

mass structure is one of the common types of mountain disasters. It is of practical significance to explore the process of instability and failure for disaster prevention and control. Taking the ‘8.28 Pusa collapse’ in Guizhou as the research object, the deformation history and rock mass structure characteristics of Pusa rockslide were analyzed. [Methods] Using the topographic mapping data, a three-dimensional geological model was constructed, and the block size of the rockslide accumulation body was counted by the Particles (Pores) and Cracks Analysis System (PCAS). Four different block sizes of 0.5 m, 2.0 m, 3.5 m and 5 m were set to invert the rockfall movement process of the Pusa rockslide. [Results] The research shows that: (1) The block size of the rockslide accumulation block ladder in Pusa is mostly concentrated between 1~2 m; (2) Under different block size conditions, the maximum velocity, maximum energy, maximum distance and maximum height of the broken block reach 74.55 m/s, 2.3×10^4 kJ, 667 m and 107 m respectively, and the particle size has different degrees of influence on the motion characteristics of rockfall. (3) The velocity of the third zone changes abruptly at the step of the accumulation zone, and the velocity decreases rapidly from 30 m/s to about 20 m/s. [Conclusion] Block size affects rockfall movement; The movement mode of rockfall in the process of migration is “free fall—rolling (collision/impact bounce)—rolling (collision/sliding friction)” ; Micro-topography affects rockfall movement. The research ideas and method of this paper can be used for the risk of other landslide disasters.

Keywords: Fragmentation rock mass structure; Rockslide; Block size; Motion characteristics; Micro-topography

0 引言

岩质崩滑灾害是山区常见的山地灾害类型之一。近年来,中国西南山区因其特殊的地质环境和气候条件,加上煤矿开挖、道路修建等人类工程活动叠加效应,崩滑灾害频发,威胁人们的生命和财产安全。例如,2013年凯里鱼洞河地区因强烈的岩溶作用多次发生山体崩塌,并堵塞河道约 30 m^[1-2];鸡尾山滑坡和马达岭滑坡受反复采煤活动和溶蚀作用的综合影响发生高位远程崩滑^[3-5]。岩质斜坡受地层岩性、构造、工程扰动等多因素的影响,节理裂隙发育,稳定性差,而不稳定岩体失稳破坏后的运移和堆积,实质上与不同粒径落石的运动有关。因此,开展块体尺寸效应的高位崩滑体运动过程数值反演研究,对地质灾害成灾范围预测具有一定的参考意义。

探究崩滑体运动学过程对于山区防灾减灾具有重要的现实意义,目前研究落石运动特征的方法主要有现场试验和数值模拟方法。RITCHIE^[6]、叶四桥等^[7]进行了大量人工滚石的现场试验,总结出落石基本运动特征。黄润秋等^[8-9]通过现场滚石运动特征正交试验,得出坡面及坡面情况为影响落石运动的主要因子。LAN等^[10]利用 GIS、Rockfall 建模对加拿大某一段铁路沿线岩崩进行了评估,并提出了一种综合考虑崩塌源特征、岩崩物理过程等的危险性评价方法。AZZONI等^[11]指出,落石运动受到自然环境的变异性影响较大;CROSTA等^[12]也认为,这些不可控因素在三维参数化模型计算时是造成落石轨迹离散性较大的关键因素。为此,BORKOWF等^[13]基于蒙特卡罗方法提出了二维的刚体随机模拟方法。HE等^[14]基于

Heok-Brown 准则,利用 RocPro3D 软件得到了四川汶川县一次高位岩崩的运动特征。SARRO等^[15]基于紧急情况下获得的无人机摄影测量数据进行建模,进行了落石风险评估。AKIN等^[16]利用概率模拟的方法成功研究不同截面尺寸落石的有效性。王睿等^[17]通过 Ramms Rockfall 软件模拟危岩体滚落时的运动情况,获取危岩体滚落过程中的运动路径及运动学参数。严健华等^[18]通过考虑真实块体形状与体积的三维落石数值分析,定量评价了来自中、高风险源区内群发性危岩落石的动力致灾效应。王明辉等^[19]运用 Unity3D 引擎对危岩体运动过程进行三维模拟,反演研究区危岩崩落的运动路径及在不同位置上的冲击能量、弹跳高度的量级和滚落区域等。王豪等^[20]利用 Unity3D 平台建立精细化的崩塌地质-力学模型,模拟了崩塌坠落—撞击—碎裂—堆积的全过程。除此之外,刘潇等^[21]采用 EDEM 离散元数值模拟软件模拟反演大岩山崩塌过程。

以上研究表明:现场试验方法与实际的落石运动特征最为吻合,但对于重现落石运动过程中的偶然性较为困难。数值模拟方法具有简便、成本低、适用性更广等优势,其在崩塌反演研究方面的应用逐渐增加。STEVENS等^[22]基于落石运动特征研究出了 Rocfall 程序,其优点在于短时间模拟大量落石的运动过程。但 Rocfall 软件只能进行二维模拟,需要人为控制落石的运动方向,不太符合实际^[23]。RocPro3D 软件由 PiR3D 软件发展而来,可以利用高程数据点文件(如 DEM、DXF 等)建立实景三维模型,通过随机运动概率的方法模拟落石的运动过程,

