

## 广州地区岩质边坡崩塌影响范围计算方法初探

曾启强, 王立朝, 刘伟, 张庆华, 陈凌伟, 楼康明, 刘羊, 樊亚男

### Calculation methods of the collapse influence range of a simple rock slope in the Guangzhou area

ZENG Qiqiang, WANG Lichao, LIU Wei, ZHANG Qinghua, CHEN Lingwei, LOU Kangming, LIU Yang, and FAN Yanan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202208053>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 基于岩体损伤的大型高陡危岩稳定性评价方法

Stability assessment methods for huge high-steep unstable rock mass based on damage theory

贺凯, 高杨, 殷跃平, 李滨 水文地质工程地质. 2020, 47(4): 82-89

#### 岩体结构对岩质滑坡运动过程和堆积特征的影响研究

A Study of the influence of rock mass structure on the propagation processes and deposit characteristics of rockslides

张恩铭, 程谦恭, 林棋文, 谢宇, 王玉峰, 姚志勇, 孙先锋 水文地质工程地质. 2022, 49(3): 125-135

#### 新疆塔县地区片麻岩冻融劣化机理与规律试验研究

Research on mechanism of freezing-thawing deterioration of gneisses in the Taxian area of Xinjiang

吕文韬, 杨龙, 魏云杰, 张明 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 95-95

#### 岩质边坡复合型破坏机制的改进运动单元法研究

Investigation on combined failure mechanism of rock slope based on the improved kinematical element method

张科, 侯杰 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 95-101

#### 落石法向恢复系数的多因素联合影响研究

Research on the joint influence of multiple factors on the normal coefficient of restitution of rockfall

姬中民, 张晟, 伍法权, 牛庆合, 王可意 水文地质工程地质. 2022, 49(2): 164-173

#### 基于黏聚力裂缝模型的反倾层状岩质边坡倾倒破坏模拟

A numerical study of the toppling failure of an anti-dip layered rock slope based on a cohesive crack model

马文著, 徐衍, 李晓雷, 陈敏 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 150-160



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202208053

曾启强, 王立朝, 刘伟, 等. 广州地区岩质边坡崩塌影响范围计算方法初探 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(5): 159-168.  
ZENG Qiqiang, WANG Lichao, LIU Wei, et al. Calculation methods of the collapse influence range of a simple rock slope in the Guangzhou area[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(5): 159-168.

## 广州地区岩质边坡崩塌影响范围计算方法初探

曾启强<sup>1</sup>, 王立朝<sup>2</sup>, 刘伟<sup>1</sup>, 张庆华<sup>1</sup>, 陈凌伟<sup>1</sup>, 楼康明<sup>1</sup>, 刘羊<sup>1</sup>, 樊亚男<sup>1</sup>

(1. 广州市城市规划勘测设计研究院, 广东 广州 510030;

2. 中国地质环境监测院(自然资源部地质灾害技术指导中心), 北京 100081)

**摘要:** 边坡危岩体产生的岩质崩塌灾害突发性强、破坏能力强, 是一种危害极大的地质灾害。防治边坡危岩体的关键在于划定危岩体的影响范围, 准确评估边坡危岩体影响范围, 提升边坡危岩体灾害防治能力, 降低崩塌威胁, 目前亟需完善边坡危岩体影响范围的计算模型。依据广州市危岩体调查成果归纳出常见边坡危岩体的类型和坡形特征, 分类建立危岩体影响范围物理几何模型, 综合考虑坡面摩擦力、块体碰撞、弹跳、碎裂、接触面覆盖物性质和恢复系数、地形条件、地震等崩塌运动过程的主要影响因素, 通过概化运动过程要素建立起直线型、曲线型边坡在不同坡度条件下崩塌影响范围的计算模型, 并根据地震力对崩塌体动能的影响求得地震工况下崩塌影响范围的扩大系数。该模型在前人研究基础上进一步归纳出坡形分类形成几何模型, 依据运动过程推求出常见工况不同地形条件下边坡危岩体最大影响范围的计算模型, 获取坡高、坡度和地表特征后可依据该模型计算得出危岩体影响范围。通过实际案例验证比对, 计算结果相对误差较小, 且能预留一定的安全距离, 可用于常见坡形边坡危岩体影响范围评价, 为边坡危岩体防治提供依据。

**关键词:** 岩质崩塌; 运动距离; 影响范围; 恢复系数

中图分类号: P642.21

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2023)05-0159-10

## Calculation methods of the collapse influence range of a simple rock slope in the Guangzhou area

ZENG Qiqiang<sup>1</sup>, WANG Lichao<sup>2</sup>, LIU Wei<sup>1</sup>, ZHANG Qinghua<sup>1</sup>, CHEN Lingwei<sup>1</sup>, LOU Kangming<sup>1</sup>,

LIU Yang<sup>1</sup>, FAN Yanan<sup>1</sup>

(1. Guangzhou Urban Planning Survey and Design Institute, Guangzhou, Guangdong 510030, China;

2. China Institute of Geo-Environment Monitoring (Guide Center of Prevention Technology for Geo-Hazard, MNR), Beijing 100081, China)

**Abstract:** The rock collapse disaster caused by the dangerous rock mass of slope is a geological disaster with strong sudden occurrence and destructive ability. The key to prevent and control the dangerous rock mass of slope is to delineate the influence range of the dangerous rock mass. In order to accurately assess the influence range of

收稿日期: 2022-08-19; 修订日期: 2023-02-23

投稿网址: [www.swdzcgdz.com](http://www.swdzcgdz.com)

基金项目: 广东省重点领域研发计划项目(2020B0101130009); 广东省自然资源厅科技项目(GDZRZYKJ2023004); 广东省城市感知与监测预警企业重点实验室基金项目(2020B121202019); 广州市城市规划勘测设计研究院科技基金项目(RDI2210204140; RDI2210204146)

第一作者: 曾启强(1995-), 男, 硕士, 助理工程师, 从事地质灾害调查评价与岩土工程勘察工作。E-mail: [zengqiqiang@live.com](mailto:zengqiqiang@live.com)

