

川东南灰岩地区陡高边坡的地貌演化研究^{*}

——以重庆市金佛山甄子岩为例

唐红梅, 张旭晨, 王林峰, 沈吉贵

(重庆交通大学 岩土工程研究所, 重庆 400074)

摘要:【目的】四川盆地东南部灰岩陡高边坡十分发育,研究其地貌演化规律有助于推动防灾减灾学科的发展。【方法】以南川金佛山甄子岩为例,用地貌学方法分析了该地区地貌演化过程。【结果】甄子岩地貌具有阶梯状层状地貌特征,存在两级显著的夷平面,两级陡崖短期内局部后退,较长时间尺度表现为两级陡崖平行后退。由软、硬岩性组合的的两级陡崖上发育了大量的危岩,由于多因素影响,侧向卸荷、软、硬岩组合及外力地质作用使甄子岩陡崖上危岩体形成具有3种典型结构面,即水平状原生结构面、顶部坡肩卸荷拉裂面及底部软、硬岩界面的拉裂面,使危岩体具有类砌体结构面特征,其破坏具有塔状压裂座溃破坏、板状倾倒式破坏及塑流-拉裂破坏3种典型破坏模式。新构造运动、长江水系归并重组的过程中对川东南的地貌进行了明显的改造,在外力地质作用下加剧陡崖边坡的演化。【结论】研究成果为进一步研究灰岩陡崖演化的力学机制提供重要的科学依据。

关键词:地貌演化;川东南灰岩地区;陡高边坡;危岩

中图分类号:P931.91;P642.2

文献标志码:A

文章编号:1672-6693(2018)05-0054-09

岩体陡高边坡是中国中西部地区工程建设的常见地质环境和工程承载体。中国广大的中西部地区地质构造复杂,河流切割强烈,地势差异显著,灰岩地区所占比例较高。边坡或自然斜坡是地貌演化的基本单元,其地貌演化属于内外地质作用的动力地貌学的核心内容。

陡崖或陡坡的地形特征近似于垂直的山坡,是地表过程的阶段性地貌行迹。许多地质地貌学家对此进行了研究。Chorly 等人^[1]研究了湿润地区的风化作用会导致边坡倾角逐渐变缓,干旱地区如坡顶硬质岩层出现平行后退特征;Cox 和 Mc Saveney^[2-3]发现崩塌落石是山坡地貌演化的主要侵蚀过程;黄润秋等人^[4]针对岩石高边坡提出了描述工程高边坡环境的超高系数的概念、区域高地应力环境的形成机理、河谷高边坡应力场特征和发育模式;郑度等人^[5]对库区紫色土坡地退化的关键因子是坡度。陡崖中常发育形成众多危岩,陈洪凯等人发现库区砂岩泥岩组合的危岩发育具有链式规律^[6],软岩泥岩岩腔内壁面60%以上的裂隙具有压张性或压剪性,表征泥岩风化具有显著的压裂特点^[7],砂岩、泥岩组合的软硬相间的缓倾角层状岩体边坡呈现多台阶倒梯形特征运动^[8];唐红梅等人^[9]研究了软弱基座泥岩的陡崖或陡坡下岩性差异风化形成的岩腔与危岩崩落序列。还有部分学者关注了典型岩石的断裂破坏问题,如 Oliver 等人^[10]关注岩石破坏的应变局部化和离散断裂问题。砂岩地区和灰岩地区的陡高边坡的地貌演化模式存在显著差异,Frayssines 和 Hantz^[11]分析了灰岩边坡的破坏问题;何潇等人^[12]从地质构造、软硬岩层组合、水动力特性等方面分析了三峡库区巫峡岸坡望霞危岩危岩形成条件;陈智强等人^[13]初步分析了甄子岩危岩的形成演化机制及防治措施;陈洪凯等人^[14]采用现场连续观测和地貌学方法,研究了灰岩地区边坡的发育机制问题;周新等人^[15]对灰岩危岩的演化进行了模拟分析;贺凯等人^[16]分析了灰岩危岩的破坏机理。但以上这些研究局限于危岩研究。

灰岩地区陡崖演化具有复杂性,本文以重庆市南川区金佛山甄子岩为例,运用陡崖的形成、岩性组合特征、岩体结构面的形成特征与组合,新构造运动及长江水系的合并等分析甄子岩陡高边坡的地貌演化特征、危岩破坏模式,将为灰岩地区陡高边坡地貌演化理论研究与灾害防治提供一定科学依据。

^{*} 收稿日期:2018-01-22 修回日期:2018-05-30 网络出版时间:2018-09-26 13:26

资助项目:国家自然科学基金(No. 51378521;No. 51678097)

第一作者简介:唐红梅,女,研究员,博士,研究方向为岩土工程与地质工程,E-mail:hmtang6778@sina.com

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1165.N.20180926.1325.036.html>

1 甄子岩的位置与河流水系

重庆市南川区位于四川盆地川东平行岭谷的东南部,是连接川、黔的重要门户,甄子岩危岩位于金佛山向斜中段近轴部偏东翼部位的金山镇玉泉村(图1),向斜呈西陡东缓特征,西翼倾角为 $40^{\circ}\sim 50^{\circ}$;东翼倾角为 $4^{\circ}\sim 11^{\circ}$ 。区内主要发育3组裂隙,多为近直立、张开的陡倾裂隙。局部裂隙有碎石土填充,延伸长度为数米至数十米不等,工程性质较差。南川有大小河流56条,分属乌江与长江水系,发源于金佛山的柏枝溪河谷狭窄,沿途多险滩急流,河谷海拔750 m左右,位于甄子岩的坡脚,经綦江河流注入长江(图1),甄子岩顶部的危岩海拔1 800 m左右(图2)。