支持危岩体防护模拟和风险评价, 是研究岩质崩滑灾害的实用性工具。

因此, 本文以贵州“8·28 普洒崩塌”为研究对象, 解析了普洒崩滑的变形历史及失稳机制; 通过 PCAS 统计岩块粒径大小, 利用 RocPro3D 数值分析方法, 构建三维实体地质模型, 反演岩块的运动过程, 重点研究微地貌、不同块石粒径和能量、弹跳高度等运动参数的关系, 为西南岩溶山区崩塌成灾范围预测及防护工程提供理论依据。

1 普洒崩塌概况

1.1 工程地质背景

研究区位于乌蒙山系东南麓, 是贵州高原第二阶梯黔西山原的一部分, 即云贵高原向黔中山原的过渡地带, 区内总体地势北低南高, 山脉总体走向为南西向, 三叠系下统夜郎组地层形成陡峭山脊, 纵贯全区, 最高点位于南面的山峰顶, 标高为 2 175 m, 最低点位于普洒村下的河沟中, 标高为 1 875 m, 相对高差 300 m。不稳定岩质边坡高度约 80~100 m, 坡度 75°~85°, 下部为较平缓的坡地, 坡度 10°~25°, 呈现“靴型”地貌形态。坡角前部有一条北东—南西的县道和凸起的小丘陵地貌, 山丘前部为平坡段, 坡度几乎为 0°(见图 1)。

崩滑区出露地层主要为三叠系下统夜郎、二叠系上统长兴-大隆组和二叠系上统龙潭组, 地层倾向 SSE 向, 整体上, 位于山体上部的灰岩、泥灰岩岩石结构致密, 力学强度高, 抗风化能力强; 山体下部的泥岩、粉砂质泥岩强度较低, 构成上硬下软工程地质特征, 岩体结构较为破碎, 溶蚀作用强烈, 呈镶嵌-次块状结构。普洒崩塌三维地质模型如图 1 所示。

整体上来看, 地层岩性呈现出典型的上硬下软工程地质特征, 岩体结构较为破碎, 溶蚀作用强烈, 呈镶嵌-次块状结构(见图 2)。经调查发现, 岩体的稳定性主要受控于坡体内发育的 J1#、J2#和 J3#三组节理面, 结构面 J1#和 J2#表面呈平直稍粗糙, 无充填, 可见迹长几十厘米至几米, 张开度估计在 1~5 mm。J1#和 J2#与斜坡呈大角度相交; J3#的走向与坡体基本一致, 且在岩体逐渐变形过程中逐渐发育成贯穿顶、底部的深大张拉裂隙, 因此, J3#为岩体滑动的主滑结构面。在崩滑后的侧壁上, 可见明显湿润的岩块。

斜坡在长时间的采矿、降雨及地质构造影响下, 又受岩层产状、地形倾向、节理产状影响, 岩体被多组密集结构面分割为碎块状, 形成典型的反向缓倾层状节理化碎裂岩体结构(见图 2)。总体上, 不稳定岩体的结构特征较为破碎状, 岩体风化程度大, 节理裂

