

文章编号:1009-3087(2010)03-0001-06

石质山区崩塌灾害形成机制 ——以四面山国家级风景名胜区红岩山为例

陈洪凯^{1 2}, 鲜学福², 唐红梅^{1 2}

(1. 重庆交通大学 岩土工程研究所, 重庆 400074;
2. 重庆大学 西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室, 重庆 400044)

摘要:崩塌是石质山区主要的地质灾害,崩塌源通常存在稳定性较低的大量危岩体,其形成机制是防治崩塌灾害的关键环节。现场调查发现,四面山国家级风景名胜区红岩山崩塌源的危岩可分为坠落式危岩、倾倒式危岩、座滑式危岩和扶壁式危岩4类,所占比例分别为70%、15%、8%和7%;具有4级陡崖的地形特征、硬质砂岩和软质泥岩交互沉积、近于正交的3组岩体结构面是红岩山崩塌灾害孕育的主要环境地质条件;根据现场观测,岩腔后侧壁泥岩压裂风化速度5.2 cm/a左右,是斜坡表面裸露泥岩气候风化速度的3~6倍,岩腔的形成过程是崩塌灾害演绎的起搏器;运用地貌学方法揭示了红岩山崩塌灾害链式演化规律,当岩腔深度超过3 m后,岩腔顶部的危岩块易于发生崩塌。

关键词:崩塌灾害;基座压裂破坏;链式规律;崩塌源;危岩;红岩山

中图分类号:P642.3;O346.5;P642.21

文献标识码:A

Developing Mechanism for Collapse Disaster in Rocky Mountain Area —— Taking Mt. Hongyan in the National Scenic Spots of Simianshan as an Example

CHEN Hong-kai^{1 2}, XIAN Xue-fu², TANG Hong-mei^{1 2}

(1. Inst. of Geotechnical Eng., Chongqing Jiaotong Univ., Chongqing 400074, China;

2. Key Lab. for the Exploitation of Southwestern Resources and the Environmental Disaster Control Eng., Ministry of Education, Chongqing Univ., Chongqing 400044, China)

Abstract: Collapse is the dominant geological disaster in rocky mountain area, and usually many individual-perilous rock or bulk-perilous rocks exist in the source of collapse. The formation mechanism of perilous rock is one key link for hazard mitigation of collapse. According to the field investigation, four types of perilous rock at the source of Mt. Hongyan in the national scenic spots of Simianshan are classified as the falling perilous rock, the toppling perilous rock, the sliding perilous rock and the counterfort perilous rock, with the percentage of 70%, 15%, 8% and 7%, respectively. The general geological conditions to trigger the collapse disasters in the Mt. Hongyan are concluded as landforms with four cliffs, rock composite with sandstone and mudstone alternatively, and three sets of rockmass structure planes with the orthography. Field observations have identified the pacemaker of rock cells in mudstone below cliff, the weathering velocity of mudstone in rockcell under pressure is about 5.2 cm/a, 2~6 times exposing in air. Further, based on the geomorphology the chained principle for the developing of collapse in Mt. Hongyan is revealed. The result shows that collapses are easy to take place when the length of rock cell is over 3 m.

Key words: collapse disaster; base rupture under pressure; chained principle; source of collapse; perilous rock; Mt. Hongyan

收稿日期:2009-01-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50678182);重庆市重点自然科学基金资助项目(2008BA0015)

作者简介:陈洪凯(1964-),男,教授,博士后,研究方向:动力地貌学、山地灾害演变、安全警报与减灾技术。E-mail:chk_cq@163.com

崩塌灾害是石质山区常见的地质病害,产生源于崩塌源危岩体的形成及演变过程^[1],属于斜坡动力地貌过程^[2-3]。Braathen 等运用构造地质和岩石力学方法详细分析了挪威境内岩石边坡破坏机理^[4];杜时贵系统论述了岩体结构面的物理力学特性^[5];谢全敏等^[6]、常中华等^[7]、何应强等^[8]和谭继文等^[9]运用地质学方法探讨了崩塌源危岩体的稳定性问题;王鹏等^[10]和陈洪凯等^[11]提出了危岩主控结构面抗剪强度参数计算方法;陈洪凯等论述了危岩主控结构面的损伤断裂机理^[12-14],并发现了三峡库区危岩链式规律^[15-18]。作者以四面山国家级风景名胜区红岩山为例,系统分析石质山区崩塌灾害的形成机制,为崩塌灾害的有效防治提供科学依据。

