

# The Mechanism of Slope Slump in Goaf

Zhiyong Ma

CCTEG Chongqing Research Institute, Chongqing  
Email: 358697099@qq.com

Received: Jul. 6<sup>th</sup>, 2020; accepted: Jul. 21<sup>st</sup>, 2020; published: Jul. 28<sup>th</sup>, 2020

---

## Abstract

With the exploitation of underground minerals, the phenomenon of slope collapse in gap goaf is becoming more and more prominent. This paper takes the landslide of Pusha Village, Zhangjiawan Town, Nayong County, Guizhou Province, on August 28, 2017 as the research object. Through on-site investigation, the preliminary grasp of the general situation of the landslide area is clear, and its genesis mechanism is analyzed. Combining numerical simulation named PFC2D to the side to simulate the process of slope collapse and landslide, the analysis shows that under natural weathering and mining, joints and fissures begin to develop in the rock mass of the slope. The stress concentration at the steep and gentle junction in the middle of the slope promotes local soft rock collapse and landslide, which makes the rock mass at the top of the slope begin to appear tension cracks. With the continuation of mining, the fissures gradually penetrate and develop along the steep inclined structural plane. With the development of cracks, the main dangerous rock mass at the top of the slope is collapse, while the lower dangerous rock mass moves downward along the slope in the way of sliding while breaking. The failure of the whole slope changes from collapse to landslide. Studying the mechanism of landslide and collapse in Pusha village, Zhangjiawan town, Nayong county, Guizhou province is of great significance to the study of potential hazards of similar conditions in mountainous areas of China and the future work of disaster reduction and prevention.

## Keywords

Slope of Goaf, Collapse and Landslide, Genesis Mechanism, PFC<sup>2D</sup>

---

# 采空区边坡崩滑成因机理研究

马智勇

中煤科工集团重庆研究院有限公司, 重庆  
Email: 358697099@qq.com

收稿日期: 2020年7月6日; 录用日期: 2020年7月21日; 发布日期: 2020年7月28日

## 摘要

随着对地下矿产的开采,采空区边坡地质灾害突发现象日益突出,尤其是崩塌和滑坡造成了重大生命财产损失,近年来引起了广泛的关注。本文以2017年8月28日贵州纳雍县张家湾镇普洒村崩塌滑坡为研究对象,通过现场勘查,对崩滑区的概况有一个初步掌握,深入分析其成因机制,并结合PFC数值模拟,对边坡的崩滑发展过程进行模拟。分析研究认为,该边坡在自然风化作用以及开采作用下,岩体节理裂隙开始发育,由于坡体中部陡缓交界处应力集中,促进坡体局部软岩崩滑,使坡顶岩体开始出现拉裂缝,随着开采的继续,裂隙逐渐贯通,并沿陡倾结构面发展,随着裂隙的发展,坡体顶部危险岩体以崩塌为主,中下部危险岩体以边破碎边滑动的方式沿坡面往下运动,整个边坡破坏由崩塌破坏为主变为滑移破坏为主。研究贵州纳雍县张家湾镇普洒村崩塌滑坡成因机制,对我国山区存在类似条件的灾害隐患点的研究以及未来的减灾防灾工作,具有重要的指导意义。

## 关键词

采空区边坡, 崩滑, 成因机理, PFC<sup>2D</sup>

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

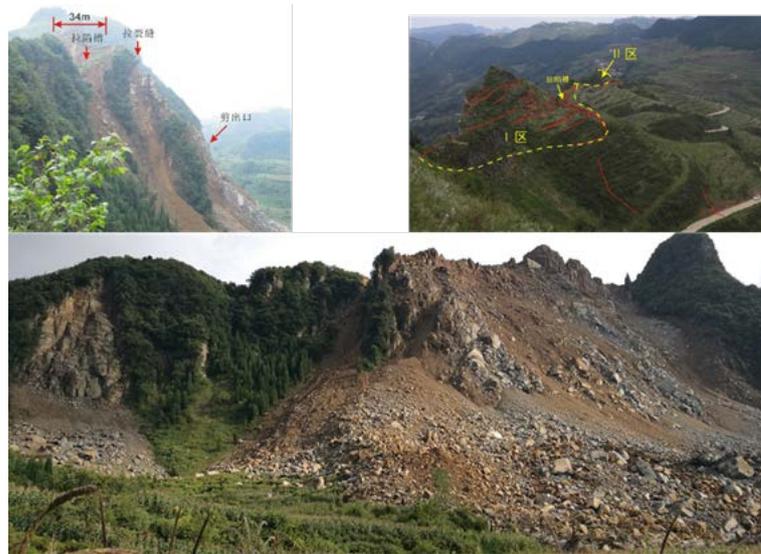
从工程力学角度看,矿产资源原属于地质体的一部分,自然形成的地质体在长久的地质作用下,内部应力趋于平衡,然而工业建设的发展需要大量的矿产资源,自然资源的开发使得地应力重分布,岩体结构劣化,诱发了地面塌陷、山体崩塌、山体滑坡、地表移动等一系列地质灾害问题。近年来,地下开采引起的地质灾害,以及地表环境变化十分严重,主要表现为采空区塌陷和山体开裂,从而导致塌陷、滑坡等地质灾害,造成重大生命财产损失[1]。如贵州省大方县德兴煤矿崩滑,贵州凯里市龙场镇崩塌等[2]。

