Analysis of Rock Failure Modes of High and Steep Slopes based on non-Contact Measurements - A Case Study of Wadugou Quarry Slopes

Jiang Tao, Cui Shenghua*

State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China
**Corresponding author. Email: cuishenghua18@cdut.edu.cn*

ABSTRACT

The stability of rock slopes is significantly influenced by rock discontinuity structural planes, yet traditional manual measurement methods are often hindered by incomplete data, low efficiency, and the inaccessibility of steep slopes. To address these issues, this study introduces an innovative approach using UAV close photogrammetry combined with an automatic structural surface extraction algorithm, which efficiently captures detailed structural surface information. By conducting multi-angle UAV close photogrammetry on the quarry slope of Wadugou, this paper obtained ultra-high resolution images and constructed a refined 3D model using an image-based 3D point cloud method. Advanced automatic discontinuity dentification techniques, such as random Hough space transformation for point cloud normal vector calculation and structural surface point cloud clustering, were applied to analyze the slope's damage patterns. The results indicated that the slope is characterized by four main structural surfaces, with the wedge damage pattern being the most probable at 36.87%, notably with a 91.57% probability for the J2 vs J3 combination. This method is not only cost-effective and labor-light but also highly efficient, providing a rapid analysis of slope rock mass damage patterns, which is invaluable for mine safety and geological engineering applications.

Keywords(Bold): *High and Steep Slopes, Non-contact Measurements, Automatic Discontinuity Dentification, Stability Analysis, Stereographicprojection*

基于非接触测量的高陡边坡岩体破坏模式快速分析

-以瓦都沟采石场边坡为例

蒋涛，崔圣华*

成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室， 成都 610059

** 通讯作者. 电子邮箱：cuishenghua18@cdut.edu.cn*

摘要

结构面是影响岩体边坡稳定性的关键因素，但传统的人工测量方法存在数据不全面、效率低、难以到达高陡边坡等局限性。本文采用无人机贴近摄影测量技术结合结构面自动提取算法，有效克服了这些限制，实现了结构面信息的高效、精细获取。研究以瓦都沟采石场边坡为对象，通过多角度无人机贴近摄影测量技术获取超高分辨率影像，并利用基于图像的三维点云构建方法生成精细化的三维模型。进一步应用岩体结构自动识别技术，

© The Author(s) 2025
S. Qiao et al. (eds.), *Proceedings of the 11th Annual Meeting of Risk Analysis Council of China Association for Disaster Prevention (RAC 2024)*, Advances in Economics, Business and Management Research 367,
https://doi.org/10.2991/978-94-6463-946-9_34

投影，对边坡破坏模式进行了深入分析。结果表明，该边坡主要发育四组结构面，楔形体破坏概率最高，达到36.87%，其中 J2 vs J3 组合破坏的概率高达 91.57%。本研究方法具有成本低、劳动强度低、效率高的优点，能够快速分析边坡岩体的破坏模式，对矿山安全和地质工程领域具有重要的应用价值。

关键词：*高陡边坡，非接触测量，结构面自动识别， 稳定性分析，极射赤平投影*

1 .引言

结构面是岩体在漫长的形成和地质作用历史中内部发展出的具有多样方向、规模和形态的地质分界面，它们是决定岩体强度和稳定性的关键因素 [1, 2] 。在进行岩体边坡稳定性分析时，结构面扮演着至关重要的角色。

传统的人工测量结构面存在结构面数据不全面、效率低、对于高陡边坡难以到达等局限性 [3-5] 。随着无人机摄影测量技术已经日益成熟，并以其高效率、快速性、灵活性等显著优势，在地质调查以及地物信息提取等领域得到了广泛应用 [6-8] 。在无人机摄影技术方面分为垂直摄影、倾斜摄影、多角度摄影以及贴近摄影，垂直摄影以及倾斜摄影受到摄影角度和距离的限制，往往难以有效捕捉坡面的细微结构和复杂块体的形态 [9, 10] ，在复杂的坡面条件下，这种方法难以避免地会遇到众多视觉盲区，进而使得岩体结构面的测量结果存在一定误差。多角度贴近摄影融合了多方面优点，可以获得更全面、高精度的边坡模型。

