

# 武隆县羊角场镇厚层灰岩山体大型危岩体破坏模式及成因机制研究

王磊<sup>1)</sup>, 李滨<sup>1)</sup>, 冯振<sup>1)</sup>, 高杨<sup>2)</sup>, 朱赛楠<sup>2)</sup>

1) 中国地质科学院地质力学研究所, 国土资源部新构造与地质灾害实验室, 北京, 100081;

2) 长安大学地测学院, 西安, 710064

**内容提要:**厚层灰岩山体在我国滇黔渝鄂湘等西南山区分布广泛, 研究这类山体的破坏模式和成因机理, 是对这类危岩体灾害进行风险评估和工程治理的依据, 具有重要的意义。本文以重庆武隆羊角场镇区域内大型危岩体为研究对象, 通过现场调查, 对危岩体的发育分布特征、破坏类型和形成机制进行分析。结果表明: 羊角场镇后山陡崖带上分布有大型危岩体 11 个, 总体积约  $1280 \times 10^4 \text{ m}^3$ ; 根据危岩体形态、结构面特征、变形迹象, 危岩体的破坏模式可划分为视向滑动式、滑塌式、倾倒式和落石破坏式 4 种类型; 控制研究区大型危岩体形成的主要因素有斜坡结构类型、岩性组合、岩体结构、岩溶作用和采矿活动等。

**关键词:** 武隆县羊角场镇; 厚层灰岩山体; 危岩体; 破坏模式; 成因机制

重庆市武隆县羊角场镇位于乌江下游左岸, 为强侵蚀岩溶化中低山峡谷区, 构造上位于扬子准地台四川台坳川东南垫江坳褶带南端与川黔经向构造带交汇部位, 山体斜坡地层主要为二叠系厚层灰岩。受恶劣的地质环境条件和人类工程活动影响, 区域内发育了许多大型危岩体, 对场镇内居民生命财产造成巨大威胁。厚层灰岩山体在我国重庆、湖北、贵州、云南、四川等西南灰岩山区有广泛的分布, 这类山体引发地质灾害类型常见为规模较小的崩塌, 但在一定条件下, 厚层灰岩山体也能形成特大型滑坡或不稳定山体(董金玉, 2010; 冯振等, 2012, 2014; 黄波林等 2009, 2010; 殷跃平, 2010; Yin, 2011), 例如 1980 年湖北宜昌盐池河磷矿区大规模山体崩塌, 2009 年重庆武隆鸡尾山高速远程滑坡-碎屑流, 以及长江三峡链子崖危岩体等, 造成了许多的群死群伤灾难或潜在的威胁(姚宝魁等, 1988; 冯振, 2012; 殷跃平等, 2000)。这些灾害形成过程缓慢, 成灾模式复杂, 具有隐蔽性, 失稳时又具有突发性, 往往规模方量巨大, 破坏性强。因此, 研究分析厚层灰岩山体的破坏模式、主控因素和成灾机理, 是对这类危岩体灾害进行风险评估和工程治理的依据, 具

有较为重要的实际意义。

大型危岩体成因机理复杂, 其变形破坏方式也是多种多样的, 国内外学者在分析大量危岩崩塌灾害的基础上, 提出了多种危岩体失稳模式的分类方案(Varnes, 1978; Hungr et al., 2004, 2014; 黄润秋, 2007)。许多学者采用了不同方法对厚层灰岩山体的失稳模式和形成机制进行了研究, 并取得了许多有益的成果。刘传正等(1995)在对链子崖危岩体的变形破坏模式的研究中, 探讨了煤层采空形成的悬臂梁机制, 并提出了斜倾厚层灰岩山体“视滑力”的概念; 殷跃平(2005)将三峡库区边坡划分为顺层边坡、平缓软岩层互层边坡、滑崩堆积体边坡、溶塌角砾岩边坡、层状碎裂岩体边坡等类型, 并对典型边坡开挖变形破坏过程和失稳模式进行了研究; 柴波等(2009)等根据岩体控制论, 将巴东组灰岩地层划分为层状结构、块裂结构和碎裂结构, 并分析了各类岩体结构控制下斜坡的变形破坏模式; 陈小婷等(2009)针对三峡库区软硬相间平缓层状危岩体进行了研究, 采用应力分析法研究岩体厚度变化组合对斜坡变形破坏模式的影响, 得出斜坡岩体结构类型与斜坡变形破坏的地质力学模式有着密切关系; 殷

注: 本文为中国地质调查局基金项目(编号: 1212011220140; 121201140079101)联合资助的成果。

收稿日期: 2014-08-05; 改回日期: 2014-09-15; 责任编辑: 黄敏。

作者简介: 王磊, 男, 1988 年生。博士研究生, 地质工程专业, 主要从事地质灾害机理及风险评估研究工作。通讯地址: 100081, 北京市海淀区民族大学南路 11 号, 100081; Email: wangallen88@126.com。通讯作者: 冯振, 1985 年 8 月, 工程地质专业, 助理研究员, 北京市海淀区民族大学南路 11 号, Email: fengzhengcs@126.com。

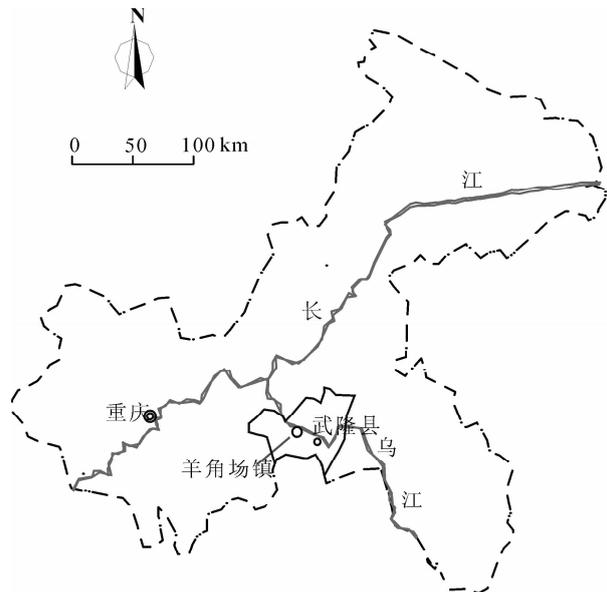


图1 重庆武隆县羊角场镇地理位置示意图

Fig. 1 Location map of Yangjiao Town, Wulong County, Chongqing

跃平(2010)、冯振(2012)等对鸡尾山滑坡的失稳模式和破坏机制进行研究,提出了斜倾厚层灰岩山体的视向滑动破坏模式,认为前端关键块体脆性剪断是山体失稳的主要诱因,采矿活动主要通过应力调整和上覆岩体差异性沉降来产生不利影响。这些成果为从多种角度研究厚层灰岩山体的失稳模式和形成机制奠定了基础,但厚层灰岩山体稳定性影响因素众多,破坏机理复杂,目前针对这类危岩体的研究相对缺乏,研究程度也不够深入。本文以重庆武隆县羊角场镇大型危岩体为研究对象,基于野外详细调查,通过地质分析,对区域内危岩体的发育分布特征、破坏类型和形成机制进行分析。