本文以贵州纳雍县张家湾镇普洒村崩塌滑坡为例,通过现场调查测绘,研究其变形和破坏情况。根据采空区滑坡的工程地质条件,采用数值模拟方法对地下开采诱发滑坡的形成机制进行了详细研究,并分析煤层地下开采过程中滑坡的采空区稳定性及应力应变变化。为我国山区存在类似条件灾害隐患点的研究以及未来的减灾防灾工作,具有重要的指导意义。

## 2. 概况

2017年8月28日10时30分左右,贵州省纳雍县张家湾镇普洒村山体发生高位崩塌地质灾害,造成重大生命财产损失,伤亡人员高达43人,引发广泛关注[3]。

根据现场调查,崩塌山体位于煤矿采空区上部。山体崩塌失稳后,岩体迅速破碎、崩落、铲刮,并沿坡体高速滚落滑动,由于坡角处,村庄建筑物的阻挡,崩滑体停止运动。在此过程中,坡面原有的松散堆积体被铲刮并随崩滑体一起运动,形成了“滚雪球”效应。沿坍塌方向最长地层约610 m,平均长度约575 m,中部宽度360~380 m,平均厚度约4 m,体积约 $82.3 \times 10^4 \text{ m}^3$ (见图1),是典型的由地下矿区开采而引发的大型岩质滑坡[4][5]。

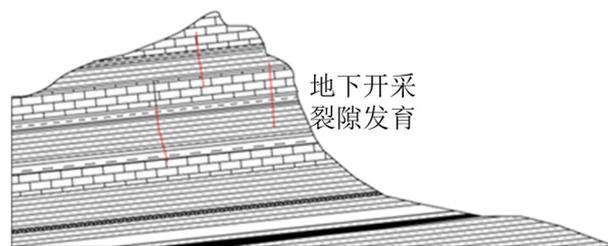


**Figure 1.** Site collapse overview  
**图 1.** 现场崩塌概况图

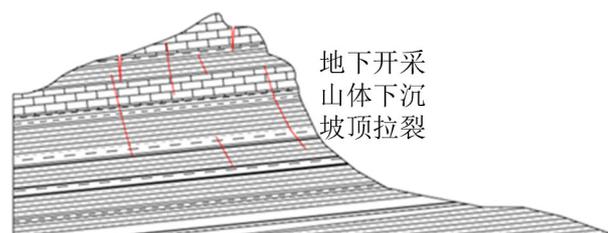
### 3. 成因机制分析

为进一步研究采空区边坡崩滑成因机理，此次将该滑坡成因机制分为五个阶段：1) 冻融循环、干湿循环造成岩体节理裂隙的形成；2) 坡体地形地貌变化差异大，砂泥岩互层，造成局部应力集中；3) 随着煤矿区的继续开采，采空区域不断扩大，岩体应力重分布，结构面不断劣化；4) 量变导致质变，当岩体中部裂隙发育到一定程度时，上部岩体在自重作用下挤压下部岩体并引起破坏；5) 局部崩塌带动整体失稳[6] [7] [8]。具体分析如下：