本文以瓦都沟采石场为研究区,利用贴近摄影测量技术以“面”为摄影对象，通过规划人工控制精细贴近航线，结合结构面自动提取算法实现了结构面信息的高效、精细获取，利用获取的结构面数据分析了边坡岩体破坏模式。研究表明，该方法费用低、劳动强度低、效率高，可实现边坡岩体的破坏模式快速分析，对于矿山安全和地质工程领域具有重要的应用价值。

2 .研究区概况

瓦都沟采石场边坡所在区域属中低山深切割地貌，沟内总体呈“V”形地貌，采石场边坡位于瓦都沟内上游，距离尾矿坝约1000m，高程范围在 2460m-2800m，高差达340m，坡度在 38-60°，坡度比约 31°，坡面是一个陡-缓-陡的地形，一二级的坡度在45°，中间每级坡度 38°，最上面已做防护区坡度 57°，最大坡度位于高程2760-2800m（图 1）。

边坡岩体结构面分布较为复杂，主要受两组原生结构面控制，分别是 40∠88° 和 73∠14°，局部受到风化裂隙、爆破裂隙等次生裂隙影响，岩体碎裂，存在危岩体发育可能。

图 1 瓦都沟采石场边坡

3 .基本原理

3.1 多角度无人机贴近摄影测量技术

无人机贴近摄影测量技术。该技术利用已知的或常规摄影影像重建的场地粗模设计精细贴近航线，并以近距离(5～30m)贴近物体表面进行飞行，从而高效获取覆盖拍摄对象的超高分辨率影像，进而通过摄影测量处理实现目标的精细化三维重建。

相对常规无人机贴近摄影航线将一段

坡面拟合为平面进行摄影的方式，多角度无人机贴近摄影更加注重综合坡面起伏变化和岩体结构面发育特征进行针对性拍摄。针对不同组结构面设置对应的摄影角度，对凹凸、突变的复杂块体也依据其形态特征设置补偿航点，进行多角度拍摄，确保各个面的贴近影像覆盖度。

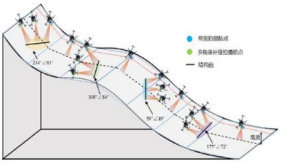


图 2 岩体结构面多角度无人机贴近摄影测量示意图

3.2 基于图像的三维点云构建方法

在从野外工作中获取高分辨率图像之后，SfM 技术可以从多个拍摄位置和角度的伪随机冗余图像来恢复对象的 3D 模型。近年来，结合 SfM 技术，开发了多种用于三维重建的软件，如 ContextCapture、Pix4D、Agisoft、VisualSFM 和 DJI Terra [11, 12] 。

在本研究中，ContextCapture 被应用于图像处理。首先，将图像上传到软件中，并导入相关的拍摄位置信息。然后软件结合尺度不变特征算法（SIFT）匹配图像的关键特征，并应用 Structure from Motion (SfM) 技术生成稀疏点云。随后，通过多视图立体匹配（MVS）算法加密稀疏点云，并在之前生成的密集点云基础上，采用 Delaunay 三角剖分算法和纹理映射重建三维模型。最后，可以创建与影像分辨率相同的 3D 点云数据模型，为结构面自动识别提供基础数据。

3.3 岩体结构自动识别

3.3.1 基于随机 Hough 空间变换的点云法向量计算方法

Hough 变换就是运用两个坐标空间的变换将一个空间中具有相同形状的曲线或直线映射到另一个坐标空间的一个点上形成峰值，从而把形状检测问题转化为峰值统计问题 [13, 14] 。以标准 Hough 变换的直线检测为例，在直线方程 y=kx+b 中，直线上的所有点对应的参数（k，b）是相同的，利用此信息，可以建立一个 k 与 b 的累加器，以此计算图像中提取的边界点，计算每个点可能对应的 k，b 并把相应的累加器项加一，最后求出累加器中的局部峰值，若峰值大于给定的阈值就能得到一条根据 k 与 b 所确定的直线。

3.3.2 点云 HSV 空间着色

为使滑坡破坏边界上结构面分布情况能够直观展示，可采用 Matlab 编程，使用 HSV 彩重建技术渲染三维结构面 [15] 。本文的 HSV 颜色空间中，使用色相来表示岩体结构面的倾向，以 1°为单位，分成 361 个不同的颜色；使用饱和度来表示岩体的倾角，当法向位于半球投影圆的边缘时（即垂直于倾斜的不连续点），纯色完全饱和，S=1，倾角为 90 度；反之，S=0 时，倾角为 0 度；而明度则取定值为 1。这样，同一平面上的点将以相同的颜色显示。不连续结构面会呈现出复杂的颜色模式。