通讯作者: 王立朝(1972-), 男, 博士, 教授级高级工程师, 从事地质灾害调查评价与地质灾害形成机理与防治研究。

E-mail: [wanglichao@mail.cgs.gov.cn](mailto:wanglichao@mail.cgs.gov.cn)

the dangerous rock mass of slope, improve the disaster prevention ability of the dangerous rock mass of slope and reduce the collapse threat, it is urgent to improve the calculation model of the influence range of the dangerous rock mass of slope. Based on the survey results of dangerous rock mass in Guangzhou, the types and slope shape characteristics of common dangerous rock mass in slope are summarized, and the physical and geometric model of the influence range of dangerous rock mass is established. The main factors affecting the collapse movement process, such as slope friction, block collision, bounce, fragmentation, properties of contact surface covering and coefficient of restitution, terrain conditions and earthquake, are comprehensively considered. The calculation model of collapse influence range of linear and curved slope under different slope conditions is established by generalized motion process elements, and the expansion coefficient of collapse influence range under earthquake conditions is obtained according to the influence of earthquake force on the kinetic energy of collapse body. On the basis of previous studies, this model further summarizes the geometric model of slope shape classification and formation, and calculates the calculation model of the maximum influence range of dangerous rock mass under common working conditions and different terrain conditions according to the movement process. After obtaining the slope height, slope and surface characteristics, the influence range of dangerous rock mass can be calculated according to this model. Through the verification and comparison of actual cases, the relative error of calculation results is small, and a certain safety distance can be reserved, which can be used for the evaluation of the influence range of dangerous rock mass in common slope, and provide a basis for the prevention and control of dangerous rock mass in slope.

**Keywords:** rock collapse; movement distance; scope of influence; coefficient of restitution

崩塌落石作为最常见的地质灾害分布广泛。随着人类工程活动的不断扩展,山地丘陵地区的建设开发越来越强烈,开挖与削坡活动十分频繁,产生了大量的人工边坡,崩塌落石灾害、隐患的数量大幅增长。

早期针对崩塌灾害的研究主要集中于崩塌落石的机理和稳定性研究,胡厚田<sup>[1]</sup>对崩塌落石的分类、破坏模式、稳定性计算方法进行了较为系统的研究,为崩塌研究提供了完整的思路。刘传正<sup>[2]</sup>收集了国内 160 个崩塌滑坡案例并对崩塌的成因进行分类。进入 21 世纪以来,随着对崩塌灾害防治要求的提升,对崩塌运动过程和影响范围的研究也有所增加。亚南等<sup>[3]</sup>采用缩小的物理模型和数值模型对猴子岭崩塌落石的运动特征进行模拟,并提出崩塌防护设计建议。肖智勇<sup>[4]</sup>采用 RocFall 模拟计算单个坡体的滚石冲击能量和速度,并通过滚石冲击能量确定落石的危害区域。廖俊展<sup>[5]</sup>尝试采用基于运动学的数值公式对崩塌落石的影响范围进行计算,并总结出滚动及滑动状态下理想落石的动能计算方式。王伟才<sup>[6]</sup>通过简化运动过程求得崩塌落石运动轨迹的计算式,并得出理想化的威胁区域推求公式。李娟等<sup>[7]</sup>采用崩塌滚石冲击耗能损伤理论模型计算地震中防护工程对崩塌滚石冲击耗能作用,还原滚石的冲击耗能过程。以崩塌落石运动过程中的能量分析计算崩塌落石影响范围,取得

了较好的成效。

崩塌落石的运动过程总是伴随着碰撞和摩擦,碰撞会带来巨大的能量损耗,研究碰撞对能量的影响是落石运动过程分析的一个重点。Wang 等<sup>[8]</sup>利用 LS-DYNA 软件对落石撞击时的冲击力和穿透深度进行研究,得到冲击力和穿透深度的值。王林峰等<sup>[9]</sup>应用落石棚洞试验对落石在不同重量、角度、高度下的冲击力进行试验分析,并给出落石冲击力的拟合计算公式。吴建利等<sup>[10]</sup>采用落石冲击试验,研究落石撞击混凝土后冲击力衰减情况以及混凝土的变形破坏特征,给出撞击后冲击力的衰减函数。Zhu 等<sup>[11]</sup>认为砾石垫被广泛用于吸收落石冲击能量,能量消耗和缓冲效果受砾石垫厚度等的影响。Zhang 等<sup>[12]</sup>利用粒子流方法对碰撞中的落石进行三维建模,引入落石碰撞的恢复系数描述其冲击特性。Caviezel 等<sup>[13]</sup>等采用“Chant Sura”试验重建落石轨迹,对冲击持续时间和力进行了深入分析。Azzoni 等<sup>[14]</sup>对比已有滚石冲击力算法,提出最大脉冲算法、弹塑性算法、LS-DYNA 算法,并验证了其适用性,由此得出强震触发的崩塌滚石的运动特征、消能方式与地震烈度、滚石规模、坡面形态等因素相关。对落石碰撞过程的研究为确定落石碰撞中的能量损耗比例奠定了基础。

随着计算机技术的发展,数值模拟也逐渐成为岩

土工程领域的重要研究手段。目前针对落石和崩塌常见的数值模拟软件有 RAMMS、PFC、Rocfall、UDEC 等方法<sup>[15]</sup>。RAMMS 常用于大范围的斜坡落石滚动过程分析, 其应用基础为数字高程模型, 不适用于小型高陡边坡的落石研究<sup>[16]</sup>。PFC 偏向于颗粒流运动过程的机理研究, 因建模复杂, 难以应用于实际中的小型边坡评价<sup>[17]</sup>。UDEC 则适用于模拟岩体结构、破坏过程、应力分析等, 由于建模网格主要为尖锐的块体, 无法模拟塑性变形, 对块石的运动过程模拟效果较差<sup>[18]</sup>。Rocfall 主要针对较简单的边坡进行弹跳过程模拟, 适用于简单边坡, 可大致给出坡面块石弹跳距离; 在实际中的应用也较广泛, 由于将岩块视为刚体, 算出的运动距离往往偏大<sup>[19]</sup>。

通过模型试验、运动过程物理模型分析、数值模拟等多种方式的研究, 取得了崩塌落石的运动模式、影响因素和碰撞能量损耗计算参数等重要成果。但由于缺少与实际情况的衔接, 无法根据岩体、坡面特性、坡形得出普适性的计算模型。本次研究, 在总结广州市岩质边坡危岩体发育特征基础上, 探究不同坡形在不同工况条件下危岩体影响范围的计算方法。

## 1 广州市岩质边坡发育特征

广州市位于华南地区, 市域地形北高南低, 北部和东部山地丘陵众多, 随着城市建设外拓产生了大量人工开挖岩质边坡<sup>[20]</sup>。此外, 广州市气候温暖潮湿, 汛期大暴雨、特大暴雨多发频发, 具有雨强大、范围广、累积雨量大、强降水时空分布集中、持续时间长等特点, 为崩塌落石灾害提供了有利气象条件, 增大了崩塌灾害风险。2018 年 6 月, 广州市黄埔区保利林语山庄孤石滚落事件, 涉及 81 户 350 多名居民<sup>[21]</sup>。

危岩体调查结果显示, 广州市城区共有潜在崩塌风险的岩质陡坡 732 处, 主要分布于黄埔区、天河区、白云区和南沙区, 规模上以小型崩塌为主。边坡成因上, 自然边坡仅有 76 处, 占比为 10.38%; 人工边坡 656 处, 占比为 89.62%。人工边坡中采石边坡 445 处, 占总数的 60.80%; 居民削坡建房、道路建设、非居民削坡建设数量分别为 39, 64, 108 处, 占比分别为 5.33%, 8.74%, 14.75%, 共计 28.82%。

总体上广州市内边坡危岩体具有以下特征:

(1) 类型上看, 人工边坡数量远大于自然陡坡, 是为采石、工程、道路和房建削坡开挖形成的边坡。

(2) 采石边坡坡高多在 10 ~ 80 m 之间, 坡度较陡, 常见直立边坡, 坡面形状较为规则, 多为直线型坡, 也

可见阶梯形坡、凹面或凸面坡。坡面多数裸露, 坡面较破碎, 除构造形成的结构面外, 坡面还常见爆破、风化、卸荷导致的各类节理面, 致使坡面存在大量的局部小型危岩体, 多具有显著的崩塌落石风险(图 1)。



图 1 广州市南沙区大井天山石场边坡

Fig. 1 Slope of the Dajing Tianshan Stone Farm in Nansha District of Guangzhou

(3) 道路、房屋和其它建设活动削坡坡高多在 3 ~ 30 m 之间, 坡度 50°~90°不等, 坡形多为直线型, 岩体完整性较采石边坡好, 风化程度往往较高, 部分采取了挡墙或喷锚等防治措施进行防治。由于此类边坡往往紧邻人类活动区域, 虽然规模较小, 但威胁最为显著(图 2)。



图 2 广州市南沙区芦湾上街 63 号后侧边坡

Fig. 2 Side slope behind No.63 Luwan Street in Nansha District of Guangzhou

(4) 存在崩塌隐患的自然岩质斜坡多为高陡的砂岩或砾岩斜坡, 经历了漫长的地质演化历程, 地质构造较稳定, 块体较为完整, 结构面发育较少, 整体上稳定性较好, 在地质演化过程中部分边坡可能产生大块孤石或结构面切割的不稳定块体, 在广州常见于大岗山、莲花山等地区(图 3)。



图 3 广州市南沙区大岗镇砂岩质陡坡  
Fig. 3 Sandstone steep slope near Dagang Town in Nansha District of Guangzhou

由此可见,广州市内存在威胁的边坡危岩体既存在于人工开挖边坡,也存在于自然边坡。人工开挖边坡主要表现为直线型和阶梯形;自然陡坡主要为凸面型或直线型,但也存在少量坡形较为复杂的坡体。根据调查结果可以将广州市内主要岩质陡坡坡形简化分类为直线型、阶梯形和凸面型。

## 2 岩质崩塌影响范围计算式推导

为适应大范围岩质陡坡危岩体调查的需求,对常见坡形条件下落石运动过程进行还原,并依据运动过程物理力学运算,求取不同条件下崩塌落石的影响范围。

### 2.1 直线型边坡

采用以下方式对崩塌块体运动过程进行简化处理:

1) 假设坡面和坡脚威胁区为平面。

2) 崩塌块体通常位于陡坡之上,岩块在陡坡上的运动方式通常为滚动与碰撞交替进行,整个过程的阻力等效边坡滚动摩擦系数<sup>[22]</sup>。边坡摩擦系数取值参考《崩塌防治工程勘查规范》(TCAGHP011—2018)<sup>[23]</sup>(表 1)。

表 1 常见坡面岩块滚动摩擦系数

坡面特征	滚动摩擦系数
光滑岩面、混凝土表面	0.30 ~ 0.60
软岩面、强风化硬岩面	0.40 ~ 0.60
块石堆积坡面	0.55 ~ 0.70
密实碎石堆积坡面、硬土坡面、(植被灌木丛)发育	0.55 ~ 0.85
密实碎石堆积坡面、硬土坡面、植被不发育或少量杂草	0.50 ~ 0.75
松散碎石坡面、软土坡面、植被(灌木丛为主)发育	0.50 ~ 0.85
软土坡面、植被不发育或少量杂草	0.50 ~ 0.85

3) 块体在坡脚发生碰撞并反弹,采用法向及切向恢复系数对块体反弹速率进行计算<sup>[24]</sup>。

4) 岩块抵达坡脚后产生弹跳,由于碰撞过程岩块

法向动能呈现指数型衰减,第 3 次及之后的弹跳幅度很小,视作滚动进行处理。

根据上述假设概化块体运动过程为 5 个阶段:下落阶段、第一次弹跳阶段、第二次弹跳阶段、滑动阶段、潜在运动距离,分别对不同阶段的运动过程进行分析,如图 4 所示。

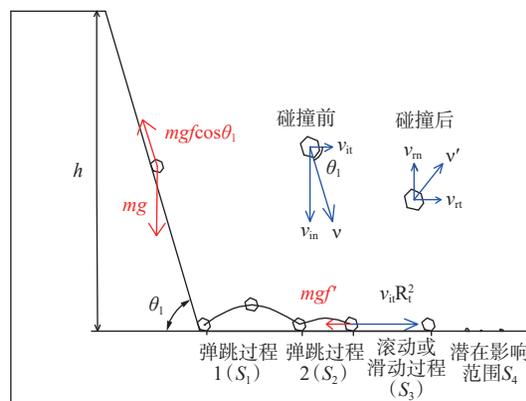


图 4 直线型边坡崩塌块体运动过程概化图  
Fig. 4 Schematic diagram of motion process of a collapse block in the linear slope

下落阶段:块体重力势能转化为动能,运动过程受斜坡等效摩擦阻力作用。

$$E_0 = mgh \quad (1)$$

式中:  $E_0$ ——初始势能/J;

$h$ ——坡高/m;

$m$ ——块体质量/kg;

$g$ ——重力加速度/( $m \cdot s^{-2}$ )。

采用等效摩擦系数计算摩擦力所做的功,计算式如下所示:

$$w = mg \cos \theta_1 \frac{h}{\sin \theta_1} f = mgh f \cot \theta_1 \quad (2)$$

式中:  $w$ ——下落阶段合力做功/J;

$\theta_1$ ——边坡坡度/( $^\circ$ );