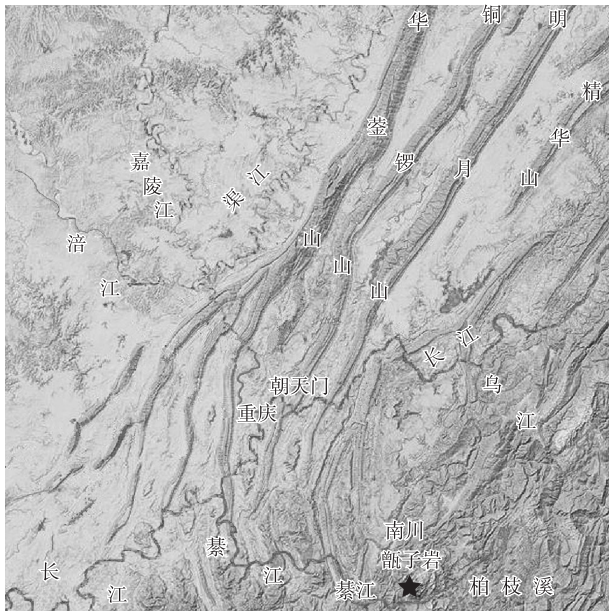


图1 研究区地貌与水系分布平面图

Fig.1 Landforms and distribution maps of water systems in the study area

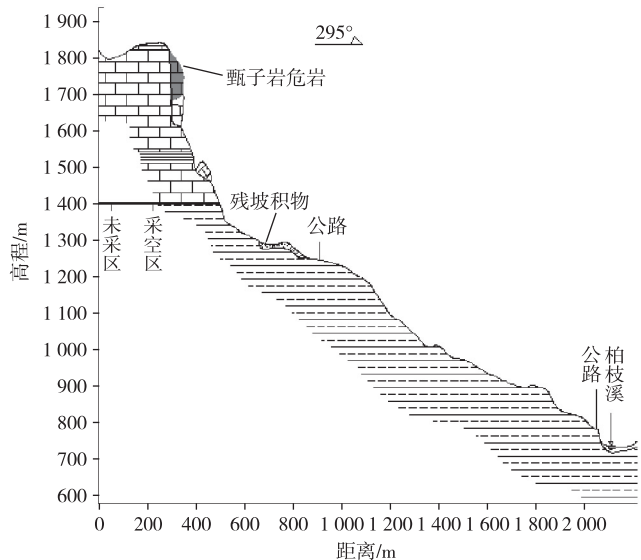


图2 甄子岩危岩剖面示意

Fig.2 Section diagram of Zhenziyan perilous rock

2 两级陡崖地貌形态与岩性组合

南川金佛山甄子岩位于金泉铝厂东侧,属构造侵蚀中山地貌区^[15],岩层产状为 $300^{\circ}\angle 5^{\circ}$ 。主要由二级陡崖组成(图1),第二级陡崖由二叠系下统的茅口组三、四、五段(P_1m^{3+4+5})石灰岩组成,陡崖的相对高差为200~215 m,崖顶海拔为1 800 m左右,基座为二叠系下统茅口组二段页岩夹灰岩,属于软岩。第一级陡崖由二叠系下统的栖霞组(P_1q)和茅口组一段(P_1m^1)石灰岩组成,陡崖的相对高差约80~105 m,崖顶高程为1 400~1 545 m,基座为二叠系下统梁山组(P_1l)的碳质页岩,含丰富的铝土矿,属于软质岩石,且遇水软化、崩解,在采矿爆破振动时易破碎、垮塌;一、二级陡崖之间为陡坡地形,由二叠系下统茅口组二段(P_1m^2)页岩组成^[14],坡面沉积了大量坡积物,地形坡角 $30^{\circ}\sim 52^{\circ}$,一级陡崖下为志留系中统韩家店组(S_2h)粉砂质页岩及第四系崩坡积物构成的斜坡地貌,地形坡角为 $18^{\circ}\sim 26^{\circ}$,局部呈陡倾地形。谷底为柏枝溪,海拔为750 m左右。区内总体地势为北高南低,相对高差在1 050 m左右^[15]。

两级陡崖出露岩层由硬岩石灰岩构成,崖脚基座出露为软岩页岩或是页岩夹灰岩、泥灰岩,均呈现上硬、下软的地质结构特征(图3)。石灰岩与页岩的抗压、抗拉及抗剪的力学性质差异很大,石灰岩抗风化能力强,具有脆性破坏特征,在亚热带和热带湿润地区岩溶作用强烈;随着地壳抬升,河流下切露地层,硬软岩的差异卸荷回弹和差异风化十分突出。

3 危岩类砌体的结构面结构特征形成

南川甄子岩的结构面非常发育,可概化出各类结构面图(图4)。从图4可见在坡肩、坡脚及水平向都存在显著结构面。按照成因分为3种典型的结构面,使灰岩地区陡高边坡的岩体具有类砌体结构特征,具体如下。

1) 在成岩过程形成的近水平向层理为原生结构面,如 AB, CD, BE 等近水平向原生结构面。

2) 由于地壳抬升致河流下切地层,在陡高边坡顶部,侧向卸荷导致应力重分布,呈现坡肩拉应力集中,形成了大量的近平行于临空面的陡倾卸荷裂隙结构面,即为浅、表生结构面,如 JI, NM 等,在外力地质作用如风化作用、溶蚀作用、地下水及人类活动(如坡脚铝土矿的不断开挖)会加剧此类卸荷裂隙的扩张。

3) 在陡崖坡脚,基座软岩被切割临空,形成上硬下软岩性组合模式(图 5a),硬岩的弹性模量远比较岩的弹性模量大许多,侧向卸荷作用,上部硬岩内产生残余压应力,而底部基座软岩内产生残余拉应力(图 5b,c),一旦残余拉应力达到或超过基座软岩的抗拉强度时,就快速产生拉裂面(图 5d)。这种硬、软岩差异卸荷回弹产生的张性破裂裂隙,属于浅表生结构面,如 GL ,此类边坡破坏易出现塑流-拉裂类型。