1) 冻融循环、干湿循环等自然风化作用导致岩质边坡发生风化，加之矿区内爆破震动及开采等工程活动，促进坡体内外岩体节理裂隙的发育和贯通(图 2)。



**Figure 2.** Fracture development stage  
**图 2.** 裂隙发育阶段



**Figure 3.** Stage of slope top cracking  
**图 3.** 坡顶拉裂阶段

2) 坡体下部坡面较缓，而上部坡面较陡，在中部区域交汇，此处岩体由于坡面倾角变化较大，在振动荷载下容易形成应力集中。同时，坡面中部中厚层泥岩和泥质砂岩等软岩风化破碎速度较快，应力集中促进坡体局部软岩崩滑，使上部风化较慢的灰岩成悬空状态，坡顶岩体开始出现拉裂缝，同时为边坡岩体变形提供空间条件(图 3)。

3) 随着煤矿区的继续开采，采空区域不断扩大，加剧边坡岩体应力重分布，结构面不断劣化，节理裂隙不断贯通，坡体后缘竖向裂隙向下发展。裂隙往临空面方向的不稳定岩体在重力作用下产生压缩下部岩体。由于顶部岩体背靠在后墙上，而趾部岩体没有坍塌，因而岩体中部由于不平衡力矩引起弯曲并逐渐断裂(图 4)。

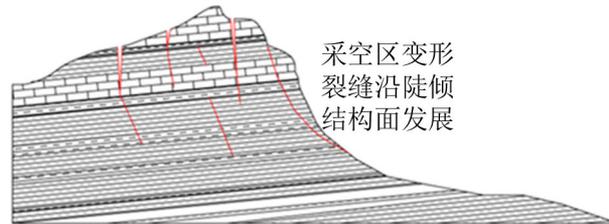


Figure 4. Fracture transfixion stage  
图 4. 裂隙贯通阶段

4) 量变导致质变。当岩体中部裂隙发育到一定程度时，上部岩体在自重作用下挤压下部岩体，导致下部岩体不断破坏，结构面不断劣化，并引起破坏。此时，岩体下部的岩体首先会因失稳而下沉，最后会呈现出整体坐落的特征。当节理裂隙缓慢发育的岩体中应力达到其极限强度时，难以承受上部岩体的自重压力，发生突发性压碎，进一步，上部不稳定岩体沿控制性节理裂隙发生突发性局部大规模崩滑(图 5)。

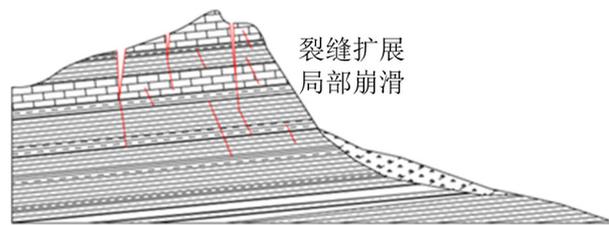


Figure 5. Fracture expansion and local collapse stage  
图 5. 裂隙扩展、局部崩滑阶段

5) 崩滑开始时，坡体顶部危险岩体以崩塌为主，由于岩体节理裂隙十分发育，在崩塌的过程中，中下部危险岩体并没有发生整体外翻，而是以边破边滑动的方式沿坡面往下运动，主要堆积于坡脚附近，即由崩塌破坏为主变为滑移破坏为主(图 6)。

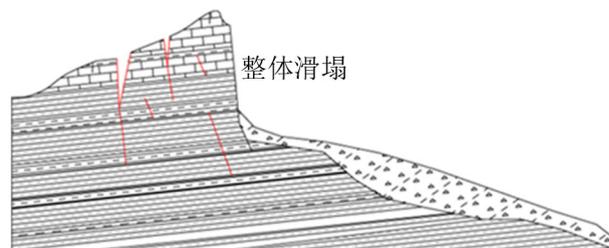


Figure 6. Overall collapse stage  
图 6. 整体崩滑阶段

根据崩滑后的地形反推坡面的安全角度约为  $30^\circ \pm 5^\circ$ ，破碎岩体边坡综合内摩擦角约为  $30^\circ \pm 10^\circ$  (取  $30^\circ$ )

作为平均值)。崩滑前后地形线存在一个交点,交点以上的岩体均是不稳定的,在不平衡力的作用下,节理裂隙逐渐发育和局部贯通。量变产生质变,控制性节理裂隙贯通后,不稳定岩体突然启动崩滑模式。