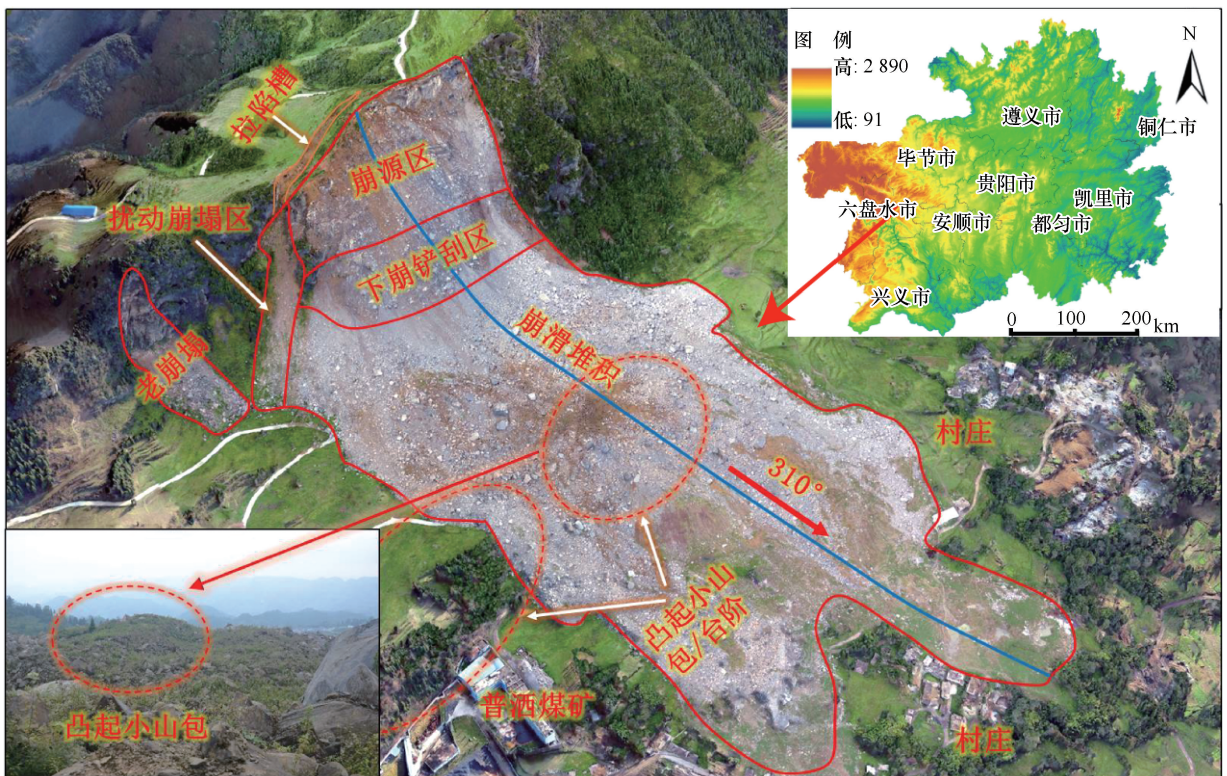


图 1 普洒崩滑三维地质模型

Fig. 1 3D geological model of Pusa rockslide

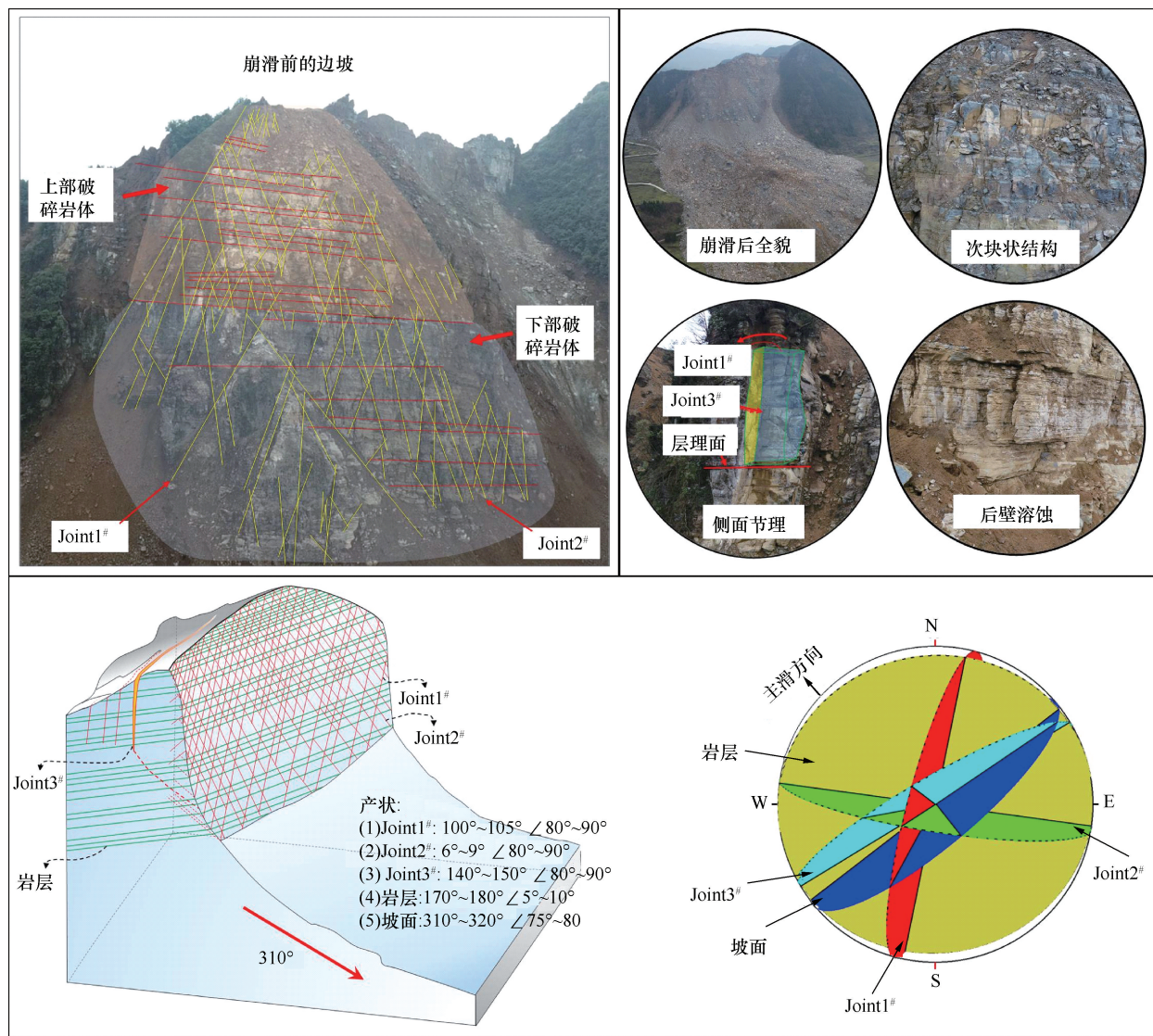


图2 普洒崩滑体地质情况

Fig. 2 Geological map of Pusa landslide

隙发育, 岩溶作用强烈, 岩层上硬下软, 是高陡部位处的斜坡多次发生局部落石的内在因素。

1.2 变形历史

崩塌区下部为普洒煤矿开采区, 煤矿沿煤层走向边界向采区上山方向回采, 采用炮采工艺, 全部垮塌法管理顶板。根据现场调查和历史影像资料, 2006年煤矿结束第一期开采后山体开始出现变形迹象, 坡体后缘出现张拉裂隙, 并逐年扩展。从图 3(a) 中可以看到, 崩塌源区后部已经发育有数条长大裂隙。其中 1[#] 裂缝长约 132 m; 2[#] 裂缝长约 179 m; 3[#] 裂缝长约 51 m; 4[#] 裂缝长约 25.7 m; 5[#] 裂缝长约 18.7 m; 6[#] 裂缝长约 15.6 m; 7[#] 裂缝长约 24.5 m; 8[#] 裂缝长约 22.7 m。其中, 2013 年 1[#] 裂缝扩展延伸至 180 m 左右, 宽度达到 34 m, 坡顶张拉裂隙增多, 曾多次发生落石, 并形成小型落石堆积锥。2017 年 8 月, 纳