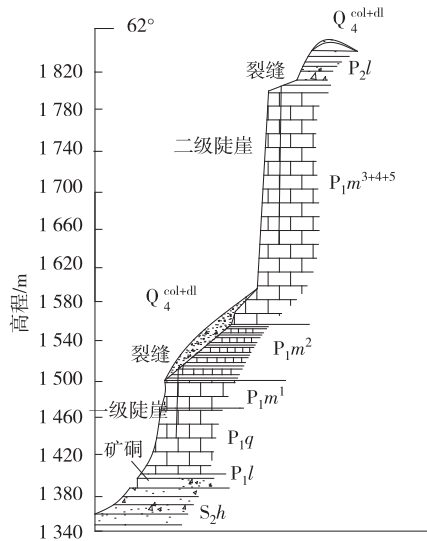


图 3 甄子岩一、二级陡崖地质剖面

Fig. 3 Geological section of the first and second stage steep cliffs

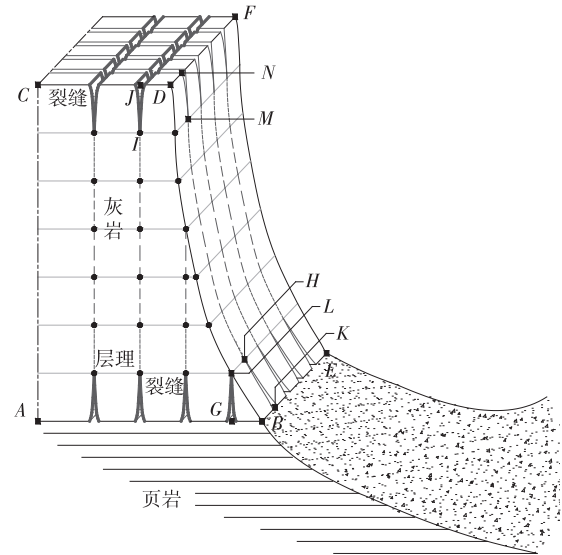


图 4 类砌体结构面概化图

Fig4 Masonry structure generalized figure

在水平结构面与纵向结构面的交汇点如 I, M 点等会导致应力集中,致使裂纹进一步扩展,形成典型的灰岩地区陡高边坡类砌体结构特征(图 4),为类砌体危岩的形成提供了坚实条件。

4 危岩形成与破坏类型

研究表明,在危岩基座软质岩体强度较低时危岩表现为滑动破坏,强度较高时危岩破坏表现为倾倒破坏,多数为倾倒-滑动耦合破坏。

重庆南川金佛山甄子岩危岩失稳破坏类型可分为塔状压裂座溃破坏型、板状倾倒式破坏型和塑流-拉裂型 3 类。下面针对甄子岩危岩的每一种破坏类型进行深度讨论。

4.1 塔状压裂座溃破坏

4.1.1 岩体地下水效应与差异风化作用 以“重庆南川金佛山甄子岩 W12# 危岩”为例,呈瘦高状特征,具有岩体被各类结构面所切割的类砌体结构特征,陡坡坡脚基座为软岩基座,呈强风化状态,岩体接近散体状。

如图 6 所示,地表水沿着卸荷陡倾主控裂隙入渗到硬岩纯石灰岩结构面底端,会沿贯通的结构面往坡面或坡脚径流排泄,遭受地下水体的动力掏蚀。同时地下水与灰岩发生化学浸蚀作用,随着时间的推移,主控结构面逐渐被地表土体和岩体风化产物所充填。渗流作用使化学作用增强,对岩体的浸泡软化现象更明显。并且,地下水的化学溶蚀作用随时间增加对岩体的溶蚀范围会扩大,导致底部溶蚀碎裂区边界不断向临空面发展,致危岩体基座软岩底部的有效支撑面积逐渐减小,使底部基座软岩支撑面的应力不断增大,加速危岩体的破坏,体现了地下水的溶蚀作用加剧危岩体的破坏。

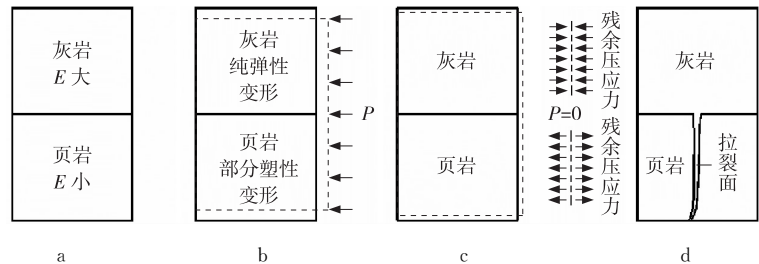


图 5 硬、软岩差异卸荷回弹残余应力和张性破裂

Fig. 5 Residual stress and tensile failure of different unloading rebounding in hard and soft rock

软、硬岩体组合临空的差异风化导致了凹腔的形成。上部硬岩为二叠系下统茅口组三、四及五段较纯微晶灰岩,基座软岩为下二叠统茅口组二段页岩夹灰岩,危岩带位于四川盆地东南部,亚热带季风气候带湿润带内。温差变化大、碳酸水溶液及生物根劈作用等因素加快了对软质岩体和裂隙的充填物风化作用,岩腔的差异风化作用在陡崖脚形成风化穴。因此岩腔由临空面逐渐向坡内发展,致危岩体底部基座软岩的有效支撑面积再次减小,支撑面的应力也随之不断增加,从而导致破坏产生(图6)。

4.1.2 应力状态发生显著变化 人类工程活动在坡脚软岩梁山组采矿,危岩区下部有铝矿厂,多年来,随着采空区逐渐扩大,在上部岩体强大的自重力的长期作用下,采矿坑道顶板逐渐向下弯曲变形,这种软弱基座采空区扩大致使上部危岩体产生向临空面方向位移显著,加剧了危岩主控结构面发展。