图2 重庆武隆县羊角场镇危岩体群全貌

Fig. 2 Overall view of perilous rocks group in Yangjiao Town, Wulong County, Chongqing

## 1 地质环境背景

羊角场镇隶属于重庆市武隆县,位于乌江下游左岸(图1),地貌属岩溶中低山地貌。整体地势东南高、西北低,最高点位于后山山坡尖顶,高程1376m,最低点位于乌江岸边,高程160m。后山陡崖总体走向SE150°~165°,呈带状延伸约5.1km,两端高差悬殊(图2)。区域典型工程地质剖面如图3所示,以中间吴家坪组底部软弱层形成的缓坡为界线,陡崖大致分为两级,1级陡崖由吴家坪组灰岩构成,2级陡崖主要由茅口组、栖霞组岩层组成。陡崖下方为大面积分布的堆积体斜坡,地形平缓,乌江流向NW,从羊角镇城区下方经过,河道弯曲而狭窄,切割侵蚀作用强烈。研究区位于主控构造——羊角背斜的西翼,为单斜山体结构(图4)。岩层倾向NW,产状约275°∠18°,岩体主要发育两组构造节理J1、J2,产状分别为124°∠75°和7°∠82°。靠近陡崖临空面卸荷风化裂隙较发育,多追踪构造节理发展,主要发育两组裂隙L1、L2,产状分别为42°∠84°和332°∠79°(图5)。

斜坡岩层总体由上部二叠系灰岩地层和下部志留系韩家店组页岩地层组成。组成山体斜坡地层主要为二叠系灰岩地层,灰岩中夹有多组软弱层,从新到老依次为吴家坪组中厚层灰岩,吴家坪组底部页岩、煤层和泥岩软层(厚约12m),茅口组薄至中厚层灰岩,栖霞组顶部泥质微晶灰岩与泥质条带不等厚互层的岩层(厚4~10m),栖霞组薄至中厚层灰岩和梁山组粘土岩、页岩(厚约11m,含铝土矿和煤层)。

研究区地下水类型可分为松散岩类孔隙水和岩

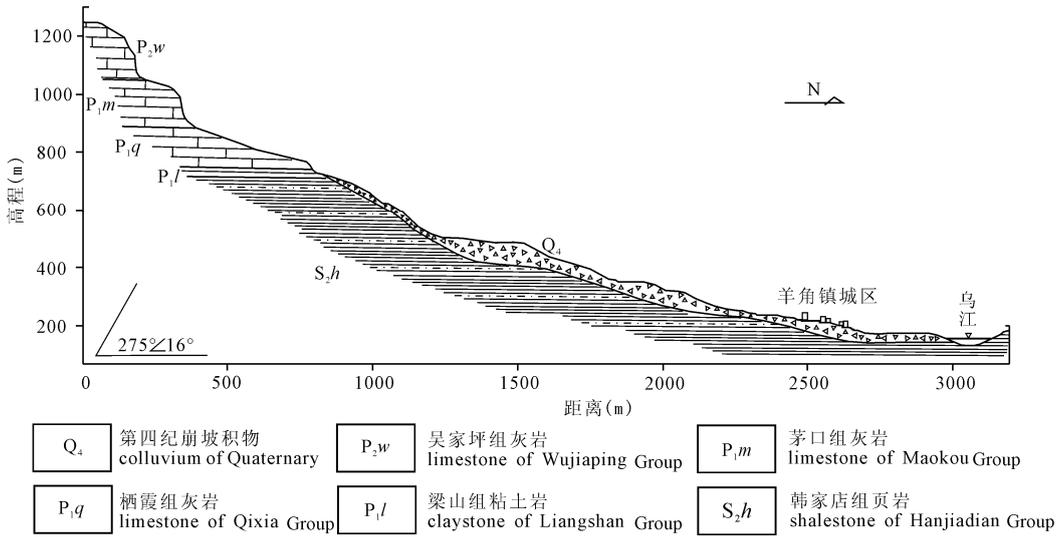


图 3 重庆武隆县羊角场镇区域工程地质剖面图

Fig. 3 Engineering geological section of Yangjiao Town, Wulong County, Chongqing

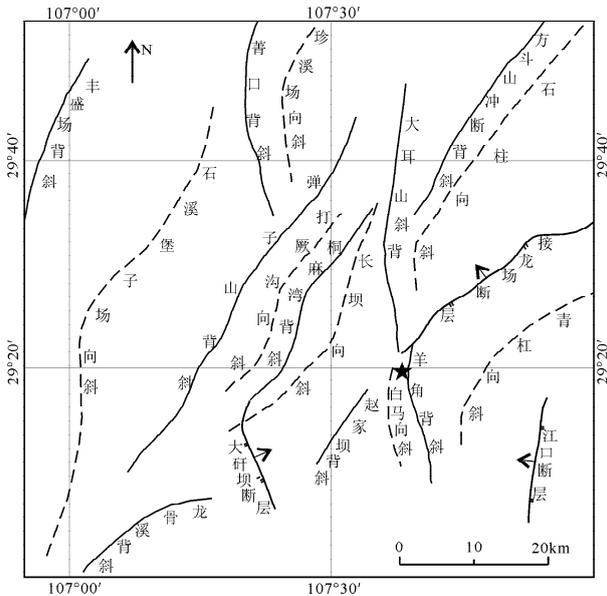


图 4 重庆武隆县羊角场镇构造位置示意图

Fig. 4 Schematic geo-structural map of Yangjiao Town, Wulong County, Chongqing

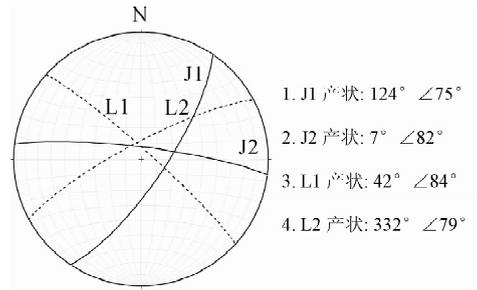


图 5 重庆武隆县羊角场镇危岩体主要节理、裂隙投影图

Fig. 5 Stereogram of main joints and fissure planes of Yangjiao Town, Wulong County, Chongqing