#### 4. 数值模拟

基于上述分析,选取主剖面(图7)构建计算模型,采用二维离散元软件 PFC<sup>2D</sup> (5.0)对边坡的崩滑发展过程进行模拟[9][10]。

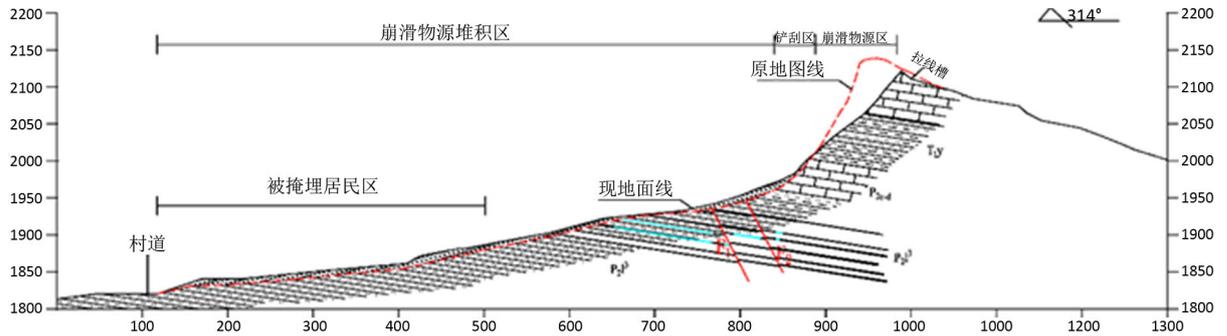


Figure 7. Engineering geological section  
图7. 工程地质剖面图

计算模型采用崩滑前的地形线,为了减少计算量,对原始剖面进行简化是有必要和可行的,因为高程在 83.22 m 以下的坡体对整个坡体的崩滑过程没有实质性影响,因此建模时可以忽略这部分坡体,顶点与底部的相对高度差 232.33 m,计算模型长度 464.89 m。

计算模型由 10,949 个半径为 1 m 的球充填而成,球之间呈正三角形排列,采用平行粘结接触模型将球体粘在一起,粘结后的颗粒集合体具有硬岩(灰岩、白云岩)的强度和弹性模量,球体和接触模型的计算参数见表 1。

这种规则排列构成的虚拟模型与实际坡体的主要区别在于:1) 实际岩体岩性不同,而虚拟岩体采用统一细观参数,岩性相同;2) 组成岩体的颗粒组成成分不同,而虚拟岩体由统一粒径的颗粒构成。上述两方面的区别可归结为虚拟岩体试样没有考虑实际岩体各向异性的特性。因此,各向异性对岩体节理裂隙发育的影响无法通过这种模型直接获取。然而,根据第二节的成因机制分析,可以通过控制节理裂隙的发育,模拟坡体崩塌滑坡启动和运动过程。

Table 1. Calculation parameters of parallel bond model  
表1. 平行粘结模型计算参数

模型	Bond Gap	Emod (linear)	Kratio (linear)	Emod (pb)	Kratio (pb)	Pb_ten	Pb_coh	Pb_fa	Dp_nratio	Fric
平行粘结	0.5e-4	1.0e9	1.0	1.0e9	1.0	10e6	50e6	0.0	0.5	0.577

统计岩体中存在的节理裂隙是个比较困难和危险的工作,然而在 PFC 中,可以采用 Discrete Fracture Network (DFN)功能模块,随机的在坡体内生成节理裂隙。节理裂隙长度为 1~3 倍的颗粒直径,倾斜角度服从高斯分布,平均值 80°,标准差 10°。

节理裂隙的数量根据截面面积确定。首先,现场收集试样,最小尺寸大于 0.3 m,然后将试样沿中间切成 2 半,取一半,磨平切面,在切面上用记号笔画一个半径为 0.1 m 的标准圆,采用放大镜,寻找出切面上的节理裂隙,1 cm 以下的裂隙不考虑,用记号笔做好标记,然后统计标准圆内节理裂隙的数量 N。重复随机取样 3 次,统计 3 次节理裂隙数量并求取平均值,最终计算单位面积内节理裂隙的数量 N/A (A

为半径 0.1 m 标准圆的面积)约为 0.5%。根据虚拟模型的面积和统计的单位面积内节理裂隙的数量得到虚拟模型中节理数量为 164 条。

节理裂隙采用光滑节理接触模型，计算参数见表 2。默认的接触模型采用 Hertz 接触模型，相关参数见表 3。如图 8 所示，在自重应力下，坡体上的颗粒发生的位移很小，处于稳定状态。