根据斜坡形成后应力重分布规律,在临空面附近,小主应力近于零或负的,满足格里菲斯破坏准则。即当 $\sigma_1 + 3\sigma_3 \leq 0$ 时,此时拉应力 σ_3 对岩石的破坏起主导作用,其破坏准则为 $(\sigma_3) = -S_t$ (S_t 为岩石的抗拉强度),属于拉应力条件下的拉断破坏类型。岩石是脆性材料,抗拉强度很低,首先易在陡崖的坡肩位置形成卸荷拉裂缝。当基座软岩支撑面附近的岩体所受荷载效应大于它的抗力时,由于卸荷回弹出现应力松弛带,处于临空面附近的岩体首先被破坏,减小有效支撑面积,导致应力进一步增大,致使基座内部危岩体由坡面向内部也相继产生破坏,最终整个危岩体将基座支撑面附近的岩体压裂,产生整体座溃破坏,坡脚临空面岩体的压裂破坏是致使整个危岩体产生座溃解体的关键。由于地下水的长期作用,在邻近结构面一侧的危岩体将会呈现岩体接近风化碎裂状(图7)。

4.2 板状倾倒式破坏

陡崖陡倾的薄板状岩体倾倒失稳如位于甄子岩一级陡崖上的(图8)倾倒式崩落岩体,由纯的厚层灰岩组成,由于侧向卸荷回弹作用,易形成两组以上陡倾卸荷裂隙,裂隙发育很深,且裂隙水发育,底部软基座原生的水平状层理发育,岩石较软,但强度高于底部解体破坏类型,差异风化发育了较小岩腔,随着时间的推移,底部岩腔发育更加明显。硬而厚的危岩如板梁的发展经历3个阶段:1) 临空面的出现导致卸荷回弹,陡倾结构面拉裂形成阶段;2) 板梁发生弯曲,陡倾裂隙尖端应力集中致拉裂面向深部扩展,陡倾阶拉裂面不断向坡后推移阶段;3) 板梁根部由于应力集中而折裂、压碎阶段。随陡倾结构面切割成岩柱,如竖向板梁弯曲发展,作用于板梁的倾覆力矩也随之而增大,具有累进性破坏特性,同时在降水、爆破振动等外力因素作用下,板梁向临空面发生弯曲、拉裂面向深部扩展并向坡后推移,如坡度很陡,大多伴有坡缘、坡面局部崩落,当倾覆力矩大于抗覆力矩时岩体便出现转动倾倒破坏,板梁根部折裂、岩块转动、倾倒,导致崩塌(图9)。

4.3 塑流-拉裂破坏

在基座软岩页岩凹腔发育深度不大,上部硬岩石灰岩重量很大,由于侧向卸荷差异卸荷回弹,基座软岩的变形远超过上部硬岩灰岩的变形,竖向卸荷裂隙很发育(图10)。若危岩后缘裂隙已贯通页岩顶部,页、灰岩界面在长期浸水的条件下岩石强度参数降低,在裂隙水压力作用下,当滑动力大于抗滑力时,危岩将沿坡体下部软岩带发生剪切滑动并坠落破坏。随着时间增长,在危岩体巨大的自重作用下,基座软岩岩体产生压缩流变及剪切流变的可能性进一步加大,使基座软岩岩体向外挤出,形成潜在的滑移剪切面,从而使危岩体具有发生剪切破坏进而滑移垮塌的危险。特别是在降雨和地震等特殊组合情况下,变形会进一步加剧岩石变形与破坏,最终在页岩层

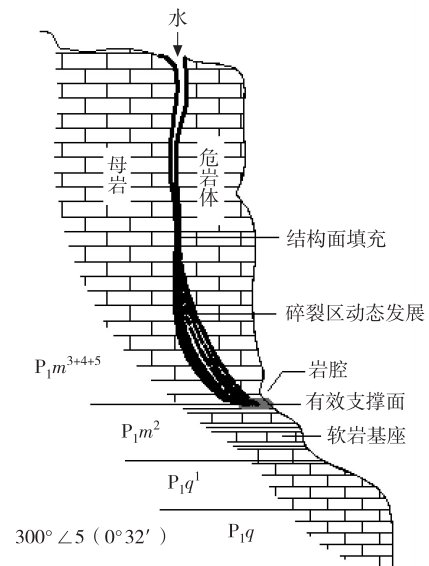


图6 地表水沿主控裂隙入渗至灰岩结构面底端

Fig. 6 Surface water infiltration along the main control fragmentation

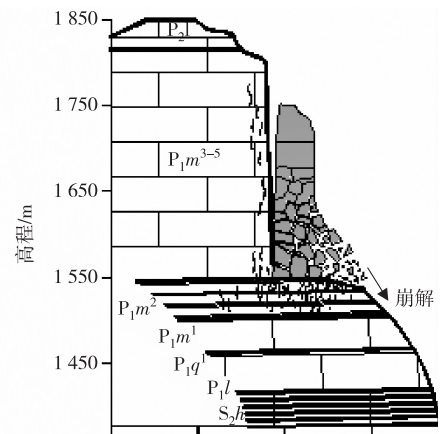


图7 危岩体接近风化碎裂状

Fig. 7 Perilous rock close to weathering cracks to the bottom of limestone structure