$f$ ——坡面摩擦系数。

则块体到达坡底时所具有的动能为:

$$E_1 = mgh - mgh f \cot \theta_1 \quad (3)$$

式中:  $E_1$ ——块体到达坡脚动能/J。

由此得块体到达坡脚时的切向速率为  $v_{it}$ , 法向速率为  $v_{in}$ :

$$v_{it} = \sqrt{2gh(1 - f \cot \theta_1)} \cos \theta_1 \quad (4)$$

$$v_{in} = \sqrt{2gh(1 - f \cot \theta_1)} \sin \theta_1 \quad (5)$$

式中:  $v_{it}$ ——块体到达坡脚切向速率/( $m \cdot s^{-1}$ );

$v_{in}$ ——块体到达坡脚法向速率/( $m \cdot s^{-1}$ )。

由于斜坡底部威胁区域为人类活动区域, 人类活动区地形相对较为平缓, 与斜坡往往能形成显著的地形夹角, 崩塌体运动至地形突变区域会导致崩塌体运动方向的剧变, 同时剧烈碰撞也会导致较大的能量损耗, 在国内外的研究中主要采用恢复系数来考虑碰撞过程中的能量损失<sup>[25]</sup>, 常用法向恢复系数( $R_n$ )和切向恢复系数( $R_t$ )分别计算碰撞后的法向速率及切向速率:

$$v_m = R_n v_{in} \quad (6)$$

$$v_{it} = R_t v_{it} \quad (7)$$

式中:  $v_m$ ——块体到达坡脚切向速率/( $m \cdot s^{-1}$ );

$v_{it}$ ——块体到达坡脚法向速率/( $m \cdot s^{-1}$ );

$R_n$ ——法向速度恢复系数;

$R_t$ ——切向速度恢复系数。

恢复系数主要与岩体岩块坚硬程度、地表坚硬程度相关, 块体越接近刚体恢复系数也越大, 吕庆等<sup>[21]</sup>研究表明: 滚石碰撞的法向恢复系数在 0.2~0.5 之间, 切向恢复系数在 0.4~0.9 之间。一般边坡坡面有基岩出露时取大值, 坡面为没有植被覆盖或有少量植被覆盖的砾岩或硬土时取中间值, 坡面为松散残积土或黏土时取小值<sup>[26]</sup>。表 2 为崩塌防治工程勘察规范推荐的法向和切向恢复系数的取值<sup>[27]</sup>, 表 3 为铁道部运输局推荐的法向和切向恢复系数的取值<sup>[21]</sup>。

表 2 崩塌防治工程勘察规范推荐岩块恢复系数

Table 2 Block springback coefficient recommended by the investigation code of collapse prevention engineering

碰撞系数	地面岩性				
	硬岩	软岩	硬土	普通土	松土
$R_n$	0.4	0.35	0.30	0.26	0.22
$R_t$	0.86	0.84	0.81	0.75	0.65

表 3 铁道部运输局推荐岩块恢复系数

Table 3 Rock springback coefficient recommended by the Transportation Bureau of the Ministry of Railways

坡面特征	$R_n$
光滑而坚硬的表面和铺砌面, 如人行道或光滑的基岩面	0.37~0.42
多数为基岩和砾岩区的斜坡	0.33~0.37
硬土边坡	0.30~0.33
软土边坡	0.28~0.30
坡面特征	$R_t$
光滑而坚硬的表面和铺砌面, 如人行道或光滑的基岩面	0.87~0.92
多数为基岩和无植被覆盖的斜坡	0.83~0.87
多数为有少量植被的斜坡	0.82~0.85
植被覆盖的斜坡和有稀少植被覆盖的土质边坡	0.80~0.83
灌木林覆盖的土质边坡	0.78~0.82

两者给出的参数大同小异, 其中铁道部运输局更侧重于坡面覆盖物性质的差异, 而崩塌防治工程勘察规范更侧重于岩质的差异<sup>[21]</sup>, 在实际应用中可根据实际情况进行合理的选用。

当坡脚地面坡度不同时块体的到达坡脚的运动过程也有较大差别, 对地面不同坡度条件分别讨论。

### 2.1.1 地面水平

将坡脚的运动过程分 3 段进行计算。

第一次弹跳过程:

$$t_1 = \frac{2v_m}{g} \quad (8)$$

$$S_1 = v_{it} t_1 = v_{it} R_t \frac{2v_{in}}{g} R_n \quad (9)$$

$$H_1 = \frac{1}{2} g \left( \frac{t_1}{2} \right)^2 = h R_n^2 (1 - f \cot \theta_1) \sin^2 \theta_1 \quad (10)$$

式中:  $t_1$ ——块体第一段弹跳时间/s;

$S_1$ ——块体第一段弹跳距离/m;

$H_1$ ——块体第一段弹跳高度/m。

第二次弹跳过程:

$$t_2 = \frac{2v_{in} R_n^2}{g} \quad (11)$$

$$S_2 = v_{it} R_t^2 t_2 = v_{it} R_t^2 \frac{2v_{in} R_n^2}{g} \quad (12)$$

$$H_2 = \frac{1}{2} g \left( \frac{t_2}{2} \right)^2 = h R_n^4 (1 - f \cot \theta_1) \sin^2 \theta_1 \quad (13)$$

式中:  $t_2$ ——块体第二段弹跳时间/s;

$S_2$ ——块体第二段弹跳距离/m;

$H_2$ ——块体第二段弹跳高度/m。

当块体停止弹跳后, 地表的摩擦力将产生作用直至运动停止, 由此求取摩擦过程时间为:

$$t_3 = \frac{v_{it} R_t^2}{g f'} \quad (14)$$

式中:  $t_3$ ——块体第三段弹跳时间/s

$f'$ ——地面摩擦系数

该段运动距离为:

$$S_3 = \frac{1}{2} g f' t_3^2 = \frac{(v_{it} R_t^2)^2}{2g f'} \quad (15)$$

式中:  $S_3$ ——块体第三段弹跳距离/m。

最终块体运动的总距离计算式(16)。

$$S_0 = v_{it} R_t \frac{2v_{in}}{g} R_n + v_{it} R_t^2 \frac{2v_{in} R_n^2}{g} + \frac{(v_{it} R_t^2)^2}{2g f'} \quad (16)$$

式中:  $S_0$ ——块体地面运动距离/m。

由于碰撞过程中存在块体碰撞碎裂溅射,使部分破碎块体具有超出整体的位移,应视坡高和坡度适当增加安全距离。坡高越大、坡度越陡岩块碰撞就越激烈,产生溅射扩散的能量就越大。因此安全距离主要取决于坡高及坡度,安全距离可取值为 $0.2h\sin\theta_1$ ,影响范围用式(17)计算。

$$S = \frac{h(R_t^2 \cos\theta_1)^2(1 - f\cot\theta_1)}{f'} + 2h\sin 2\theta_1(1 - f\cot\theta_1)(R_n R_t + R_n^2 R_t^2) + 0.2h\sin\theta_1 \quad (17)$$

