



## 特高位远程危岩群破坏成因及稳定性评价 ——以滇东北乌峰山地区为例

胡君春<sup>1</sup>, 彭 军<sup>2</sup>, 陈志军<sup>1</sup>, 焦德光<sup>3</sup>

1. 云南省煤炭地质勘查院, 云南 昆明 650218; 2. 昆明工程勘察公司, 云南 昆明 650034;

3. 玉溪师范学院, 云南 玉溪 653100

**摘 要:** 特高位远程危岩崩塌具有突发性强、速度快、势能大、摧毁力强、冲击性大、影响范围广等特征。滇东北地区镇雄县5处危岩位于乌峰山南缘斜坡地带, 地层近水平, 崩塌区地形坡度达70°以上。崩塌区和危岩区基岩裸露面积为0.07 km<sup>2</sup>, 坡脚与坡顶高差达222 m, 危岩体平均高差159 m, 落石水平最大位移216 m, 属典型特高位远程危岩群。采用定性和定量方法, 结合内外部条件, 综合分析危岩的10项基本影响因子, 评价其稳定性。5处危岩在不同工况下稳定性差, 破坏模式为倾倒式, 高速远程动力崩塌易产生碎屑流, 呈散态扇形高速冲击流动, 裸露区面积大, 生态环境脆弱, 亟待治理。

**关键词:** 危岩群; 崩塌滑坡; 地质灾害; 破坏机理; 稳定性评价; 云南省

## DAMAGE CAUSES AND STABILITY EVALUATION OF EXTREMELY HIGH REMOTE DANGEROUS ROCK GROUP: A Case Study of Wufeng Mountain Area in Northeast Yunnan

HU Jun-chun<sup>1</sup>, PENG Jun<sup>2</sup>, CHEN Zhi-jun<sup>1</sup>, JIAO De-guang<sup>3</sup>

1. Coal Geology Prospecting Institute of Yunnan Province, Kunming 650218, China;

2. Kunming Engineering Survey Company, Kunming 650034, China; 3. Yuxi Normal University, Yuxi 653100, Yunnan Province, China

**Abstract:** Extremely high remote dangerous rock collapse is characterized by suddenness, fast speed, great potential energy, severe destruction force, strong impact and wide influence range. Five dangerous rock blocks are located on the southern slope of Wufeng Mountain in Zhenxiong County, northeast Yunnan. The strata are near horizontal and the topographic slope of collapse area is above 70°. The bare area of bedrock is 0.07 km<sup>2</sup> in collapse and dangerous rock area, with the height difference of 222 m from slope toe to top, the average height difference of 159 m for dangerous rock mass, and the maximum horizontal displacement of rockfall of 216 m, belonging to typical extremely high remote dangerous rock group. The qualitative and quantitative methods are used to comprehensively analyze 10 basic influencing factors of dangerous rocks and evaluate the stability combined with internal and external conditions. The results show that the five dangerous rocks have poor stability with the toppling-type damage mode. The high-speed remote dynamic collapse easily generates debris flows, which impact and flow in high speed as scattered fans. The large

收稿日期:2021-07-09; 修回日期:2021-08-17. 编辑:张哲.

基金项目:云南省国土资源厅省级地质灾害治理工程项目“镇雄县乌峰镇上街地裂缝、崩塌治理”(云国土资[2015]67号).

作者简介:胡君春(1980—),男,硕士,高级工程师,从事水工环地质工作,通信地址 云南省昆明市东郊大石坝 云南省煤炭地质勘查院, E-mail/hujunchun@126.com

作者简介:焦德光(1983—),男,博士,副教授,从事地质研究与教学工作,通信地址 云南省玉溪市红塔区凤凰路134号, E-mail/dgjiao@yxnu.edu.cn

bare area and fragile eco-environment are in urgent need of treatment.

**Key words:** dangerous rock group; collapse landslide; geological disaster; damage mechanism; stability evaluation; Yunnan Province

0 引言

中国西南山区人类工程活动频繁,地质环境脆弱、复杂多变,加之极端气候,致群死群伤崩塌多,造成人员伤亡与财产损失.不同危岩体(带或群)的排查、研究、治理和监测亟待解决.危岩崩塌是一种全球性泛生型山地灾害,其存在部位具有失稳破坏性、随机性、隐蔽性、突发性,且运动速度快,冲击破坏力强,致灾后果具有灾难性,严重威胁山区城镇、水利设施、公路和矿山安全<sup>[1-5]</sup>.受青藏高原构造控制,中国西南地区地形切割深,河谷狭窄深切,坡体陡峻,地震烈度高,地应力水平高,地质结构复杂,岩体卸荷裂隙发育,天然岸坡浅表稳定性较差<sup>[6-7]</sup>.近年来,随着经济不断持续增长,环境复杂的偏远山区集镇和村落在人类发展和生存中扮演着重要的角色.由于其地形地貌差异明显,复杂多变,地质环境多样,加之灾害性、极端气候条件,危岩群、泥石流及滑坡等地质灾害频繁发生.危岩崩塌是滇东北山区主要地质灾害之一<sup>[8]</sup>.

滇东北地处五莲峰和乌蒙山腹地,山高谷深,以危岩坠落和崩塌为主的山地灾害频发,危害极大.为此,本文拟选择区内具有代表性的乌峰山特高位危岩群作为研究对象,深入研究特高位危岩群的破坏机制.危岩区冬季有霜、雪和凌冻,无霜期为 217 d,11 月至次年 3 月为霜冻期,年平均积冻 10 d.镇雄县冰冻灾害风险的概率值危 100%,有年年出现冰冻灾害的气候风险<sup>[9]</sup>.气象条件在本区具有代表性,降水、冻融、霜冻是危岩崩塌的主控因子<sup>[10-14]</sup>.