形成剪切破坏面,使危岩体崩塌。

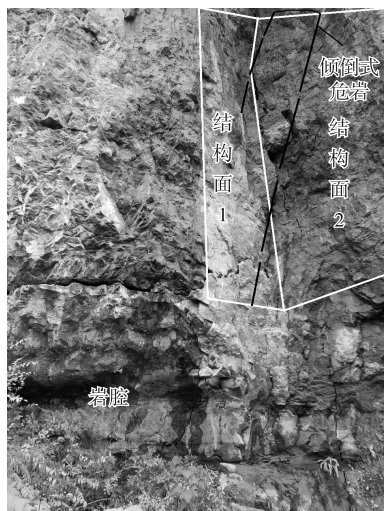


图 8 危岩倾倒失稳图

Fig. 8 Diagram of collapse and instability of perilous rock

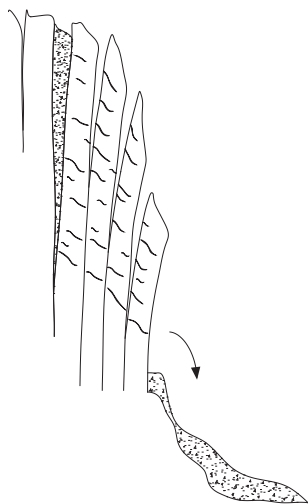


图 9 危岩弯曲-拉裂-倾倒破坏

Fig. 9 Perilous rock bending-cracking-dumping destruction

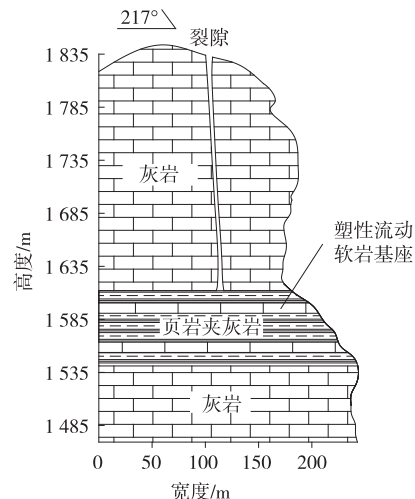


图 10 塑流-拉裂破坏

Fig. 10 Plastic flow-tensile fracture damage

研究表明(图 10),甄子岩危岩 29 为近水平状的软弱基座页岩,在上面硬岩灰岩巨大的自重作用下产生塑性变形,由于基座岩体岩质软,岩体较破碎,且基座外侧为直立的陡崖,具有完整的临空面,使基座岩体易发生压缩流变与剪切流变。由于侧向卸荷作用,硬、软岩石材料性质差异,在上伏硬岩石重压作用下致基座软岩向临空方向流动而形成塑性挤出,软岩的水平变形远远超过上部硬岩,导致上覆硬岩的拉裂起始于软弱层的接触面,属于浅表生结构面(图 3)。危岩体形成后,在降水、爆破振动、下部软岩基座铝土矿的过度开采等外力因素作用下,前缘可出现局部坠落。随着上覆坡体的拉断解体,则发展为侧向扩离或块状滑坡。

5 灰岩地区陡高边坡地貌演化

5.1 陡崖带形成阶段

从南川金佛山甄子岩的斜坡坡地柏子溪到山顶之间存在地貌面构成的阶梯状层状地貌,谷间高地为夷平面。其中,海拔 1 800 m 左右为鄂西期高夷平面,为新老第三级间的准平面抬升后残余岩体;海拔 1 250~1 450 m 左右为山原期夷平面,时间为新第三纪准平原抬升后的残体。两级夷平面之间,危岩非常发育。地壳抬升,河流下切,谷坡顶部为二叠系上统龙潭组(P_2l)灰岩、砂岩和页岩,在侧向卸荷作用下垂直节理十分发育,演变成显著裂隙,成为主控结构面,与原生的水平状的结构面贯通,危岩易失稳,导致陡崖顶部不断崩塌后退,在谷肩形成较长的弧度,趋于圆滑曲线,演化接近休止角的稳定缓坡,如二叠系上的龙潭组地层 P_2l (图 1)。当地壳再次抬升、河流继续下切致二叠系下统茅口组三、四和五段(P_1m^{3+4+5})中厚层纯的硬质晶质灰岩,茅口组二段(P_1m^2)页岩夹灰岩为软岩,使上硬下软的岩层组合出露,容易在陡崖基座软岩形成岩腔,会加速卸荷裂隙的发育,这一套软硬组合高程在 1 820~1 540 m,属于第二级陡崖。

高程 1 400~1 540 m 为第二套软、硬岩层组合,属于第一级陡崖组合。硬岩为二叠系下统茅口组一段(P_1m^1)和栖霞组(P_1q)石灰岩组成;软岩为二叠系下统梁山组碳质页岩、铝土矿,属于软质岩石(图 1)。两级夷平面之下,危岩十分发育,包含下面两个方面。

1) 卸荷陡倾拉裂面的形成。在陡高边坡形成以后,临空面附近因侧向卸荷回弹等因素导致应力重分布、应力分异现象,在坡肩位置出现拉应力集中,在坡脚位置出现剪应力集中。影响应力分异的因素十分复杂,如有原始的地应力、坡体岩体几何特征、岩体结构面等诸多因素的影响。甄子岩陡崖由于新构造运动的抬升作用,使得河谷下切,切露坡体岩层向临空面方向卸荷膨胀,应力发生调整,上覆的硬质灰岩因卸荷回弹,结构松弛,暴露地表的脆性灰岩的抗拉强度低,使坡体内形成多条近于平行的陡倾卸荷裂隙(图 3),尤其集中在坡缘拉应力分布带。甄子岩陡崖内平行于陡崖走向方向的卸荷结构面近于直立,贯通段长 159 m。

2) 软弱基座被切露加剧拉裂缝的形成。随软弱基座被切露,改变了原来的封闭状态,并在上覆岩层的强大

压力作用下,软弱基座被压缩和向临空面方向挤出,使上覆岩体产生自坡面向内且数值递减的不均匀沉陷,使原已形成的拉裂缝得以进一步扩展。被拉裂缝分割出来的板梁或岩柱,与水平向的结构面贯通时可因基座软岩挤出的进一步发展而崩落,甚至诱发群发性崩塌。

5.2 二级陡崖演化

陡崖卸荷带形成后会受到持续的如风化作用、地下水的水动力作用及人类工程活动等外力地质作用的影响,导致陡崖短时间尺度演化。一、二级陡崖软弱基座的页岩夹灰岩或灰岩、炭质页岩、粉质页岩等软岩产生较强的风化,易产生软化效应并形成风化穴;第一级陡崖下部梁山组地层铝土矿的多年大量开采,形成大面积的采空区,导致上梁山组地层页岩局部失去支撑,在上覆硬质岩体自重作用下软弱基座产生进一步的压缩与塑性变形,使坡缘附近的陡倾角卸荷裂隙带的拉裂扩张随时间变化而累进性发展,逐渐形成危岩体。