式中:  $S$ ——块体地面影响范围/m;

$\theta_1$ ——斜坡坡度/ $^\circ$ ;

$h$ ——坡高/m;

$f$ ——坡面摩擦系数;

$f'$ ——地面摩擦系数。

该计算式适用条件: 直线型边坡、坡度 $\theta_1 > 45^\circ$ 。

### 2.1.2 地面向边坡方向倾斜

地面向边坡方向倾斜,倾角为 $\theta_2$ ,块体在坡脚法向速率与切向速率的分解角度变为 $\theta_3$ , $\theta_3 = \theta_1 + \theta_2$ 。运动过程如图5所示,危岩体水平影响范围为:

$$S = \left[ \frac{h(R_t^2 \cos\theta_3)^2(1 - f\cot\theta_1)}{f' + \sin\theta_2} + 2h\sin 2\theta_3(1 - f\cot\theta_3)(R_n R_t + R_n^2 R_t^2) + 0.2h\sin\theta_1 \right] \cos\theta_2 \quad (18)$$

式中:  $S$ ——块体地面影响范围/m;

$\theta_1$ ——斜坡坡度/ $^\circ$ ;

$\theta_2$ ——地面向上倾斜坡度/ $^\circ$ ;

$\theta_3$ ——地面坡度 $\theta_1$ 与斜坡坡度 $\theta_2$ 之和/ $^\circ$ 。

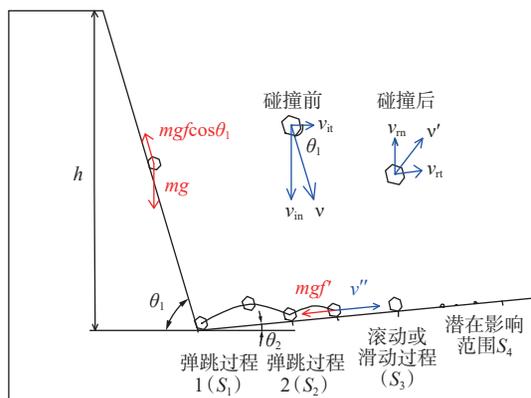


图 5 地面向边坡方向倾斜运动过程概化图

Fig. 5 Schematic diagram of the inclined movement process of the threatened area towards the slope

### 2.1.3 地面向远离斜坡方向倾斜

地面向远离斜坡方向倾斜,倾角为 $\theta_2$ ,块体在坡脚法向速率与切向速率的分解角度为 $\theta_3$ ,其中 $\theta_3 = \theta_1 - \theta_2$ 。运动过程如图6所示,得出危岩体水平影响范围为:

$$S = \left[ \frac{h(R_t^2 \cos\theta_1)^2(1 - f\cot\theta_1)}{f' - \sin\theta_2} + 2h\sin 2\theta_3(1 - f\cot\theta_3)(R_n R_t + R_n^2 R_t^2) + 0.2h\sin\theta_1 \right] \cos\theta_2 \quad (19)$$

式中:  $S$ ——块体地面影响范围/m;

$\theta_1$ ——斜坡坡度/ $^\circ$ ;

$\theta_2$ ——地面向下倾斜坡度/ $^\circ$ ;

$\theta_3$ ——斜坡坡度 $\theta_1$ 与地面坡度 $\theta_2$ 之差/ $^\circ$ 。

当 $f' < \cot\theta_2$ 时,块体将无法停止运动。

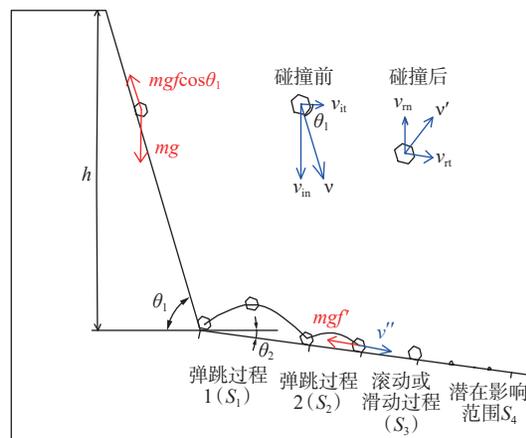


图 6 地面向远离边坡方向倾斜运动过程概化图

Fig. 6 Schematic diagram of the tilted movement process of the threatened area away from the slope

## 2.2 曲线型边坡

由于曲面边坡块体下落轨迹改变,在坡脚出口速度方向与直线型边坡有较大差异。同时由于运动轨迹变长,摩擦力做功也有所增加。由于坡形相对复杂,坡长不再用坡高及坡度计算,需通过测量获得,记坡长为 $l$ ,坡脚出口处与威胁区地面夹角(锐角)为 $\theta_1$ 。

分别对威胁区不同地形条件下的运动特征进行分析计算。

### 2.2.1 地面水平

地面水平,倾角 $\theta_2 = 0$ ,边坡危岩运动过程如图7所示,危岩体影响范围计算见式(20)。

$$S = \frac{(R_t^2 \cos\theta_1)^2(h - fl)}{f'} + 2h\sin(2\theta_1)(1 - f\cot\theta_1)(R_n R_t + R_n^2 R_t^2) + 0.2h\sin\theta_1 \quad (20)$$

式中:  $S$ ——块体地面影响范围/m;

$\theta_1$ ——斜坡整体坡度/ $^\circ$ ;

$\theta'_1$ ——坡脚与地面夹角(锐角)/ $^\circ$ ;

$l$ ——斜坡剖面长度/m。

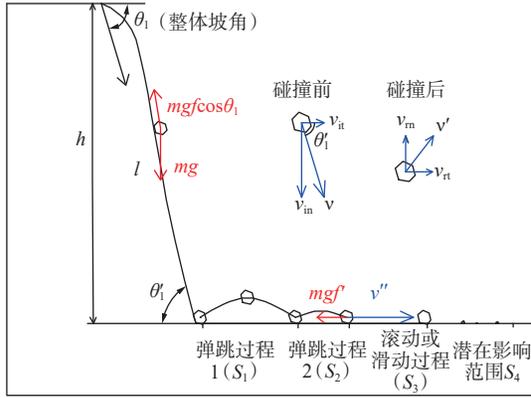


图 7 曲线型边坡运动过程概化图

Fig. 7 Schematic diagram of the curve slope movement process

### 2.2.2 地面向边坡方向倾斜

地面向边坡方向倾斜的边坡, 倾角为  $\theta_2$ , 边坡危岩运动过程如图 8, 危岩体影响范围计算见式(21)。

$$S = \frac{(R_t^2 \cos \theta_1)^2 (h - fl)}{f' + \sin \theta_2} + 2 \sin(2\theta_3)(h - fl)(R_n R_t + R_n^2 R_t^2) + 0.2h \sin \theta_1 \quad (21)$$

式中:  $S$ ——块体地面影响范围/m;

$\theta_1$ ——斜坡整体坡度/ $^\circ$ ;

$\theta'_1$ ——坡脚与地面夹角(锐角)/ $^\circ$ ;

$\theta_2$ ——地面向上倾斜坡度/ $^\circ$ ;

$\theta_3$ ——地面坡度  $\theta_2$  与斜坡坡度  $\theta_1$  之和/ $^\circ$ ;

$l$ ——斜坡剖面长度/m。

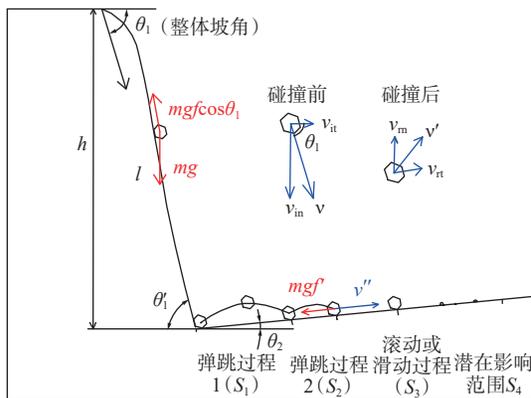


图 8 曲线型边坡地面向边坡方向倾斜运动过程概化图

Fig. 8 Generalized diagram of the sloping motion process of curved slope facing the slope direction

### 2.2.3 地面向远离边坡方向倾斜

地面向远离边坡方向倾斜的边坡, 倾角为  $\theta_2$ , 危岩运动过程如图 9 所示, 危岩体影响范围计算见式(22)。

$$S = \frac{(R_t^2 \cos \theta_1)^2 (h - fl)}{f' - \sin \theta_2} + 2 \sin(2\theta_3)(h - fl)(R_n R_t + R_n^2 R_t^2) + 0.2h \sin \theta_1 \quad (22)$$

式中:  $S$ ——块体地面影响范围/m;

$\theta_1$ ——斜坡整体坡度/ $^\circ$ ;

$\theta'_1$ ——坡脚与地面夹角(锐角)/ $^\circ$ ;

$\theta_2$ ——地面向下倾斜坡度/ $^\circ$ ;

$\theta_3$ ——斜坡坡度  $\theta_1$  与地面坡度  $\theta_2$  之差/ $^\circ$ ;

$l$ ——斜坡剖面长度/m。

同理, 当  $f' < \cot \theta_2$  时, 块体将无法停止运动。

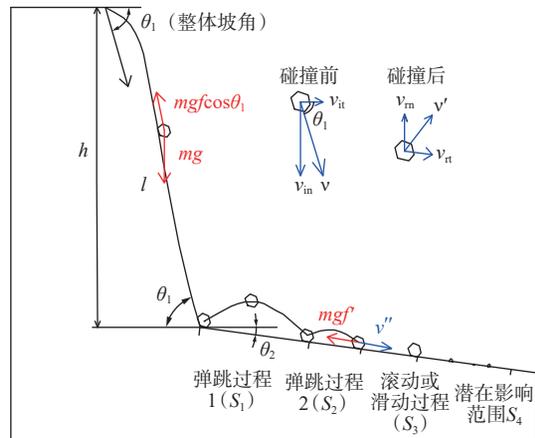


图 9 曲线型边坡地面向远离边坡方向倾斜运动过程概化图

Fig. 9 Generalized diagram of the sloping motion process of the curved slope away from the slope

### 2.3 阶梯形边坡

如果单梯宽段大于 1 m, 则单独计算该梯段的运动距离是否足以超过该梯段; 若单梯宽度小于 1m, 阶梯段众多, 难以采用模型一一计算, 可采取将其视为直线型边坡并大幅提升其摩擦系数的方式来计算该类型边坡的影响范围。

### 2.4 地震工况计算

地震工况下, 地震应力显著增大块体动能, 地震峰值加速度与重力加速度的比值  $e$  可以作为地震对块体运动速率的影响因子, 速率与加速度的关系见式(23)。

$$v = at \quad (23)$$

$$v_e = at + egt = v \left( 1 + \frac{eg}{a} \right) \quad (24)$$

式中： $v$ ——块体运动速度/( $m \cdot s^{-1}$ )；  
 $v_e$ ——地震工况下块体运动速度/( $m \cdot s^{-1}$ )；  
 $a$ ——块体运动加速度/( $m \cdot s^{-2}$ )；  
 $t$ ——块体运动时间/s；  
 $e$ ——当地地震烈度对应地震峰值加速度与重力加速度的比值。

由于摩擦阻力的存在，块体加速度 $a$ 一般小于重力加速度，根据常见值可取 $a$ 为 $0.5g$ ，因地震增加的动能可以用 $(1+2e)^2$ 进行衡量，通过参数 $e_s = (1+2e)^2$ 作为影响范围的扩大系数可以反映地震与崩塌影响范围的关系。广州市抗震设防烈度为7度( $0.10g$ )，计算得出广州市地震工况下崩塌影响范围扩大系数为1.44，广州市地震工况下边坡影响范围的计算式如下：

$$S_e = S(1+2e)^2 = S e_s = 1.44S \quad (25)$$

式中： $S$ ——块体地面影响范围/m；  
 $S_e$ ——地震工况下块体地面影响范围/m；  
 $e_s$ ——地震工况影响范围扩大系数。

通过将边坡崩塌简化为平面二维的直线或较为平缓的曲线，求取边坡危岩体影响范围适用于坡形线性化起伏较小的边坡，对于坡面走向上坡段差异显著的边坡可选取坡高较高且坡度接近 $50^\circ \sim 70^\circ$ 的剖面，也可选取多个剖面计算不同特征坡段的影响范围。该计算式不适用于坡形复杂、坡向上起伏剧烈的边坡。

### 3 计算模型适用性验证

在广州市危岩体调查过程中，共发现6处近期的岩质崩塌案例，其中2处堆积体保存完整，作为验证对比案例。

#### (1)南沙区大角一路北侧边坡

崩塌段边坡坡度为 $85^\circ$ ，崩塌段最高为20 m，岩性为花岗岩，坡面平直，略粗糙，坡面植被稀疏。坡脚地形平坦，植被为草地。崩塌堆积长10 m，宽3 m，平均厚度0.5 m，体积 $15 m^3$ 左右。崩塌距离道路较远并未造成实际危害，边坡概况见图10。该边坡按地形可归类为威胁区地形水平的直线型边坡，适用直线型、坡脚水平边坡计算模型(式16、式17)。经计算该边坡影响范围结果为5.52m，实际堆积范围为3.65m。

#### (2)南沙区进港大道北侧边坡

边坡坡度 $80^\circ$ ，崩塌段最高为7 m，岩性为花岗岩，坡面粗糙，坡面植被稀疏，坡脚为人行道和公路部分，地表平坦。崩塌堆积长约4 m，宽约1.8 m，平均厚度0.3 m，体积约 $2.16 m^3$ 。崩塌堆积体覆盖了人行道，未

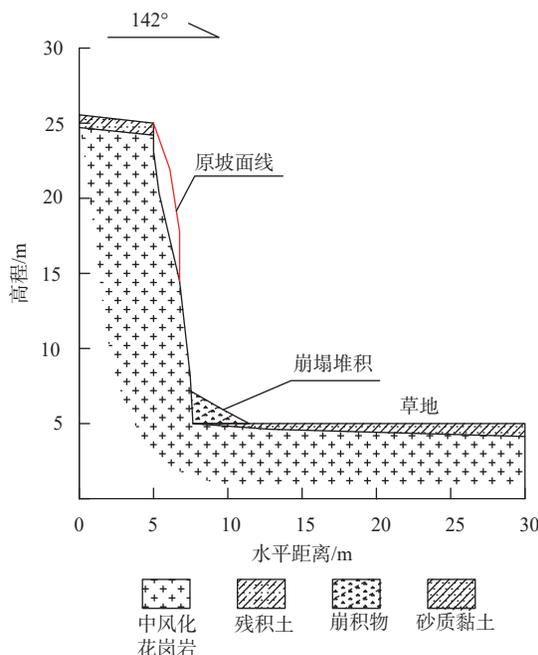


图 10 大角一路北侧边坡剖面图

Fig. 10 The north side slope section of the First Big Horn road

伤及行人，对进港大道交通产生了一定影响，边坡概况见图11。该边坡按地形可归类为威胁区地形水平的直线型边坡，适用直线型、坡脚水平边坡计算模型(式16、式17)。经计算该边坡影响范围结果为3.7 m，实际堆积范围为2.6 m。

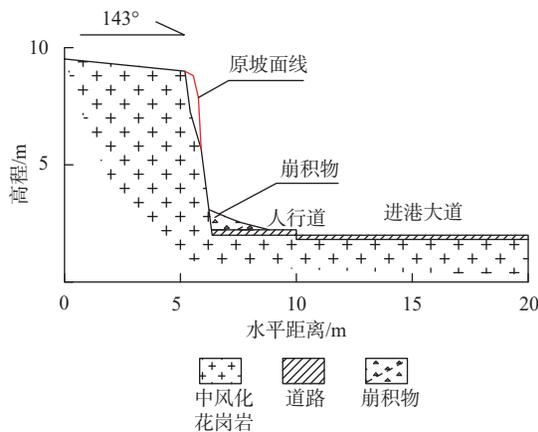


图 11 南沙区进港大道北侧边坡剖面图

Fig. 11 The north side slope section of the Jinggang Avenue in Nansha District

分别采用 RocFall 和计算模型对崩塌体的影响范围进行计算，并根据边坡地质条件选择摩擦系数和恢复系数，计算结果见表4。

模型计算所得影响范围较实际堆积范围稍大，可以在保证安全距离的条件下实现对边坡危岩体影响范围的评估。相对而言，Rocfall 计算软件在恢复系数

表 4 不同计算方法所得影响范围对照表

Table 4 Comparison of the influence range obtained with different calculation methods

边坡名称	南沙区大角一路北侧	南沙进港大道北侧
模型计算运动距离/m	1.54	2.32
模型计算影响范围/m	5.52	3.7
RocFall模型影响范围/m	4.65	8.9
实际崩塌体堆积范围/m	3.65	2.6

较小条件下计算所得的运动距离较符合实际,但在恢复系数较大的情况下计算结果偏大。在应用中会存在风险评估过大、防治成本过高等问题。

#### 4 结论

(1)以广州为代表的我国东南地区人工开挖岩质边坡具有坡高较低、坡度较陡、坡形简单的特征,依据坡形可大致归纳为直线型、曲线型、阶梯形边坡。

(2)以归纳坡形为基础建立物理几何模型,对崩塌落石运动过程进行推算分别得出直线型边坡、曲线型边坡在不同坡度威胁区域条件下的岩质崩塌影响范围计算模型;基于地震峰值加速度与重力加速度的比值,演算得出地震工况下边坡的影响范围计算式。

(3)经实例验证,模型计算所得影响范围与实际情况误差小于 2 m,实际堆积范围处于计算所得运动距离与影响范围之间,相对误差较小。

#### 参考文献 (References) :

- [ 1 ] 胡厚田. 崩塌落石研究 [J]. 铁道工程学报, 2005, 22(增刊1): 387 - 391. [ HU Houtian. Research on the collapse and falling stone[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2005, 22(Sup 1): 387 - 391. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 2 ] 刘传正. 中国崩塌滑坡泥石流灾害成因类型 [J]. 地质评论, 2014, 60(4): 858 - 868. [ LIU Chuazheng. Genetic types of landslide and debris flow disasters in China[J]. Geological Review, 2014, 60(4): 858 - 868. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 3 ] 亚南, 王兰生, 赵其华, 等. 崩塌落石运动学的模拟研究 [J]. 地质灾害与环境保护, 1996, 7(2): 25 - 32. [ YA Nan, WANG Lansheng, ZHAO Qihua, et al. Simulation study of rockfall kinematics[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 1996, 7(2): 25 - 32. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 4 ] 肖智勇. 高陡边坡崩塌危岩体运动轨迹及冲击能量分析 [J]. 路基工程, 2021(2): 187 - 192. [ XIAO Zhiyong. Analysis of movement trajectory and impact

energy of dangerous rock mass in high and steep slope collapse[J]. Subgrade Engineering, 2021(2): 187 - 192. (in Chinese with English abstract) ]