为 0.6m, 梁山组煤层厚约 0.4m, 硫铁矿厚约 0.8m。采矿活动造成陡崖山体底部分布大面积的采空区, 采空区上方发育多条宽大裂缝, 对应地表位置曾发生多次崩塌<sup>①</sup>, 采矿过程中产生的爆破震动对山体的稳定性也存在一定影响(刘传正, 2013)。

## 2 危岩体分布与发育特征

羊角后山危岩带位于羊角场镇后山斜坡陡崖中上部, 陡崖全长约 5.1km, 呈带状连续分布, 走向由东南部 NW 向, 向西转为近 N 向, 进而转为 NNW 向, 平面上呈“镰刀形”。陡崖带上发育有大型危岩体 11 处, 总体积约  $1280 \times 10^4 \text{m}^3$ (图 6, 表 1)。危岩体主要分布在吴家坪组和茅口组灰岩陡崖上, 除小湾危岩、大湾危岩、大湾北危岩和 XI 危岩等 4 块危岩分布于茅口组灰岩陡崖上, 其余 7 块均分布于吴家坪组陡崖上。

危岩体主要发育在陡崖的东南段和西北段, 东

溶裂隙水两类, 松散岩类孔隙水主要赋存于陡崖下方堆积体中, 岩溶水赋存于二叠系灰岩岩溶裂隙中, 其地表发育岩溶洼地、岩溶裂隙及溶洞等。

采矿活动为区内影响山体稳定最为强烈的人类活动, 主要有石合煤矿、庆峰煤矿和武隆县硫铁矿 3 个矿区, 陡崖中间缓坡位置还存在大量无序开采的小煤窑, 大巷危岩和庆口危岩底部陡崖一级平台位置尤为密集, 矿区开采历史达数百年, 目前所有矿区均已关闭。开采矿层主要为吴家坪组底部煤层和梁山组顶部硫铁矿及煤层。吴家坪组底部煤层厚度约

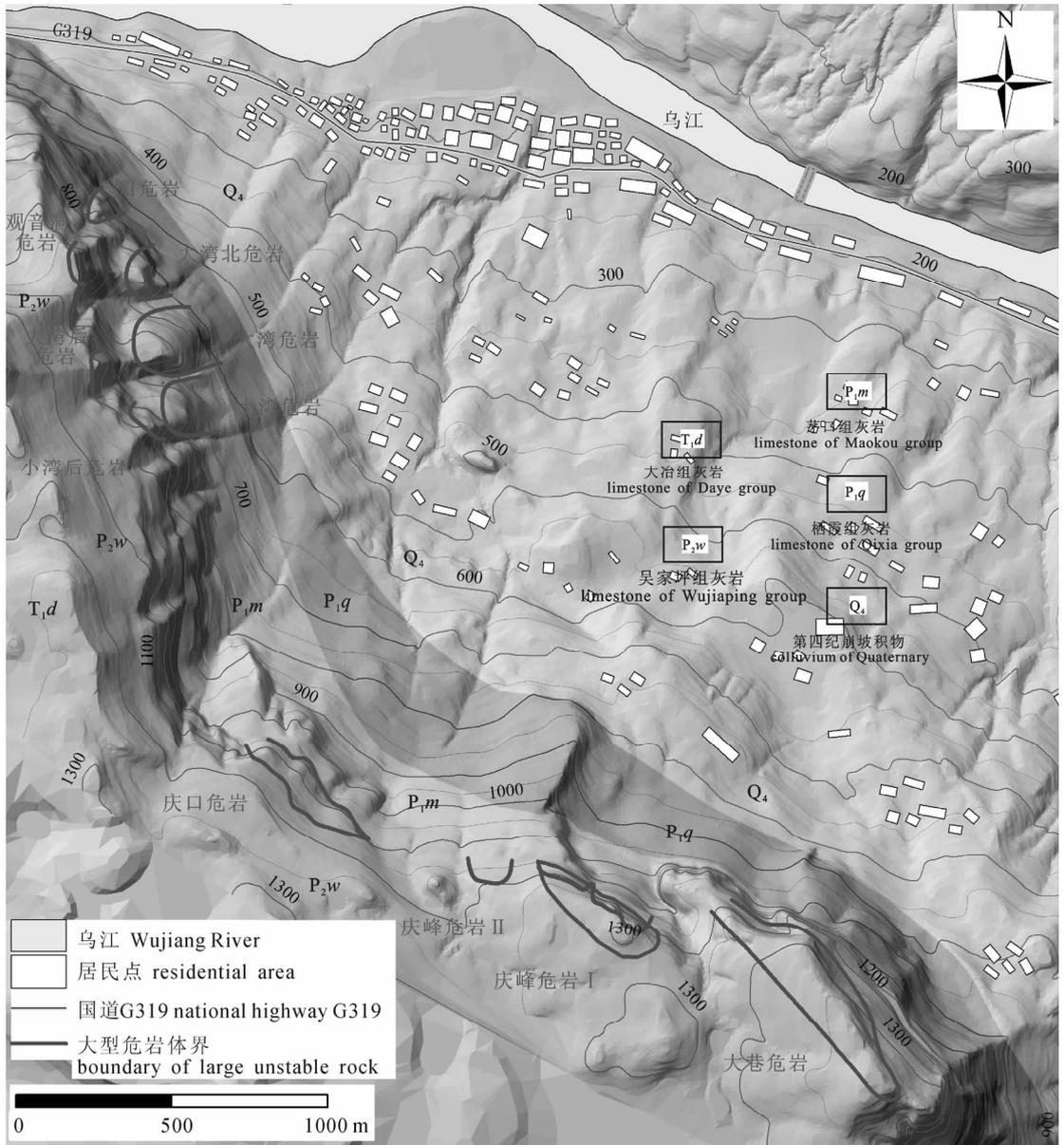


图 6 重庆武隆县羊角场镇工程地质平面图

Fig. 6 Plane map of distribution of perilous rocks in Yangjiao Town, Wulong County, Chongqing

南段陡崖由大巷、庆峰和庆口 3 段陡崖组成,总长约 2.7km,走向约 125°,岩层倾向与斜坡坡向夹角为 45°~55°,斜坡为斜交坡结构,陡崖高度 270~400m,陡崖下方存在大范围的煤层采空区。1 级陡崖上共发育有大型危岩体 4 个,其中大巷危岩、庆峰危岩(W-2-1)和庆口危岩 3 处形态呈“长条形”,均为特大型危岩体,目前均处于蠕变变形状态。危岩体岩性为吴家坪组灰岩,底部软弱基座主要为吴家坪组页岩、泥岩和煤系软层,软弱基座在上覆岩体重力作用下变形强烈,危岩可能会沿软弱层面发生滑动。大巷危岩体西南侧为宽 20~90m 溶沟,将危岩体切割孤立,构成大巷危岩的西南侧边界(图 7a)。