雍地区出现了连续极端降雨天气, 28 日累计降雨量达 180 mm, 如图 3(b) 所示, 并于当日发生大规模崩滑灾害。

1.3 崩滑体颗粒特征

在颗粒识别上, PCAS 系统能够导入各种颗粒图像通过二值化, 自动去除杂点, 自动分割并识别颗粒, 输出其几何参数和统计参数。将所有颗粒的各种几何参数显示于数据表, 包括颗粒个数、面积、长度宽度等, 并统计得到颗粒含量, 面积概率分布指数等统计参数, 实现粒的定量分析^[24-25]。研究通过无人机航拍获得正射图像, 如图 4(a) 所示, 基于 PCAS 的图像处理技术过程包括以下 3 个步骤。

(1) 图像二值化。将需要识别颗粒的某一像素点的 RGB 颜色作为参考色 X, 那么待识别图像中的其他像素点颜色值 P(RGB) 都会与 X 之间有一个差值,

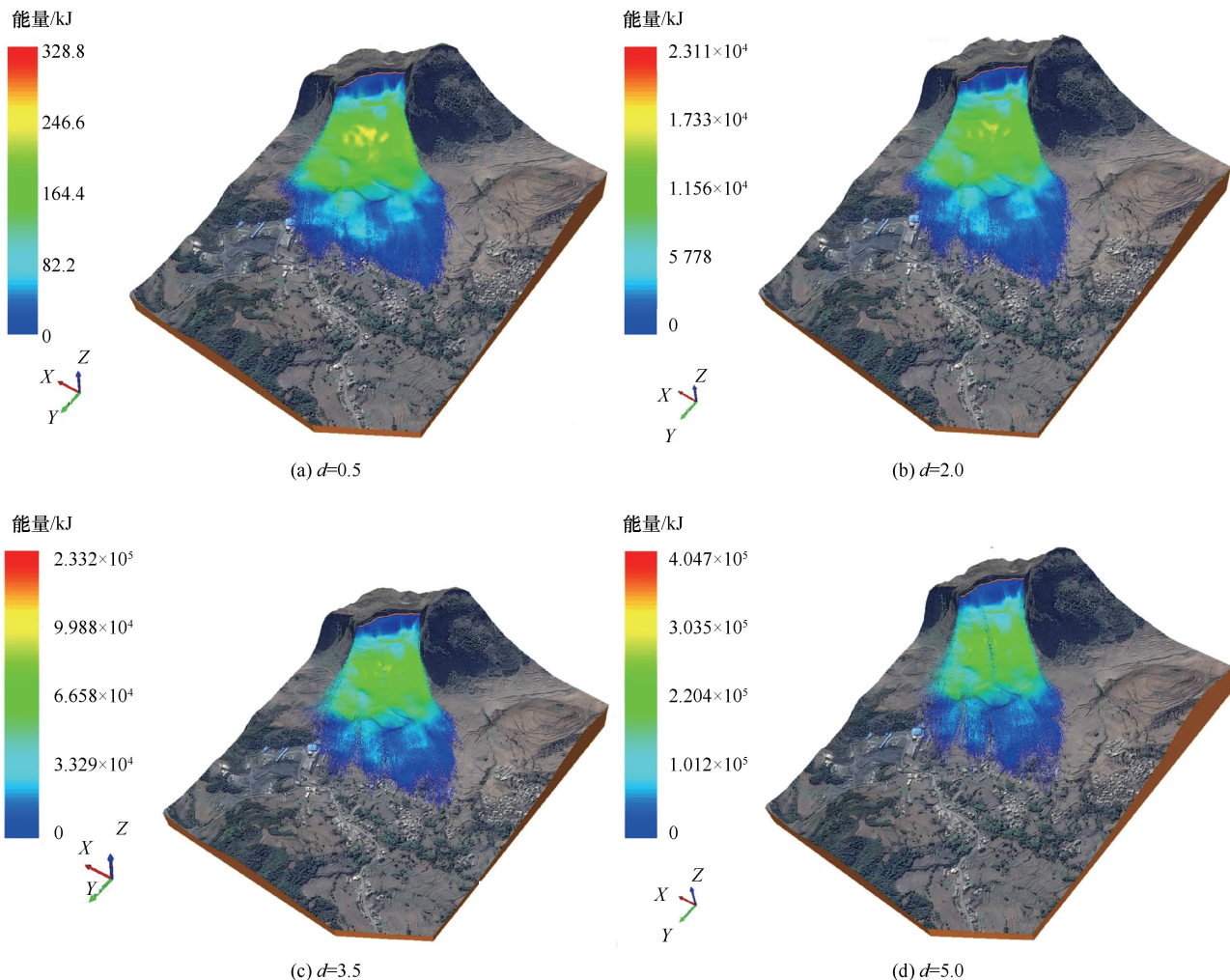


图7 0.5 m、2.0 m、3.5 m 和 5.0 m 粒径落石的能量分布

Fig. 7 Energy Distribution of Rockfall with Particle Size of 0.5 m, 2.0 m, 3.5 m and 5.0 m