1 危岩群概况

危岩群位于云南省镇雄县乌峰山南坡,包括 5 处危岩体(图 1 中 W1—W5).坡脚与坡顶高差 222 m.危岩平均高差达 159 m,属特高位危岩(表 1).斜坡整体坡度一般在 30~50°之间,局部坡度达 70°以上,山势陡峻,为悬崖峭壁.岩性主要为粉砂岩、细砂岩和薄层泥岩.坡脚崩坡积层呈扇状分布,厚在 0.5~20 m 之间.因长期零星发生不同规模崩塌,崩积层呈阶梯状.崩积层和自然土层差异明显.落石最大水平位移 216 m.危



图 1 乌峰山地貌特征及危岩分布

Fig. 1 Geomorphological feature of Wufeng Mountain with distribution of dangerous rocks

表 1 乌峰山危岩特征表

Table 1 Characteristics of dangerous rocks in Wufeng Mountain

| 危岩编号 | 长/m   | 宽/m  | 高/m   | 体积/m <sup>3</sup> | 高程/m |
|------|-------|------|-------|-------------------|------|
| W1   | 24.51 | 5.13 | 30.21 | 3798.49           | 2020 |
| W2   | 12.42 | 4.56 | 25.35 | 1435.70           | 2039 |
| W3   | 26.12 | 5.61 | 13.14 | 1925.45           | 2044 |
| W4   | 15.14 | 6.21 | 6.42  | 603.60            | 1974 |
| W5   | 20.41 | 6.14 | 10.21 | 1279.49           | 1951 |

岩群与落石分布及特征见图 1、表 2.危岩体呈带状分布,由粉砂岩、细砂岩和薄层泥岩组成,差异风化强烈,卸荷裂隙发育,岩体较破碎,岩腔和裂缝发育显著.

据访问,20 世纪 70 年代,危岩区为采石场,石料运至县城为建筑材料.90 年代开始有少量滚石,2011 年滚石量有所增大.

2 危岩基本特征

2.1 危岩体结构

危岩体岩性为三叠系下统飞仙关组(T<sub>f</sub>)粉砂岩,中—厚层状,产状 210°∠5°,岩层近水平.斜坡坡度一般 40~70°,局部为陡崖,危岩沿陡崖呈带状展布.岩体

表 2 乌峰山崩塌落石特征表  
Table 2 Characteristics of collapse rockfalls in Wufeng Mountain

| 编号  | 岩性  | 长/m  | 宽/m  | 厚/m  | 体积/m <sup>3</sup> | 位置 |
|-----|-----|------|------|------|-------------------|----|
| K1  | 粉砂岩 | 0.7  | 0.77 | 0.55 | 0.30              | 坡脚 |
| K2  | 粉砂岩 | 0.8  | 1.6  | 1.3  | 1.66              | 坡脚 |
| K3  | 粉砂岩 | 0.53 | 1.1  | 0.54 | 0.31              | 坡脚 |
| K4  | 粉砂岩 | 0.69 | 0.3  | 0.84 | 0.17              | 坡脚 |
| K5  | 粉砂岩 | 1.3  | 1.28 | 0.56 | 0.93              | 坡脚 |
| K6  | 细砂岩 | 1.66 | 0.81 | 1.13 | 1.52              | 坡脚 |
| K7  | 细砂岩 | 2.21 | 1.72 | 0.37 | 1.41              | 坡脚 |
| K8  | 粉砂岩 | 1.10 | 0.53 | 0.52 | 0.28              | 坡脚 |
| K9  | 细砂岩 | 0.93 | 0.54 | 0.24 | 0.12              | 坡脚 |
| K10 | 细砂岩 | 1.66 | 1.3  | 0.4  | 0.86              | 坡脚 |
| K11 | 细砂岩 | 0.22 | 0.7  | 0.55 | 0.08              | 坡脚 |
| K12 | 细砂岩 | 0.35 | 0.77 | 0.55 | 0.15              | 坡脚 |
| K13 | 细砂岩 | 0.75 | 0.34 | 0.36 | 0.09              | 坡脚 |
| K14 | 粉砂岩 | 0.34 | 0.7  | 0.85 | 0.20              | 坡脚 |
| K15 | 细砂岩 | 0.7  | 0.5  | 0.5  | 0.18              | 坡脚 |
| K16 | 细砂岩 | 2.4  | 1.3  | 3.3  | 10.30             | 坡脚 |

结构面共发育 3 组优势裂隙结构面： $(310\sim315)^{\circ}$   $\angle$   $(75\sim80)^{\circ}$ 、 $(150\sim160)^{\circ}$   $\angle$   $(80\sim90)^{\circ}$ 、 $(224\sim235)^{\circ}$   $\angle$   $(40\sim70)^{\circ}$ 。危岩风化裂隙发育，节理面与岩层面切割贯通(图 2)。