1 崩塌灾害分布及形成条件

四面山国家级风景名胜区位于渝南江津区南端,大娄山北坡,层状地貌发育,海拔 700~1300 m,属于鄂西期和大娄山期夷平面。红岩山座落在风景名胜区北部边缘,为四面山国家级风景名胜区重要

组成部分,距离重庆市主城区约 100 km,处于头道河和黄连坝河交汇处的分水岭部位,坡脚海拔高程 750 m,坡顶海拔高程 1250 m,坡脚燕子村居民 500 余人,并有一条乡村公路绕山而建。近 20 年来,红岩山崩塌灾害事件频繁发生,造成人员伤亡 12 人、牲畜死亡 30 余头,毁坏耕地林地约 40 公顷。

红岩山坡顶坡脚高差 500 m,发育典型的 4 级陡崖,从下到上,陡崖高差分别为 60、72、80 和 160 m,如图 1 和图 2。陡崖上存在 62 个大型及特大型危岩体,单体体积 1000~1600 m³。坡脚存在 2 个由崩塌体堆积而成的堆积扇,其中 1[#]堆积扇前缘宽 420 m、纵向长 460 m,体积 357×10⁴ m³,前缘巨粒径块石广布,直径可及 29 m,主要发生在清朝末年,距今 130 a 左右,后期零星崩落堆积。2[#]堆积扇前缘宽 240 m、纵向长 270 m,体积 182×10⁴ m³,前缘堆积块石最大粒径 23 m 左右,从 20 世纪初以来 10 余次崩塌堆积而成,最近一次发生在 2004 年 12 月 21 日凌晨 5:00 左右,一次性崩塌体体积约 4000 m³,如图 3。

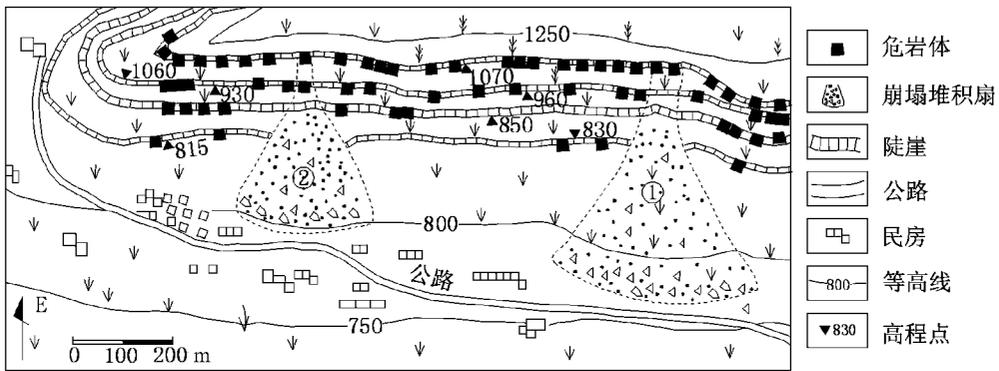


图 1 红岩山危岩及崩塌灾害分布简图

Fig. 1 Sketch for distribution of perilous rocks and collapses in Mt. Hongyan

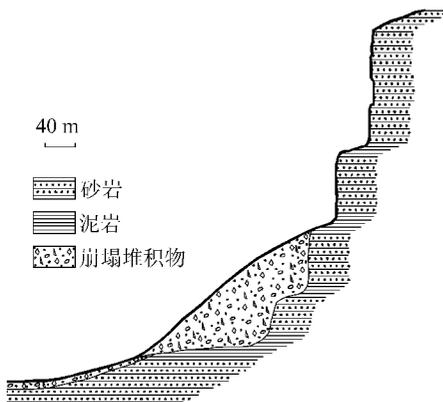


图 2 红岩山穿过 2[#]崩塌体的地质地貌图

Fig. 2 Geological and geomorphological section cross 2[#] fallings in Mt. Hongyan