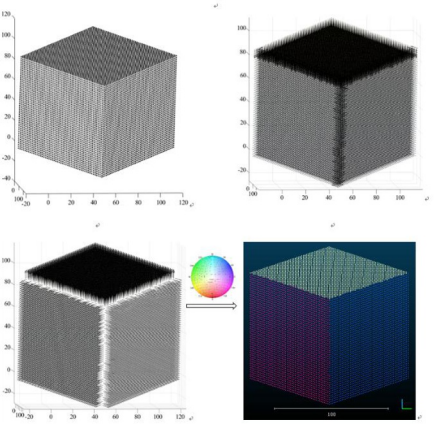


图 3 法向矢量方向和颜色转换。(a)正立方体的点云。(b)正态向量计算。(c)法向量的重新定向。(d)HSV 颜色转换。

3.3.3 结构面点云聚类

K-means 算法是一种迭代求解聚类的算法，属于一种无监督的分类算法 [0] 。假定有一个数据集 X，需要对其分为 K 组。则随机选取 K 个对象作为初始的聚类中心 $\{\mu 1,\mu 2,\ldots,\mu k\}$，然后计算数据集 X 中每个对象 xi 与各个初始聚类中心 μk 之间的距离，并把每个对象分配给距离他最近的聚类中心。

每个聚类包括聚类中心和分配给这个聚类中心的对象，上述过程称为一轮计算。当全部对象都被分配，每个聚类的聚类中心会根据聚类中现有的对象被重新计算，并重复上述过程。整个计算过程会不断重复直到满足没有聚类中心再发生变化且没有对象被重新分配给不同的聚类。计算过程可用公式表示：

$$Ax + By + Cz = D \quad (1)$$

式中，E：所有对象到各自聚类中心的欧氏距离的平均值。

N：法向量个数。

K-means 计算的目的是最小化均方误差 E，从而得出每个对象所在的聚类，直到聚类中心与聚类所包含的对象不发生变化为止。

3.4 结构面产状计算方法

结构面的产状是从倾向、走向、倾角三个要素来描述结构面的三维空间位置。结构面产状信息的提取与归纳汇总是绘制结构面玫瑰花图、极限赤平投影图与等极点密度图的重要基础。在三维点云中，我们通常使用最小二乘法拟合平面方程 [17]：

$$ax + by + c = d \quad (2)$$

写成矩阵形式可表示为：

$$[x, y, 1]\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = [d] \quad (3)$$

结构面上的 n 个点的坐标分别为 $(x_1,y_1,z_1),(x_2,y_2,z_2)$，…，$(xn,yn,zn)$,则可表示为：

$$\begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ \mathrm{M} & \mathrm{M} & \mathrm{M} \\ x_n & y_n & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \mathrm{M} \\ d_n \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ \mathrm{M} & \mathrm{M} & \mathrm{M} \\ x_n & y_n & 1 \end{bmatrix}$$

$$x = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$d = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \mathrm{M} \\ d_n \end{bmatrix}$$

则要找到拟合的向量 A，使得$\varphi(A) = \| Ax - d \|$取得最小值，即拟合得到平面方程及其法向。通过本文 3.2.3 小节的点法向与结构面倾向倾角转换公式，即可得到结构面的产状信息。

3.5 极射赤平投影

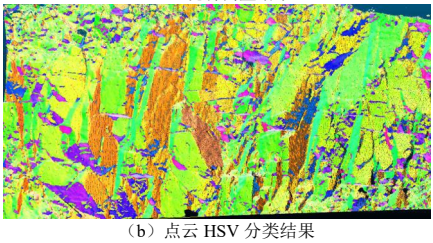
运动学分析是确定边坡破坏模式的一种有效方法 [18, 19]。原理是根据坡向、坡角、结构面倾向、结构面倾角和结构面摩擦角之间的相互作用关系，利用三维点云数据获取的产状，在赤平投影图上，绘制出坡面大圆与摩擦圆，根据结构面极点或交线是否落在危险区，从而判断岩体可能发生的破坏模式，具体的破坏模式分为：平面滑动、楔体破坏、直接倾倒和弯曲倾倒 4 种模式 [20]。