最高速度分别达到了 72.49 m/s、74.55 m/s、80.54 m/s 和 82.3 m/s; 最高能量分别为 328.8 kJ、 2.311×10^4 kJ、 1.322×10^5 kJ 和 4.047×10^5 kJ。结果表明, 大粒径崩塌落石由于自身质量比小粒径崩塌落石的质量大, 在自由落体和飞行的过程中, 往往比小粒径落石更容易获得较大的速度和能量。受 II 处凸起台阶的影响, 第三分带的速度发生骤变, 速度很快从 30 m/s 附近降至 20 m/s 左右。这主要是大量高速度、高能量的崩塌落石在小山包坡表面的爬升与撞击过程中需要克服更大的摩擦阻力和冲击力, 导致速度被迫迅速衰减、能量被坡面大量吸收。由此可见, 凸起的微地貌对落石的运动速度和能量的影响较大。

利用基于数字影像的泥石流表面流测算系统, 对普洒崩滑过程的影像进行落石速度测算(见图 9)。通过设置主要的监测窗口, 对整个崩滑影像中的像素元变化进行分析, 可以近似得到某一时刻位置处的崩滑

体速度。测算结果显示, 崩塌源区同一高度的平均落石速度和模拟结果相近; 而落石在未到达 I—II 阶梯中部前, 仅在 I 位置处的平均速度就可以达到 30~40 m/s, 最高速度为 58.78 m/s。落石粒径为 2.0 m 时, 模拟得到的最大速度是测算最大速度值的 1.268 倍。为此, 三维模拟得到的落石运动速度和能量值是可靠的。

在崩塌落石运动过程中, RocPro3D 软件的弹跳高度测量, 是以落石的中心质点为起点, 计算质点与其垂直方向下的坡表面点之间的距离, 即落石与边坡发生碰撞后在垂直方向上的弹射高度或自由落体高度, 其与落石和坡面的材质、边坡的陡倾程度以及高差有关: 往往材质坚硬的崩塌落石在材质较坚硬的坡面上发生碰撞时, 弹跳效果较好^[34-35]; 边坡高度越高陡, 崩塌落石作无障碍式自由落体的时间越长, 弹跳高度越大。研究落石弹跳高度, 有利