危岩软弱基座位置岩体较破碎。受软弱基座和采空区影响,平行于陡崖方向的宽大裂隙发育,最长裂缝约 496m 位于庆口陡崖顶部,已贯通至陡崖两侧(图 7b),构成庆口危岩体边界,裂缝最宽处可达 3.5m (图 7c)。庆口危岩体西侧临空面基座岩体压裂破碎(图 7d),局部形成凹腔(图 7e),受滑移、挤压作用,凹腔内岩体挤压呈碎块状向 SE 向偏转。庆峰陡崖上方由采矿形成的拉张裂缝沿着宽大岩溶裂缝发育并基本贯通,构成了庆峰危岩体的后缘裂缝。靠近陡崖临空面的岩体,卸荷裂缝较为发育,如庆口危岩西侧的石合危岩和庆峰危岩前部的岩体,变形强烈,有出现局部破坏的可能(图 7g)。



图 7 重庆武隆县羊角场镇危岩体变形破坏特征

Fig. 7 Characteristics of rock mass deformation of perilous rocks in Yangjiao Town, Wulong County, Chongqing

(a)一大巷危岩西南侧溶沟;(b)一庆口危岩后缘裂缝东端;(c)一庆口危岩后缘裂缝;(d)一庆口危岩基底岩体压碎和推移现象;(e)一页岩夹层附近岩体破碎形成凹腔;(f)一小湾后围岩底部基座压裂破碎;(g)一庆峰危岩 W-2 前部倾倒塌坏危岩;(h)一大湾北危岩全貌和前部不稳定块体

(a)—Karren at the southwest of Daxiang perilous rock; (b)—east end of Qingkou perilous rock break-away scar; (c)—break-away scar of Qingkou perilous rock; (d)—cracked and twisty rock in the bottom of Qingkou perilous rock; (e)—cracked rock near shale interlayer developed to a cavity; (f)—cracked and twisty rock in the bottom of Xiaowanhou perilous rock; (g)—toppling perilous rock at the front of Qingfeng perilous rock (W-2); (h)—full view of Dawanbei perilous rock and the unstable rock at the front

西北段分布有大型危岩体 7 处, 总体积约  $398 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。该段陡崖总长约 2.4km, 高差 185 ~ 270m, 岩层倾向与斜坡坡向夹角约  $5^\circ \sim 25^\circ$ , 岩层倾向坡内, 斜坡为逆向坡结构。陡崖下方分布有大范

围的煤矿和硫铁矿采空区。1 级陡崖上发育危岩体 3 个, 变形特征均较为强烈。危岩体岩性为吴家坪组灰岩, 底部基座为吴家坪组软层或炭质软弱夹层。底部基座岩体在上部岩体压力作用下变形强烈(图

7f)。其中观音洞危岩顶部发育多组卸荷裂隙和岩溶裂隙,岩体较为破碎。2级陡崖上发育危岩体4个,体积最大者为大湾危岩,约 $139 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。危岩体岩性主要为茅口组灰岩,底部基座为栖霞组顶部破碎灰岩,变形最为强烈者为大湾北危岩,危岩体竖向裂隙发育,最宽可达1.1m,前部局部块体有发生滑塌破坏的可能(图7h)。

表1 重庆武隆县羊角场镇大型危岩体特征表

Table 1 Statistical achievement of perilous rocks features in Yangjiao Town, Wulong County, Chongqing

危岩名称	危岩编号	岩性	形态	体积( $\text{m}^3$ ) (长 $\times$ 宽 $\times$ 高)	破坏类型
大巷危岩	W-1	吴家坪组 灰岩 ( $P_2w$ )	长条形	$842 \times 92 \times 50$	视向滑动式
庆峰危岩 I	W-2		长条形	$395 \times 105 \times 69$	视向滑动式
庆峰危岩 II	W-3		柱状	$102 \times 45 \times 45$	滑塌式
庆口危岩	W-4		长条形	$391 \times 78 \times 61$	视向滑动式
小湾后危岩	W-5		柱状	$122 \times 25 \times 85$	滑塌式
大湾后危岩	W-6		柱状	$120 \times 32 \times 85$	倾倒式
观音洞危岩	W-7		不规则形	$132 \times 45 \times 61$	落石破坏式
小湾危岩	W-8	茅口组灰岩 ( $P_1m$ )	柱状	$165 \times 55 \times 93$	滑塌式
大湾危岩	W-9		柱状	$170 \times 70 \times 116$	滑塌式
大湾北危岩	W-10		锥状	$130 \times 55 \times 97$	滑塌式
XI危岩	W-11		柱状	$60 \times 10 \times 160$	滑塌式

### 3 危岩体破坏模式分析

本文根据危岩体几何形态、主控结构面特征和变形破坏迹象,将羊角后山大型危岩体破坏类型分为视向滑动式、滑塌式、倾倒式和落石破坏式4种(表1)。

#### 3.1 视向滑动式

视向滑动式危岩体形态呈长条形板状,体积方量较大,所在斜坡视倾向和岩层真倾向方向都具有临空面,岩层倾向与斜坡临空面夹角一般大于 $30^\circ$ 。危岩体由软弱基座和卸荷裂隙共同切割而成,初始破坏沿软岩层面和一组卸荷裂隙的交线,即岩层的真倾向,发生蠕变变形,整体失稳后,在受稳定山体阻挡或地形限制,会发生视倾向偏转,产生高速滑动,失稳后危害严重。研究区陡崖带上视向滑动型危岩式有3处,都发育于陡崖带东南段,庆口危岩为这种破坏模式的典型实例(图8)。

庆口危岩体积约 $187 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,危岩体岩性为吴家坪组灰岩,软弱基座为厚约12m的吴家坪组底部页岩、煤层和含铝质泥岩,强度低,在上部岩体长期重力作用下,发生塑性变形。尤其是在煤层采空区形成后,变形更为强烈,局部位置出现压裂现象。在

软层压缩和采空区逐渐扩大的条件下,采空区上方形成宽大卸荷裂隙,最宽处约3.5m,裂隙贯通至两侧陡崖形成危岩体南侧边界(图9a, 9b)。危岩体东侧临空面方向 $48^\circ$ ,前缘西侧临空面方向 $314^\circ$ 。根据野外调查,庆口危岩向NNW方向移动了约2.16m,对应向横向NE向移动距离约1.25m。危岩体滑面位于吴家坪组软层界面上,危岩体初始蠕变沿岩层真倾向,发生整体失稳后,受南西侧稳定山体阻挡,危岩体将向视倾向方向偏转,沿软弱层面产生滑移破坏,高位剪出,形成高速远程滑坡。

