

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

陈洪凯, 王圣娟

(重庆交通大学 岩土工程研究所, 重庆 400074)

摘要:【目的】灰岩地区的危岩表现为危岩聚集体,具有类砌体结构特征;危岩座裂解体是灰岩地区危岩破坏的核心科学问题。【方法】以在三峡库区具有代表性的重庆市金佛山甄子岩为例,采用现场连续观测和地貌学方法,研究灰岩地区边坡的发育机制问题。【结果】危岩的形成与破坏是灰岩地区边坡演化的主要动力学机制,甄子岩危岩体下座过程中基座的碳质页岩表现出显著的压裂喷射现象,类砌体结构底部快速解体;甄子岩坡脚碳质页岩自然风化速度约 $48 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$,甄子岩危岩形成过程的地貌学解释可概化为3个阶段,每个过程边坡后退 $35 \sim 40 \text{ m}$,所需时间在 600 a 左右;灰岩地区岩质边坡演化在较短时间尺度(如甄子岩在 600 a 左右)具有局部后退特征,但在较长时间尺度(如甄子岩在 1200 a 以上)表现为平行后退。【结论】研究成果对于科学解释三峡库区边坡地貌演化规律、防治灰岩地区危岩崩塌灾害有积极意义。

关键词:边坡地貌演化;危岩座裂解体;类砌体结构;灰岩地区;三峡库区;甄子岩

中图分类号: P931.91; P642.2

文献标志码: A

文章编号: 1672-6693(2017)03-0038-06

边坡(Cutting slope)或自然斜坡(Natural slope)是地貌演化的基本单元。20世纪初,科学家们便对坡地的地貌发育作了广泛而深入地研究,如 Davis、Penck 和 King 分别提出了坡地发育的演化模式;Chorly 等人梳理出湿润地区风化作用导致坡地倾角逐渐变缓而干旱地区由于顶部硬质岩层的限制作用导致坡地保持平行后退的规律^[1]。三峡库区砂岩地区和灰岩地区的边坡地貌演化存在明显差异,郑度等人^[2]将砂岩地区的山坡划分成4个坡段;崇靖等人^[3]发现三峡库区大部分边坡为剥蚀陡坡而少部分为崩塌滑坡陡坡;陈洪凯等人^[4-5]从危岩崩塌发育角度探讨了砂岩地区边坡地貌演化规律,并分析了边坡演化的力学机制^[6-8];更多学者则从微观角度分析岩石的断裂破坏问题,如 Oliver 等人^[9]关注材料破坏应变局部化和离散断裂问题,Fraysines 和 Hantz 分析了灰岩边坡的破坏问题^[10]。三峡库区灰岩地区岩质边坡的地貌演化具有特殊性,其中危岩座裂演化模式占 60% 左右。本研究以重庆金佛山甄子岩为例,分析三峡库区灰岩地区岩质边坡危岩座裂演化问题,对于科学揭示三峡库区边坡地貌演化规律有积极意义,并为防治灰岩地区的危岩崩塌灾害提供参考借鉴。

1 甄子岩地质地貌条件

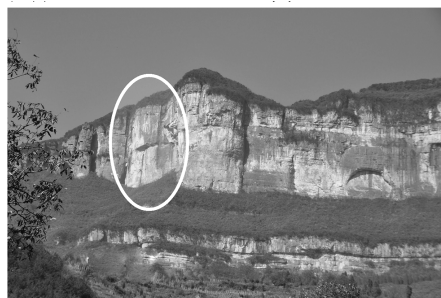
甄子岩位于北东—南西向的金佛山向斜内,由两级陡崖组成。第一级陡崖由二叠纪栖霞组灰岩组成,崖高 $80 \sim 105 \text{ m}$,崖顶海拔为 $1400 \sim 1545 \text{ m}$;第二级陡崖由茅口组石灰岩组成,崖高 $200 \sim 215 \text{ m}$,崖顶海拔为 1800 m 左右;两级陡崖之间的斜坡坡角为 $30^\circ \sim 52^\circ$,宽度为 $70 \sim 80 \text{ m}$,由二叠纪茅口组碳质页岩组成。边坡岩体内主要发育两组结构面,走向分别是 $30^\circ \sim 40^\circ$ (第1组)和 $320^\circ \sim 330^\circ$ (第2组);第1组为边坡北东—南西向的卸荷裂隙,第2组为边坡北西—南东方向的卸荷裂隙。W12#危岩位于第二级陡崖,危岩崩塌前后地貌景观如图1划圈处所示,危岩所在部位的地质地貌剖面如图2所示。W12#危岩体高约 180 m ,平均宽度为 35 m ,沿陡崖走向方向的长度为 40 m 左右,体积约为 $2.51 \times 10^5 \text{ m}^3$;危岩体由大量小尺度灰岩块组成,危岩主控结构面近于直立;贯通段长 159 m ,危岩体底部的非贯通段处于压剪状态,长 38.2 m ,压剪段出口隐藏在危岩体基座碳质页岩内。危岩体容重 $26.3 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$,自重 $6.6 \times 10^6 \text{ kN}$ 。