**Table 2.** Calculation parameters of smooth joint model  
**表 2.** 光滑节理模型计算参数

模型	Kn/N/m	Ks/N/m	Fric	Da/(°)	Ten/Pa	Shear/Pa	Cohe/Pa	Fa	Large
光滑节理	2e9	2e9	0.577	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1

**Table 3.** Hertz contact model calculation parameters and sphere parameters  
**表 3.** Hertz 接触模型计算参数及球体参数

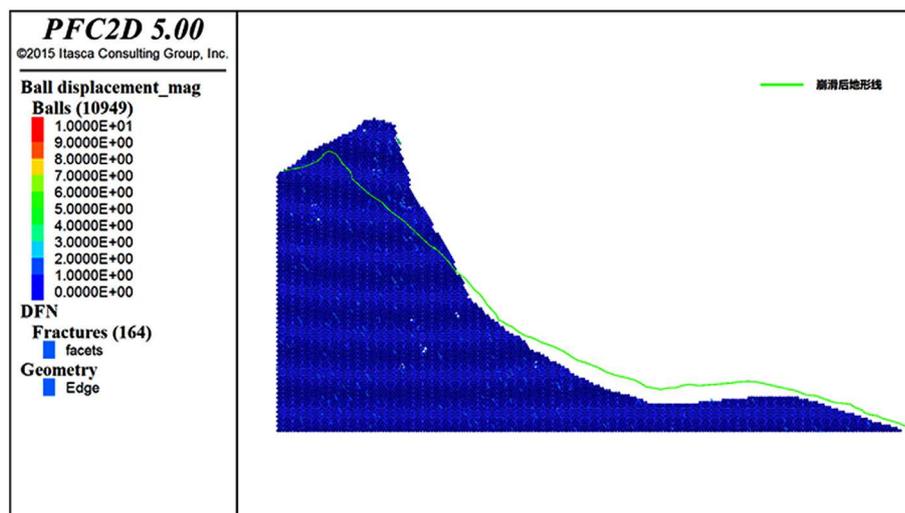
类别	Hertz_shear	Hertz_pois	Fric	Damp	Dp_ratio
Hertz 接触	2.45e10	0.3	0.35	-	0.5
球	2.45e10	0.3	0.35	0.0	-

根据纳雍崩滑资料，坡体中上部的软岩先被压碎，紧接着，上部硬岩发生崩滑。说明，该处软岩是上部硬岩保持稳定的一个支点，推测硬岩内部发育有基本贯通的控制性裂隙，使硬岩脱离母岩，成为危险性岩体。因此模拟坡顶崩滑的启动过程时，在软岩处，植入不断发育的控制性裂隙 4 条，如图 9 所示，倾角分别为 0°，120°，135°和-45°，点 A 是它们的发育始点。每条裂隙按照既定的方向以 1 m/s 的速度增长，即每秒增长 1 m，且各自在增长方向上存在偏差，均为±10°。随着裂隙的发育，A 点下部出现局部岩体崩滑，使 A 点上部岩体成悬空状态。

裂隙的发育导致，带来局部岩体崩滑的同时，也导致岩体内应力不均衡，在裂隙两端或坡面转角处发生岩体破碎，触发新的局部崩滑，如图 10 所示。

随着软岩的破碎和崩滑，失去支点的顶部硬岩最终启动崩滑模式，如图 11，硬岩以破碎的方式沿坡面滑动，同时，后缘裂隙开口变大。

启动崩滑后的岩体沿坡面运动，大块岩体不断破碎成小块岩体，最终堆积成新的坡面，如图 12 所示。



**Figure 8.** Calculation model of Nayong slope (displacement under self weight)  
**图 8.** 纳雍边坡计算模型(自重下的位移量)

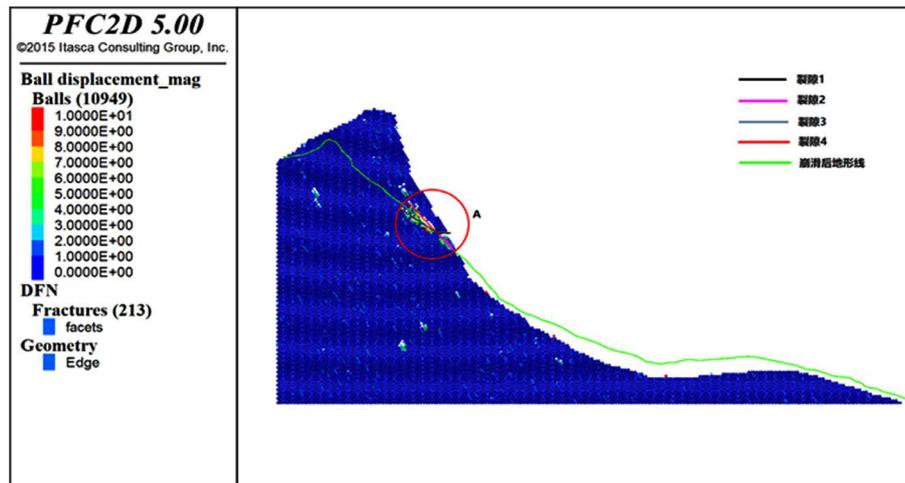


Figure 9. Local soft rock collapse  
图 9. 局部软岩崩滑

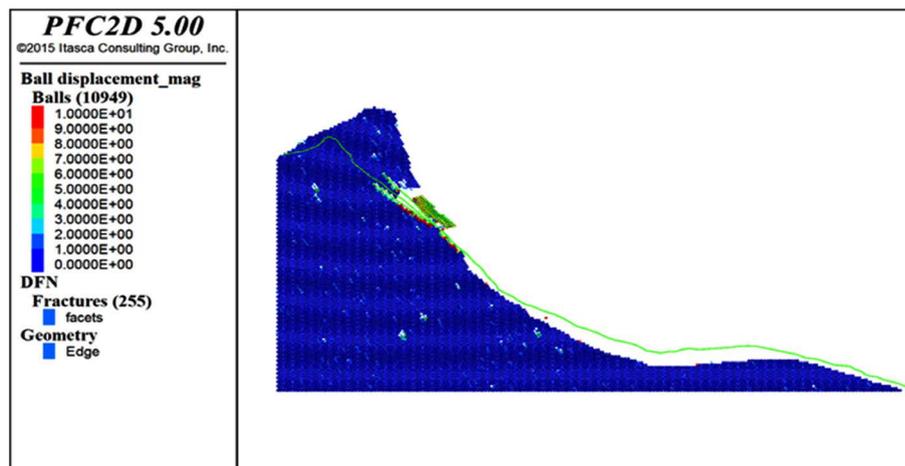


Figure 10. Local collapse of rock mass  
图 10. 岩体局部崩滑

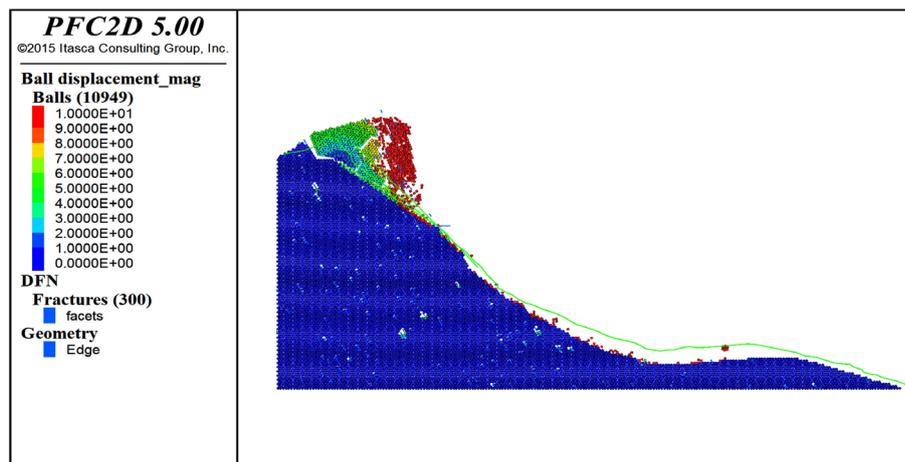


Figure 11. The mode of starting avalanche in hard rock  
图 11. 硬岩启动崩滑模式

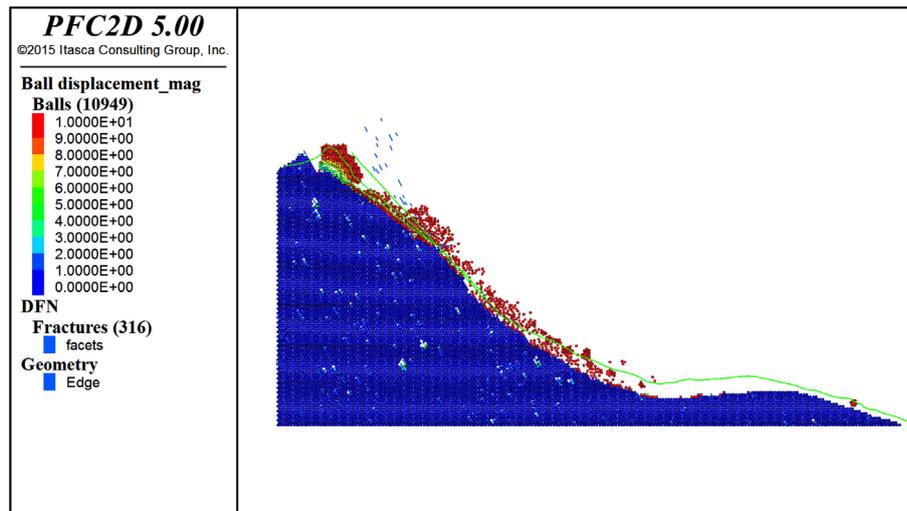


Figure 12. New slope after landslide

图 12. 崩滑后新的坡面

## 5. 结语

1) 通过现场勘查, 研究分析了贵州纳雍县张家湾镇普洒村崩塌滑坡的特征及成因机理。

2) 在掌握该采空区边坡崩塌的特征及成因机理的基础上, 运用二维离散元软件 PFC<sup>2D</sup> (5.0)对边坡进行数值建模, 对崩滑发展过程进行模拟, 基本再现了采空区边坡崩滑过程。

3) 该边坡在自然风化作用以及开采作用下, 岩体节理裂隙开始发育, 由于坡体中部陡缓交界处应力集中, 中厚层泥岩和泥质砂岩等软岩风化破碎速度较快, 促进坡体局部软岩崩滑, 使上部风化较慢的灰岩成悬空状态, 坡顶岩体开始出现拉裂缝, 随着开采的继续, 裂隙逐渐贯通, 坡顶拉裂缝向下发展, 坡体顶部危险岩体以崩塌为主, 下部危险岩体以边破碎边滑动的方式沿坡面往下运动, 整个边坡破坏由崩塌破坏为主变为滑移破坏为主。整个破坏过程可以概括为“坡体中部关键性块体失稳 - 坡顶拉裂缝发育 - 坡体下部岩体压碎”。