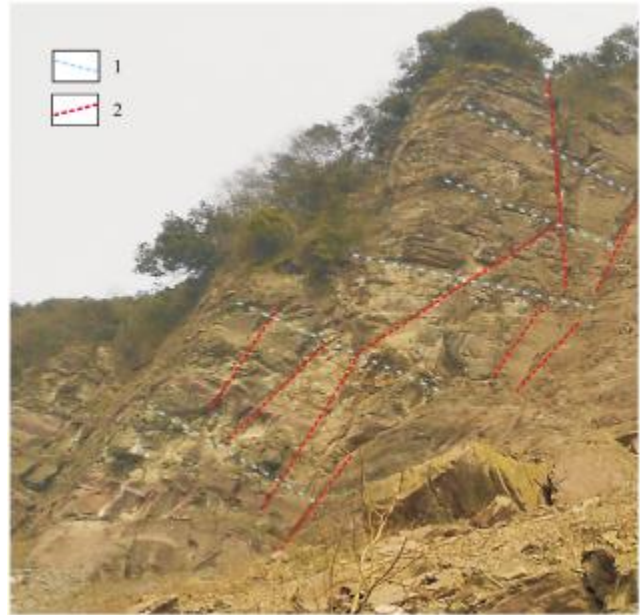


图 2 危岩(W1)节理面与岩层面切割贯通  
Fig. 2 Joint planes cutting through rock beddings of dangerous rock  
1—岩层层面(rock bedding); 2—节理(joint)

2.2 危岩体基座

危岩基座地层为三叠系下统飞仙关组( $T_1f$ )和卡以头组( $T_1k$ ),岩性均以粉砂岩为主,夹薄层状泥岩或含泥质粉砂岩,泥质含量较大,强度较上部危岩低。基座因差异风化而形成岩腔,深 0.5~3 m(图 3)。



图 3 岩性差异风化形成的凹腔(W1)  
Fig. 3 Concave cavities formed by lithologically differential weathering

危岩体及其基座岩性以粉砂岩和细砂岩为主,抗风化耐久性较差。层间夹薄层泥岩和泥质粉砂岩,岩性风化差异较大,为崩塌灾害形成提供了有利条件。

2.3 危岩卸荷

侵蚀切割形成斜坡陡崖改变了岩体原物理力学环境。卸荷作用致使陡倾角裂隙进一步扩张,裂隙间相互贯通,裂隙空间逐渐增大,形成卸荷裂隙带。卸荷带发育程度与危岩带发育高度、危岩体性质、结构裂隙发育程度、危岩带形成时间长短密切相关。

危岩卸荷带宽度为 5.20~14.10 mm,一般揭露 1~5 条。卸荷带多沿陡崖走向呈带状分布,以追踪平行坡面的陡倾裂隙为主。裂隙密度 0.5~2 条/m,张开度 5~40 mm,贯通性较好。危岩内卸荷裂隙较发育(图 2、



3),多为泥质充填,发育于岩体表层,深度较大,陡崖中下部巨厚层岩体中少见。

## 2.4 危岩崩塌堆积体

崩塌堆积物高 10~20 m,一般厚 4~8 m,坡度为 32~46°,主要组成物为碎石土,呈倒石锥形态(图 1)。最大落石(K7)规模为  $2.21 \times 1.72 \times 0.37 \text{ m}^3$ 。

崩塌堆积体分布于乌峰山脚,总体呈阶梯状。堆积体顶部较薄,厚度 0.5~1 m,坡脚堆积体随地形变化。坡脚有人工种植的杉树,堆积物上部为碎石裸区。因长期零星崩塌,植物活存较少,近裸露状。堆积物上部为碎石,坡脚为巨石,堆积体目前处于自然稳定状态。

## 2.5 危岩近期变形破坏

2013 年 5 月 1 日至 2016 年 3 月,危岩区共发生 22 次不同规模的崩塌现象。2016 年 3 月 11 和 3 月 15 日,分别发生两次崩塌现象。危岩后缘裂缝张开,岩体拉裂。随着 6、7 月份雨季来临,上部裂缝进一步加大,危岩体处于变形阶段,危岩块体多处于欠稳定状态。在暴雨等不利因素作用下,易出现失稳发生大型崩塌。

## 2.6 落石移动轨迹

调查过程中对乌峰山崩塌危岩产生的崩塌落石进行了详细测量,尤其是对规模较大,运动距离较远的块石,并根据实际坐标在平面图中予以标识。据此获得了翔实、准确的崩塌物质运动轨迹。

危岩体崩塌时,自由运动到达地面后以滚动或跳跃的方式运动一段距离后,在平缓地段停靠。调查发现崩塌区崩落轨迹线如图 4 所示。

## 3 危岩形成机制分析

危岩形成条件包括内部和外部条件两大类。内部条件包括坡体结构、地层岩性、构造、高陡临空面等;外部条件包括降雨、植被、冰雪冻融、地震、风化、人类工程活动等<sup>[15-16]</sup>。崩塌滑坡灾害成因有降雨引发型、自然演化型、地震激发型、地下开挖型、冻融渗透型、工程堆载型、切坡卸荷型、爆破振动型、灌溉渗漏型和和水库浸润型等 10 种<sup>[17]</sup>。

### 3.1 内部条件

1)坡体结构:地形坡度大于 70°,局部岩体近直立。坡面产状  $(224 \sim 235)^\circ \angle (40 \sim 70)^\circ$ 。

2)地层岩性:粉砂岩、细砂岩夹薄层泥岩,软硬相间,岩层产状  $210^\circ \angle 8^\circ$ 。



图 4 危岩体落石(K15)运动轨迹线

Fig. 4 Motion trajectory of rockfall from dangerous rock

3)构造:危岩区无断裂构造,发育  $(310 \sim 315)^\circ \angle (75 \sim 80)^\circ$  和  $(150 \sim 160)^\circ \angle (80 \sim 90)^\circ$  两组节理裂隙。两组节理交线外倾,与坡脚同向,存在纵向拉裂,不稳定。在粉砂岩区顶部可见裂缝,地形上危岩体前缘临空,卸荷作用较为强烈,卸荷主要沿  $310^\circ \angle 75^\circ$  及  $150^\circ \angle 80^\circ$  两组结构面张开,卸荷作用使岩体完整性变差,表部块体稳定性降低。