^{*} 收稿日期:2016-09-28 修回日期:2017-01-01 网络出版时间:2017-05-02 17:24

资助项目:国家自然科学基金(No.51678067;No.51378521;No.11272185);重庆市首席专家工作室专项经费(No.201605);重庆市"两江学者"计划专项资金(No.201309);2016年重庆高校创新团队建设计划(No.CXTDG201602012)

第一作者简介:陈洪凯,男,教授,博士,研究方向为地貌过程减灾与环境修复,E-mail:chk99@163.com

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1165.N.20170502.1724.024.html>



a 崩塌前



b 崩塌后

图1 甄子岩 W12# 危岩崩塌前后地貌景观

Fig. 1 Outline before and after the collapse of W12# perilous rock in Zhenziyan cliff

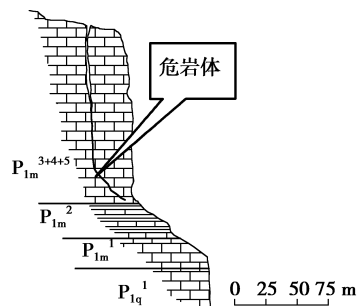


图2 甄子岩 W12# 危岩地质断面

Fig. 2 Geological section of W12# perilous rock in Zhenziyan cliff

2 灰岩地区危岩座裂破坏机制

2.1 甄子岩变形监测

2000年,任幼蓉等人^[11]在危岩体顶部安设了1#,2#,3#和4#监测点,对甄子岩 W12# 危岩变形进行连续监测。2001—2002年,危岩体顶部的水平位移变化量均小于 $0.1 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$;2003年1月—2004年3月,危岩体顶部的水平位移变化量在 $0.2 \sim 1.0 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$;2004年4—8月初,危岩体顶部的水平位移变化量线性增大(图3),最大可及 300 mm ,日变形量超过 $2.5 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。2004年8月10日,危岩体顶部的水平位移量1#测点可及 41 mm ,2#测点可及 168 mm ,3#测点可及 70 mm ,4#测点可及 166 mm ;截至8月11日,4#测点的累计水平变形量达到 658 mm ;8月12日12:53,甄子岩 W12# 危岩体发生突发性座裂破坏。

2.2 危岩基座岩土体压裂喷射

危岩体下座变形过程中,具有向后倾倒的趋势,危岩体表现出轻度座滑特征,危岩体与后壁母岩之间产生强烈的摩擦作用,出现白色尘雾(图4)。根据功能平衡原理,若 W12# 危岩体下座 1 m ,危岩体底部的平均冲击速度约 $4.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,足以使碳质页岩颗粒高速喷出,喷出距离约 4.9 m ;当 W12# 危岩体整体下座 50 m 时,碳质页岩颗粒喷出距离可达 260 m ,而下座 90 m 时,碳质页岩颗粒喷出距离可达 458 m ,与现场观测结果相近(图5)。碳质页岩在危岩下座压裂作用下的高速喷射示意图如图6所示,加速了危岩体底部岩腔的发育过程^[12],促进危岩体下座破坏过程^[13]。