## 参考文献

- [1] 郑光, 许强, 巨袁臻, 等. 2017年8月28日贵州纳雍县张家湾镇普洒村崩塌特征与成因机理研究[J]. 工程地质学报, 2018, 26(1): 223-240.
- [2] 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.
- [3] 王得原, 等. 纳雍县张家湾镇普洒村老鹰岩组崩塌地质灾害应急调查报告[R]. 遵义: 贵州省地质矿产勘查开发局一〇六地质大队, 2016: 58-63.
- [4] 欧阳刚, 兰中孝. 纳雍县张家湾镇普洒煤矿崩塌地质灾害治理工程施工图设计[R]. 贵阳: 贵州地矿工程勘察总公司, 2009: 113-118.
- [5] 欧阳刚, 王江. 纳雍县张家湾镇普洒煤矿矿山地质环境保护与治理恢复方案[R]. 贵阳: 贵州地矿工程勘察总公司, 2010: 66-75.
- [6] 王玉川, 巨能攀, 赵建军, 等. 缓倾煤层采空区上覆山体滑坡形成机制分析[J]. 工程地质学报, 2013, 21(1): 61-68.
- [7] 许强, 李为乐, 董秀军, 等. 四川茂县叠溪镇新磨村滑坡特征与成因机制初步研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(11): 2612-2628.
- [8] 丁丽萍. 采空区塌陷诱发崩滑复合型地质灾害形成机理研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2014:

35-43.

- [9] 张洪, 林锋. 基于离散元法的德兴煤矿崩塌形成机制研究[J]. 中国水运(下半月), 2015, 15(10): 309-312.
- [10] 张文轩. 小秦岭矿区矿渣泥石流发育特征及启动机理研究[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 华北水利水电大学, 2017: 56-73.