- [ 5 ] 廖俊展. 地质灾害治理设计中崩塌落石的运动特征分析 [J]. 山西建筑, 2021, 47(19): 72 - 75. [ LIAO Junzhan. Analysis on the motion characteristic of rockfall in the designing about geological disaster treatment[J]. Shanxi Architecture, 2021, 47(19): 72 - 75. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 6 ] 王伟才. 崩塌落石运动特征评判及量化分析 [J]. 西部探矿工程, 2021, 33(8): 15 - 18. [ WANG Weicai. Evaluation and quantitative analysis of the characteristics of rockfall movement[J]. West-China Exploration Engineering, 2021, 33(8): 15 - 18. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 7 ] 李娟, 何亮, 荀晓慧. 强震作用下崩塌滚石冲击耗能损伤演化分析 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(2): 157 - 163. [ LI Juan, HE Liang, XUN Xiaohui. An evolution analysis of the impact energy damage of collapsed rolling stones under strong earthquakes[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(2): 157 - 163. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 8 ] WANG Xing, XIA Yongxu, ZHOU Tianyue. Theoretical analysis of rockfall impacts on the soil cushion layer of protective structures[J]. Advances in Civil Engineering, 2018, 2018: 1 - 18.
- [ 9 ] 王林峰, 刘丽, 唐芬, 等. 基于落石棚洞冲击试验的落石冲击力研究 [J]. 防灾减灾工程学报, 2018, 38(6): 973 - 979. [ WANG Linfeng, LIU Li, TANG Fen, et al. Study on impact force of rockfall impact experiment on shed tunnel[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2018, 38(6): 973 - 979. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 10 ] 吴建利, 胡卸文, 梅雪峰, 等. 落石冲击混凝土板与缓冲层组合结构的动力响应 [J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(1): 78 - 87. [ WU Jianli, HU Xiewen, MEI Xuefeng, et al. Dynamic response of RC slab with cushion layer composed of sandy soil to rockfall impact[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(1): 78 - 87. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 11 ] ZHU Chun, WANG Dongsheng, XIA Xing, et al. The effects of gravel cushion particle size and thickness on the coefficient of restitution in rockfall impacts[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2018, 18(6): 1811 - 1823.
- [ 12 ] ZHANG Yulong, LIU Zaobao, SHI Chong, et al. Three-

- dimensional reconstruction of block shape irregularity and its effects on block impacts using an energy-based approach[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2018, 51(4): 1173 – 1191.
- [13] CAVIEZEL A, DEMMEL S E, RINGENBACH A, et al. Reconstruction of four-dimensional rockfall trajectories using remote sensing and rock-based accelerometers and gyroscopes[J]. *Earth Surface Dynamics*, 2019, 7(1): 199 – 210.
- [14] AZZONI A, LA BARBERA G, ZANINETTI A. Analysis and prediction of rockfalls using a mathematical model[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics*, 1995, 32(7): 709 – 724.
- [15] CROSTA G B, AGLIARDI F. A methodology for physically based rockfall hazard assessment[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2003, 3(5): 407 – 422.
- [16] HUNGR O, EVANS S G, BOVIS M J, et al. A review of the classification of landslides of the flow type[J]. *Environmental and Engineering Geoscience*, 2001, 7(3): 221 – 238.
- [17] BOURRIER F, LAMBERT S, BAROTH J. A reliability-based approach for the design of rockfall protection fences[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2015, 48(1): 247 – 259.
- [18] DORREN L, BERGER F. New approaches for 3D rockfall modelling with or without the effect of forest in Rockyfor3D[C]//EGU General Assembly Conference Abstracts. 2010.
- [19] 彭卫平, 刘伟. 广州城市地质研究与城市可持续发展[J]. *城市勘测*, 2005(6): 51 – 53. [ PENG Weiping, LIU Wei. Guangzhou urban geological research and urban sustainable development[J]. *Urban Geotechnical Investigation & Surveying*, 2005(6): 51 – 53. (in Chinese with English abstract) ]
- [20] 曾志林. 广东省广州市黄埔区保利林语山庄会所后山崩塌地质灾害勘察报告[R]. 广州: 广东省有色矿地质灾害防治中心, 2019. [ Zeng Zhilin. Geological disaster investigation report of the collapse of the back mountain of the Baoli Linyu Villa Club in Huangpu District, Guangzhou City, Guangdong Province[R]. Guangzhou: Guangdong non-ferrous mine geological disaster prevention center, 2019. (in Chinese) ]
- [21] 吕庆, 孙红月, 翟三扣, 等. 边坡滚石运动的计算模型[J]. *自然灾害学报*, 2003, 12(2): 79 – 84. [ 吕庆 LÜ Qing, SUN Hongyue, ZHAI Sankou, et al. Evaluation models of rockfall trajectory[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2003, 12(2): 79 – 84. (in Chinese with English abstract) ]
- [22] 韩振华, 陈鑫, 王学良, 等. 四川罗家青杠岭崩塌风险的定量评价研究[J]. *工程地质学报*, 2017, 25(2): 520 – 530. [ HAN Zhenhua, CHEN Xin, WANG Xueliang, et al. Risk assessment for luojiaqinggangling rockfall[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2017, 25(2): 520 – 530. (in Chinese with English abstract) ]
- [23] 中国地质灾害防治工程行业协会. 崩塌防治工程勘查规范: TCAGHP011-2018[S]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2018. [ China Geological Disaster Prevention Engineering Industry Association. Exploration specification for collapse prevention project: TCAGHP011-2018[S]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2018. (in Chinese) ]
- [24] 程强, 苏生瑞. 汶川地震崩塌滚石坡面运动特征[J]. *岩土力学*, 2014, 35(3): 772 – 776. [ CHENG Qiang, SU Shengrui. Movement characteristics of collapsed stones on slopes induced by Wenchuan earthquake[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(3): 772 – 776. (in Chinese with English abstract) ]
- [25] 于帅印. 河南省山地丘陵区地质灾害风险评价[D]. 西安: 长安大学, 2018. [ YU Shuaiyin. Risk assessment of geological disasters in mountainous and hilly areas of Henan Province[D]. Xi'an: Changan University, 2018. (in Chinese with English abstract) ]
- [26] 陆明. 危岩崩塌运动数值模拟及治理措施研究[D]. 南宁: 广西大学, 2017. [ LU Ming. Study on numerical simulation of dangerous rock collapse movement and control measures[D]. Nanning: Guangxi University, 2017. (in Chinese with English abstract) ]
- [27] 王颂, 张路青, 周剑, 等. 青藏铁路设兴村段崩塌特征分析与运动学模拟[J]. *工程地质学报*, 2020, 28(4): 784 – 792. [ WANG Song, ZHANG Luqing, ZHOU Jian, et al. Characteristic analysis and kinematic simulation of rockfall along shexing village section of Qinghai-Tibet railway[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2020, 28(4): 784 – 792. (in Chinese with English abstract) ]

编辑: 王支农