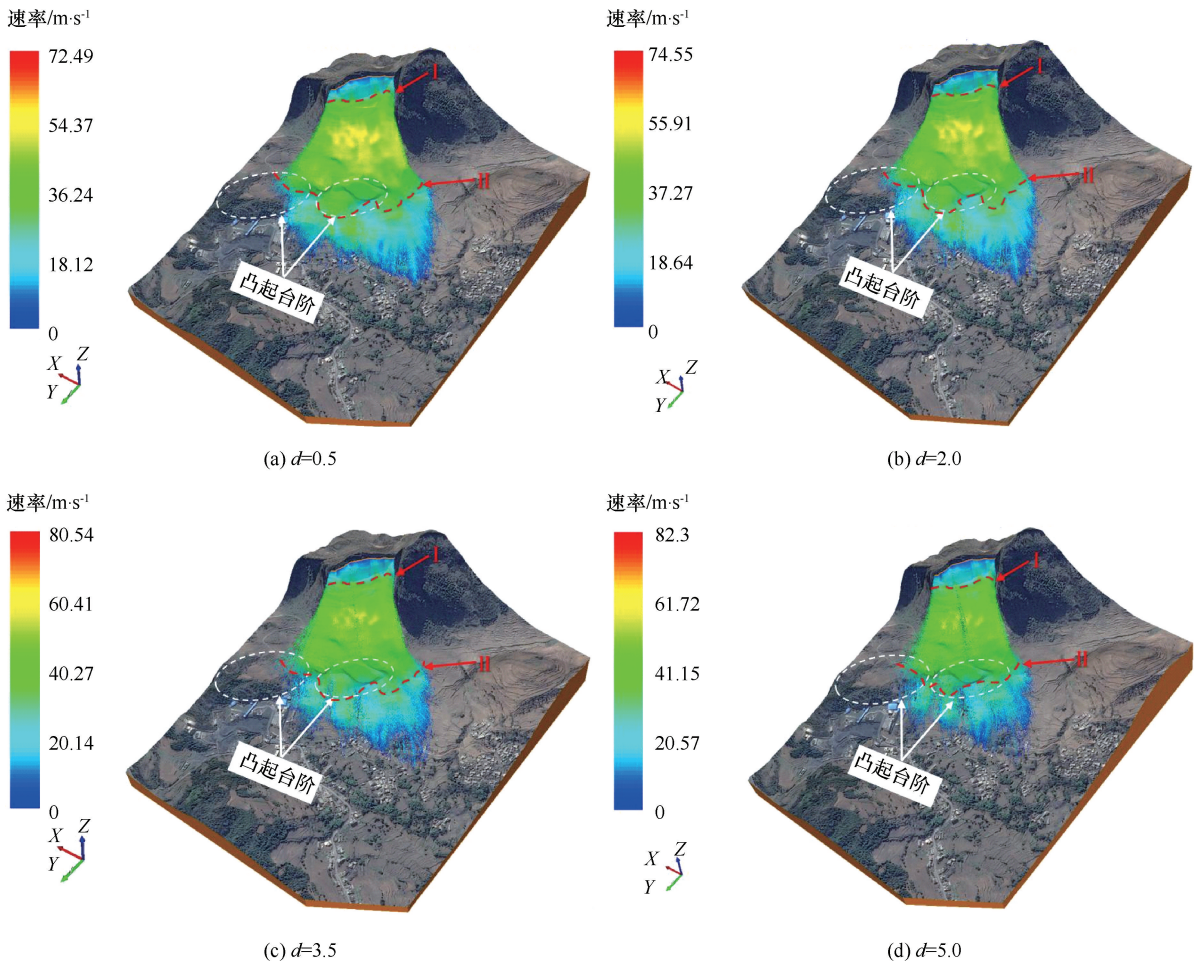


图 8 0.5 m、2.0 m、3.5 m 和 5.0 m 粒径落石的速度分布

Fig. 8 Velocity distribution of falling rocks with particle sizes of 0.5 m, 2.0 m, 3.5 m and 5.0 m