4)高陡临空面:危岩陡崖段高,一般高差 120~234 m,局部为高陡临空面。

### 3.2 外部条件

1)降水:多年平均降雨量 923.6 mm,年最大降雨量 1 427.7 mm (1983 年),年最小降雨量 578.7 mm (2009 年),月最大降雨量 355.0 mm (1998 年 7 月),日最大降雨量 178.3 mm (2008 年 7 月 1 日)。

2)植被:危岩区内树木茂盛,树木的根劈作用破坏了岩体的整体性,同时又对局部块体有加固作用。

3)冰雪冻融:危岩区内最低气温达  $-12.2^\circ \text{C}$  (1977 年 2 月 19 日)。冬季有霜、雪和凌冻,无霜期为 217 d,

11 月至次年 3 月为霜冻期,年平均积冻 10 d. 冻融温度、冻融循环、应力状态和化学环境因素交替作用导致寒旱地区岩石的冻融循环损伤劣化<sup>[18]</sup>. 冰雪冻融对岩体破坏能力强,是加剧崩塌的关键因子.

4)地震:地震基本烈度为 6 度,在地震水平作用力的影响下,易引起危岩体稳定性降低.

5)风化:风化作用加速危岩体裂隙的扩展和贯通,使裂面强度降低. 差异风化促进危岩体的失稳. 在岩石风化和卸荷作用影响下局部岩体结构较破碎,呈碎裂—块裂结构.

6)人类工程活动:据当地居民反映,20 世纪 80 年代,附近存在老窑采空区和老红旗营煤矿,生产时间短,无资料记载. 危岩区曾为采石场,采石过程中导致山体局部至今无植被,为大面积基岩裸露区. 老采区和采石是崩塌灾害形成的原因之一.

### 3.3 成因分析

通过分析危岩内、外部条件,乌峰山特高位远程危岩群岩性以粉砂岩、泥质粉砂岩为主,且整座山体岩性亦如此,易于风化,节理裂隙发育,破碎带面积大,长期零星崩塌,以渐进式演化为群崩塌,高差大,远距离崩塌,规模较大,崩塌面积广,具有群发性、危险范围大等特征. 高差大、高陡坡地形、冰雪冻融、雨水、差异风化、岩体破碎等因素是 5 处危岩发育和破坏的主控因子,也是危岩形成、演化、崩塌的关键. 危岩群崩塌灾害成因为降雨引发、自然演化、冻融渗透复合成因.

## 4 危岩破坏模式分析

大型高陡危岩在自重荷载和剧烈工程活动等多因子共同作用下,其底部区损伤劣化速度加快,成为破坏危岩整体稳定性的“薄弱环节”,易发生底部压裂变化,引发整体失稳<sup>[19]</sup>. 崩塌主要发育于坡顶临空面附近,受后部陡倾结构面和下部软弱结构面控制,其破坏特征与边坡破坏中的滑塌较为类似,破坏模式为倾倒—坠落破坏(图 5).

倾倒式危岩是指后缘存在陡倾或反倾结构面的层状岩体,陡倾或反倾结构面有一定的张开度,受力状态为倾覆力矩,最终破坏后的起始运动形式为倾倒.

现场调查表明,陡倾坡外结构面非常发育,局部发育陡倾坡内的结构面. 由于陡崖高且陡峻,强烈的卸荷作用使危岩体后缘陡倾结构面张开度大,部分裂隙

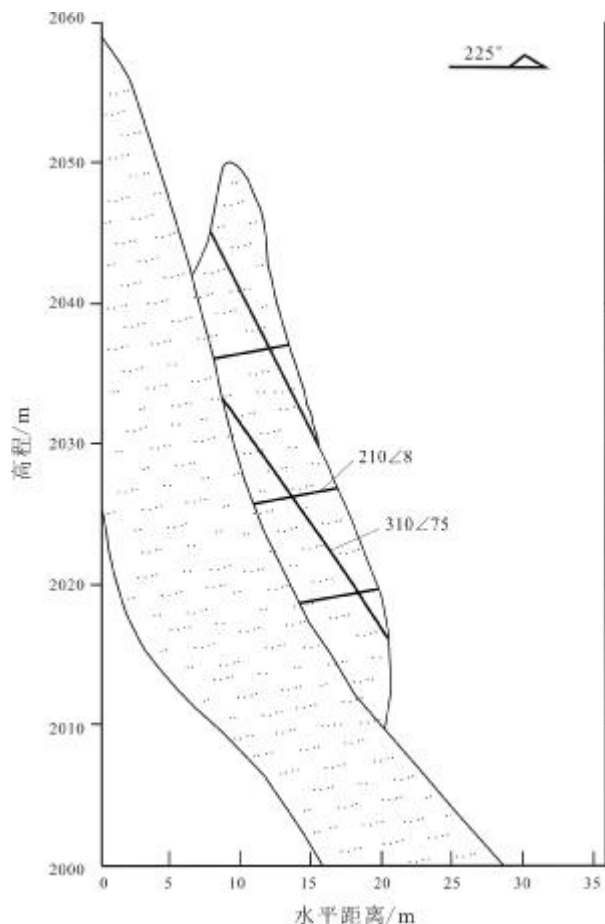


图 5 倾倒式危岩(W1)破坏模式

Fig. 5 Breaking mode of toppling-type unstable rock

和母岩几乎完全分离,致使危岩体向临空方向发生较强烈的倾倒变形. 该类危岩体后缘常常存在陡倾或者反倾结构面,在自身重力、孔隙水压力、水平地震作用力等所产生的倾覆力矩作用下,危岩体会产生倾倒变形,形成崩塌. 研究区 5 处危岩均属于倾倒式破坏.