4 .结果

4.1 结构面产状统计分析

通过现场调查和点云数据模型相互验证的方法，对边坡的结构面进行分析，发现点云数据获取的产状与真实产状较为一致。可以说明本文自动提取的结构面是有效的。

（a）现场测量结果



（b）点云 HSV 分类结果

图 4　坡面结构展布情况

坡面主要发育结构面 J1、J2、J3 和 J4，为了方便展示，对其进行了重新赋色（表 1）。

4 组结构面产状及分布见表 1 和图 5。

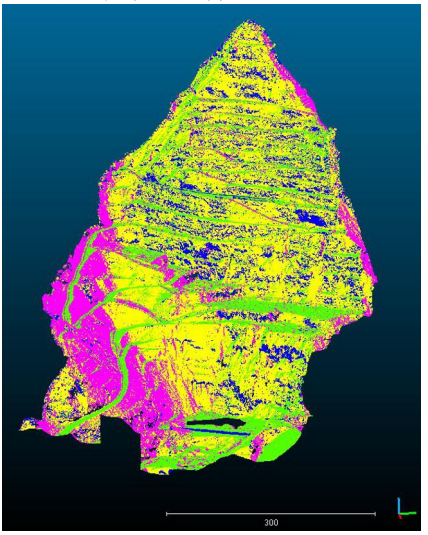


图 5 边坡结构面总体分布

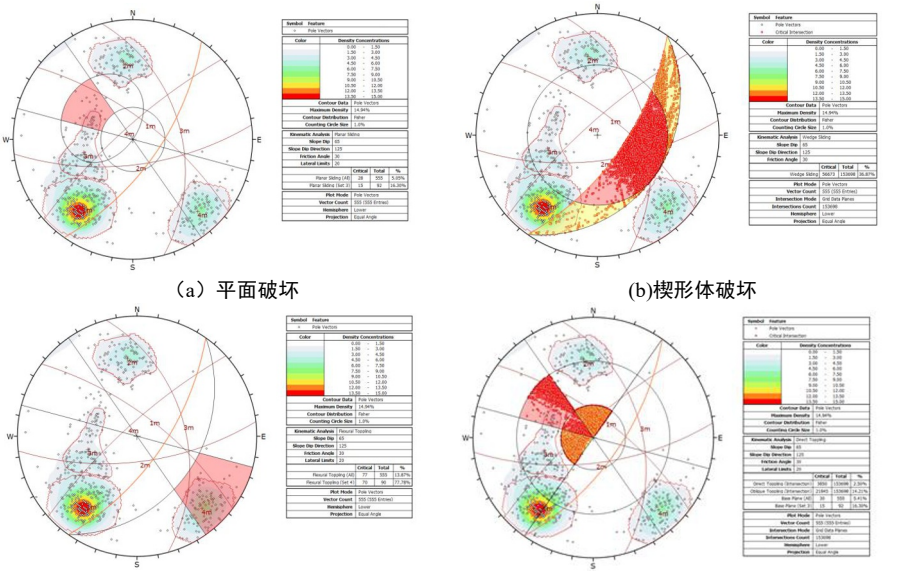
表 1 边坡结构面产状与分布

结构面与岩桥	产状	类型	点云数量	颜色
J1	40°∠70°	主要结构面	230 万	
J2	118°∠38°	坡面卸荷面	231 万	
J3	73°∠14°	坡面缓倾	65 万	
J4	73°∠45°	侧面内部斜切	125 万	

4.2 边坡岩体破坏模式分析

为方便计算并减少采样偏差，我们在边坡每组结构面中随机选取大约 100 个小平面，边坡得到 555 个产状数用于断面破坏模式分析。参考类似岩体的物理力学参数，将内摩擦角设置为 30°，坡面产状为 125°∠31°，

边坡发生楔形体破坏的概率最高，达到 36.87%，结构面 J1 vs J2、J2 vs J3、J2 vs J3 组合破坏的概率较高，在 55%以上。其中，J2 vs J3 组合破坏的概率达到 91.57%；弯曲破坏的概率次之，为 13.87%，主要沿结构面 J4 发生；平面破坏和倾倒破坏都主要沿 J3 发生（如图 6 所示）。



