

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2021.01.04

北京雁栖镇典型危岩基本特征及稳定性分析

夏相骅¹, 刘德成^{1,2}, 李玉倩¹, 高雪媛¹

(1. 北京市地质矿产勘查开发总公司, 北京 100050;

2. 中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083)

摘要: 本文以北京市怀柔区雁栖镇研究区崩塌体为研究对象, 通过现场调查和岩块试验检测, 查明了崩塌体的基本特征。采用赤平投影分析法, 对崩塌危岩带整体稳定性进行定性分析; 运用极限平衡法, 针对不同工况条件, 对单体危岩崩塌进行定量评价。在此基础上, 提出了具有针对性的治理措施。研究结果表明: (1) 研究区内崩塌隐患点所在斜坡危岩带基本处于不稳定状态; (2) 单体危岩 W1、W2、W3 在自重+裂隙水压力(天然状态)工况条件下, 稳定系数 1.02~1.17, 均处于欠稳定状态; 在自重+裂隙水压力(暴雨期间)工况条件下, 稳定系数 0.82~0.98, 均处于不稳定状态; 在自重+裂隙水压力(天然状态)+地震力工况条件下, 稳定系数 0.72~0.83, 均处于不稳定状态。(3) 提出的以清理危岩为基础, “主动+被动防护网”的综合工程治理措施在北京地区是可行的。研究成果可以作为北京地区开展崩塌灾害工程治理的参考。

关键词: 崩塌; 单体危岩; 稳定性评价; 防治建议

中图分类号: P694

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2021)01-0028-07

Basic characteristics and stability evaluation of dangerous rockmasses in Yanqi Town, Beijing

XIA Xianghua¹, LIU Decheng^{1,2}, LI Yuqian¹, GAO Xueyuan¹

(1. Beijing Geology and Mineral Resources Prospecting and Developing Company, Beijing 100050, China;

2. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: In this paper, taking Yanqi Town, Huairou District, Beijing as the research object, through the field investigation and rock block test and detection, the basic characteristics of the collapse are found out. By using the method of stereographic projection analysis, the overall stability of the collapse dangerous rock zone is qualitatively analyzed; by using the method of limit equilibrium, the single dangerous rock collapse is quantitatively evaluated according to different working conditions. On this basis, the targeted governance measures are put forward. The results show that: (1) the dangerous rock zone on the slope where the hidden danger point of collapse disaster is located is basically in an unstable state; (2) under the condition of self weight + fracture water pressure (natural state), the stability coefficient of single dangerous rock W1, W2 and W3 is 1.02 ~ 1.17, which are all in an unstable state; under the condition of self weight+ fracture water pressure (rainstorm), the stability coefficient is 0.82 ~ 0.98, both in an unstable state; under the condition of self weight + fissure water pressure (natural state) + seismic force, the stability coefficient is 0.72 ~ 0.83, both in an unstable state. (3) The comprehensive engineering control measures of “active + passive protection network” are feasible in Beijing area. The research results can be used as a reference for engineering control of collapse disaster in Beijing.

Keywords: rock fall; dangerous rock; stability evaluation; prevention and control measures

收稿日期: 2020-03-10; 修订日期: 2020-04-28

第一作者: 夏相骅(1988-), 男, 河北人, 大学本科, 工学学士, 工程师, 主要从事地质灾害与防治研究、生态环境修复研究。E-mail: hyena1023@163.com

0 引言

北京作为我国的首都,也是地质灾害多发城市之一。崩塌灾害是北京主要的突发性地质灾害种类之一^[1]。北京的崩塌灾害多发生于山区地带,具有突发性强、致灾性大、影响范围大等特点。

国内外对崩塌的研究成果比较多,在可查证文献中,可追溯至19世纪。1875年POWELL^[2]从地貌学角度分析了美国科罗拉多河及其支流流域的塔柱状崩塌岩体形成过程。POISEL等^[3-5]对发育于下伏软弱层的硬岩地层中的塔柱状、板状岩体崩塌灾害做了较详细的研究。TERZAGHI^[6]围绕阿尔卑斯山脉的塔状灰岩崩塌灾害开展了研究。DUSSAUGEPEISSER^[7]研究认为灰岩陡崖易发生塔柱状块体的倾覆。NICHOL等^[8]对大型孤立灰岩倾覆崩塌开展了研究。GLASTONBURY等^[9]对岩质崩塌诱发因素进行了全面研究。这些研究成果主要侧重于崩塌灾害形成机理的理论研究。国内学者对崩塌的形成机理^[10-14]、监测手段^[15]、运动过程数值模拟^[16-17]、评价方法^[18]等方面开展了大量的研究工作。这些研究作为崩塌灾害的防治提供了理论基础。

本文以北京市怀柔区雁栖镇研究区崩塌为研究对象,通过现场调查和岩块试验检测,查明了崩塌体的基本特征。对崩塌体稳定性进行了定性和定量分析评价。根据评价结果,提出了防治建议,以期为北京地区开展单体危岩崩塌灾害防治类似工程问题的研究提供参考。

1 研究区概况

研究区位于北京市怀柔区雁栖镇西北部山区,距离怀柔城区约45 km,距离北京城区108 km。属暖温带大陆性季风气候区,年平均气温 $6^{\circ}\sim 12^{\circ}\text{C}$ 。年降水量较多,在470~850 mm。地表水流流量约50~100 L/h。研究区内崩塌体位于南北向丁香沟东侧山体,海拔高度760~820 m,山体坡度 $50^{\circ}\sim 75^{\circ}$,主要由碳酸盐岩、沉积岩所组成。地下水的补给方式主要来自大气降水入渗及土地灌溉回渗补给。排泄方式包括自然蒸发、向地表及侧向径流和人为开采。附近人类工程活动主要有山坡绿化、坡脚以干砌石堆砌梯田。

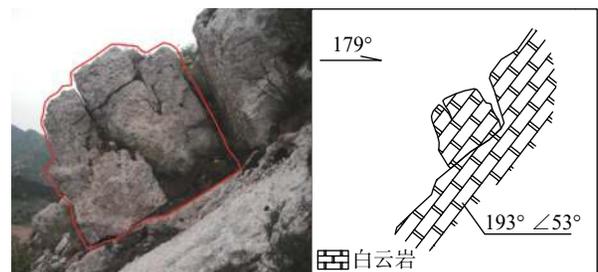
2 崩塌基本特征

2.1 范围、规模及形态

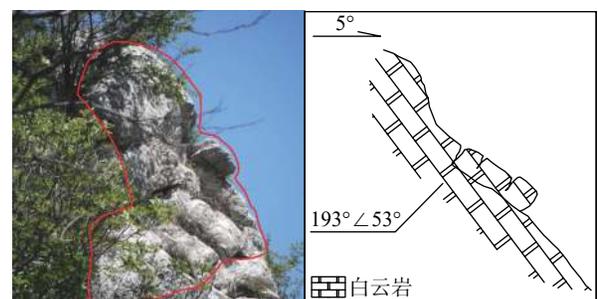
研究区崩塌体坡脚离房屋最近仅3 m。主崩方向正对22户居民。根据访问,坡脚存在少量崩塌的碎块石堆积在坡脚。该崩塌所在边坡宽约80 m,高约100 m,

坡长约120 m,坡向 196° ,坡度 $50^{\circ}\sim 70^{\circ}$,局部可达 80° ,坡面植被发育良好,覆盖率可达70%以上。

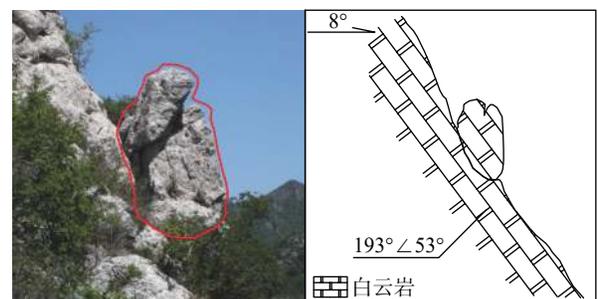
研究区崩塌体上分布有3处典型单体危岩体(图1),体积 $4\sim 15\text{ m}^3$,岩性为长城系高于庄组白云岩,灰白色,白云质结构,块状构造,岩层产状 $193^{\circ}\angle 53^{\circ}$,顺向坡,微~中风化,局部强风化,破碎成块状,节理裂隙发育,有两组节理:①结构面, $259^{\circ}\angle 81^{\circ}$,与坡面斜交,裂隙0.5~1条/m,张开1~3 cm,无填充;②结构面,反向坡面, $17^{\circ}\angle 56^{\circ}$,裂隙1~2条/m,微张1~2 cm,无填充。岩体表面受雨水冲刷,溶蚀现象明显。崩塌坡脚修建有1~3道干砌挡墙,墙后覆土种植有农作物及香椿树、核桃树。



(a) 危岩体W1



(b) 危岩体W2



(c) 危岩体W3

图1 危岩体照片及素描图

Fig. 1 Photo and sketch of dangerous rock mass

经实地调查(表1),部分危岩体有少量松动块石滚落,处于不稳定状态。较大降雨、重力作用等其他不利因素可能成为发生崩塌的激发因素,导致局部或整个危岩体发生崩塌,变形破坏方式为倾覆式。

表 1 崩塌危岩体特征调查统计表

Table 1 Survey statistics of characteristics of collapse dangerous rock mass

序号	危岩体编号	所在位置	规模/m ³	可能运动方式	可能运动最大距离/m	稳定性分析	危害对象
1	W1	坡顶下方20 m处靠东	10	倾倒式	80~90	欠稳定	人员、房屋、道路
2	W2	坡顶下方21 m处中部	4.5	倾倒式	80~90	欠稳定	人员、房屋
3	W3	坡顶下方22 m处靠西	4.5	倾倒式	80~90	欠稳定	人员、房屋

2.2 破坏方式及主要影响因素

2.2.1 破坏方式

山高坡陡是孕育崩塌的必要条件,研究区崩塌地质灾害隐患所处的高陡边坡坡角一般大于 45°,相对高差多为 5~30 m,这为崩塌灾害的发生提供了较好的地形条件和动力条件。研究区崩塌灾害发育于长城系高于庄组白云岩斜坡上,由于经受强烈风化作用,基岩风化程度高,比较破碎,节理裂隙发育,一般发育有两组以上的裂隙,多以雁行排列的节理组或由两组剪切节理形成共轭的“x”型节理形式存在,节理面大多较平整光滑,局部充填土质并长有植物。在主裂隙的控制及降雨的诱发下岩体裂隙进一步加长加宽,直至变形破坏产生崩塌,崩塌危岩体多以倾倒方式发生。

2.2.2 形成条件及影响因素

研究区崩塌属于外动力地质灾害,主要受地形地貌、岩土、地质条件、气象、水文、降雨等条件控制,其次受工程建设以及破坏植被等人类活动影响。

(1) 地形地貌

研究区属剥蚀低山、丘陵地貌类型,地形切割较大,海拔高度一般为 730~880 m,天然形成的地形地貌特征构成了崩塌地质灾害隐患的基础,受地质构造制约,山体较为陡峭。研究区属地质灾害易发区。

(2) 地层岩性

研究区崩塌隐患分布在白云岩类岩质边坡上,基岩经强烈风化后,裂隙明显,形成陡崖地貌,形成张性裂隙,裂隙下穿切层,贯通形成张性裂缝,将岩层切割,孤立岩体逐渐向外倾斜,最终在重力和裂隙水压力作用下产生崩塌。

(3) 地质构造

研究区地处华北地台北部边缘地区,以构造岩浆活动带、断裂破碎带和结晶基底深埋突变带形式为特征。崩塌坡面岩层节理裂隙发育,构造发育强烈,地形相对较陡,微地貌变化复杂,在降雨、地下水、地震、重力等条件的综合作用下易引发崩塌地质灾害。

(4) 降雨

降雨是研究区地质灾害发育的重要动力条件和主

要触发因素之一,雨水沿节理裂隙下渗运移,浸泡软化润滑岩体,改变了斜坡内部应力状态,增加了坡体自重,使应力局部集中,致使坡体局部出现各种变形,如裂缝、膨胀、下挫等。研究区一年以内降水分布不均,大约有 80% 以上集中在每年的 6—9 月,多为暴雨。研究区的崩塌主要由暴雨和连续性降雨引起的。

(5) 植被覆盖度

植被具有保护斜坡防止水土流失的作用,对斜坡的演化和稳定性具有一定的有利影响,同时由于植物根系根劈作用,会加剧岩体的破碎风化程度,不利于坡体稳定性,植被覆盖对坡体的稳定性有双重影响,总体来说,植被覆盖率高的地方,地质灾害相对较少。研究区局部植被覆盖率偏低。

(6) 人类工程活动

研究区内人为活动主要包括建房、修路等。人为破坏了植被和岩土结构,改变了边坡岩土体原有平衡的地质条件,促进了崩塌地质灾害隐患的发育,形成了很多高陡的岩质边坡和部分土质边坡,这些边坡大部分坡面裸露,受工程施工影响节理裂隙发育相对密集,形成了潜在的崩塌隐患。

2.3 工程地质条件

2.3.1 岩体工程地质

本研究区位于雁栖镇大地村,出露岩组为坚硬层状白云岩岩组,中—厚层状,较完整,岩体坚硬,新鲜面多呈灰白色,溶蚀现象不发育,受断裂构造影响相对较大,岩体节理裂隙发育,多形成陡峭、直立的高山景观。

2.3.2 岩体基本质量分级

采用凿岩取样的方式采取了岩石试样进行室内试验(抗压、弹性模量、抗剪)确定其物理力学参数(表 2)。

试验检测结果表明:白云岩,灰白色,白云质结构,块状构造,单轴天然抗压强度为 45.83~96.41 MPa,属较坚硬岩—坚硬岩,平均抗剪断强度 $c=3.65$ MPa, $\phi=44.495^\circ$,该组力学性质较好—一般。

对研究区边坡岩体,根据边坡岩体的软硬程度及完整性进行工程岩体基本质量分级,分级标准依据《工程岩体分级标准》^[19-20]。

表 2 岩块试验检测数据

Table 2 Rock block test and detection data

岩性	试样编号	抗压强度/ MPa	弹性模量/ 10 ⁴ MPa	内聚力/ MPa	内摩擦角/ (°)
白云岩	岩样1	96.41	7.27	2.80	45.57
	岩样2	45.83	4.74	4.50	43.42

经分级判定, 研究区崩塌岩性为白云岩, 较坚硬岩—坚硬岩, 岩体较破碎, 基本质量级别为 IV。

3 稳定性分析

影响岩质边坡稳定性的因素很多, 包括地层岩性、岩体结构、地质构造、地形地貌、水文地质条件等, 其中岩体中的控制性结构面往往起决定性作用。赤平投影法是目下岩质边坡岩体稳定性分析的一个重要方法, 通过分析边坡临空面与结构面之间的组合关系, 可直观、快速地分辨出控制边坡稳定性的主要和次要结构面, 判断出不稳定块体的空间位置、形状、规模及可能变形位移方向, 确定出边坡的稳定类型。鉴于此, 本文采用赤平投影法来从宏观上定性评价工程中岩质边坡的稳定性。

危岩体稳定性定量分析方法主要为静力解析法、数值模型实验、可靠性理论分析法等, 最为常用的是以极限平衡理论为基础的静力分析法。该方法基于危岩体块体稳定性, 所需参数少, 受力明确, 计算结果能够基本反映危岩体实际的稳定情况。同时该方法多次应用于三峡库区危岩体的稳定性分析评价及治理工程设计。

3.1 稳定性宏观分析

根据现场勘查, 主要依据节理面的发育情况、岩体完整程度(结构面发育程度、结构面结合程度、结构面类型等), 采用赤平投影分析法对研究区内崩塌地质灾害隐患点所在坡体的整体稳定性进行了宏观评价。经对研究区典型危岩带中典型危岩体节理裂隙及坡体出露基岩节理赤平投影分析(图 2), 斜坡危岩带处于不稳定状态。层面为主控结构面, 倾向与坡向相近, 倾角小于坡角; 节理 1 和节理 2 组合交线的倾向与坡向相近, 倾角小于坡角, 被节理 1 和节理 2 交合线切割形成的楔形体, 易沿向节理 1 结构面方发生倾倒式破坏, 与现场调查结果基本一致。裂隙发育密度高, 故易发生局部倾倒破坏和掉块现象, 综合判定该边坡目前稳定性较差。

3.2 危岩体稳定性定量评价

研究区崩塌所在坡体的危岩体破坏模式主要为倾倒破坏模式, 运用模型计算危岩体的稳定系数 F , 进行定量评价。

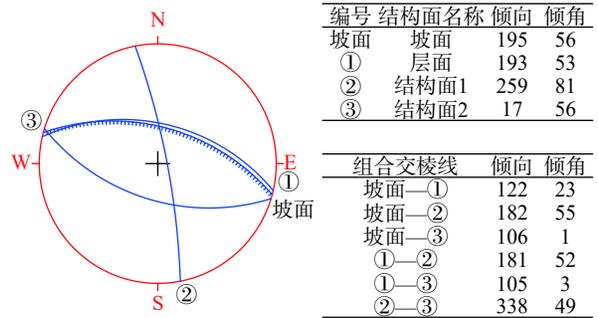


图 2 赤平投影分析图

Fig. 2 Stereographic projection analysis

(1) 倾倒式危岩体计算模型

倾倒式破坏危岩体稳定性计算采用极限平衡法^[21], 其稳定性计算模型见图 3, 计算公式如下。

稳定性系数 K 计算公式:

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

式中: K ——为危岩体稳定性系数;

f_{ik} ——危岩体抗拉强度标准值/kN;

b ——后缘裂隙未贯通段下端到倾覆点之间的水平距离/m;

w ——危岩体自重/(kN·m⁻¹);

a ——危岩体与基座接触面倾角/(°);

β ——后缘裂隙倾角/(°);

h_w ——现状裂隙充水高度/m;

h_0 ——危岩体重心到倾覆点的垂直距离/m;

V ——危岩体体积/m³;

Q ——裂隙中静水压力/kN。

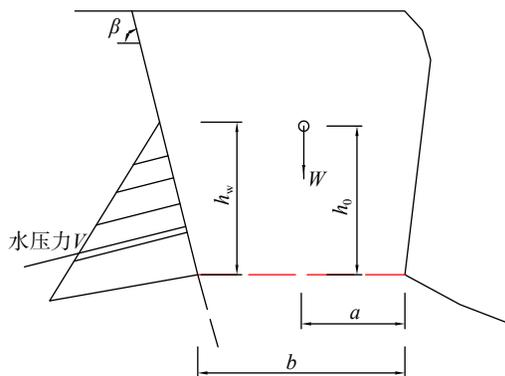


图 3 稳定性计算模型

Fig. 3 Stability calculation model

(2) 工况选取

综合分析危岩体特征及其各种荷载情况, 对倾倒式

危岩选定三种组合工况计算评价危岩体稳定性。

工况一: 自重+裂隙水压力(天然状态);

工况二: 自重+裂隙水压力(暴雨期间);

工况三: 自重+裂隙水压力(天然状态)+地震力。

(3) 计算参数确定

计算参数主要包括危岩块体物理力学参数、几何形状参数、裂隙和滑面参数以及地震水平系数。危岩块体物理力学参数主要是危岩体的重度, 依据现场调查结果经验类比得到; 几何形状参数主要是危岩体的高度、体积等, 结合现场调查结果和剖面量测确定; 裂隙和滑面参数主要包括裂隙充水高度、滑面倾角、裂隙黏聚力和内摩擦角等, 主要从计算剖面中量取和采用经验数据; 地震水平系数根据相关规范, 工程区抗震设防烈

度为 7 度, 地震水平系数取 0.10。危岩体稳定性计算参数见表 3。

表 3 稳定性计算参数一览表
Table 3 Stability calculation parameters

重度/(KN·m ⁻³)	天然	25
	饱和	26
黏聚力/kPa	天然	37
	饱和	35
内摩擦角/(°)	天然	44.5
	饱和	43

根据危岩体稳定性系数计算结果, 按照《滑坡防治工程勘查规范》^[22]中危岩体稳定程度等级划分表(表 4), 评价三种工况下各危岩体的稳定性见表 5。

表 4 稳定状态分级
Table 4 Stability classification

稳定性系数(F_s)	$F_s < 1.00$	$1.00 \leq F_s < 1.3$	$1.3 \leq F_s < 1.5$	$F_s \geq 1.5$
稳定状态	不稳定	欠稳定	基本稳定	稳定

表 5 稳定性计算结果统计表
Table 5 Statistical table of stability calculation results

危岩体编号	工况1(天然状态)		工况2(持续暴雨)		工况3(地震)		破坏模式
	稳定系数	状态	稳定系数	状态	稳定系数	状态	
W1	1.17	欠稳定	0.98	不稳定	0.83	不稳定	倾倒式
W2	1.02	欠稳定	0.82	不稳定	0.72	不稳定	倾倒式
W3	1.10	欠稳定	0.87	不稳定	0.86	不稳定	倾倒式

研究区崩塌危岩体 W1、W2、W3 主要受结构面切割影响, 通过稳定性计算, 危岩体 W1、W2、W3 在天然条件下为欠稳定状态, 暴雨条件下为不稳定状态, 地震条件下为不稳定状态。

4 治理措施建议

4.1 既有治理工程

研究区崩塌坡面未进行任何处理, 仅坡脚人工修建 3 道干砌挡墙, 高约 1.5 m, 顶宽 0.5 m, 墙后覆土种植农作物。

4.2 治理工程措施

根据现场勘查情况及崩塌治理思路, 对研究区崩塌区提出治理方案。对崩塌危岩体进行清理, 清理后布设主动防护网, 坡脚布设被动防护网治理方式进行治理。

4.2.1 清理危岩

清理范围包括对陡崖表面危岩(W1 ~ W3 等)及斜

坡体上孤石、浮石的清理, 其中清理厚度根据实际裂隙切割情况将松动岩块进行清除, 初步确定厚度为 0.5 m, 局部可根据现场实际情况适当增加或减少。危岩清除设计总体积为 460.2 m³。清理危岩过程中应对坡脚处房屋进行保护, 设置防护围栏, 防止掉落块石对房屋造成损坏。

4.2.2 主动防护网

清理危岩后, 崩塌虽整体处于稳定状态, 但岩体表面由于节理裂隙发育, 受风化、雨水冲刷、根劈等不良作用下, 极易形成新的危岩, 故治理方案采用柔性防护网 GPS2 防护, 防护面积为 1 695.7 m²。

防护网采用纵横交错的 $\phi 16$ 横向支撑绳和 $\phi 12$ 纵向支撑绳与 4.5 m×4.5 m 正方形模式(边沿局部根据需要有时为 4.5 m×2.5 m)布置的锚杆相连接并进行预张拉。支撑绳构成的每个 4.5 m×4.5 m(或 4.5 m×2.5 m)网格内铺设一张 D0/08/300/4 m×4 m(或 4 m×2 m)型钢绳

网。防护网锚杆孔径不小于 $\phi 50$, 上沿钢绳锚杆一般孔深 250 cm, 中部及下沿钢绳锚杆一般孔深 200 cm。

4.2.3 被动防护网

被动防护网布置于坡体中下部平缓位置, 拦截坡体危岩带区域的崩落危岩。治理区被动防护网型号采用 RX-050 型号, 网高 3 m, 延伸长 151.0 m, 防护网面积 435.0 m²。

4.3 治理效果

本治理工程于 2016 年全面完工。工程建设完成后, 至今研究区未有崩塌现象发生, 边坡整体稳定。充分验证了以清理危岩为基础, “主动+被动防护网”的综合工程治理方案是可行的。治理工程保护了大地村百余户居民的生命财产安全, 避免数千万元的潜在经济损失, 减灾效益巨大, 为当地群众创造了安定的生产和生活条件。

5 结论

(1) 采用赤平投影法对研究区崩塌危岩带整体稳定性分析, 崩塌灾害隐患点所在斜坡危岩带基本处于不稳定状态; 与实地调查情况一致。

(2) 针对不同工况条件, 运用极限平衡法对单体危岩崩塌进行了定量评价。评价结果表明: 研究区崩塌危岩体 W1、W2、W3 主要受结构面切割影响, 在天然状态工况条件下, 均处于欠稳定状态; 在暴雨条件和地震条件下, 均处于不稳定状态。

(3) 提出的以清理危岩为基础, “主动+被动防护网”的综合工程治理措施在北京地区是可行的。

参考文献 (References) :

- [1] 刘德成. 北京市朝阳区地质灾害危险性区划研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2015. [LIU Decheng. Study on geological hazard zoning of Chaoyang District, Beijing [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2015. (in Chinese with English abstract)]
- [2] POWELL J W. Exploration of the Colorado River of the west and its tributaries[M]. Washington: Government Printing Office, 1875.
- [3] POISELR, EPPENSTEINER W. A contribution to the systematics of rock mass movements [C]//The 5th International Symposium on Landslides, 1988: 1353 - 1357.
- [4] POISEL R, ANGERER H, PÖLLINGER M, et al. Mechanics and velocity of the Lärchberg - Galgenwald landslide (Austria) [J]. Engineering Geology, 2009, 109(1/2): 57 - 66.
- [5] RAINER POISEL, ALEXANDERPREH. Rock fall detachment mechanisms [C]//Interdisciplinary Rockfall Workshop, 2011: 1 - 2.
- [6] TERZAGHI K. Mechanism of landslides [M]. Berkeley: The Geological Society of America, Engineering Geology, 1950.
- [7] DUSSAUGEPEISSER C, HELMSTETTER A, GRASSO J, et al. Probabilistic approach to rock fall hazard assessment: potential of historical data analysis [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2002, 2: 15 - 26.
- [8] NICHOL S L, HUNGR O, EVANS S G. Large-scale brittle and ductile toppling of rock slopes [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2002, 39(4): 773 - 788.
- [9] GLASTONBURY J, FELLR. Report on the analysis of “Rapid” Natural Rock Slope Failures [M]. Sydney Australia: The University of New South Wales, 2000.
- [10] 曾芮, 姜明顺, 孙琳旭, 等. 强降雨条件下岩质边坡倾覆崩塌破坏机理——以鄂西赵家岩崩塌为例 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2018, 29(3): 12 - 17. [ZENG Rui, JIANG Mingshun, SUN Linkui, et al. Toppling failure mechanism of rock slope induced by heavy rainfall: a case study of the Zhaojiayan Rockfall in Western Hubei [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2018, 29(3): 12 - 17. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 肖锐铨, 陈红旗, 冷洋洋, 等. 贵州纳雍“8·28”崩塌破坏过程与变形破坏机理初探 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2018, 29(1): 3 - 9. [XIAO Ruihua, CHEN Hongqi, LENG Yangyang, et al. Preliminary study on the collapse process and deformation failure mechanism of “8.28” in Nayong, Guizhou [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2018, 29(1): 3 - 9. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 王章琼, 晏鄂川, 刘骏, 等. 湖北鹤峰红莲池铁矿反倾岩坡崩塌破坏特征及形成机理分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2016, 27(3): 7 - 13. [WANG Zhangqiong, YAN E chuan, LIU Jun, et al. Characteristics and mechanism of the rockfall at Honglianchi iron mine in Hefeng, Hubei Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2016, 27(3): 7 - 13. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 董秀军, 裴向军, 黄润秋. 贵州凯里龙场镇山体崩塌基本特征与成因分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2015, 26(3): 3 - 9. [DONG Xiujun, PEI Xiangjun, HUANG Runqiu. The Longchangzhen collapse in Kaili, Guizhou: characteristics and failure causes [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2015, 26(3): 3 - 9. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 贺凯, 陈春利, 冯振, 等. 塔柱状岩体崩塌灾害研究现状 [J]. 地质力学学报, 2016, 22(3): 714 - 724. [HE Kai, CHEN Chunli, FENG Zhen, et al. A review on the collapse hazards of

- tower-shaped rock [J] . *Journal of Geomechanics*, 2016, 22(3): 714 - 724. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 岳发政, 郭金城, 汪娟, 等. GB-InSAR技术在山体崩塌残余危岩体监测中的应用 [J] . 中国地质灾害与防治学报, 2018, 29(5): 78 - 80. [YUE Fazheng, GUO Jincheng, WANG Juan, et al. Application of GB-InSAR technology in monitoring of residual dangerous rock mass in mountain collapse [J] . *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2018, 29(5): 78 - 80. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 袁志辉, 陈志新, 倪万魁, 等. 倾倒式岩质崩塌运动过程数值模拟分析 [J] . 中国地质灾害与防治学报, 2014, 25(2): 26 - 31. [YUAN Zhihui, CHEN Zhixin, NI Wankui, et al. Numerical analysis of the movement process of toppling fall [J] . *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2014, 25(2): 26 - 31. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 黄刚, 郑达. 贵州开阳磷矿山体崩塌形成机理与数值模拟 [J] . 中国地质灾害与防治学报, 2013, 24(1): 46 - 50. [HUANG Gang, ZHENG Da. Research on formation mechanism and numerical simulation of rockfall in Kaiyang phosphorite, Guizhou Province [J] . *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2013, 24(1): 46 - 50. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 马保成, 范丽晓, 田伟平. 黄土地区公路崩塌危险性简易快速评价方法探讨 [J] . 中国地质灾害与防治学报, 2014, 25(2): 19 - 25. [MA Baocheng, FAN Lixiao, TIAN Weiping. Study on quick and easy hazard evaluation method for highway slope collapse in loess area [J] . *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2014, 25(2): 19 - 25. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 工程岩体分级标准: GB/T 50218—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015. [Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for engineering classification of rock mass: GB/T 50218 —2014[S]. Beijing: China Planning Press, 2015. (in Chinese)]
- [20] 武中鹏, 刘宏, 董秀群, 等. 单体危岩崩塌灾害危险性评价——以贵州威宁县新发乡樊家岩为例 [J] . 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(2): 30 - 34. [WU Zhongpeng, LIU Hong, DONG Xiuqun, et al. Risk assessment of single dangerous rock collapse disaster: Taking fanjiayan, Xinfatownship, Weining County, Guizhou Province as an example [J] . *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2019, 30(2): 30 - 34. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 彭宁波, 孙博, 王逢睿, 等. 危岩体在地震作用过程中的失稳模式及稳定性评价 [J] . 地震工程学报, 2016, 38(6): 916 - 921. [PENG Ningbo, SUN Bo, WANG Fengrui, et al. Failure mode and stability evaluation of unstable rock during earthquakes [J] . *Northwestern Seismological Journal*, 2016, 38(6): 916 - 921. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 中华人民共和国国土资源部. 滑坡防治工程勘查规范: DZ/T 0218—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006. [Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. Specification of geological investigation for landslide stabilization: DZ/T 0218—2006[S]. Beijing: Standards Press of China, 2006. (in Chinese)]