图 3 红岩山 2[#]崩塌堆积扇轮廓

Fig. 3 Outline of 2[#] fallings in Mt. Hongyan
红岩山地层属于白垩纪晚期的砂岩、泥岩交互湖相沉积,硬质砂岩出露形成陡崖,软质泥岩出露形

成陡崖坡脚的斜坡,斜坡表面堆积丰富的崩坡积物,厚度5~30 m,局部大粒径块石顶部出露地表4~8 m。第2级陡崖主要由湖相砾石组成,粒径3~7 cm,为硅质胶结和铁质胶结。

砂岩内发育3组典型的岩体结构面:

第1组:与陡崖近于垂直,产状 $251^{\circ}\sim 260^{\circ}\angle 80^{\circ}\sim 85^{\circ}$,间距9~13 m,贯通率较好,可及83%。

第2组:与陡崖走向一致,走向 $NW85^{\circ}$,直立,间距6~10 m,贯通率好,可及90%。

第3组:岩层层面,倾角 $5^{\circ}\sim 8^{\circ}$,厚层状,厚度3~5 m。

3组地质构造面中,第2组为地貌演化过程中表生改造即侧向卸荷作用造成,是崩塌灾害形成的控制性地质因素,自然卸荷作用加剧了第2组结构面的贯通演化进程。

陡崖底部岩腔内的泥岩粘土含量较高,可及86%,含水量12%~17%,基本处于干燥状态。地貌台阶表面裸露的泥岩风化速度 $1.1\sim 2.5\text{ cm/a}$,如图4,但是位于第4级陡崖北端的岩腔,从1982年迄今平行后退1.3 m左右,则其平均后退速度为 5.2 cm/a 。多年观察发现,红岩山的小规模落石多发于在高强度降雨期间,而大规模崩塌则主要发生在秋冬季节。

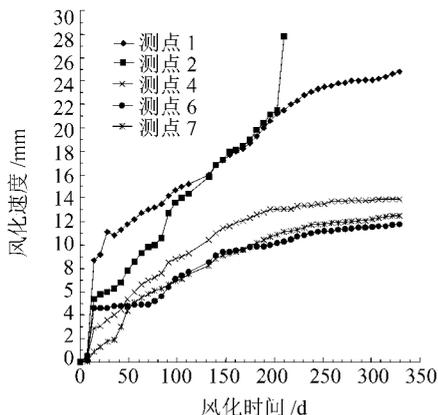


图4 天然状态下泥岩风化观测曲线(2007-04-30~2008-03-15)

Fig. 4 Observation curves of mudstone under natural condition from Apr. 30, 2007 to Mar. 15, 2008

2 危岩类型

红岩山的危岩可分为坠落式危岩、倾倒式危岩、座滑式危岩和扶壁式危岩4类。

2.1 坠落式危岩

前述3组结构面的共同作用,将砂岩切割成块状岩体,位于陡崖临空范围的稳定性较差的岩块便属于危岩体,是崩塌灾害源,多体现为群体发育。图

5显示了单体危岩崩落后的地貌形迹。坠落式危岩是红岩山崩塌源危岩的主要类型,占70%左右,是陡崖后退演化的主要动力地质机制^[4]。



图5 单体危岩崩落形迹

Fig. 5 Formality vestige of collapse of single perilous rock

2.2 倾倒式危岩

在陡崖坡脚的软质泥岩岩腔顶部,危岩体后部的主控结构面通常未完全贯通,危岩体以岩腔内侧壁泥岩顶端为支点,发生向外倾倒破坏,这类危岩体称为倾倒式危岩,如图6,占红岩山危岩总量的15%左右,集中分布在陡崖坡脚的硬质砂岩层内。



图6 倾倒式危岩

Fig. 6 Toppling perilous rock

2.3 座滑式危岩

当危岩体后部主控结构面完全贯通后,危岩体自重完全由下部残存的岩腔后部泥岩层承担,则泥岩在危岩体作用下沿着危岩主控结构面向下座,在泥岩中形成剪切破裂面,致使危岩体发生座滑式破坏,如图7,这种危岩在红岩山占8%左右,仍然分布在陡崖坡脚的硬质砂岩内。