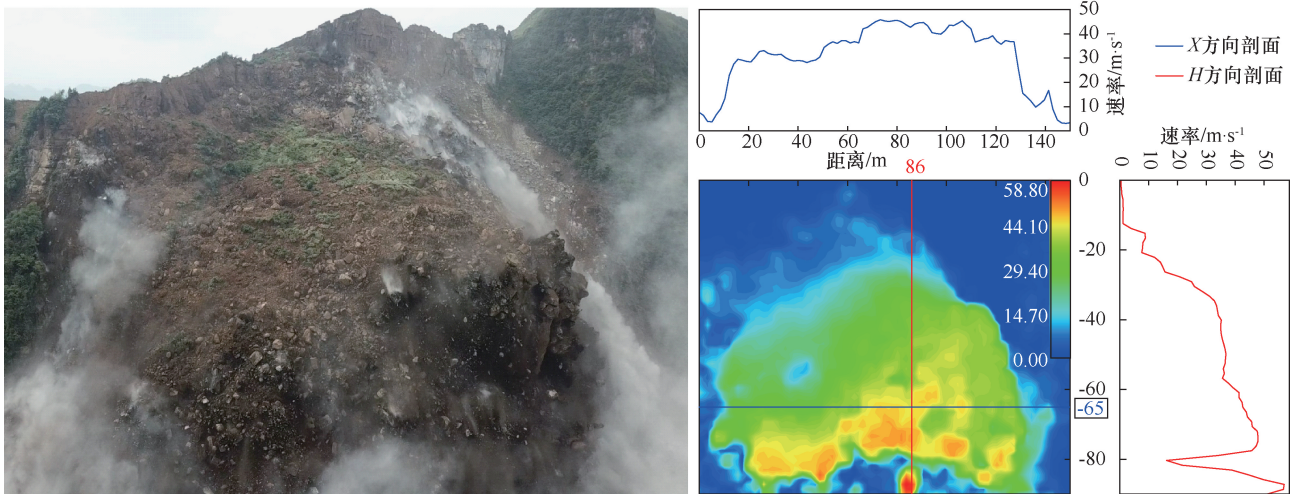


图 9 基于数字影像的崩滑速度测算

Fig. 9 Calculation of collapse velocity based on digital image

于工程师在修建落石拦截工程时, 确保落石的最大有效拦截率。

四种粒径的崩塌落石在运动过程中的弹跳高度分布情况如图 10 所示。从坡顶至 I 处高度差在 60 ~

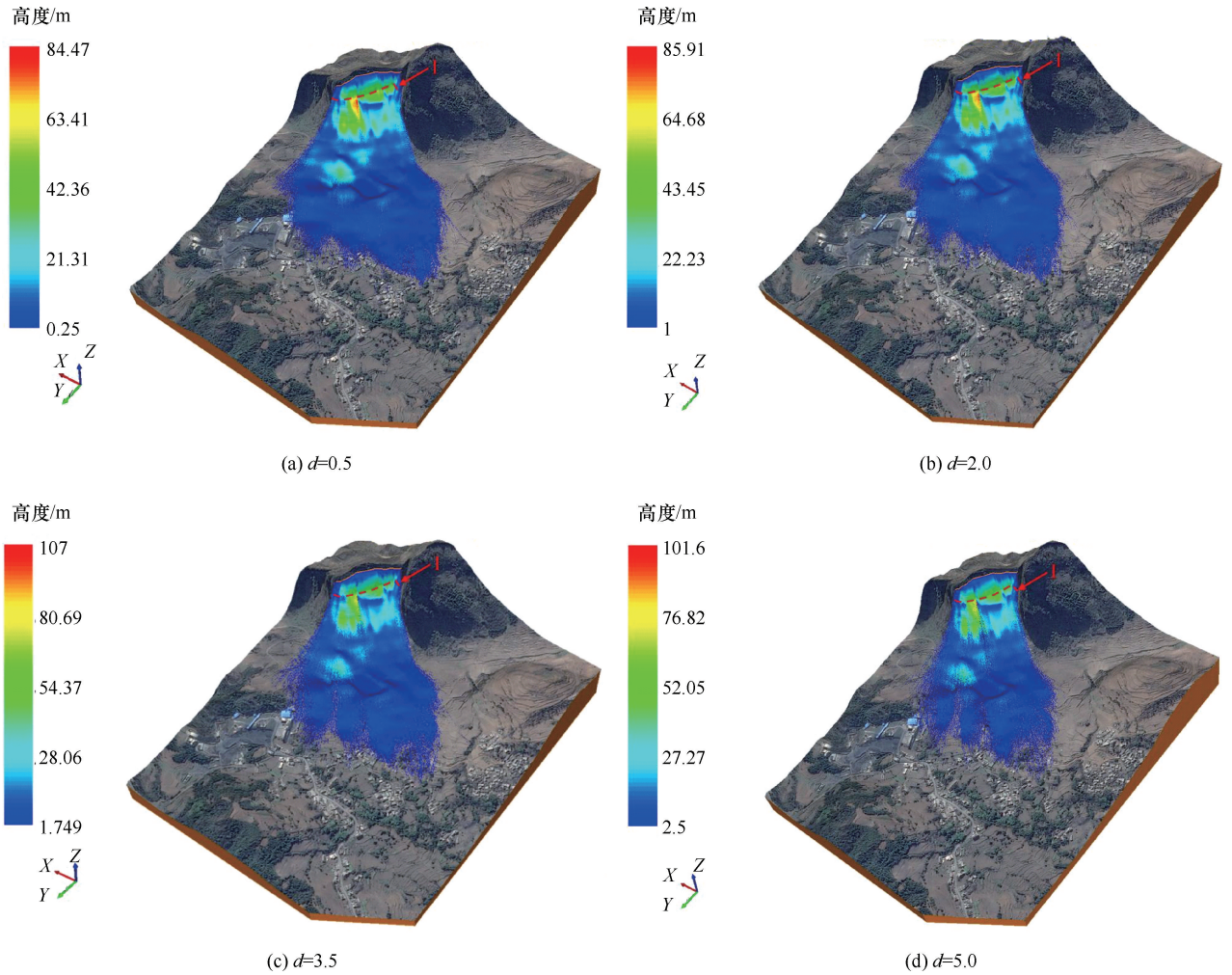


图 10 0.5 m、2.0 m、3.5 m 和 5.0 m 粒径落石的弹跳高度分布

Fig. 10 Distribution of bounce height of rockfall with particle sizes of 0.5 m, 2.0 m, 3.5 m and 5.0 m

90 m 间, 坡度接近直立, 落石以自由落体和飞行为主。因此, 崩塌源处的弹跳高度实际为崩塌落石的自由落体下落高度, 模拟的数值和陡崖高差相近。从图 7 可以看出, 崩塌落石在到达第一台阶上部时, 由于积累了较多的能量, 在 I 附近的弹跳高度较大。落石粒径为 0.5 m、2.0 m、3.5 m 和 5.0 m 时, 最大的弹跳高度分别为 84.41 m、85.91 m、107 m 和 101.6 m。随后落石沿着 310° 方向运动, 落石的弹跳高度逐渐减小。经过坡脚至小山包的区域后, 崩塌落石的弹跳高度基本为 0, 这主要是崩塌落石在经过第一台阶时发生大量摩擦、碰撞及冲击, 导致落石不再具备足够的弹跳高度, 运动模式由滚动—冲击弹跳模式转变为以滑动/滚动为主的运动模式。弹跳高度在落石运动过程中的变化, 表明落石在运移过程中发生了“自由落体—滚动/碰撞/冲击弹跳—滚动/碰撞/滑动摩擦”的运动模式转换。

3.3 崩滑体单落石运动特征分析

通过选取四种粒径落石的最远运动轨迹, 提取速度、能量等相关数据进行定量分析。图 11 标定了所选的崩塌落石运动轨迹(紫红色), 其中图 11(a)(b) 分别是四种粒径崩塌落石在运动过程中的速度、能量特征曲线。通过观察崩塌落石的运动轨迹速度和能量变化曲线可知, 四种粒径的落石的速度和能量变化趋势基本相同, 均呈锯齿状。可以看出, 大粒径崩塌落石的能量远大于小粒径崩塌落石的能量, 这与上述分析基本一致。在落石启动位置至①位置处, 粒径为 0.5 m、2.0 m、3.5 m 和 5.0 m 的崩塌落石的速度变化趋势基本同步且相似, 但①位置后落石的速度衰减存在明显差异: 大粒径崩塌落石的速度衰减速率比小粒径崩塌落石的速度衰减速率快, 形成该现象的原因将在下文进行分析。

