

武汉大学学报(信息科学版)

Geomatics and Information Science of Wuhan University

ISSN 1671-8860, CN 42-1676/TN

## 《武汉大学学报(信息科学版)》网络首发论文

题目: 一种利用 Unity3D 模拟崩塌三维运动全过程的方法  
作者: 王豪, 黄健, 黄祥, 袁镜清, 贺子城  
DOI: 10.13203/j.whugis20210237  
收稿日期: 2021-05-17  
网络首发日期: 2021-09-15  
引用格式: 王豪, 黄健, 黄祥, 袁镜清, 贺子城. 一种利用 Unity3D 模拟崩塌三维运动全过程的方法. 武汉大学学报(信息科学版).  
<https://doi.org/10.13203/j.whugis20210237>



**网络首发:** 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认:** 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

引用格式：

王豪，黄健，黄祥，等. 一种利用 Unity3D 模拟崩塌三维运动全过程的方法[J].武汉大学学报·信息科学版，2021，DOI: 10.13203/j.whugis.20210237 (WANG Hao, HUANG Jian, HUANG Xiang, et al. A Method of Using Unity3D to Simulate the Whole Process of Three-dimensional Movement of Rockfall [J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2021， DOI: 10.13203/j.whugis.20210237)

一种利用 Unity3D 模拟崩塌三维运动全过程的方法

王豪<sup>1</sup> 黄健<sup>1</sup> 黄祥<sup>1</sup> 袁镜清<sup>1</sup> 贺子城<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 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

**摘要：**随全球气候变化，高位崩塌灾害频发，造成了巨大人员伤亡与财产损失。然而，当前崩塌模拟软件尚存明显的不足，如地形精度较低、未考虑岩体结构特征及无法实现块体运动过程中碰撞碎裂等现象，且利用中央处理器（Central Processing Unit，CPU）的运算效率较低也限制了模拟的崩塌规模。为此，急需一种能更真实反映崩塌运动过程的快速模拟方法。本文利用无人机摄影技术，结合现场调查，提取危岩岩体结构特征，建立精细化的崩塌地质-力学模型；利用集成 PhysX 物理引擎与中央处理器-图形处理器（Central Processing Unit-Graphics Processing Unit，CPU-GPU）并行计算能力的 Unity3D 平台，研发了大规模崩塌运动过程模拟软件，再现崩塌坠落-撞击-碎裂-堆积的全过程；系统可输出崩塌三维运动轨迹、速度、能量及弹跳高度，为崩塌防治设计提供依据。以贵州纳雍谢家岩崩塌为原型案例，开展崩塌运动过程三维模拟与验证，模拟结果显示落石堆积范围与现场调查坡底落石堆积范围较吻合，单体块石运动特征符合现实规律，表明本方法的可行性与实用性。

**关键词：**崩塌；无人机；运动模拟；物理引擎；可视化

收稿日期：2021-05-17

项目资助：国家创新研究群体科学基金(41521002)

第一作者简介：王豪，硕士研究生，主要从事无人机倾斜摄影及崩塌灾害方面的研究. E-mail:964861905@qq.com

通讯作者简介：黄健，博士，副教授，主要从事地质工程和岩土工程的教学和科研工作. E-mail: hjian.2010@qq.com

# 引言

崩塌是一种山区常见地质灾害类型,具有显著的隐蔽性、突发性及灾难性特征,易造成人员伤亡与财产损失<sup>[1,2]</sup>。随着全球气候恶化加剧,已在我国西南地区出现了多起重大崩塌灾害。如2013年2月18日贵州凯里龙场镇山体发生大规模崩塌,体积达 $3\times 10^4\text{m}^3$ ,掩埋房屋数间,造成5人失踪,转移安置21户79人<sup>[3]</sup>。2017年8月28日,贵州省纳雍县张家湾镇普洒村发生山体崩塌,方量约 $6\times 10^5\text{m}^3$ ,造成35人遇难<sup>[4]</sup>。2017年6月24日四川省茂县叠溪镇新磨村发生高位滑坡,体积约 $4.5\times 10^6\text{m}^3$ ,造成新磨村64户农房被埋,10人死亡、73人失踪,堵塞了1000多米的河道<sup>[5]</sup>。可见,山区工程修建中与运营阶段都将面临着长期的崩塌灾害风险。