## 5 危岩稳定性评价

按《地质灾害防治工程勘察规范》<sup>[20]</sup>对不同破坏模式采用不同的计算模型和方法进行定量计算分析. 因其稳定计算体系具有简便、通用性、易操作的特点,工程中被广泛使用,至今还在沿用<sup>[8]</sup>.

### 5.1 计算条件选取

危岩活动的主要影响因子是大暴雨,考虑地震对危岩影响,选取 3 种荷载组合条件下评价危岩稳定性. 自重(天然状态)、自重+裂隙水压力(暴雨状态)、自重+地震力.

## 5.2 计算块体选取

综合考虑岩体结构特征、结构面发育现状、危岩块体边界条件、失稳模式、下部粉砂岩受节理裂隙切割等因素,结合拟设支挡工程块体和落石统计,选取  $1 \text{ m}^3$  的块体大小来进行计算。

## 5.3 计算方法选取

结合岩体结构特征、结构面发育现状、危岩块体边界条件、类型及失稳模式等因素,对危岩的稳定性进行计算。5处危岩主要以倾倒式为主,力学计算按照上述3类不同荷载条件进行。

计算模型如图6、7所示,将岩块按各自结构特征沿长度方向选取若干截面进行计算,同时在考虑裂隙水压力时,设裂隙深度与裂隙充水深度相等,每一截面按单元宽度考虑,不考虑基座抗拉强度。

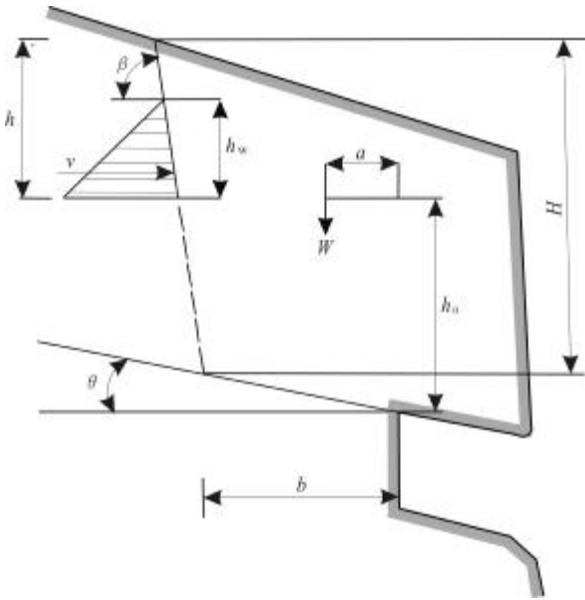


图6 后缘岩体抗拉强度控制

Fig. 6 Control of tensile strength by trailing edge rock mass

1) 危岩破坏由后缘岩体抗拉强度控制时,危岩稳定系数( $K$ )按下式计算。

危岩体重心在倾覆点之外:

$$K = \frac{\frac{1}{2} f_{ik} H \left[ \frac{2}{3} \frac{H-h}{\sin \beta} + \frac{b}{\cos \theta} \cos(\beta-\theta) \right]}{W \cdot a + Q \cdot h_0 + V \left[ \frac{H-h}{\sin \beta} + \frac{h_w}{3 \sin \beta} + \frac{b}{\cos \theta} \cos(\beta-\theta) \right]} \quad (1)$$

危岩体重心在倾覆点之内:

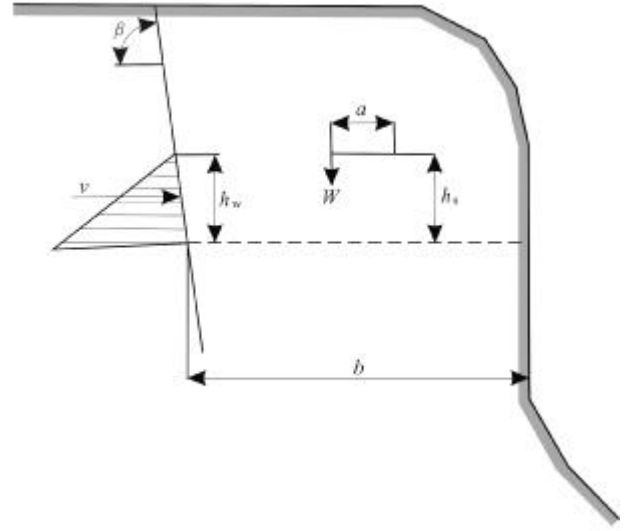


图7 底部岩体抗拉强度控制

Fig. 7 Control of tensile strength by bottom rock mass

$$K = \frac{\frac{1}{2} f_{ik} \frac{H-h}{\sin \beta} \left[ \frac{2}{3} \frac{H-h}{\sin \beta} + \frac{b}{\cos \theta} \cos(\beta-\theta) \right] + W \cdot a}{Q \cdot h_0 + V \left[ \frac{H-h}{\sin \beta} + \frac{h_w}{3 \sin \beta} + \frac{b}{\cos \theta} \cos(\beta-\theta) \right]} \quad (2)$$

2) 当危岩的破坏由底部岩体抗拉强度控制时,危岩稳定系数按下式计算。

$$K = \frac{\frac{1}{3} f_{ik} \cdot b^2 + W \cdot a}{Q \cdot h_0 + V \left( \frac{1}{3} \frac{h_w}{\sin \beta} + b \cos \beta \right)} \quad (3)$$

式中:  $h$ —后缘裂隙深度(m);  $h_w$ —后缘裂隙充水高度(m);  $H$ —后缘裂隙上端到未贯通段下端的垂直距离(m);  $a$ —危岩体重心到倾覆点的水平距离(m);  $b$ —后缘裂隙未贯通段下端到倾覆点之间的水平距离(m);  $h_0$ —危岩体重心到倾覆点的垂直距离(m);  $f_{ik}$ —危岩体抗拉强度标准值(kPa),根据岩石抗拉强度标准值乘以0.4的折减系数确定;  $\theta$ —危岩体与基座接触面倾角( $^\circ$ ),外倾时取正值,内倾时取负值;  $\beta$ —后缘裂隙倾角( $^\circ$ );  $W$ —危岩自重( $\text{kN/m}^3$ );  $Q$ —地震力( $\text{kN/m}$ );  $V$ —裂隙水压力( $\text{kN/m}$ )。

## 5.4 计算参数

据危岩体结构和形态特征,判断其破坏模式为倾倒式崩塌破坏。据采样分析,综合邻近场地的经验资料及相关规范,确定岩体的物理力学参数建议值。危岩体岩性主要为粉砂岩,岩体节理发育,裂隙面结合

差,抗剪强度低. 据《建筑边坡工程技术规范》<sup>[21]</sup>,天然状态下裂隙抗剪强度为:内摩擦角( $\phi_0$ )取 12~18°,黏聚力( $C$ ) 20~50 kPa;天然状态下碎石土和胶结碎石土参数取值见表 3. 岩体物理力学参数建议值见表 4. 软弱结构面、裂隙水压力按裂隙蓄水能力和降雨情况综合选取. 软弱结构面分为结合很差型和结合极差型(泥化层),其中结合很差型内摩擦角在 13~18°之间,结合极差型(泥化层)取值小于 12°;结合很差型黏聚力取值在 20~50 kPa 之间,结合极差型(泥化层)黏聚力取值小于 20 kPa.

表 3 岩土体力学参数取值

Table 3 Mechanical parameters of rock and soil mass

| 岩土体   | 重度/(kN/m <sup>3</sup> ) | C/kPa | 内摩擦角 $\phi_0$ /(°) | 地基承载力 q/kPa |
|-------|-------------------------|-------|--------------------|-------------|
| 碎石土   | 22.1                    | 21.4  | 27.8               | 260         |
| 胶结碎石土 | 22.6                    | 33.6  | 36.8               | 360         |

表 4 岩石力学参数统计表

Table 4 Statistical table of rock mechanics parameters

| 岩石名称   | 密度/(g/cm <sup>3</sup> ) | 抗压强度 $\sigma$ /MPa |      | 抗拉强度 $\sigma$ /MPa | 黏聚力 $C_0$ /kPa | 内摩擦角 $\phi_0$ /(°) |
|--------|-------------------------|--------------------|------|--------------------|----------------|--------------------|
|        |                         | 天然                 | 饱和   |                    |                |                    |
| 强风化粉砂岩 | 2.70                    | 32.2               | 25.2 | 2.20               | 9.0            | 31                 |
| 中风化粉砂岩 | 2.75                    | 35.1               | 30.1 | 3.20               | 12.0           | 34                 |

5.5 危岩稳定性计算与结果评述

针对不同变形破坏模式的危岩体,量化标准是有差别的. 参照《滑坡防治工程勘查规范》<sup>[22]</sup>中制定的判别依据. 按计算模型和方法,选取危岩块体具有代表性剖面,根据各个块体的计算参数对危岩体的稳定性系数进行了计算,计算结果见表 5.

表 5 危岩体稳定性计算结果表

Table 5 Stability calculation results of dangerous rocks

| 编号 | 体积/m <sup>3</sup> | 破坏模式 | 稳定系数 K |       |       | 安全系数 | 稳定性评价 |      |      |
|----|-------------------|------|--------|-------|-------|------|-------|------|------|
|    |                   |      | 天然     | 暴雨    | 地震    |      | 天然    | 暴雨   | 地震   |
| W1 | 3798.49           | 倾倒式  | 1.878  | 0.409 | 0.387 | 1.5  | 稳定    | 不稳定  | 不稳定  |
| W2 | 1435.70           | 倾倒式  | 2.426  | 1.096 | 0.973 | 1.5  | 稳定    | 欠稳定  | 不稳定  |
| W3 | 1925.45           | 倾倒式  | 1.284  | 0.606 | 0.565 | 1.5  | 欠稳定   | 不稳定  | 不稳定  |
| W4 | 603.60            | 倾倒式  | 1.914  | 1.429 | 1.256 | 1.5  | 稳定    | 基本稳定 | 欠稳定  |
| W5 | 1279.49           | 倾倒式  | 9.344  | 1.507 | 1.365 | 1.5  | 稳定    | 稳定   | 基本稳定 |

6 结论

1)高差大、高陡坡地形、冰雪冻融、雨水、差异风化、岩体破碎等因素是 5 处危岩发育和破坏的主控因子. 危岩群崩塌灾害成因为自然演化、降雨引发、冻融渗透复合成因.