（a）平面破坏 (b)楔形体破坏

(c)弯曲破坏 (d)直接倾倒破坏

图 6 瓦都沟采石场边坡岩体破坏模式

5 .结论

本文以瓦都沟采石场边坡为研究对象，利甩多角度无人机贴近技术获取岩体边坡结构面信息，实现了边坡总结多角度无人机贴近摄影的飞行规划，实现了边坡岩体结构

面参数的自动识别以及破坏模式分析，结论如下：

（1）通过自动识别处理瓦都沟采石场边坡的点云数据，发现该边坡主要发育有40°∠70°，118°∠38°，73°∠14°，73°∠45°四组结构面；

（2）边坡发生楔形体破坏的概率最高，达到36.87%，其中，J2 vs J3组合破坏的概率达到91.57%；平面破坏和倾倒破坏概率最小；

（3）提出来一种边坡快速进行岩体破坏模式分析的思路，后期研究可以加强对三维结构面参数的利用，进行三维的破坏模式分析，并且定位破坏模式的具体发生位置。

参考文献

[1] 王存根, 王述红, 张紫杉, 等. 含结构面岩体的岩桥贯通系数修正及其应用[J]. 工程力学. 2017, 34(5): 95-104.

Wang Cungen, Wang Shuhong, Zhang Yeshan, et al. Rockbridge coalescence coefficient correction of rock mass with structural surface and its application[J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(5): 95-104.

[2] 王宇翔, 沈月千. 基于三维激光扫描技术的岩体结构面智能识别方法[J]. 激光与光电子学进展. 2024, 61(14): 128-137.

Wang Yuxiang, Shen Yueqian. Intelligent Identification of Rock Discontinuities Based on Three-Dimensional Laser Scanning Technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2024, 61(14): 128-137.

[3] 宣程强, 章杨松, 许文涛. 基于数字表面模型的岩体结构面产状获取[J]. 水文地质工程地质. 2022, 49(1): 75-83.

Xuan Chengqiang, Zhang Yangsong, Xu Wentao. Extraction of the discontinuity orientation from a digital surface model[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(1): 75-83.

[4] 付德荃, 王珊珊, 吴彬, 等. 基于无人机摄影测量技术的高陡边坡危岩体特征构建与分析[J]. 地球学报. 2024, 45(1): 53-62.

Fu Dequan, Wang Shanshan, Wu Bin, et al. Construction and Analysis of Dangerous Rock Mass Characteristics of High and Steep Slope Based on UAV Photogrammetry Technology[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2024, 45(1): 53-62.

[5] Xu W, Zhang Y, Li X, et al. Extraction and statistics of discontinuity orientation and trace length from typical fractured rock mass: A case study of the Xinchang underground research laboratory site, China[J]. Engineering Geology. 2020, 269: 105553.

[6] 王云凯, 李安民, 林楠, 等. 基于无人机地理信息视频技术的自然资源调查外业核查方法[[J/OL]]. 自然资源遥感.

Wang Yunkai, Li Anming, Lin Nan, et al. Research on field inspection method of natural resource survey based on UAV geographic information video technology[J]. Remote Sensing for Natural Resources.

[7] 韦彪, 孙璐. 消费级无人机倾斜摄影测量的室内实景三维模型构建方法[J]. 测绘通报. 2024(S1): 73-78.

Wei Biao, Sun Lu. A method for indoor real 3D model building based on consumer UAV oblique photogrammetry[J]. Surveying and Mapping Bulletin, 2024(S1): 73-78.

[8] 茅娜, 张文明, 孙侃. 基于无人机贴近摄影测量的露天采石场高陡岩质边坡岩体结构面信息自动识别[J]. 安全与环境工程. 2024, 31(02): 164-172.

Mao Na, Zhang Wenming, Sun Kan. Automatic discontinuity identification of high steep rocky slopes in open pit quarries based on UAV nap-of-the-object photogrammetry[J]. Safety and Environmental Engineering, 2024, 31(2): 164-172.

[9] 李术才, 刘洪亮, 李利平, 等. 隧道危石识别及防控研究现状与发展趋势[J]. 中国公路学报. 2018, 31(10): 1-18.