甄子岩危岩形成的地貌演化过程可分为3个阶段(图11),即1,2,3这3个危岩体逐渐形成和崩塌的过程。图11a为甄子岩第二级陡崖的最初地貌形态,然后上述3个危岩体逐渐形成和崩塌,危岩体的形成以危岩体底部页岩的风化作用孕育岩腔为重要诱发因素,同时主控结构面的地下水的岩溶作用,随着危岩体底部软岩有效应力面积变小,它所承担的有效应力增大直到在底部炭质页岩出现压裂喷射,然后危岩块体呈突发性崩塌破坏(图11b,c,d)。

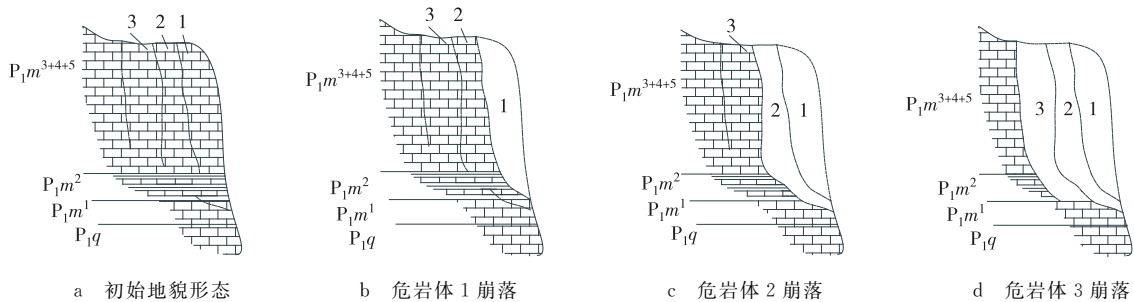


图11 陡崖后退过程

Fig. 11 The process of steep cliff retreat

陡崖上危岩的失稳崩落受多种因素影响控制,与临空、卸荷裂隙发育相关。图12a给出了9个潜在危岩体。经过近水平灰岩,原生水平层理发育,河流下切割出陡高边坡,陡坡形成后导致应力重分布使陡崖坡肩位置拉应力集中,形成竖向拉裂缝,即卸荷裂隙发育,结构面组合使危岩体具有类砌体危岩特征,陡坡1,3危岩体具有有效的临空面。随裂纹尖端应力集中导致裂纹扩展,随裂隙水压力和地震荷载叠加,危岩的失稳破坏就发生。如图12b表明危岩体1和3已经破坏崩落,使危岩体2能够有效临空,同时它们后退的危岩体4暴露临空。图12c表示危岩体2,4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,与危岩体结构面的快速发育贯通紧密相关。

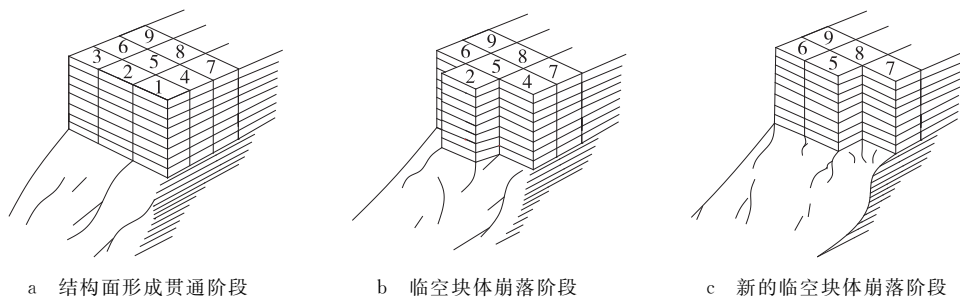


图12 川东南类砌体结构灰岩陡高边坡危岩演化模式

Fig. 12 Evolution model of the perilous rock in the steep slope of the masonry structure in Southeast Sichuan

上述崩塌过程将循环发生,两级陡崖平行后退(图13),河流下切速度变缓慢时,以侧向卸荷与差异风化为主,在切露的一、二级陡崖上同时形成危岩体,第二级陡崖上的危岩体4与第一级陡崖上形成危岩体A(图13a),随时间演化,在两级陡崖上危岩体继续形成与崩落(图13b,c),在第二级陡崖崩落危岩体4,5,第一级陡崖崩落危岩体A与B,使两级陡崖都崩落,同时后退,且产生大量崩塌堆积物堆积在坡脚。这两级陡崖河流下切出露开始于高夷平面,经过喜马拉雅Ⅱ幕构造运动的破坏,在海拔1340m存在山原期夷平面,经喜马拉雅Ⅲ幕构造运动