#### 3.2 滑塌式

滑塌式危岩体受控于陡倾裂隙或软弱层面,结构面倾角相对较缓,形态多呈柱状或锥状,依靠未贯通部分的岩石及结构面抗剪能力依附于母岩上,裂隙面锁固部位进一步贯通,危岩体就会发生平行于破坏面的滑移破坏。破裂面的剪出部位出现在陡崖面或基座岩土体中(陈洪凯等,2004)。研究区陡崖带上滑塌式危岩体有6处,主要分布于陡崖带西北段,小湾后危岩为这种破坏模式的典型代表(图9c, 10)。

小湾后危岩由位于1级陡崖坡脚位置,小湾顶部南侧,总体呈柱状,体积约 $26 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。危岩体主要由吴家坪组灰岩组成,后缘裂隙产状 $69^\circ \angle 84^\circ$ ,宽0.5~2.30m,两侧延伸至陡崖两端,危岩体内部发育多条竖向裂隙,内部多被碎石土充填,危岩体靠附在内侧稳定岩体上。灰岩岩体溶蚀现象发育。底部基座为吴家坪组灰黑色粉砂泥岩、煤层和浅灰、灰白色水云母含铝土岩及铝土质泥岩,强度低,基座存在局部破坏。受下部采空区影响,基座进一步破坏后将诱发上部岩体滑塌失稳。

#### 3.3 倾倒式

倾倒式危岩体呈柱状形态,受控于一组或两组近直立的陡倾结构面,危岩体底部局部支撑,危岩体重心多数情况下出现在基座临空支点外侧,危岩体可能以支点为轴向临空方向倾倒破坏,破坏时顶部先脱离母岩(陈洪凯等,2004)。研究区大湾后危岩和庆峰危岩W-2前部的两处不稳定危岩均为这种类型的破坏(图9d, 11)。

大湾后危岩由位于陡崖西北段1级陡崖上,危岩体总长138m,高81~138m,厚23~70m,体积约 $33 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,危岩体东侧临空。危岩体主要为吴家坪组灰岩组成,危岩体后缘裂隙产状 $65^\circ \angle 76^\circ$ ,该裂隙在陡崖两侧出露较好,南侧陡崖临空处贯通长度约175m,直至软弱基座,北侧裂隙竖向可见贯通长度约120m,裂隙内植物根系较发育,危岩体靠附在

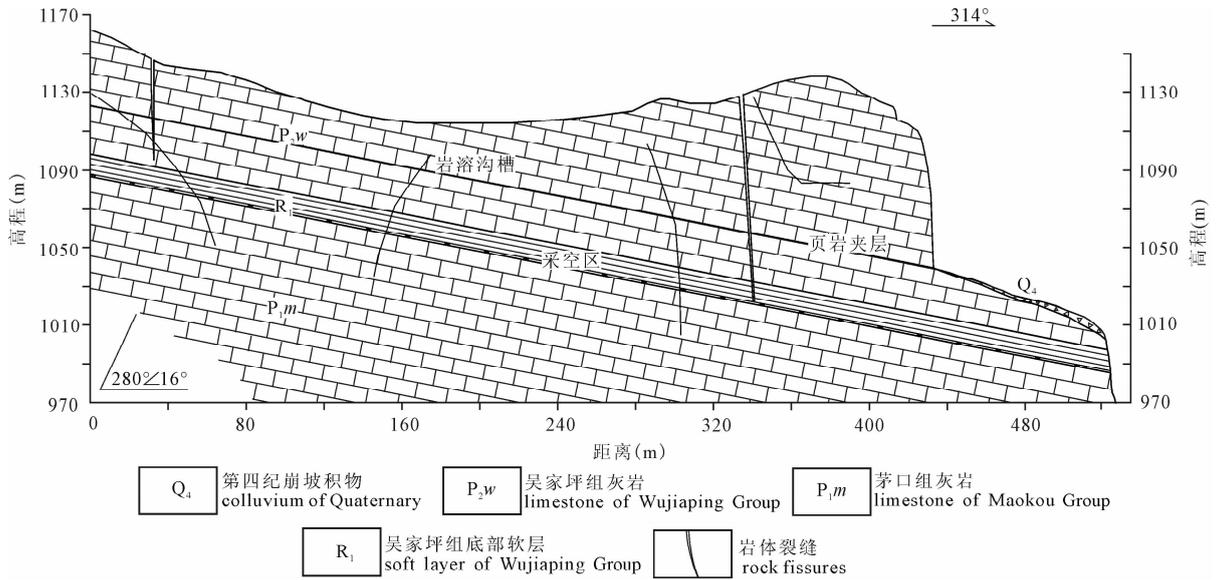


图 8 重庆武隆县羊角场镇庆口危岩剖面图

Fig. 8 Cross section map of Qingkou perilous rock in Yangjiao Town, Wulong County, Chongqing

内侧稳定岩体上。底部基座为吴家坪组页岩、煤层和泥岩软层,强度低,灰岩层间发育多组炭质页岩夹层。受上覆岩体重力作用,基座岩体较为破碎,进一步破坏后,危岩体易发生倾倒破坏。

### 3.4 落石破坏式

落石破坏是指个别孤立块石从陡峭斜坡体表面分离出来后,经过下落、回弹、跳跃、滚动或滑动等方式沿着坡面向下快速运动,最后在较平缓的地带或障碍物附近静止下来的一个动力学过程,一般具有失稳突发、运动快速、破坏性强的特点(张路青等,2004;胡厚田,2005)。研究区西北侧观音洞危岩的破坏方式为落石破坏式,典型落石运动斜坡剖面如图 12 所示。

观音洞危岩位于研究区陡崖西北端,1 级陡崖顶部,呈“月牙形”形态,体积约  $36 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。岩体垂向裂缝较为发育,裂缝宽度 0.5~3.0m,切割深度最深约 35m。后缘裂隙切割岩体形成危岩体边界,东西两侧溶蚀区形成岩体两侧边界。危岩体岩性为吴家坪组灰岩,底部基座为炭质页岩夹层,软弱夹层附近岩体受压破碎,风化作用强烈,形成凹腔。灰岩溶蚀现象发育,多形成溶沟溶槽。受卸荷作用和岩溶作用影响,危岩体顶部发育多组裂隙切割,将危岩体破碎,裂隙中局部充填碎块石(图 9e)。地表及斜坡面上存在的不稳定块石大小、形状各异,以立方体、近圆形和长条状为主,个别已经脱离母体形成孤石(图 9f)。危岩块石易在降雨、风化、根劈作用及其他因素作用下发生失稳坠落,沿着坡面滚落至下方