Li Shucai, Liu Hongliang, Li Liping, et al. Stateand Trends of Dangerous Rock Preventionand Control During Tunnel Construction[J]. China J. Highw. Transp, 2018, 31(10): 1-18.

[10] 张茹, 吕游, 张泽天, 等. 深地工程多维信息感知与智能建造的发展与展望[J]. 煤炭学报. 2024, 49(3): 1259-1290.

Zhang Ru, Lü You, Zhang Zetian, et al. Development and prospect of multidimensional information perception and intelligent construction in deep earth engineering[J]. Journal of China Coal Society，2024，49(3)：1259−1290.

[11] Zhang W, Zhao X, Pan X, et al. Characterization

of high and steep slopes and 3D rockfall statistical kinematic analysis for Kangyuqu area, China[J]. Engineering Geology. 2022, 308: 106807.

[12] 于广瑞, 刘兴春, 时春霖, 等. 一种稳健的无人机影像三维重建方法[J]. 测绘通报. 2022(6): 76-81.

Yu Guangrui, Liu Xingchun, Shi Chunlin, et al. A robust 3D reconstruction method of UAV images. Surveying and Mapping Bulletin. 2022(6): 76-81.

[13] 王森, 刘琛, 邢帅杰. K-means聚类算法研究综述[J]. 华东交通大学学报. 2022, 39(05): 119-126.

Wang Sen, Liu Chen, Xing Shuaijie. Review on K-means Clustering Algorithm[J]. Journal of East China Jiaotong University. 2022, 39(05): 119-126.

[14] 王俊智, 杜朋召, 牛兆轩. 基于K-means聚类方法和I Index聚类有效性检验指标的岩体结构面自动分组及应用[J]. 长江科学院院报. 2018, 35(09): 109-113.

Wang Junzhi, Du Pengzhao, Niu Zhaoxuan. An Auto-classification of Rockmass Discontinuities Based on K-means Cluster Analysis and Cluster Validity Index I: Researchand Application [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute. 2018, 35(09): 109-113.

[15] 梁玉飞, 裴向军, 崔圣华, 等. 基于地面三维激光点云的滑坡破坏边界岩体结构特征分析[J]. 岩石力学与工程学报. 2021, 40(6): 1209-1225.

Liang Yufei, Pei Xiangjun, Cui Shenghua, et al. Analysis of rock mass structure characteristics of landslide boundaries based on ground 3D laser point cloud[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. 2021, 40(6): 1209-1225.

[16] 冯文凯, 曾唯恐, 程柯力, 等. 基于三维点云的结构面产状获取方法研究[J]. 长江科学院院报. 2021, 38(9): 128-132, 140.

Feng Wenkai, Zeng Weiwei, Cheng Keli, et al. Method of Obtaining Structural Plane Occurence Based on Three-dimensional Point Cloud [J]. Journal of the Yangtze River Academy of Sciences. 2021, 38(9): 128-132, 140.

[17] 赵健仓, 来光, 李永新, 等. 基于运动学与离散元的边坡稳定性分析[J]. 人民黄河. 2020, 42(1): 105-108.

Zhao Jiancang, Lai Guang, Li Yongxin, et al. Slope Stability Analysis Based on Kinematics and Discrete Element Method[J]. People's Yellow River. 2020, 42(1): 105-108.

[18] 王亮清, Kulatilake P H S W, 唐辉明, 等. 双临空面岩质边坡滑动与倾倒破坏的运动学分析[J]. 岩土力学. 2011, 32(S1): 72-77.

Wang Liangqing, Kulatilake P H S W, Tang Huiming, et al. Kinematic analyses of sliding and toppling failure of double free face rock mass slopes [J]. Rock and Soil Mechanics. 2011, 32(S1): 72-77.

[19] 赖润森, 张紫昭, 陈德斌, 等. 新疆阿勒泰骆驼峰崩塌发育特征及破坏机理[J]. 工程地质学报. 2023, 31(4): 1186-1199.

Lai Runsen, Zhang Zizhao, Chen Debin, et al. Collapse development characteristics and failure mechanism of altay camel peak in xinjiang [J]. Journal of Engineering Geology. 2023, 31(4): 1186-1199.

Open Access This chapter is licensed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/), which permits any noncommercial use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons license and indicate if changes were made.

The images or other third party material in this chapter are included in the chapter's Creative Commons license, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the chapter's Creative Commons license and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder.