wanzhou of Chongqing[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 41 (6): 128 – 133 (in Chinese with English abstract).
- Ran T, Wen B P, Su C, et al., 2012. Analysis of the formation mechanism of the Zhaojiayan rock fall in Wufeng County, Hubei Province[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 39 (6): 114 – 118 (in Chinese with English abstract).
- Su T M, Wu F Q, Zhu J W, et al., 2006. Research on collapse model of high cutting slope in Wanzhou District[J]. *Journal of Engineering Geology*, 14 (Suppl.): 337 – 343 (in Chinese with English abstract).
- Shao Q D, 2011. Treatment technology of dangerous rock landslide in Tianshengcheng, Wanzhou District, Three Gorges reservoir area[J]. *Exploration Engineering in Western China*, 23 (2): 51 – 53 (in Chinese with English abstract).
- Headquarters for Geological Disaster Prevention in the Three Gorges Reservoir Area, 2014. Geological Exploration Technical

- Requirements of Geological Disaster Prevention Project in the Three Gorges Reservoir Area[S]. Wuhan: China University of Geosciences Press.
- Tang H M, Wang C X, Chen H K, et al., 2005. Preliminary research on formation and long-term stability of cliff along the bank of the Three Gorges reservoir[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 24 (6) : 104 – 107 (in Chinese with English abstract).
- Tang H M, 2005. Research on control design case to sliding unstable rock in FEM[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 24 (5) : 62 – 64+81 (in Chinese with English abstract).
- Tang H M, 2006. Research on control design case to toppling unstable rock in FEM[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2 (4) : 658 – 661+699 (in Chinese with English abstract).
- Tang H M, Yan N, Zhou F C, et al., 2021. Analysis on the failure mechanism of tensile fracture-sliding of unstable rock with steep slope in the Three Gorges reservoir area[J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science), 38 (2) : 38 – 47 (in Chinese with English abstract).
- Xiao T, 2019. Stability analysis of a dangerous rock in the Three Gorges reservoir area of Wanzhou District, Chongqing[D]. Beijing: China University of Geosciences.
- Ye S Q, Tang H M, Zhu H, 2007. Typical formation causes of dangerous rock development in Wanzhou area[J]. Water Power, 33 (2) : 31 – 33 (in Chinese with English abstract).
- Yan J S, Tan J M, 2018. Preliminary analysis on development characteristics and genetic mechanism of Guanmuling dangerous rock in Zigui County, Three Gorges Reservoir Area[J]. Geology and Mineral Resources of South China, 34 (4) : 347 – 353 (in Chinese with English abstract).
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China, 2015. Seismic ground motion parameters zonation map of China (GB 18306-2015) [S]. Beijing: China Standards Press.
- Zhou Y T, Shi S W, Zhang Y, et al., 2017. Stability of unstable rock in nearly-horizontal sandstone-mudstone stratum due to enlarged rock-cell[J]. Journal of Engineering Geology, 25 (5) : 1220 – 1229 (in Chinese with English abstract).
- 陈洪凯, 鲜学福, 唐红梅, 等, 2008. 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, 31 (10) : 1178 – 1184.
- 陈启国, 郑万模, 常小军, 2011. 典型红层地区地下水的补、径、排关系探讨——以重庆市荣昌县为例[J]. 沉积与特提斯地质, 31 (3) : 107 – 112.
- 重庆市高新工程勘察设计院有限公司, 2016. 重庆市三峡库区地质灾害防治项目——万州区四层岩危岩带及下部斜坡补充勘察报告[R]. 重庆: 重庆市高新工程勘察设计院有限公司.
- 陈洪凯, 王圣娟, 2017. 三峡库区灰岩地区岩质边坡危岩座裂演化机制研究——以重庆市金佛山甄子岩为例[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 34 (3) : 38 – 43.
- 董好刚, 陈立德, 黄长生, 2010. 三峡库区云阳—江津段危岩形成的影响因素及稳定性评价[J]. 工程地质学报, 18 (5) : 645 – 650.
- 邓珊珊, 陈洪凯, 游来凤, 2012. 喀斯特山区危岩崩塌形成机制研究——以三峡库区巫溪海螺湾危岩为例[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 29 (6) : 35 – 38.
- 胡厚田, 1989. 崩塌与落石[M]. 北京: 中国铁道出版社.
- 黄达, 杨伟东, 陈智强, 2018. 考虑软弱基座风化效应的望霞危岩崩塌机制分析[J]. 人民长江, 49 (6) : 64 – 69+78.
- 贺凯, 高杨, 殷跃平, 等, 2020. 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, 47 (4) : 82 – 89.
- 简文星, 殷坤龙, 马昌前, 等, 2005. 万州侏罗纪红层软弱夹层特征[J]. 岩土力学, 26 (6) : 901 – 906.
- 廖伟杰, 聂邦亮, 何钰铭, 等, 2018. 三峡库区巴东县链子岩崩塌形成机制分析与防治对策[J]. 资源环境与工程, 32 (4) : 642 – 647.
- 刘广宁, 陈州丰, 黄波林, 2012. 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, 24 (12) : 14 – 17.
- 刘长春, 殷坤龙, 2014. 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, 41 (6) : 128 – 133.
- 冉涛, 文宝萍, 苏昌, 等, 2012. 湖北五峰赵家岩崩塌形成机理分析[J]. 水文地质工程地质, 39 (6) : 114 – 118.
- 苏天明, 伍法权, 祝介旺, 等, 2006. 万州区边坡崩塌失稳模式研究[J]. 工程地质学报, 14 (增刊) : 337 – 343.
- 邵其东, 2011. 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, 23 (2) : 51 – 53.
- 三峡库区地质灾害防治工作指挥部, 2014. 三峡库区地质灾害防治工程地质勘察技术要求[S]. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 唐红梅, 王昌贤, 陈洪凯, 等, 2005. 三峡库区陡崖形成及长期稳定性初步研究——以万州区太白岩为例[J]. 重庆交通学院学报, 24 (6) : 104 – 107.
- 唐红梅, 2005. 滑塌式危岩控制设计工况数值模拟研究[J]. 重庆交通学院学报, 24 (5) : 62 – 64+81.
- 唐红梅, 2006. 基于数值模拟研究倾侧式危岩的控制设计工况[J]. 地下空间与工程学报, 2 (4) : 658 – 661+699.
- 唐红梅, 闫凝, 周福川, 等, 2021. 三峡库区公路陡高边坡拉裂-滑塌型危岩破坏机制分析[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 38 (2) : 38 – 47.
- 肖瞳, 2019. 重庆市万州区三峡库区某危岩稳定性分析[D]. 北京: 中国地质大学.
- 叶四桥, 唐红梅, 祝辉, 2007. 万州地区危岩发育的典型成因[J]. 水力发电, 33 (2) : 31 – 33.
- 闫举生, 谭建民, 2018. 三峡库区秭归县棺木岭危岩体发育特征及成因机制探讨[J]. 华南地质与矿产, 34 (4) : 347 – 353.
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会, 2015. 中国地震动参数区划图 (GB 18306-2015) [S]. 北京: 中国标准出版社.
- 周云涛, 石胜伟, 张勇, 等, 2017. 岩腔后退近水平砂-泥岩互层危岩稳定性研究[J]. 工程地质学报, 25 (5) : 1220 – 1229.

附中文参考文献