的破坏,在海拔 900 m,发育了剥夷平面。

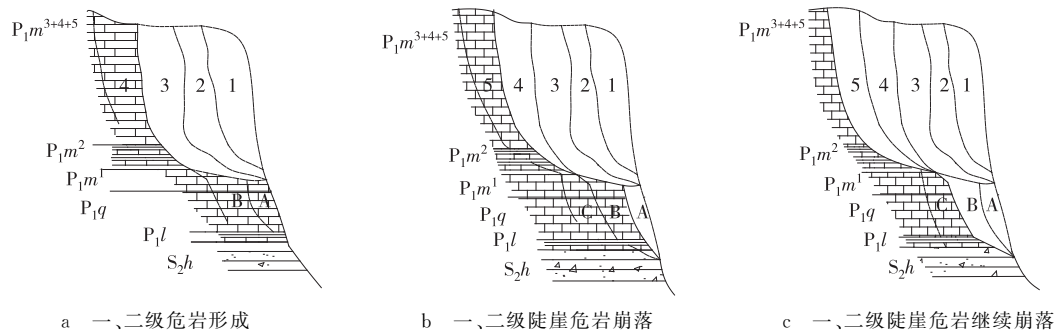


图 13 两级陡崖平行后退演化

Fig. 13 Parallel retrogressive evolution of two levels of cliffs

坡肩平缓后退,坡肩位置有二叠系下龙潭组页岩组成,随侵蚀作用的进行,后期在重力崩塌和流水侵蚀将此陡坡面改造为缓侵蚀面。

5.3 新构造运动与河流水系的影响

川东盆地自古近纪以来地貌的演化发展可以分为两个阶段:早期遭受剧烈的喜马拉雅运动形成的构造地貌,后期遭受以长江水系为主外力的剥蚀作用的改造形成典型的河流地貌。

1) 古近纪到第四纪之前,在始新世中晚期,四川盆地地层完成了陆相沉积并进入到构造盆地演化阶段,先形成了南北向褶皱构造。渐新世时期,在川东形成了十分独特的北东向的隔挡式褶皱带,伴有自南东向北西逆冲的华蓥山断层产生,华蓥山断层与早期所形成的南北向构造连接组合,在华蓥山地区发育了呈帚状的构造。中新世时期,北部的大巴山在盆地前缘形成北西向构造,且向南凸出。中新世晚期的构造运动使川东盆地在前期褶皱和断层的基础上再次发生强烈褶皱和错断,基本奠定了今天的地貌格局。

2) 第四纪,四川盆地内气候由炎热干旱转为温凉湿润促进了特色丹霞地貌和喀斯特地貌的形成。后期青藏高原强烈隆起造成地块的差异性升降,长江下游江汉盆地快速沉降导致了长江水系的归并重组,河流侵蚀地貌的发育,形成有地形斜坡的深切河谷地貌,同时分水岭也逐渐向西迁移,造就了如今川东地区发育典型的平行岭谷地貌。

长江水系归并重组的过程中对川东南的地貌进行了明显的改造,庞大的长江水系的侵蚀作用对川东南地区的地貌的发展产生了巨大的影响^[17]。图 14 为四川盆地东部弧形带可能的古水系格局,中央分水岭分隔纵向水系,黄陵背斜分隔川东与湘鄂段长江水系,随河流向源侵蚀作用的加强,且穿了中央分水岭和黄陵背斜,使长江水系东西归并,形成了四川盆地现今水系格局(图 15),向源侵蚀控制了川东南地区的地形起伏程度,同时分水岭的迁移也塑造了川东地区特有的平行岭谷地貌,下蚀导致了河谷侵蚀地貌的发育,形成特有地形斜坡的深切河谷地貌,切割甄子岩不同的沉积岩层,在外力地质作用下,加剧了其陡崖边坡的演化。

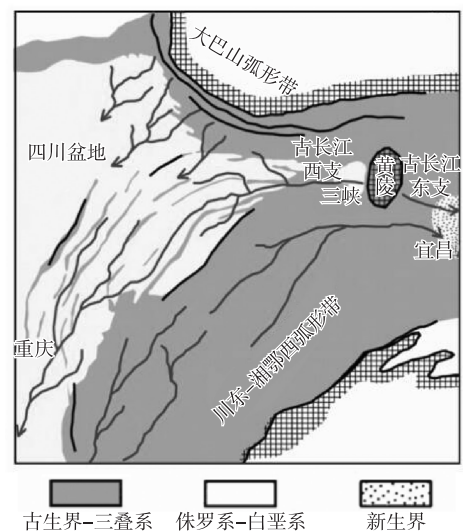


图 14 四川盆地东部弧形带可能的古水系格局

Fig. 14 Possible paleo water system pattern in the eastern arc zone of the Sichuan Basin

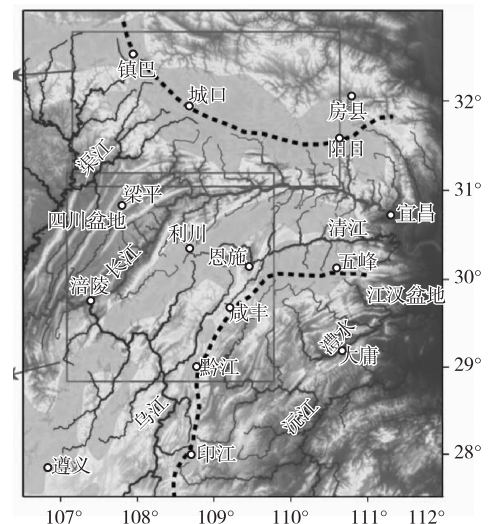


图 15 四川盆地现今水系格局

Fig. 15 the current pattern of water system in the Sichuan Basin

6 结论与建议

以南川金佛山甄子岩陡崖为例,分析了川东南灰岩地区陡高边坡地貌演化,得出结论如下。

1) 甄子岩陡崖具有阶梯状层状地貌特征,软、硬组合的岩性的两级陡崖上存在两级显著的夷平面,陡崖短期内局部后退,较长时间尺度表现为两级陡崖平行后退。

2) 两级陡崖上发育了大量的危岩,由于多因素影响,分析了危岩体结构面的形成,侧向卸荷、软、硬岩组合及外力地质作用使甄子岩陡崖上危岩形成具有3种典型结构面,即水平状原生结构面、顶部坡肩卸荷拉裂面及底部软、硬岩界面的拉裂面,使危岩体具有类砌体结构面特征。该危岩的破坏方式具有塔状压裂座溃破坏、板状倾倒式破坏及塑流-拉裂危岩破坏3种典型破坏模式。

3) 新构造运动与长江水系归并重组的过程中对川东南的地貌进行了明显的改造,庞大的长江水系的侵蚀作用对川东地区的地貌的发展产生了巨大的影响。向源侵蚀使长江水系归并,下蚀作用切露陡崖不同的岩层,在外力地质作用下加剧陡崖边坡的演化。

该研究在宏观上探索了川东南灰岩地区陡高边坡的地貌演化过程,为以后将边坡地貌演化和断裂力学、岩体力学等理论相结合,更加细化研究川东南灰岩地区陡高边坡地貌演化力学机制提供重要的科学依据。

参考文献:

- [1] CHORLY R J, SCHUMM S A, SUGDEN D E. Geomorphology[M]. London: University Press of Cambridge, 1984.
- [2] COX S C, ALLEN S K. Vampire rock avalanches of January 2008 and 2003, Southern Alps, New Zealand[J]. Landslides, 2009, 6(2): 161-166.
- [3] Mc SAVENEY M J. Recent rockfalls and rock avalanches in Mount Cook National Park, New Zealand[J]. Reviews in Engineering Geology, 2002, 15: 35-70.
- [4] 黄润秋. 中国西南岩石高边坡的主要特征及其演化[J]. 地球科学进展, 2005, 20(3): 292-297.
HUANG R Q. Main characteristics of high rock slopes in southwestern China and their dynamic evolution[J]. Journal of Geoscience, 2005, 20(3): 292-297.
- [5] 郑度, 申元村. 坡地过程及退化坡地恢复整治研究——以三峡库区紫色土坡地为例[J]. 地理学报, 1998, 17(2): 116-120.
ZHENG D, SHEN Y C. Research on slope process and rehabilitation of degraded slope: a case study of purple soil slope in Three Gorges reservoir area[J]. Journal of Geographical Science, 1998, 17(2): 116-120.
- [6] 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. Rock in the Three Gorge reservoir chain rule geomorphology research[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science Edition), 2008, 27(1): 91-95.
- [7] 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 the weathering characteristics of shale fracturing in rock cavity[J]. People Changjiang, 2010, 41(21): 51-54.
- [8] 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. Low angle dip bedded rock slope chain evolution[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Science Edition), 2009, 45(1): 20-25.
- [9] 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. The series of critical rock and caving sequences on the weak base steep cliff[J]. Journal of geotechnical engineering, 2010, 32(2): 205-210.
- [10] OLIVER J, HUESPE A E, PULIDO M D G, et al. From continuum mechanics to fracture mechanics: the strong discontinuity approach[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2002, 69(2): 113-136.
- [11] 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.
- [12] 何潇, 陈洪凯, 唐红梅. 长江三峡巫峡岸坡望霞危岩发育机理研究[J]. 人民长江, 2014, 45(12): 49-53.
HE X, CHEN H K, TANG H M. Study on the mechanism of development of slope-Wangxia dangerous rock in Wuxia gorge of Three Gorges[J]. Yangtze River, 2014, 45(12): 49-53.
- [13] 陈智强, 李渝生. 重庆市南川甄子岩危岩形成演化机制分析及防治措施探讨[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2004, 15(1): 78-81.
CHEN Z Q, LI Y S. Discussion on mechanism of forming and evolving of dangerous rock in Nanchuan, Chongqing[J]. Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2004, 15(1): 78-81.
- [14] 陈洪凯, 王圣娟. 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),2017(3):38-43.
- CHEN H K, WANG S J. Study on evolution mechanism of dangerous rock seams in limestone rock area in the Three Gorges Reservoir area: taking Zhenzi Yan in Jinfo Mountain, Chongqing as an example [J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science Edition), 2017(3):38-43.
- [15] 周新,巨能攀,张潇敏. 水平岩层软弱基座危岩体演化过程研究[J], 人民长江, 2015, 46(22):40-44.
- ZHOU X, JU N P, ZHANG X M. Study on evolution process of dangerous rock mass in weak foundation of horizontal rock formation [J]. Yangtze River, 2015, 46(22):40-44.
- [16] 贺凯,殷跃平,冯振,等. 重庆南川甄子岩一二垭岩危岩带特征及其稳定性分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2015, 26(1):16-22.
- HE K, YIN Y P, FENG Z, et al. Characteristics and stability analysis of Yan-Peiyuan rock intrusive rock mass in Nanchuan, Chongqing [J]. Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2015, 26(1):16-22.
- [17] 王平,刘少峰,郑洪波,等. 四川盆地东部弧形构造控制的地形和水系发育[J]. 第四纪研究, 2013, 33(3):461-470.
- WANG P, LIU S F, ZHENG H B, et al. Structural control on topography and drainage development in arcuate fold thrust in eastern Sichuan basin [J]. Quaternary Science, 2013, 33(3):461-470.
- [18] 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. Prevention and treatment of perilous rock [M]. Beijing: Earthquake Press, 2006.

Resources, Environment and Ecology in Three Gorges Area

Study on the Landforms Evolution of High Cliff in Limestone Area: Taking Zhenziyan Cliff of Jinfo Mountain in Chongqing City as an Example

TANG Hongmei, ZHANG Xuchen, WANG Linfeng, SHEN Jigui

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

Abstract: [Purposes] The steep slopes of limestone in the southeastern part of the Sichuan Basin are well developed. Studying the laws of the evolution of the landforms will help promote the development of disaster prevention and reduction disciplines. [Methods] Taking the Zhenziyan Nanchuan as an example, the geomorphological method was used to analyze the evolution process of the geomorphology in this area. [Findings] The Zhenziyan landscape has the characteristics of stair-like layered geomorphology and two significant levels of planation surface. The two-step cliffs are partially retreated within a short period of time, and the long-time scales show that the two cliffs recede in parallel. The cliff that combination of soft and hard rock of the Zhenziyan is formed with a large number of perilous rocks. Due to the multi-factor influence, lateral unloading, combination of soft and hard rocks and external geological geology can make the perilous rock mass of the Zhenziyan steep cliff form three typical structural planes. The three typical structural planes, that is the level-like primary structural plane, the top slope shoulder unloading tensile fracture plane and the bottom soft and hard rock interface fracture surface. They make the perilous rock have the characteristics of masonry-like structural plane, fracturing pedestal collapse, plate pouring failure and plastic flow-fracture failure three typical failure modes. Neotectonic movement, the merger and reorganization of the Yangtze River water system in the process of transformation of the landscape of southeastern Sichuan has been significantly transformed. The evolution of cliff is being aggravated by exogenic geological process. [Conclusions] The research results provide important scientific basis for further study of the mechanical mechanism of the evolution of steep cliffs in limestone.

Keywords: landform evolution; limestone area in southeastern Sichuan; steep and high slope; perilous rock

(责任编辑 黄 颖)