2)危岩群破坏模式为倾倒式,5 处危岩在不同荷载条件下稳定性差,应加强监测与群防群测,及时加以工程防治,确保危岩崩塌不造成重大经济损失.

3)乌峰山特高位远程危岩群平均高差 159 m,落石最大水平位移 216 m,崩塌区和危岩区基岩裸露面积为 0.07 km<sup>2</sup>. 由于软弱岩层相间,长期零星崩塌,高速远程动力崩塌过程中易产生碎屑流,呈散形扇状高速冲击流动.

4)通过对乌峰山 5 处危岩的内、外部特征分析,评价了危岩群的基本特征、变形破坏模式及稳定性. 该方法有助于现场识别危岩,准确获取危岩的现场数据,即反演危岩孕灾过程,亦可推演危岩变形、破坏、发展趋势,对于同类特高位远程群发性崩塌有一定参考意义.

参考文献(References):

[1]陈洪凯,董平,唐红梅. 危岩崩塌灾害研究现状与趋势[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2015, 32(6): 53-60.  
Chen H K, Dong P, Tang H M. The status quo and trends of perilous rock and collapse disaster[J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science), 2015, 32(6): 53-60.  
[2]章涛. 危岩破坏机理的研究进展[J]. 地质与资源, 2018, 27(5): 488-493.  
Zhang T. Research progress on the failure mechanism of unstable rock [J]. Geology and Resources, 2018, 27(5): 488-493.  
[3]刘福臻,李旭德,王军朝,等. 基于无人机和 Rockfall Analyst 的崩

- 塌落石特征分析与运动学模拟——以察雅县崩塌落石为例[J]. 自然灾害学报, 2021, 30(3): 171-180.
- Liu F Z, Li X D, Wang J C, et al. Characteristic analysis and kinematic simulation of rockfall based on UAV and Rockfall Analyst: A case study of rockfall in Chaya County [J]. Journal of Natural Disasters, 2021, 30(3): 171-180.
- [4] 李元灵, 刘建康, 张佳佳, 等. 藏东察达高位崩塌发育特征及潜在危险[J]. 现代地质, 2021, 35(1): 74-82.
- Li Y L, Liu J K, Zhang J J, et al. Characteristics and potential hazard of the Chada collapse in eastern Tibet[J]. Geoscience, 2021, 35(1): 74-82.
- [5] 徐晨栋, 苑康泽, 郭子坤, 等. 清子高速某工程滑坡诱发机制及治理模拟[J]. 地质与资源, 2020, 29(2): 196-201.
- Xu C D, Yuan K Z, Guo Z K, et al. Inducement mechanism and treatment simulation of an engineering landslide on Qingzi expressway [J]. Geology and Resources, 2020, 29(2): 196-201.
- [6] 张永双, 巴仁基, 任三绍, 等. 中国西藏金沙江白格滑坡的地质成因分析[J]. 中国地质, 2020, 47(6): 1637-1645.
- Zhang Y S, Ba R J, Ren S S, et al. An analysis of geo-mechanism of the Baige landslide in Jinsha River, Tibet[J]. Geology in China, 2020, 47(6): 1637-1645.
- [7] 宋胜武, 冯学敏, 向柏宇, 等. 西南水电高陡岩石边坡工程关键技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(1): 1-22.
- Song S W, Feng X M, Xiang B Y, et al. Research on key technologies for high and steep rock slopes of hydropower engineering in Southwest China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(1): 1-22.
- [8] 吴福, 范秋雁, 李拓, 等. 危岩稳定性计算新体系[J]. 地质与勘探, 2018, 54(4): 791-800.
- Wu F, Fan Q Y, Li T, et al. A new system of stability calculation for dangerous rock mass[J]. Geology and Exploration, 2018, 54(4): 791-800.
- [9] 彭贵芬, 余美兰, 彭勃, 等. 云南省冰冻灾害气象条件及风险评估——基于模糊信息分配方法的研究[J]. 自然灾害学报, 2012, 21(2): 150-156.
- Peng G F, Yu M L, Peng B, et al. Meteorological conditions and risk assessment of frost hazards in Yunnan Province: Research based on fuzzy information distribution method[J]. Journal of Natural Disasters, 2012, 21(2): 150-156.
- [10] 王涛, 段鹏. 山西省中阳县地质灾害特征及区划研究[J]. 地质与资源, 2016, 25(5): 487-493.
- Wang T, Duan P. Research of the characteristics and zonation of geological hazards in Zhongyang County, Shanxi Province[J]. Geology and Resources, 2016, 25(5): 487-493.
- [11] 刘传正, 吕杰堂, 童立强, 等. 雅鲁藏布江色东普沟崩滑-碎屑流堵江灾害初步研究[J]. 中国地质, 2019, 46(2): 219-234.
- Liu C Z, Lü J T, Tong L Q, et al. Research on glacial/rock fall-landslide-debris flows in Sedongpu basin along Yarlung Zangbo River in Tibet [J]. Geology in China, 2019, 46(2): 219-234.
- [12] 刘传正, 陈春利. 中国地质灾害成因分析[J]. 地质论评, 2020, 66(5): 1334-1348.
- Liu C Z, Chen C L. Research on the origins of geological disasters in China[J]. Geological Review, 2020, 66(5): 1334-1348.
- [13] 吴玮江. 季节性冻融作用与斜坡整体变形破坏[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1996, 7(4): 59-64, 93.
- Wu W J. Seasonal freeze-thaw action and the entire deformation, failure of slope [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1996, 7(4): 59-64, 93.
- [14] 杨艳霞, 祝艳波, 李才, 等. 南方极端冰雪灾害条件下边坡崩塌机理初步研究[J]. 人民长江, 2012, 43(2): 46-49.
- Yang Y X, Zhu Y B, Li C, et al. Preliminary research on formation mechanism of collapse under the condition of extreme snow hazard [J]. Yangtze River, 2012, 43(2): 46-49.
- [15] 刘廷登. 砂页岩悬崖陡壁危岩发育机制浅探[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2001, 12(3): 53-56.
- Liu T D. Study on the development mechanism of the dangerous rock mass in the sandstone and shale cliff [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2001, 12(3): 53-56.
- [16] 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. Analysis on formation and development mechanism and discussion on prevention measures for Zenziyan dangerous rock mass in Chongqing[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2004, 15(1): 78-81.
- [17] 刘传正. 中国崩塌滑坡泥石流灾害成因类型[J]. 地质论评, 2014, 60(4): 858-868.
- Liu C Z. Genetic types of landslide and debris flow disasters in China [J]. Geological Review, 2014, 60(4): 858-868.
- [18] 沈瑜, 王新新. 西部寒旱地区岩石冻融损伤机理研究[J]. 城市道桥与防洪, 2017(9): 223-224.
- Shen Y, Wang X X. Study on freeze thawing and damage mechanism of rock in western cold and dry areas [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2017(9): 223-224.
- [19] 贺凯, 高杨, 殷跃平, 等. 基于岩体损伤的大型高陡危岩稳定性评价方法[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(4): 82-89.
- He K, Gao Y, Yin Y P, et al. Stability assessment methods for huge high-steep unstable rock mass based on damage theory[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2020, 47(4): 82-89.



