

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

邓珊珊, 陈洪凯, 游来凤

(重庆交通大学 岩土工程研究所, 重庆 400074)

摘要 研究三峡库区危岩崩塌地质灾害的演变机制和规律能帮助采取更合理的治理防护措施。采用地貌学和构造地质学等研究方法, 对海螺湾危岩带的形成机制进行研究。据调查, 该区的危岩单体和危岩群体均较发育, 总面积达 $4.30 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。根据其失稳模式可将该区的危岩主要分为压剪-滑动型和拉裂-倾倒型两种类型, 所占比例分别为 93.7% 和 6.3%。研究发现, 海螺湾危岩崩塌的形成属于斜坡自我稳定的平衡发展过程。在河流的下切运动过程中, 流水不停地淘蚀岸坡底部。长期的风化卸荷和岩溶作用, 使坡体内部近于垂直的 4 组次生裂隙之间产生相互作用的, 并且得到发展, 最终贯穿, 形成危岩体。研究认为, 岩溶作用和大量的人类工程活动对灰岩地区危岩的形成和发展有一定影响。

关键词 形成机制; 破坏模式; 危岩; 海螺湾

中图分类号 P642. 21

文献标志码 A

文章编号 1672-6693(2012)06-0035-04

巫溪县位于重庆市北部, 大巴山南缘。县内南部以喀斯特中山地貌为主, 北部以褶皱抬升中山地貌为主(图 1)。海螺湾危岩带位于河流岸坡地带, 大宁河“U”河谷右岸。与构造运动时期的内外营力的改造密切相关, 流水侵蚀剥蚀成为地形地貌的主导外营力, 属于侵蚀河谷岸坡地貌。自 2005 年来, 海螺湾危岩带在外动力的诱发下频繁发生崩塌(封二彩图 2), 严重威胁下方城区居民 119 户 394 人的生命财产及事业单位、公用设施和道路安全(封二彩图 3), 并因此可能造成约 1.14 亿元的直接经济损失。所以, 正确认识海螺湾危岩的成因, 揭示其破坏机制, 对确保人民生命财产安全具有重大意义。

危岩崩塌是重庆山区常见的地质灾害之一, 源于斜坡岩体在内外营力的双重作用下失去自然平衡而要重新获得平衡的过程^[1-2], 是属于斜坡的一种平衡稳定的自我调节功能。目前, Mu 等人^[3]及 Santo 等人^[4]对典型灰岩岩溶地区, 危岩的形成机制进行了相关的论述和研究; 刘琦等人^[5]针对动水压力作用下碳酸盐的溶蚀作用的发展进行了模拟实验研究; 姜海西等人^[6-7]基于有限元分析, 利用水下岩质边坡模型试验对水下岩质边坡的稳定性进行了研

究; Barbero, Amitrano 等人^[8-9]通过不连续体模型对危岩在地震作用下的稳定性进行了论述; 陈洪凯等人^[10]、肖盈等人^[11]、谢全敏等人^[12]论述了危岩稳定性的系列问题; 陈洪凯、唐红梅、王林峰等人针对危岩主控结构面的强度参数^[13]、损伤模型^[14]、群发性的和非群发性的危岩崩落机理^[15-16]进行了相关的研究; 高福德等^[17]运用静力解析法(定量)、赤平极射法(定性)和数值模拟法揭示了楔形体危岩块体的变形破坏机理; 唐红梅等人^[18]、杨益元^[19]阐述了落石运动轨迹以及相关的问题; 易朋莹等人^[20]针对三峡库区的实例探讨新现代构造应力场对三峡库区危岩发育的宏观作用。上述研究为认识喀斯特地区的危岩提供了一定的理论基础, 但没有针对岩溶地区危岩形成机制进行系统性地阐述。由于海螺湾危岩带地处长江流域的灰岩地带, 具有促进岩溶发育的各种条件, 如灰岩、丰富的地表水和地下水、裂隙发育等, 所以本研究以巫峡海螺湾危岩带为例, 分析了有岩溶作用的石质山区危岩崩塌的形成机制, 为防治此类危岩崩塌灾害提供有效的依据。

* 收稿日期 2012-04-05 网络出版时间 2012-11-12 16:42:01

资助项目 国家自然科学基金项目(No. 50678182), 国家科技攻关项目(No. GYHY201006039)

作者简介 邓珊珊, 女, 硕士研究生, 研究方向为岩土工程 通讯作者 陈洪凯, E-mail: chenhongkai@sina.cn

网络出版地址 http://www.cnki.net/kcms/detail/50.1165.N.20121112.1642.201206.35_008.html

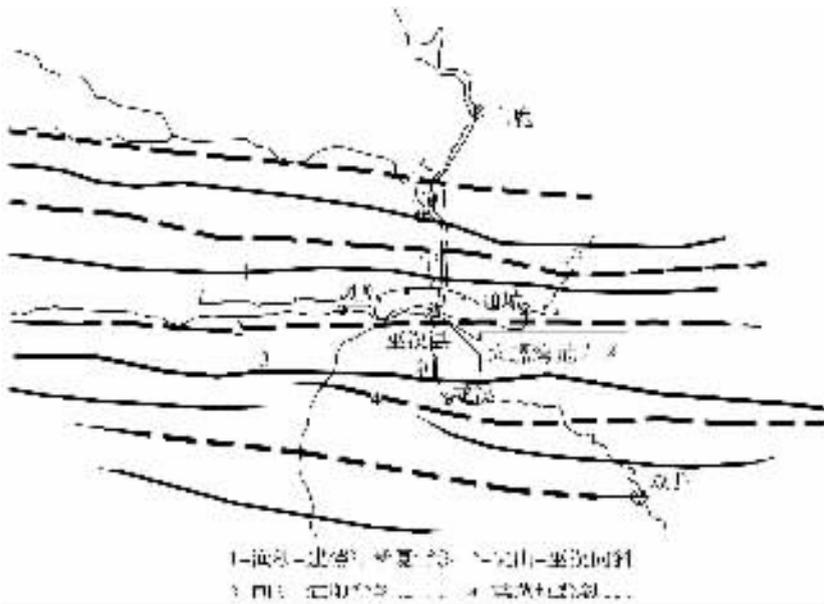


图1 研究区构造纲要图

Fig. 1 Tectonic outline map of the study area

1 海螺湾危岩区地质条件

海螺湾危岩带沿公路内侧陡崖展布。危岩总面积达到 $4.30 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。部分岩体已形成岩腔,危岩带临空面基于直立,所处势能较高,多数属于中位危岩。坡面起伏较大,河谷两岸坡度较缓,危岩坡体表现为上缓中陡下缓的“J”型剖面形态。危岩区域主要出露的下伏三叠系嘉陵江组白云质角砾状灰岩(T_{ij})质硬性脆,不易风化,局部含泥量稍高。出露的第四系全新统残坡积(Q_4^{el+dl})主要分布于危岩陡坡上部平缓地带,属于下伏基岩风化残留物。岩体的胶结物主要为钙质胶结,其次为泥质胶结。

据调查发现,海螺湾地区的地表径流条件好,有利于大气降水的入渗,促进岩体中的溶孔的发育(封二彩图4),进而加快裂隙的发展。大部分不填充,局部泥质填充。溶洞多被人为改造扩大成洞室(封二彩图5)。

在灰岩岩体内主要发育了4组典型的地质裂隙结构面,它们的具体情况如下。

第一组:北东向,与斜坡近于垂直,产状 $340^\circ \sim 360^\circ \angle 30^\circ \sim 87^\circ$ 。裂隙发育不完善,张开度一般 $0 \sim 15 \text{ mm}$,在WD3段最大达 70 mm ,纵横方向延伸一般为 $1 \sim 7 \text{ m}$ 。

第二组:北西向,与斜坡垂直,产状 $30^\circ \sim 40^\circ \angle 14^\circ \sim 87^\circ$,在WD3段最大达 100 mm ,纵横方向延伸一般为 $1 \sim 5 \text{ m}$ 。

第三组:南东向,与斜坡近于平行,产状 $60^\circ \sim 70^\circ \angle 23^\circ \sim 89^\circ$,属于较发育裂隙,裂隙张开度 $0 \sim 50 \text{ mm}$,最大达 150 mm ,走向延伸多大于 3 m ,垂向上部分延伸至坡脚,裂隙间距一般 $3 \sim 15 \text{ m}$,裂面粗糙,有少量泥质充填。

第四组:南西向,与斜坡近于平行,产状 $120^\circ \sim 130^\circ \angle 27^\circ \sim 90^\circ$,属于较发育裂隙,裂隙张开度 $0 \sim 70 \text{ mm}$,最大达 400 mm ,走向延伸多大于 3 m ,垂向上,部分已贯通至坡脚,裂隙间距一般 $5 \sim 10 \text{ m}$,裂面粗糙,有少量泥质充填。

4组地质结构裂隙中,边坡的卸荷作用加剧了垂直的地质

构造面的贯通演化过程。对于灰岩来说,在水条件充分的条件下,溶蚀作用的发生会加剧岩体内4组裂隙的发展和贯通。

2 海螺湾危岩类型

根据海螺湾危岩的勘察报告中的详细记录分析,海螺湾危岩体崩塌频率与主控结构面发展速度关系密切。根据危岩破坏模式^[21],可将危岩体崩塌破坏类型分为压剪-滑动型和拉剪-倾倒型。在上述4组地质结构面的相互切割作用下,灰岩被切割成各种楔形体和各种块体,暴露于大气中。

2.1 压剪-滑动型

此类危岩带的主控结构面的倾角较小,一般在 45° 以下,危岩体的重心在主控结构面的内侧。在重力、暴雨、地震、人类工程活动等外动力荷载的影响下,底部切割基座软化塑变,最终发生剪断滑动破坏,呈现出拉剪破坏的力学机制。该破坏模式是海螺湾危岩的主要破坏方式,占 93.7% ,如封二彩图6所示。

2.2 拉剪-倾倒型

该类型危岩主要受顺坡向裂隙控制,结构面倾角变化较大,一般大于 25° 。随着裂隙进一步发育扩展,重心逐渐外倾,多为陡崖或陡坡的卸荷张拉结构面,且主控结构面下端部潜存于陡坡岩体内。在外部荷载和振动条件下,危岩体以基座为支点,向坡外

发生转动倾倒崩落,呈现出拉剪破坏的力学机制(封二彩图7)。此类破坏方式在研究区内相对较少,占6.3%。

3 海螺湾危岩崩塌形成机制

处于向斜北翼的岸坡,岩层倾角 $20 \sim 40^\circ$,单斜构造,岩性为灰岩,岩体整体相对较完整。构造裂隙不发育,原生层面不明显。在三峡库区的新构造地面抬升的地质运动和江水的下切作用下,形成“U”型河谷。导致两岸岸坡卸荷回弹,发生拉裂变形,发育在斜坡表面 $0 \sim 6$ m。区内裂隙倾角交大,50%以上大于 70° ;裂隙面呈波状,锯齿状,且粗糙。岩体在长时间里受到降雨、重力、风化、地震和岩溶等的多重作用,内部的次生裂隙逐步扩张和发展,特别是在地下水和地表水都相当充沛的海螺湾地区,地表水沿着竖向裂隙渗入进岩体,沿着裂隙逐步发展,生长成溶孔、溶缝、溶槽和溶管等,最终发展成为溶洞。在此过程中溶蚀作用进一步的对岩体内的裂隙加宽加深,逐步向岩体内部深处扩展(封二彩图8),进一步将岩体切割成很多楔形体和块体,使岩体稳定性降低,形成危岩的前身。最终,主控结构面贯通,在外部荷载的诱因下发生落石崩塌灾害。

研究区岸坡下部则长期受大宁河河水冲蚀而逐渐被掏空,为上部形成的危岩体崩塌坠落创造了一定的条件。坠落的崩积物直接堆积在河流岸坡地带,经河流搬走后,其下部又直接受到河流的冲蚀破坏。然后,进入下一轮的侵蚀旋回。从宏观上说,整个过程其实就是河流在下切的过程中,岸坡失去平衡和重新获得平衡的自我调节的过程。

海螺湾地区危岩形成破坏演化机制用封二彩图9展示,主要分为4个阶段:a)河流下切产生卸荷裂隙;b)风化溶蚀裂隙;c)裂隙贯穿,危岩形成;d)危岩崩塌。

4 结论

1) 工程地质条件是决定巫山海螺湾危岩带(群)形成和破坏的宏观地质背景。三叠系下侏罗组白云质角砾状灰岩(T_{1j})和上覆第四系松散土体之间极易出现差异风化。该地区的危岩大多发育在岸坡的中上部,多属中位危岩。

2) 单斜缓倾灰岩,在大宁河下切过程中岸坡卸荷回弹,产生拉裂隙。在外部风化和溶蚀作用的发

展下,岩体内部进一步产生4组相互垂直、相互切割的地质结构面。

3) 海螺湾危岩带的形成过程符合喀斯特地区危岩形成规律。丰富的地表水,沿着各种次生改造裂隙的延伸方向,加宽加深裂隙,溶蚀岩体,最终危岩体主控结构面贯通,在外动力作用下诱发崩塌灾害。

4) 根据失稳模式将海螺湾危岩分为压剪-滑动型和拉剪-倾倒型,所占比例分别为93.7%、6.3%。

另外,在下一步对海螺湾危岩的深入研究中,建议探索每个危岩体的安全稳定状态,并从锚固清除、建立防护林和居民迁移等方面加强对该地区危岩的防治对策的研究。

参考文献:

- [1] Stokes A, Norris J E, Greenwood J R. Slope stability and erosion control: ecotechnological solutions [M]. Netherlands: Publications of the Universiteit van Amsterdam, 2008: 17-64.
- [2] Bertran P. The rock-collapse of February 1995 at Claix (French Alps) [J]. *Geomorphology*, 2003, 54(3): 339-346.
- [3] Mu C M, Lao Z P, Liu B C, et al. Study on the formation mechanism of the lime perilous rock in Guilin areas [C]// Remote sensing, environment and transportation engineering (RSETE), 2011 international conference. Nanjing: IEEE Press 2011: 6373-6377.
- [4] Santo A, Del Prete S, Di Crescenzo G, et al. Karst processes and slope instability: some investigations in the carbonate Apennine of Campania (southern Italy) [J]. *Geological Society Special Publications* 2007, 279(1): 59-72.
- [5] 刘琦, 卢耀如, 张凤娥, 等. 动水压力作用下碳酸盐岩溶蚀作用模拟实验研究 [J]. *岩土力学*, 2010, 31: 96-101.
- [6] 姜海西, 沈明荣, 任红梅. 波浪作用下水下岩质边坡的稳定性 [J]. *同济大学学报: 自然科学版*, 2009, 37(7): 1165-1173.
- [7] 姜海西, 沈明荣, 程石, 等. 水下岩质边坡稳定性的模型试验研究 [J]. *岩土力学*, 2009, 30(7): 1993-1999.
- [8] Barbero M, Barla G. Stability analysis of a rock column in seismic conditions [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2010, 43(6): 845-855.
- [9] Amitrano D, Arattano M, Chiarle M, et al. Microseismic activity analysis for the study of the rupture mechanisms in unstable rock masses [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2010, 10(4): 831-841.

- [10] 陈洪凯,鲜学福,唐红梅,等.危岩稳定性分析方法[J].应用力学学报,2009,26(2):278-282.
- [11] 肖盈.公路危岩稳定性评价分析[J].公路交通技术,2010,8(4):23-27.
- [12] 谢全敏,夏元龙.危岩块体稳定性的综合评价方法分析[J].岩土力学,2002,23(6):775-777,781.
- [13] 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,2008,16(1):37-41.
- [14] 陈洪凯,唐红梅,叶四桥.危岩主控结构面损伤模型研究[J].应用数学和力学,2006,27(7):845-851.
- [15] 唐红梅,陈洪凯,王林峰,等.岩质陡坡上危岩崩落机理研究[J].金属矿山,2009,39(2):40-45.
- [16] 王林峰,唐红梅,陈洪凯.陡崖上群发性危岩崩塌机理研究[J].武汉理工大学学报,2010,32(6):1-5.
- [17] 高福德,王亮.危岩楔形块体变形破坏机制研究[J].中国新技术新产品,2010(15):119.
- [18] 唐红梅,易朋莹.危岩落石运动路径研究[J].重庆建筑大学学报,2003,25(1):17-23.
- [19] 杨仲元.道路边坡危岩落石运动路径研究[J].公路交通科技,2010,27(1):34-38.
- [20] 易朋莹,陈洪凯,唐红梅.新、现代构造应力场对三峡库区危岩发育宏观的作用[J].科技创新导报,2009(2):240-241.
- [21] 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,2009:23-24.

Resources , Environment and Ecology in Three Gorges Area

Developing Mechanics for Perilous Rock in Karst Area : Taking the Hailuo Bay in the Three Gorges as an Example

DENG Shan-shan , CHEN Hong-kai , YOU Lai-feng

(Institute of Geotechnical Engineering , Chongqing Jiaotong University , Chongqing 400074 , China)

Abstract Study the mechanisms and laws of evolution of the perilous rock collapse of geological disasters in Three Gorges Reservoir Area , is helpful for us to take a more rational management and protection measures , more effective ensure human lives and property safety. Study the formation mechanism of unstable rocks in Hailuo Bay with Geomorphology and structural geology. Both the monomer and the colony perilous rock are developing , and the area of perilous rock in a total with $4.30 \times 10^4 \text{m}^2$. According to the unstable modes , two types of perilous rock at the source of Hailuo Bay are classified as the compression and shear sliding type and the fracturing-toppling type , with the percentage of 93.7% and 6.3% respectively. The study found , the Hailuo Bay perilous rock collapse , belongs to the formation of self-stabilizing the balance of the development process. In the fluvial digesting movement , flowing dredging and erosion the bottom of the bank slope constantly. The weathering and the Karst never stop to develop the fissure , which the four main fractures interaction , until the penetrative cranny presence , and the perilous rocks formed which is harmful to the surrounding environment of human life. It shows that the Karst and a numerous engineering activities contribute to the formation of perijous rocks actively in the limestone area.

Key words : developing mechanics ; failure mode ; perilous rock ; Hailuo Bay

(责任编辑 方 兴)