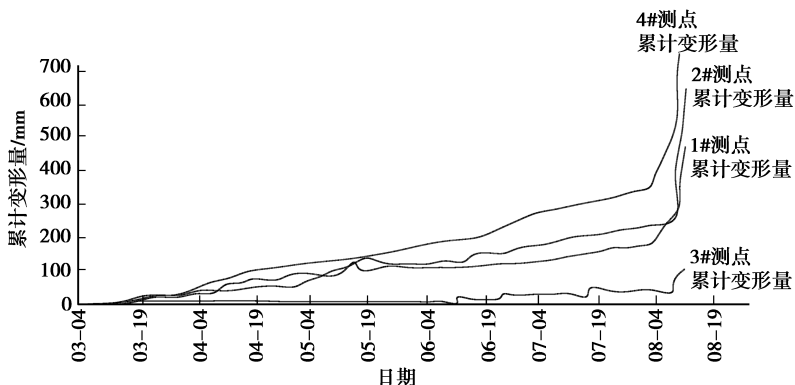
图3 2004年甄子岩 W12# 危岩体顶部水平位移变化曲线^[11]

Fig. 3 Horizontal displacement curve at the top of W12# perilous rock in Zhenziyan cliff in 2004



图4 甄子岩 W12# 危岩下座过程中与母岩摩擦成雾

Fig. 4 Lithic fragment fog from rubbing action between W12# perilous rock and source rocks in Zhenziyan cliff



图 5 甄子岩 W12# 危岩临崩前基座碳质页岩压裂喷射过程

Fig. 5 The sinking-disintegration injection process of carbonaceous shale in the impending collapse of W12# perilous rock in Zhenziyan cliff

2.3 危岩下座解体

现场观测发现,当危岩体下座 30 m 左右时,危岩体底部出现座裂解体破坏。根据功能原理,当 W12# 危岩体下座 30 m 时,由 Hertz 碰撞理论估算产生的冲击力^[14]约为 5.9×10^7 kN,等效为 42.33 MPa,而危岩体的单轴抗压强度 33~40 MPa。显然,危岩体下座 30 m 左右时,危岩类砌体结构底部易出现碎裂解体,实际发生的危岩下座解体过程如图 7 所示。

3 灰岩边坡座裂演化模式

3.1 甄子岩危岩形成的地貌学解译

按照甄子岩危岩第 1 组结构面间距 35~40 m 推算,截至目前,甄子岩危岩形成过程的地貌学解译可概化为 3 个阶段,即 A, B, C 等 3 个危岩块相继形成与崩塌过程,属于 3 个地貌小循环(图 8),其中图 8a 为第二级陡崖的初始地貌形态,图 8b-d 为危岩块 A 形成、破坏与崩塌过程,图 8e-g 为危岩块 B 形成、破坏与崩塌过程,图 8h-j 为危岩块 C 形成、破坏与崩塌过程。每个危岩块的形成均以危岩体底部碳质页岩的快速风化孕育岩腔为诱发因素,如图 8b, e, h;当岩腔深度增大到一定值时,危岩主控结构面端部区域的碳质页岩出现压裂喷射,如图 8c, f, i;随后危岩块体呈现突发性崩塌破坏,如图 8d, g, j。图 8j 的地貌景观与甄子岩 W12# 危岩崩塌后的地貌形迹相同。

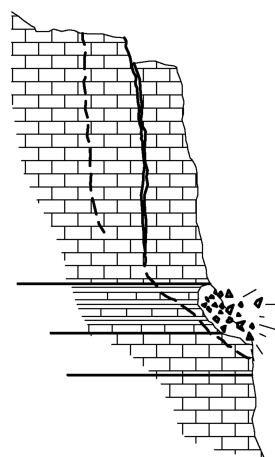


图 6 甄子岩 W12# 危岩临崩前基座碳质页岩压裂喷射示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the sinking-disintegration injection of carbonaceous shale in the impending collapse of W12# perilous rock in Zhenziyan cliff

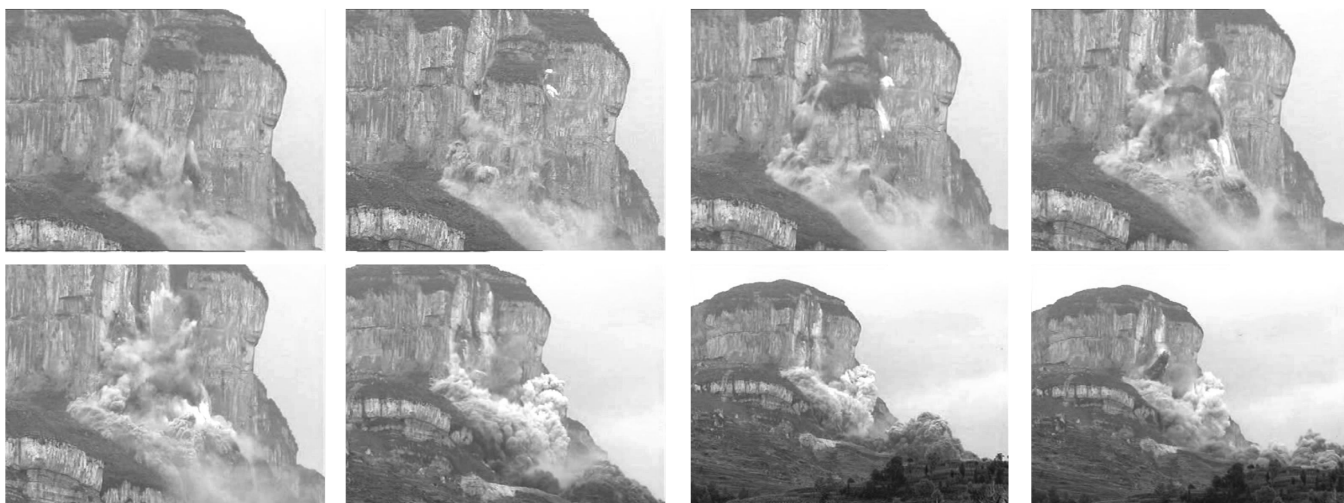


图 7 甄子岩 W12# 危岩下座破坏解体过程

Fig. 7 The sinking-disintegration process of W12# perilous rock in Zhenziyan cliff

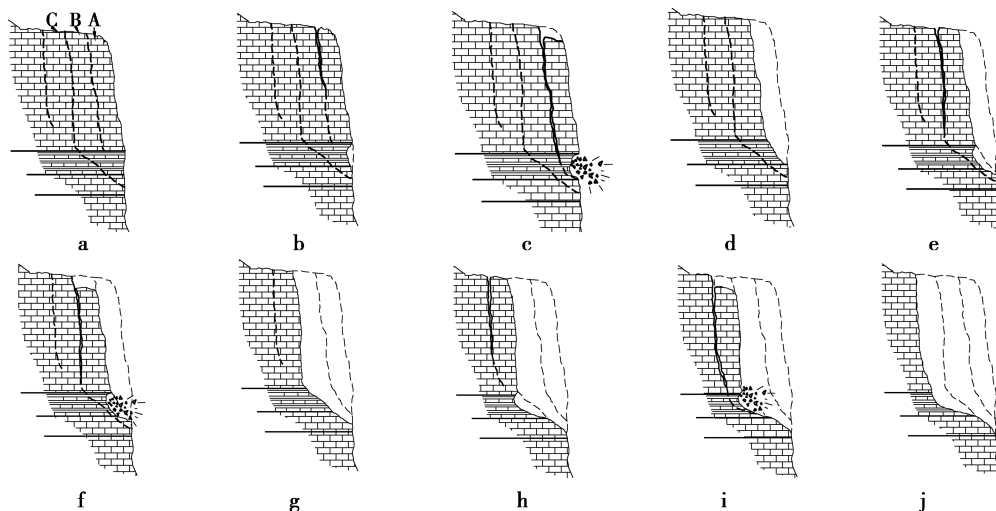


图8 甄子岩二级陡崖地貌演化过程

Fig. 8 The Geomorphologic evolution process of the second cliff in Zhenziyan cliff

3.2 灰岩地区岩质边坡地貌演化模式

现场调查发现,三峡库区灰岩地区的岩质边坡演化模式如图9所示,遵循危岩座裂演化机制。该类边坡地貌演化过程中,危岩体由大量小尺寸灰岩块组成并被多组陡倾角岩体结构面切割,呈现类砌体结构(Quasi-masonry structure)特征,落水洞、漏斗、溶蚀洼地等喀斯特作用加速了陡倾岩体结构面张开度和贯通度的发育过程;而危岩基座泥岩、泥页岩、碳质页岩等软质岩体与危岩体之间的差异风化在软质岩体内形成岩腔(Rock notch),这成为诱发灰岩边坡后退演化的起搏器(Pacemaker)。因此,着眼于危岩底部岩腔的发育过程探索灰岩地区岩质边坡的地貌演化问题是可行的,这与 Regmi 等人^[15]从岩体风化角度探讨喜马拉雅山中段尼泊尔境内灰岩、白云岩地区的滑坡灾害发育问题思路相似。

地貌演化是地貌学的经典科学问题,尤其是进入21世纪后,边坡地貌演化过程的量化问题一直是国内外地貌学者研究的热点问题,如 Lange 等人^[16]估算出新西兰 Auckland 海蚀崖后退速率在 $11 \sim 75 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$, Barlow 等人^[17]提出了一种负指数幂函数方法用于模拟几十年尺度范围内陡崖地貌的后退问题。笔者于2010年2月15日至2012年2月25日在甄子岩二级陡崖坡脚的碳质页岩表面布置了10个监测点,累计731 d,记录了碳质页岩在自然条件下的风化过程(图9)。结果表明碳质页岩在自然条件下风化速度与气候条件关系密切,第100天到第250天为2010年雨季,第450天到第680天为2011年雨季,碳质页岩风化速度较大,可达到 $48 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$,平均约 $38 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 。据此估算,形成10 m深的岩腔只需要260 a左右。如甄子岩,危岩体平均宽度35 m,根据陈洪凯等的研究,岩腔深度为危岩体宽度的2/3左右时,危岩体将突发性失稳^[18],据此推算,甄子岩边坡一个地貌演化旋回所需时间在600 a左右,这个时间历时与当地县志记录比较接近。

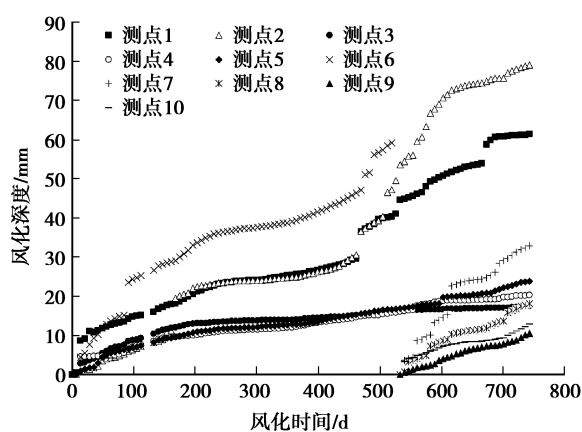


图9 甄子岩二级陡崖坡脚碳质页岩风化曲线

Fig. 9 Weathering curves of carbonaceous shale at foot of the second cliff in Zhwnziyan cliffs

图10所示的灰岩地区岩质边坡演化模式中,图10a比较理想地给出了a~h等8个危岩体,临空面的a,b,c,d等4个危岩块失稳破坏通常具有随机性,如图10b表示危岩块a和b已经破坏崩落,它们后部的危岩块e和f暴露临空,图10c表示危岩块e已经破坏崩落。可见,灰岩地区岩质边坡地貌演化在较短时间尺度上具有局部后退特征,即危岩座裂破坏(Sinking-disintegration rupture of perilous rock),但在较长时间尺度上则表现为平行后退。

目前,应拓展地貌过程研究思维,积极引入损伤力学、断裂力学等工程力学方法,将传统的定性和逻辑推理

研究方法与工程力学相结合,如 Imposa 等人^[19]采用构造地质学方法分析了碳酸盐岩陡崖的稳定性问题,陈洪凯等人^[6-8]从力学角度探讨了砂岩地区边坡地貌演化问题,但对灰岩地区边坡地貌演化的量化研究问题尚未取得实质性进展,这也是下一阶段研究的核心科学问题之一。

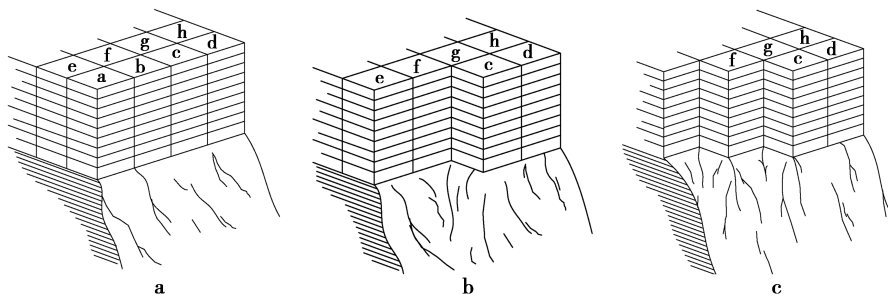


图 10 灰岩地区岩质边坡演化模式

Fig. 10 The evolution model of rock slope in limestone area

4 结论

以重庆市金佛山甄子岩为例,分析了三峡库区灰岩边坡危岩座裂演化机制,得出以下结论:

1) 灰岩地区危岩具有类砌体结构特征,甄子岩危岩体在下座过程中,基座碳质页岩具有明显的压裂喷射特征,类砌体结构底部快速解体。

2) 甄子岩边坡演化经历了 3 个危岩块的下座解体演化过程,每个过程边坡后退 35~40 m,基于现场观测的基座碳质页岩自然风化速度估算边坡每次后退演化时间在 600 a 左右。

3) 灰岩地区岩质边坡演化在较短时间尺度(如甄子岩在 600 a 左右)上具有局部后退特征,但在较长时间尺度(如甄子岩在 1 200 a 以上)上表现为平行后退。

进一步研究中,将引入损伤力学、断裂力学和突变理论,科学分析灰岩地区具有类砌体结构特征危岩的座裂演化力学机制,使工程力学与边坡地貌演化有机结合,实现对边坡地貌演化的精细描述。

参考文献:

- [1] CHORLY R J, SCHUMM S A, SUGDEN D E. Geomorphology[M]. London: University Press of Cambridge, 1984.
- [2] 郑度, 申元村. 坡地过程及退化坡地恢复整治研究[J]. 地理学报, 1998, 53(2): 116-122.
ZHENG D, SHEN Y C. Studies on process, restoration and management of the degrading slopelands [J]. Acta Geographica Sinica, 1998, 53(2): 116-122.
- [3] 崇婧, 杨达源, 姜洪涛, 等. 长江三峡地区坡地发育初步研究[J]. 长江流域资源与环境, 2002, 11(3): 265-268.
CHONG J, YANG D Y, JIANG H T, et al. Preliminary research on slope development in the three gorges areas[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2002, 11(3): 265-268.
- [4] 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.
CHEN H K. Geomorphology research on chained regularity of perilous rock in the area of the gorges reservoir[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2008, 27(1): 91-95.
- [5] 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.
CHEN H K, TANG H M, XIAN X F. Chained developing pattern for rock slopes with gentle dip strata[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2009, 45(1): 20-25.
- [6] 陈洪凯, 唐红梅, 王林峰, 等. 缓倾角岩质陡坡后退演化的力学机制[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(3): 468-473.
CHEN H K, TANG H M, WANG L F, et al. Mechanical mechanism for retreat evolution of steep rock slopes with gentle dip[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(3): 468-473.
- [7] 唐红梅, 王林峰, 陈洪凯, 等. 软弱基座陡崖上危岩崩落序列[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(2): 205-210.
TANG H M, WANG L F, CHEN H K, et al. Collapse sequence of perilous rock on cliffs with soft foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(2): 205-210.
- [8] 王林峰, 陈洪凯, 唐红梅. 反倾岩质边坡破坏的力学机制研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(5): 884-889.
WANG L F, CHEN H K, TANG H M. Mechanical mechanism of failure for anti-inclined rock slopes [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(5): 884-889.
- [9] OLIVER J, HUESPE A E, DIAS I F. Strain localization, strong discontinuities and material fracture: matches and mismatches[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2012, 241/242/243/244(9): 323-336.
- [10] FRAYSSINES M, HANTZ D. Modelling and back-analysing failures in steep limestone cliffs[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009, 46(7): 1115-1123.
- [11] 任幼蓉, 陈鹏, 张军, 等. 重庆南川甄子岩 W12 危岩崩塌预

- 警分析[J].中国地质灾害与防治学报,2005,16(2):28-31.
- REN Y R, CHEN P, ZHANG J, et al. Early-warning analysis on the rockfall for Zenziyan W12# dangerous rock mass in Nanchuan City of Chongqing [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2005, 16(2): 28-31.
- [12] 陈洪凯, 王全才, 唐红梅. 岩腔内泥岩压裂风化特性研究[J]. 人民长江, 2010, 41(21): 51-54.
- CHEN H K, WANG Q C, TANG H M. Study on weathering and fracturing features of mudstone in rock cell [J]. Yangtze River, 2010, 41(21): 51-54.
- [13] 陈洪凯, 张瑞刚, 唐红梅, 等. 压剪型危岩破坏弹冲动力参数研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(24): 30-34.
- CHEN H K, ZHANG R G, TANG H M, et al. Elastic & impulsive dynamic parameters of a ruptured compression-shear perilous rock [J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(24): 30-34.
- [14] 陈洪凯, 唐红梅, 叶四桥, 等. 危岩防治原理[M]. 北京: 地震出版社, 2006.
- CHEN H K, TANG H M, YE S Q, et al. Perilous rock control principle [M]. Beijing: Seismological Press, 2006.
- [15] REGMI A D, YOSHIDA K, NAGATA H, et al. The relationship between geology and rock weathering on the rock instability along Mugling-Narayanghat roadcorridor, Central Nepal Himalaya [J]. Nat Hazards, 2013, 66(2): 501-532.
- [16] LANGE W P D, MOON V G. Estimating long-term cliff recession rates from shore platform widths [J]. Engineering Geology, 2005, 80(3/4): 292-301.
- [17] BARLOW J, LIM M, ROSSER N, et al. Modeling cliff erosion using negative power law scaling of rockfalls [J]. Geomorphology, 2012, 139/140(4): 416-424.
- [18] CHEN H K, TANG L, ZHANG R G, et al. Mutation instability model of perilous rock and calculation methods for corresponding dynamic parameters [J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 249/250: 1030-1039.
- [19] IMPOSA S, CORRAO M, BARONE F, et al. Geostructural and geognostic survey for a stability analysis of the calcareous cliff of Ispica (Hyblean plateau, Southeastern Sicily) [J]. Bull Eng Geol Environ, 2010, 69(2): 247-256.

Resources, Environment and Ecology in Three Gorges Area

Study on Sinking-disintegration Evolution Mechanism of Perilous Rock for Rock Slope in Limestone Area of Three Gorges Reservoir Area: Taking Zhenziyan Cliff of Jinfo Mountain in Chongqing City as an Example

CHEN Hongkai, WANG Shengjuan

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

Abstract: [Purposes] Perilous rocks in limestone area are in aggregate with quasi-masonry structure, and it is the key scientific problem for the sinking-disintegration of the perilous rock to rupture. [Methods] Taking Zhenziyan cliff in Chongqing city as an example, a representative rock slope in limestone area of Three Gorges reservoir area, it discusses the slope development in limestone area by investigation in fields and geomorphology. [Findings] Studies indicate that it is the main dynamic mechanism of slope landform development for formation and rupture of perilous rock in limestone area, and the carbonaceous shale on the base of perilous rock in Zhenziyan cliff shows significant fracturing-jetting in the sinking process of the perilous rock, which triggers quickly disintegrates for the part at the bottom of the quasi-masonry structure. The natural weathering speed of carbonaceous shale in the toe of Zhenziyan cliff is about $48 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$, and the slope evolution has experienced three evolutionary processes of sinking-disintegration of perilous rock, so the slope retreats about 35~40 m every process, and it takes about 600 years. In a short period such as 600 years at Zhenziyan cliff, the evolution of rock slope shows partly back characteristics, but in a long period such as more than 1 200 years at Zhenziyan cliff, it shows parallel retreat. [Conclusions] The achievement in the paper is valuable in revealing the slope geomorphologic evolution discipline and controlling the perilous rock disaster in limestone area.

Keywords: slope geomorphologic evolution; sinking-disintegration of perilous rock; quasi-masonry structure; limestone area; Three Gorges reservoir area; Zhenziyan cliff

(责任编辑 许 甲)