- MS/MS 检测方法的建立[J]. 环境化学, 2015, 34(8): 1446–1452.
- Zhang J, Zong D L, Chang A M, et al. Determination of common antibiotics in aquatic environment by solid-phase extraction and ultra pressure liquid chromatography-tandem mass spectrometry (UPLC-MS/MS) [J]. Environmental Chemistry, 2015, 34(8): 1446–1452.
- [13] Kim C, Ryu H D, Chung E G, et al. A review of analytical procedures for the simultaneous determination of medically important veterinary antibiotics in environmental water: Sample preparation, liquid chromatography, and mass spectrometry [J]. Journal of Environmental Management, 2018, 217: 629–645.
- [14] 孙琴, 徐律, 丁士明, 等. 薄膜扩散梯度技术测量砷的影响因素及其应用[J]. 中国环境科学, 2016, 36(5): 1482–1490.
- Sun Q, Xu L, Ding S M, et al. Environmental influences on the measurement of dissolved arsenic using Zr-oxide DGT [J]. China Environmental Science, 2016, 36(5): 1482–1490.
- [15] 王艳平, 关庆伟, 李超, 等. 巢湖沉积物有效态磷与硫的 DGT 原位同步分析研究[J]. 环境科学学报, 2015, 35(8): 2512–2518.
- Wang Y P, Guan Q W, Li C, et al. A study of in situ synchronous measurement of available phosphorus and sulfur in the sediments of lake Chaohu by diffusive gradients in thin films (DGT)[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(8): 2512–2518.
- [16] Chen C E, Zhang H, Jones K C. A novel passive water sampler for in situ sampling of antibiotics[J]. Journal of Environmental Monitoring, 2012, 14(6): 1523–1530.
- [17] 宋志廷, 赵玉杰, 周其文, 等. 不同土壤孔隙度对 DGT 提取 Cd 有效态含量的影响研究[J]. 中国农学通报, 2016, 32(12): 139–144.
- Song Z T, Zhao Y J, Zhou Q W, et al. Effects of soil porosity on available Cd content extracted by DGT [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016, 32(12): 139–144.
- [18] 荣楠, 朱家亮, 周道坤, 等. 黑臭河流沉积物磷、铁、硫的 DGT 同步分析研究[J]. 环境科学学报, 2018, 38(7): 2599–2606.
- Rong N, Zhu J L, Zhou D K, et al. A study of synchronous measurement of phosphorous, iron and sulfur in the sediment of malodorous black rivers by diffusive gradients in thin films (DGT)[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, 38(7): 2599–2606.
- [19] Chen C E, Zhang H, Ying G G, et al. Evidence and recommendations to support the use of a novel passive water sampler to quantify antibiotics in wastewaters[J]. Environmental Science & Technology, 2013, 47(23): 13587–13593.
- [20] Chen W, Li Y Y, Chen C E, et al. DGT passive sampling for quantitative in situ measurements of compounds from household and personal care products in waters[J]. Environmental Science & Technology, 2017, 51(22): 13274–13281.

---

(上接第 213 页/Continued from Page 213)

- [20] 重庆市质量技术监督局. DB50/143—2003 地质灾害防治工程勘察规范[S]. 重庆: 重庆市质量技术监督局, 2003: 28–32.
- Chongqing Municipal Bureau of Quality and Technical Supervision. DB50/143—2003 Code for investigation of geological disaster control engineering[S]. Chongqing: Chongqing Municipal Bureau of Quality and Technical Supervision, 2003: 28–32.
- [21] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50330—2013 建筑边坡工程技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014: 21.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. GB50330—2013 Technical code for building slope engineering[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014: 21.
- [22] 中华人民共和国国土资源部. DZ/T0218—2006 滑坡防治工程勘查规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006: 20.
- Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. DZ/T0218—2006 Specification of geological investigation for landslide stabilization[S]. Beijing: China Standard Press, 2006: 20.