图 11(c)(d) 为四种不同粒径崩塌落石在运动过程中的加速度和弹跳高度曲线, 可以看出, 崩塌落石

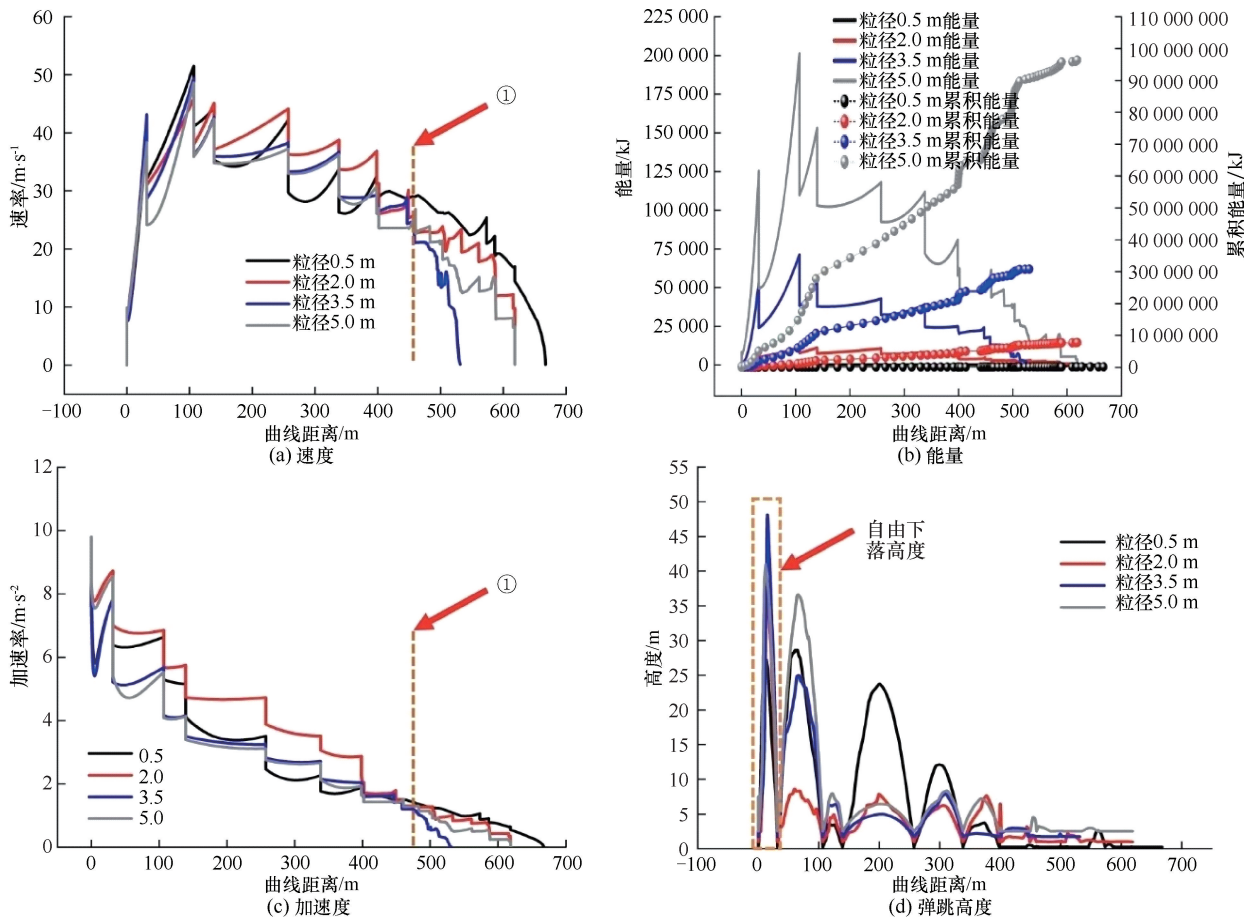


图 11 0.5 m、2.0 m、3.5 m 和 5.0 m 粒径落石的速度、能量、加速度和弹跳高度特征曲线

Fig. 11 Motion characteristic curve of rockfall with 0.5 m, 2.0 m, 3.5 m and 5.0 m particle size

从最高处开始坠落时, 加速度基本等于重力加速度值 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$, 且为最大值。四种粒径的崩塌落石在不断经历碰撞弹跳飞行摩擦后, 加速度均呈阶梯状迅速衰减。落石到达 450 m 附近(①位置)时, 四种粒径崩塌落石的加速度衰减速率明显不同: 大粒径崩塌落石的加速度衰减速率明显要比小粒径崩塌落石的加速度衰减速率快。这主要是由于①位置刚好位于是凸起小山丘附近, 落石“翻越”过小山包后, 落石运动基本上是以滚动摩擦和滑动摩擦为主, 大粒径崩塌落石受到的摩擦阻力相对较大, 导致加速度和速度的衰减速率都较快。这表明, 在崩塌落石的自由落体、滚动/弹跳冲击阶段, 落石粒径的大小对加速度的影响较小, 加速度的变化和地面物质特征及地形地貌变化有关; 在滑动/滚动阶段, 粒径大小对崩塌落石的加速度衰减速率影响较大。

4 结 论

选取“8·28 普洒崩塌”为研究对象, 通过野外

调查及勘查资料, 利用 PCAS 系统统计了块体粒径分布特征, 分析了边坡变形历史, 利用 AcrGIS、Rhino 7.0 和 RocPro3D 软件等技术, 构建了崩塌山体的三维实景地质模型, 并采用不同粒径对张家湾崩滑过程进行了模拟, 分析了落石的运动特征, 其主要认识如下。

(1) 通过 PCAS 统计分析了崩滑体颗粒特征, 0~2 m 的粒径占绝大部分, 大于 5 m 的巨型颗粒占比较少。

(2) 块体粒径影响落石运动。以 1.5 m 为梯度, 在 2.0 m 的基础上设置了 0.5 m、2.0 m、3.5 m 和 5.0 m 四种粒径落石开展数值模拟, 结果发现: 落石运动过程中, 大粒径落石的能量耗散速度比小粒径的能量耗散速度快, 小粒径落石的运动距离要比大粒径落石的运动距离远, 结果与现场堆积分布情况基本一致。

(3) 微地貌对落石运动有影响。在堆积区凸起台阶处, 第三分带的速度发生骤变, 速度很快从 30 m/s 附近降至 20 m/s 左右, 凸起的微地貌对落石的运动