羊角场镇居民区,威胁居民生命和财产安全。

## 4 讨论

综合上述分析可知,羊角场镇大型危岩体的形成和变形破坏主要受其斜坡结构类型、上硬下软的岩层组合、层状块裂的岩体结构、岩溶作用和采矿活动等因素控制,从而发育了一系列视向滑动式、滑塌式、倾倒式和落石破坏式危岩体。

### 4.1 斜坡结构类型

研究区斜坡结构有斜交坡和逆向坡两种结构类型,与危岩体的变形机制和破坏方式有密切的关系。研究区陡崖东南侧斜坡为斜交坡结构,发育危岩体形态呈“长条形”,斜坡真倾向和视倾向方向均有临空面,危岩体破坏模式与“链子崖”危岩体相似,初始变形沿真倾向方向蠕动,当受稳定山体阻挡或地形限制时,易产生视向滑动破坏;陡崖西北侧斜坡为逆向坡结构,危岩体发育形态主要为柱状、锥状等,破坏模式以滑塌式、倾倒式为主。

### 4.2 上硬下软的岩层组合

软硬相间的地层组合导致显著的差异风化,对斜坡稳定性十分不利。羊角后山斜坡岩性组合表现为上硬下软、上陡下缓的特征,这种岩性组合对上覆刚性山体的稳定非常不利。岩性组合整体为二叠系厚层灰岩覆盖于二叠系梁山组粘土岩及志留系页岩之上,粘土岩和页岩的易风化特性导致其成为上部陡崖的软弱基座。同时,二叠系厚层灰岩中含有多组软岩和软弱夹层,差异性风化作用,使坡体成为陡

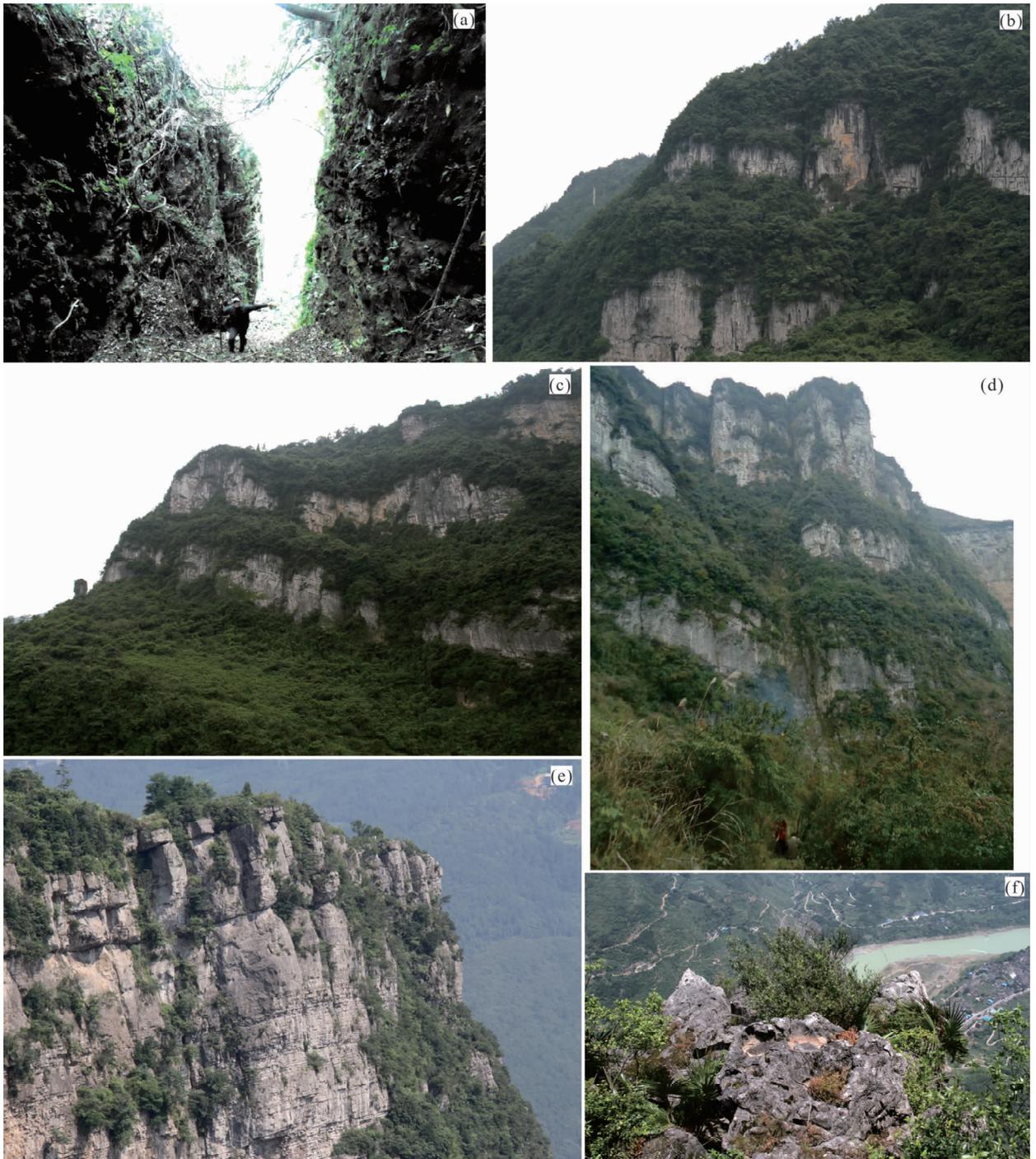


图 9 重庆武隆县羊角场镇不同破坏模式的危岩体

Fig.9 Perilous rocks of different failure modes in Yangjiao Town, Wulong County, Chongqing

(a)一庆口危岩东侧竖向贯通裂隙；(b)一庆口危岩后缘裂缝西端贯通至陡崖；(c)一小湾后危岩北侧形态；

(d)一大湾后危岩体侧面；(e)一观音洞危岩带东侧不稳定块体全貌；(f)一各种形态的不稳定块石

(a)—Break-away scar cuts through the abrupt cliff at east of Qingkou perilous rock; (b)—break-away scar cuts through the abrupt cliff at west of Qingkou perilous rock; (c)—photo showing the north side of Xiaowanhou perilous rock; (d)—the side view of Dawanhou perilous rock; (e)—full view of unstable rocks at the east side of Guanyindong abrupt cliff; (f)—unstable rocks of various shapes