对于崩塌运动过程力学机制与运动特征的研究主要有现场试验、模型试验和数值模拟方法<sup>[6-10]</sup>。数值模拟具有成本低、简便及可移植性强优势,常被用于崩塌运动过程模拟评估。但现有数值模拟方法尚存明显不足,如二维数值模拟软件Rockfall常被用于落石运动距离、弹跳高度及动能计算方面,但需人为指定地形剖面,不能真实反映落石运动轨迹<sup>[11]</sup>;Rockfall Analyst是ArcGIS二次开发组件,能够实现崩塌运动轨迹模拟、风险制图等方面的自动化、半自动化分析,但忽略落石碰撞、碎裂现象<sup>[12]</sup>。CRSP-3D是美国联邦公路管理局相关的工程项目中指定的崩塌模拟程序,但没有考虑岩体结构特征,且无法准确设定危岩位置<sup>[13]</sup>,在模拟大规模崩塌运动方面存在着一定局限<sup>[14]</sup>。另外,崩塌定量风险评价中需要运动距离、弹跳高度、冲击力等关键参数。因此,进一步研究崩塌运动过程精细模拟,具有重要的科学意义与社会价值。

Unity3D引擎是由丹麦Unity Technologies公司开发的一套包括图形、声音、物理等功能的集成开发环境。相较于传统三维引擎,Unity3D具有支持模型格式广泛、资源导入方便、可视化展示效果更好且可通过编写脚本实现所需功能的特点,更加适用于进行崩塌灾害仿真模拟<sup>[15]</sup>。该引擎集成的PhysX物理引擎是基于刚体动力学理论开发,可同时检测多个物体连续碰撞,模拟刚体弹跳、滚动和滑动等物理效果,实现求解运动速度、能量及获得运动轨迹等功能<sup>[16]</sup>。PhysX不仅能充分利用CPU的多核计算性能,还引入了GPU物理加速技术,CPU

结合GPU的异构并行计算能力能提高大规模崩塌运动过程三维模拟计算效率。在Unity3D引擎中,为几何模型添加刚体、碰撞体等物理属性或者添加自定义代码功能即可实现物理建模,PhysX物理引擎将准确计算真实的物理效果。李维炼进行了泥石流灾害的VR场景融合建模以及交互方法研究,初步实现了在地质灾害领域的应用<sup>[17]</sup>。Chiu利用Unity3D制作了滑坡运动场景,并将其上传Web端和移动平台,实现了在地质灾害科普教育中的应用<sup>[18]</sup>。但是,上述应用尚没有引入物理引擎技术,造成了模拟结果缺乏物理属性支撑,效果较差。

鉴于此,本文在大量崩塌原型案例调查基础上,引入物理引擎技术,构建崩塌动力学理论与计算机模拟技术之间的对应关系,研发基于Unity3D的崩塌运动过程三维模拟系统,实现了崩塌运动过程中撞击碎裂物理过程。应用该系统,对贵州谢家岩崩塌进行模拟反演分析,验证了系统的可靠性与适用性,可为山区崩塌灾害防控提供一种新的技术手段与评价方法。

## 1 崩塌动力学理论与模拟方法

崩塌运动过程模拟主要是模拟落石和斜坡之间的相互作用,可能涉及多次碰撞、反弹、滚动、滑动及撞击碎裂过程<sup>[19]</sup>。在进行崩塌运动过程数值模拟时将岩块与坡体视为刚体,刚体间相互碰撞中的能量损失通常使用包含摩擦和恢复系数的接触函数来处理<sup>[20]</sup>,摩擦和恢复系数在Unity3D引擎中是利用物体所赋物理材料的参数进行有效控制<sup>[21]</sup>。物理材料允许用户通过物理引擎PhysX使用的动摩擦系数、静摩擦系数和弹跳系数来控制物体之间的交互。根据碰撞前的运动状态以及斜坡和落石物体的几何形状,每次碰撞可能包含多个接触点(图1)。在图1中, $V$ 和 $\omega$ 变量代表入射(i)和回弹(r)的线速度和角速度。可知,碰撞后弹离坡表的块体的线速度和角速度取决于每次碰撞中所有接触点的速度在接触和摩擦约束下的迭代解的乘积。