2.4 扶壁式危岩

图8和图9所示位于陡崖中下部的扶壁式危岩,是左右两侧危岩体崩落后残存的危岩块体,一般由3~5个危岩体叠置而成,后部主控结构面均贯通,通常底部较宽,可及20 m左右,高度可及50 m左右,顶部均呈峰状,这类危岩在红岩山占7%左右。



图 7 座滑式危岩

Fig. 7 Sliding perilous rock

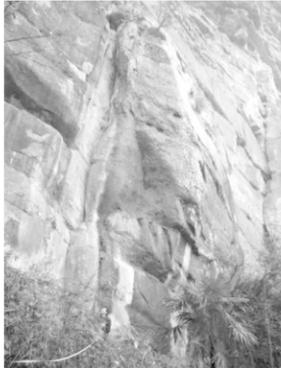


图 8 薄片状扶壁式危岩

Fig. 8 Flaky counterfort perilous rock

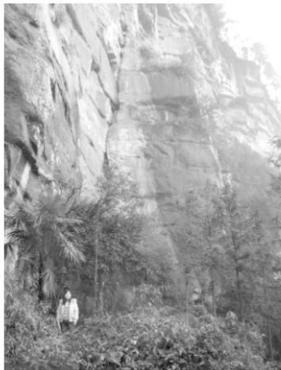


图 9 厚层状扶壁式危岩

Fig. 9 Thick layered counterfort perilous rock

3 危岩崩塌机制

3.1 基座压裂破坏

陡崖底部发育在泥岩内的岩腔是红岩山崩塌灾害演绎的源动力。现场调查与测试发现,每级陡崖底部的岩腔高度 0.2~2.9 m、长度 5.0~38 m、深度可及 4.3 m。岩腔内处于压裂阶段的软质泥岩宏观上表现为岩腔深度的快速增长,岩腔后部侧壁加速平行后退,壁面泥岩处于压裂崩解阶段,纵向压张裂缝发育,如图 10,泥岩压裂风化速度是自然风化速度的 3~6 倍,破解了三峡库区大量岩腔能够在缺少大气降雨、温差变化作用下仍然快速风化演进^[1]的难题。当岩腔深度超过 3 m 后,其顶部的危岩块易于崩塌。



图 10 岩腔压裂崩落平行后退

Fig. 10 Parallel retreat of rockcell under pressure

3.2 链式规律

由于基底压裂破坏机制主要针对岩腔顶部的第 1 个危岩体,即仅符合宏观链的第一个微观链情况,危岩体形成及崩落演化机制如图 11 所示,可分为 4 个阶段:1) 岩腔气候风化形成阶段;2) 基座压裂破坏阶段;3) 危岩体倾倒阶段;4) 危岩体崩落阶段。第 1 个微观链以上的危岩体逐个崩落的过程属于群发性崩塌灾害的链式规律^[15,18]。

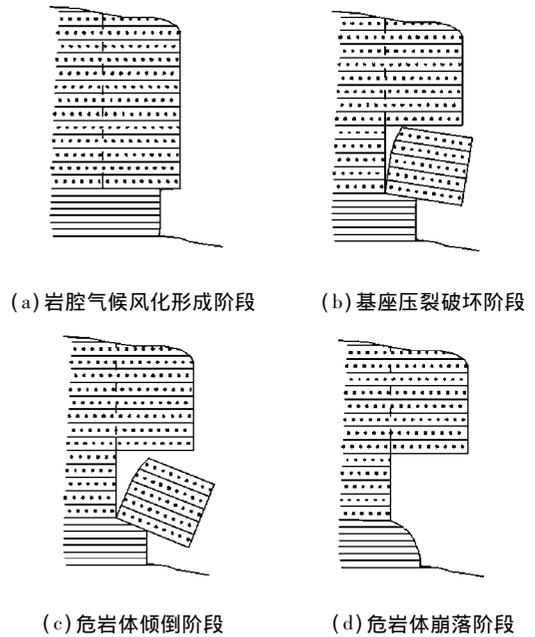


图 11 危岩体形成及崩塌演化模式

Fig. 11 Developing model of formation and collapse of perilous rock

处于初始危岩体形成及演化阶段的危岩体均为低位危岩,如图 12,与岩腔发育过程相关。进入陡崖上第 2 个及其以上的微观链发育阶段的危岩体均为高位危岩,以坠落方式崩落。当陡崖上多个宏观链同时发育时,在陡崖上可见清晰的倒台阶状地形,与三峡库区万州太白岩、天生城等危岩发育规律相似^[16]。红岩山第 4 级陡崖发育有 15~20 个微观链,目前第 1 个宏观链已经进入后期,2004 年 12 月

21日发生的危岩崩落事件属于2#堆积扇源头第4级陡崖顶部的第19个和第20个微观链同时崩落的情况,但该级陡崖更多处于第15~17个微观链发育阶段,如图13。



图12 陡崖低位链式坠落形迹

Fig. 12 Falling vestige in chained principle at lower situation on cliff

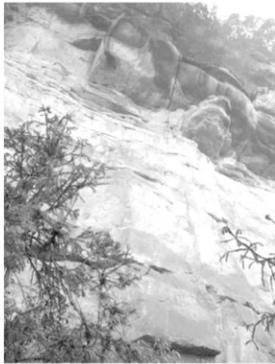


图13 陡崖高位链式坠落形迹

Fig. 13 Falling vestige in chained principle at higher situation on cliff

4 结论

以四面山国家级风景名胜区红岩山为例,分析了石质山区崩塌灾害形成机制:

1) 石质山区坡脚规模较大的堆积物主要源于陡崖上群体危岩的长期崩塌堆积。

2) 四级陡崖的地貌特征、硬质砂岩和软质泥岩交互沉积、近于正交的3组地质构造面是四面山国家级风景名胜区红岩山崩塌灾害孕发的主要环境地质条件,陡崖底部泥岩内岩腔的形成过程是崩塌灾害演绎的源动力。岩腔后侧壁泥岩应力风化速度5.2 cm/a左右,是斜坡表面裸露泥岩气候风化速度的3~6倍。

3) 红岩山的危岩可分为坠落式危岩、倾倒式危岩、座滑式危岩和扶壁式危岩4类,所占比例分别为70%、15%、8%和7%,危岩体后部主控结构面贯通率达到90%。

4) 红岩山崩塌灾害的形成过程符合链式规律,基座泥岩压裂破坏是第1级微观链崩落的主要动力机制,形成的危岩属于倾倒式危岩、座滑式危岩和扶壁式危岩,其上的危岩破坏属于崩塌灾害链式崩落过程,形成的危岩属于坠落式危岩。当岩腔深度超过3 m后,其顶部的危岩块易于发生崩塌。

进一步研究中,应探索红岩山危岩的稳定寿命,预测每个危岩体的安全状态,并从退耕还林、建立崩塌灾害防护林、设置拦石网并局部实施危岩支撑与锚固等方面加强崩塌灾害防治对策研究。

参考文献:

- [1] 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, 2008, 31(10): 1178 - 1184. [陈洪凯, 鲜学福, 唐红梅, 等. 三峡库区危岩群发性机理与防治[J]. 重庆大学学报, 2008, 31(10): 1178 - 1184.]
- [2] Richard J C, Stanley A S, David E S. Geomorphology [M]. Cambridge: The University Press of Cambridge, 1984: 255 - 275.
- [3] Bertran P. The rock-collapse of February 1995 at Claix (French Alps) [J]. Geomorphology, 2003, 54(3): 339 - 346.
- [4] Braathen A, Blikra L H, Berg S S, et al. Rock-slope failures in Norway: type, geometry, deformation mechanisms and stability [J]. Norwegian Journal of Geology, 2004, 84: 67 - 88.
- [5] 杜时贵. 岩体结构面的工程性质 [M]. 北京: 地震出版社, 1999: 15 - 25.
- [6] Xie Quanmin, Xia Yuanyou. Comprehensive assessment method of stability of critical rock-block mass and its application [J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(6): 775 - 777. [谢全敏, 夏元友. 危岩块体稳定性的综合评价方法分析[J]. 岩土力学, 2002, 23(6): 775 - 777.]

- [7] Chang Zhonghua, Chen Houjun, Zhang Lezhong, et al. Causes for the rock avalanche on the right bank of the KUITUN river and probability of its reoccurrence [J]. *Journal of Engineering Geology* 2005, 13(1): 76–80. [常中华, 陈厚军, 张乐中, 等. 奎屯河龙口右岸山体崩塌原因及再次失稳可能性分析 [J]. *工程地质学报* 2005, 13(1): 76–80.]
- [8] He Yingqiang, Song Gencai, Ma Yuegang. Stability research on Dr2 endangered rock mass of suofengying hydropower plant [J]. *China Rural Water and Hydropower* 2005(5): 87–90. [何应强, 宋根才, 马跃刚. 索风营水电站 Dr2 危岩体稳定性研究 [J]. *中国农村水利水电* 2005(5): 87–90.]
- [9] Tan Jiwen, Li Runwei, Ma Zhiqing. Analysis of No1 rock body stability in left bank of Jiangkou hydropower station arch dam [J]. *Water Resource and Hydropower of Northeast China* 2005 23(1): 9–10. [谭继文, 李润伟, 马志强, 等. 江口水电站拱坝左岸 1 号危岩体稳定分析 [J]. *东北水利水电* 2005 23(1): 9–10.]
- [10] Wang Peng, Zhao Xueliang, Wan Linhai, et al. Hybrid cluster analysis method based on GA and FCM for automatically identifying joint sets [J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing* 2004 26(3): 227–232. [王鹏, 赵学亮, 万林海, 等. 基于 GA 和 FCM 的岩体结构面的混合聚类方法 [J]. *北京科技大学学报* 2004 26(3): 227–232.]
- [11] Chen Hongkai, Tang Hongmei. Method for calculating strength parameters of structural planes controlling the rock block stability [J]. *Journal of Engineering Geology* 2007 16(1): 37–41. [陈洪凯, 唐红梅. 危岩主控结构面强度参数计算方法 [J]. *工程地质学报* 2007 16(1): 37–41.]
- [12] Chen Hongkai, Tang Hongmei, Ye Siqiao. Research on damage model of control fissure in perilous rock [J]. *Applied Mathematics and Mechanics* 2006 27(7): 967–974.
- [13] Chen Hongkai, Tang Hongmei. Method to calculate fatigue fracture life of control fissure in perilous rock [J]. *Applied Mathematics and Mechanics* 2007 28(5): 643–649.
- [14] Chen Hongkai, Tang Hongmei, Zhu Hui. Research on duration for perilous rock to form [J]. *WSEAS Transactions on Applied and Theoretical Mechanics* 2006, 1(2): 169–173.
- [15] Chen Hongkai. Geomorphology research on chained regularity of perilous rock in the area of the Three Gorges Reservoir [J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science* 2008 27(1): 91–95. [陈洪凯. 三峡库区危岩链式规律的地貌学解译 [J]. *重庆交通大学学报: 自然科学版* 2008 27(1): 91–95.]
- [16] Chen Hongkai, Tang Hongmei. Regularity of perilous rock in the area of the Three Gorges Reservoir [C]//*Proceedings of the 2th National Geotechnical and Engineering*. Beijing: Science Press, 2006: 837–842. [陈洪凯, 唐红梅. 三峡库区危岩发育规律研究 [C]//*第二届全国岩土与工程学术大会论文集(上)*. 北京: 科学出版社, 2006: 837–842.]
- [17] Chen Hongkai, Tang Hongmei. Testing research on development of perilous rock in tension-shear fracture [J]. *Journal of Chongqing University* 2006 29(6): 115–119. [陈洪凯, 唐红梅. 拉剪型危岩发育过程的模型试验 [J]. *重庆大学学报* 2006 29(6): 115–119.]
- [18] Chen Hongkai, Tang Hongmei, Xian Xuefu. Chained developing pattern for rock slopes with gentle dip strata [J]. *Journal of Lanzhou University: Natural Science* 2009 45(1): 20–25. [陈洪凯, 唐红梅, 鲜学福. 缓倾角层状岩体边坡链式演化规律 [J]. *兰州大学学报: 自然科学版*, 2009 45(1): 20–25.]

(编辑 张琼)