缓相间的阶梯状悬坡。在上覆岩体重力作用下，软层向临空方向发生塑性变形，硬质岩体产生脆性破裂，并不断扩展，加剧了岩体的破坏。吴家坪组底部

厚约 12m 的页岩、煤层和泥岩软层，强度低、塑性大，为吴家坪组灰岩软弱基座。页岩、煤层在地下水的长期作用下持续软化，导致上部岩体蠕动变形。

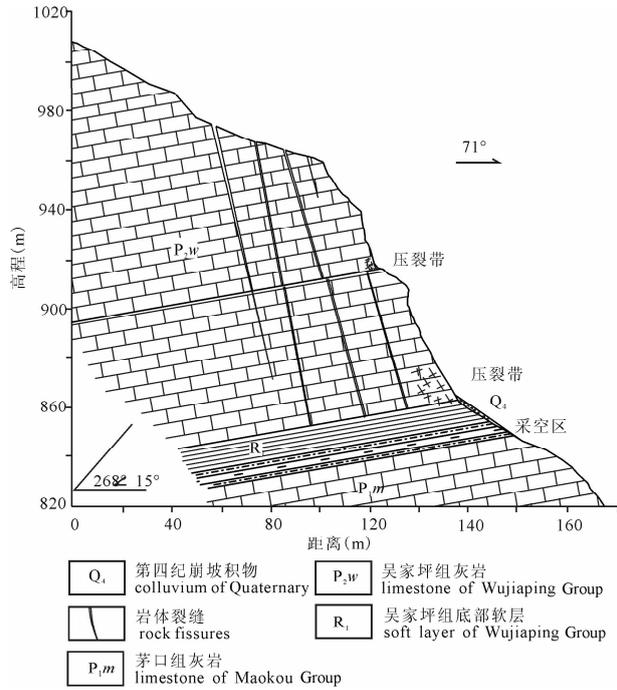
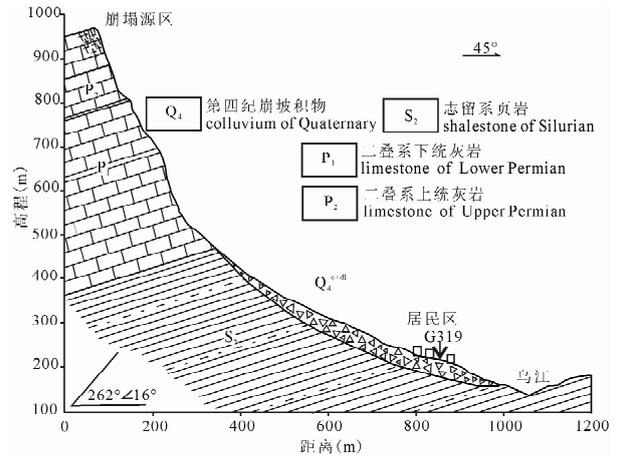


图 10 重庆武隆县羊角场镇小湾后危岩剖面图

Fig. 10 Cross section map of Xiaowanhou perilous rock in Yangjiao Town, Wulong County, Chongqing



12 重庆武隆县羊角场镇观音洞危岩落石运动斜坡剖面  
Fig. 12 Cross section map of Guanyindong perilous rock in Yangjiao Town, Wulong County, Chongqing

灰岩为茅口组灰岩软弱基座,脆性强易碎裂,抗风化能力弱,易被软化挤出形成凹腔,为危岩体发育的软弱基座,小湾危岩、大湾危岩和大湾北危岩底部破碎基座即为该层破碎灰岩。沿二叠系灰岩层面发育多组厚 4~15cm 炭质页岩、泥岩夹层,强度低,易风化,将灰岩切割破碎,降低岩体稳定性。

### 4.3 层状块裂结构

羊角场镇陡崖斜坡受羊角背斜控制,发育两组近垂直节理,与软弱夹层、灰岩层面共同切割岩体成“积木状”块体。同时,卸荷裂隙、岩溶裂隙、溶沟等也主要沿着这两组构造节理追踪发展,发展为危岩体的侧向张拉边界和后缘裂缝,与陡崖临空面近平行的一组卸荷裂隙尤为发育。

### 4.4 岩溶作用

在二叠系、三叠系厚层灰岩岩体中岩溶裂隙、溶沟、溶洞等岩溶现象较为发育,切割岩体破碎,降低灰岩力学强度,或直接成为危岩体的边界。大巷危岩的西侧边界即为岩溶形成的宽 20~90m 的溶沟,将岩体与稳定山体分离。观音洞危岩灰岩受岩溶作用影响强烈,发育多组岩溶裂隙,与节理、卸荷裂隙共同将岩体切割破碎,形成大量不稳定块石,易形成落石灾害。

### 4.5 采矿活动

研究区不合理的采矿活动也是大型危岩体形成的重要影响因素。山体底部大范围采空区的存在,硫铁矿的爆破开采方式,加剧了岩体拉张裂隙的形成,造成上覆岩体不均匀沉降,并引起斜坡变形破坏。调查显示,地下采矿对平行陡崖走向的深大卸荷裂隙的形成具有明显的促进作用,地表切割裂缝

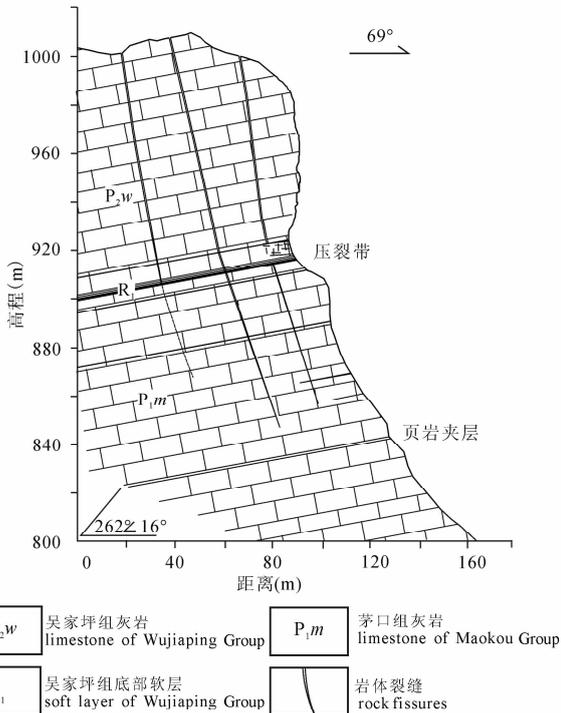


图 11 重庆武隆县羊角场镇大湾后危岩剖面图

Fig. 11 Cross section map of Dawanhou perilous rock in Yangjiao Town, Wulong County, Chongqing

陡崖东南侧大巷危岩、庆峰危岩和庆口危岩滑动面即位于软层界面上。栖霞组顶部厚 4~10m 的破碎

的形成及变形的急速发展均出现在对应的底部矿层采空之后。深大卸荷裂隙形成破坏了岩体完整性,增加了降水的入渗作用。庆口危岩长达496m的后缘裂缝即与下部煤层采空区的发展有明显关系,在1996~2002年期间,随着煤层向山体内部进一步开采,裂缝宽度从70cm急剧增加到3.5m,停止采矿后,裂缝变形趋势则逐渐变缓。

## 5 结论

通过对重庆市武隆县羊角场镇厚层灰岩山体大型危岩体详细调查,分析区域内大型危岩体的发育分布特征、失稳模式,详细分析了影响大型危岩体形成的主控因素,探讨了各因素对危岩体形成的作用机制和意义。

(1)羊角场镇后山为厚层灰岩山体,其斜坡陡崖带上发育大型危岩体11处,总体积约 $1281 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,主要分布在吴家坪组和茅口组灰岩陡崖上,其中吴家坪组陡崖上7处危岩体变形较为强烈。

(2)根据危岩体几何形态、主控结构面特征和变形破坏迹象,将危岩破坏模式划分为视向滑动式、滑塌式、倾倒式和落石破坏式四种类型。

(3)在四类破坏方式中,对羊角场镇威胁最大的为视向滑动式和落石破坏式两种类型。视向破坏式危岩体方量巨大,失稳后易形成高速远程滑坡;观音洞危岩破坏方式为落石式,距离羊角场镇居民区较近,对区内居民生命财产安全构成了严重威胁。

(4)斜交坡和逆向坡的坡体结构,上硬下软、间夹多组软层的岩性组合、层状块裂的岩体结构、岩溶作用和不合理的采矿活动等为控制羊角场镇厚层灰岩山体大型危岩体形成和变形破坏的主要影响因素。

## 注释

① 重庆市高新岩土工程勘察设计院有限公司. 2012. 重庆市羊角场镇危岩滑坡防治工程方案论证报告.

## 参考文献

柴波,殷坤龙,陈丽霞等. 2009. 岩体结构控制下的斜坡变形特征. 岩土力学, 30(2): 521~525.

- 陈洪凯,唐红梅,王蓉. 2004. 三峡库区危岩稳定性计算方法及应用. 岩石力学与工程学报, 23(4): 614~619.
- 陈小婷,黄波林,刘广宁等. 2009. 三峡库区平缓层状软硬相间斜坡变形模式变化分析. 地质灾害与环境, 20(2): 57~61.
- 董金玉,杨继红,伍法权等. 2010. 三峡库区软硬互层近水平地层高切坡崩塌研究. 岩土力学, 31(1): 151~157.
- 冯振. 斜倾厚层岩质滑坡视向滑动机制研究. 2012. 中国地质科学院博士学位论文.
- 冯振,殷跃平,李滨等. 2012. 重庆武隆鸡尾山滑坡视向滑动机制分析. 岩土力学, 33(9): 2704~2712.
- 冯振,李滨,贺凯. 2014. 近水平厚层高陡斜坡崩塌机制研究. 地质力学学报, 20(2): 123~131.
- 胡厚田. 2005. 崩塌落石研究. 铁道工程学报, 12(z1): 387~391.
- 黄波林,刘广宁,彭轩明. 2009. 重庆市涪陵区厚层软硬相间岩体失稳模式. 工程地质学报, 17(4): 516~521.
- 黄波林,陈立德,刘广宁等. 2010. 岩体结构对三峡库区岸坡变形失稳模式的影响. 人民长江, 41(19): 41~44.
- 黄润秋. 2007. 20世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制. 岩石力学与工程学报, 26(3): 433~454.
- 刘传正,施韬,张明霞. 1995. 链子崖危岩体T8~T12缝段开裂变形机制的研究. 工程地质学报, 3(2): 29~41.
- 刘传正. 2013. 重庆武隆羊角镇工程地质环境初步研究. 水文地质工程地质, 40(2): 1~8.
- 姚宝魁,孙玉科. 1988. 宜昌盐池河磷矿山崩及其崩塌破坏机制. 中国典型滑坡. 北京: 科学出版社, 89~98.
- 殷跃平. 2005. 三峡库区边坡结构及失稳模式研究. 工程地质学报, 13(2): 145~154.
- 殷跃平,康宏达,张颖. 2000. 链子崖危岩体稳定性分析及锚固工程优化设计. 岩土工程学报, 22(5): 599~603.
- 殷跃平. 2010. 斜倾厚层山体滑坡视向滑动机制研究—以重庆武隆鸡尾山滑坡为例. 岩石力学与工程学报, 29(2): 217~226.
- 张路青,杨志法,许兵. 2004. 滚石与滚石灾害. 工程地质学报, 12(3): 225~231.
- Hungr O, Evans S G. 2004. The occurrence and classification of massive rock slope failure. Felsbau, Rock and Soil Engineering, Journal for Engineering Geology, Geomechanics and Tunnelling, 2: 16~23.
- Hungr O, Leroueil S, Picarelli L. 2014. The Varnes classification of landslide types, an update. Landslides, 11(2): 167~194.
- Varnes D J. 1978. Slope movement types and processes. Landslides: Analysis and Control, Transp Res Board Spec Rep 176:11~33
- Yin Yueping. 2011. Recent catastrophic landslides and mitigation in China. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 3(1):10~18.

# The Failure Patterns and Their Formation Mechanisms of Large Perilous Rocks in Thick Layered Limestone Masses in Yangjiaochang Town, Wulong County

WANG Lei<sup>1)</sup>, LI Bin<sup>1)</sup>, FENG Zhen<sup>1)</sup>, GAO Yang<sup>2)</sup>, ZHU Sainan<sup>2)</sup>

1)Key Laboratory of Neotectonic Movement and Geohazard of MLR at Institute of Geomechanics, CAGS, Beijing, 100081; 2)Chongqing University, Xian, 710064

## Abstract

Landslides and collapses on mountain massifs with thick layered limestone masses distribute widely in mountainous area in southwestern China. It is of important significance for risk assessment and prevention to study the failure patterns and their formation mechanisms of this kind geohazards. Based on detail field investigation, the development features, failure patterns and their formation mechanisms of the large perilous rocks in the area of Yangjiaochang Town in Wulong County, Chongqing City are studied in this paper. Main conclusions are as follows: there are 11 large perilous rocks at the abrupt cliff in the Yangjiaochang Town area, with the total volume nearly  $1280 \times 10^4 \text{m}^3$ . According to the shapes, features of main structural planes and signs of deformation, the failure patterns can be divided into four types which are apparent dip slide, slide collapse, topple and rockfall; The main influence factors are slope structure, lithological combination, rock mass structure, karstification and mining activities etc., This study discusses the mechanism affecting formation of the perilous rocks in detail.

**Key words:** Yangjiao Town in Wulong County; mountain massif with thick layered limestone masses, perilous rock; failure pattern; formation mechanism