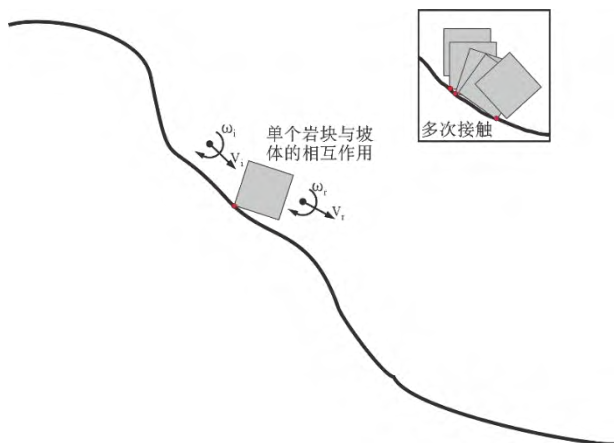


图 1 多次接触的概念图，以及在单一岩石-斜坡相互作用过程中产生的接触点。

Fig.1 Conceptual Diagram of the Multiple Collisions, and Contact Points Generated During a Single Rock-slope Interaction.

每次接触的线速度和角速度，取决于摩擦和恢复方程。在碰撞过程中，摩擦系数( $\mu$ )用于确定模拟落石面和坡面之间的法向力( $N$ )的比例，该比例用于计算块体运动时的摩擦力。摩擦力( $F_f$ )的作用方向与输入速度矢量的切向分量相反。对每次接触中的摩擦力求解，并利用其计算接触后的线速度和角速度。在标准摩擦角定义下，摩擦系数与摩擦面的粗糙度和摩擦角有关，摩擦角( $\varphi$ )的正切值也称静摩擦系数( $\mu$ )。在 Unity 环境中，表面碰撞被分解为两个接触点，导致所施加的摩擦力加倍<sup>[22]</sup>。因此，有效摩擦角等于单位摩擦系数两倍的反正切角(公式 1)。每个接触点施加的摩擦力以及摩擦系数和摩擦角之间的转换关系如公式 2 所示。这与应用于速度切向分量的动摩擦系数不同，恢复系数  $R_v$  仅在法线方向起作用。该系数等于物体每次碰撞前后相对速度的比值(公式 3)。

$$\varphi = \arctan(2\mu) \quad (1)$$

$$F_f = \mu * \vec{N} \quad (2)$$

$$R_v = \frac{\vec{v}_t}{\vec{v}_r} \quad (3)$$

在分析了引擎的摩擦和恢复系数后，为了模拟落石运动中与坡体撞击碎裂及块体间相互撞击碎裂的过程，在引擎中通过使用一个称为“固定关节”的组件(图 2)连接岩块对象。被固定关节连接的两个岩块对象受到约束限制，既不能向任何方向相对移动，也不能向任何方向相对转动。在所受外力未达到固定关节断裂力阈值情况下保持相对静止运动；若岩块所受外力超过阈值，则固定关节断开，两个岩块对象不再受其限制约束相互分离。可实现模拟

岩块受外力超过结构面强度而导致的结构面断开。

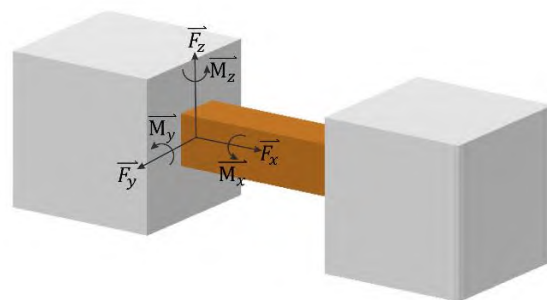


图 2 固定关节示意图。M 和 F 表示约束力矩和约束反力  
Fig.2 Schematic Diagram of Fixed Joint. M and F Represent the Restraining Moment and Constraint Reaction

## 2 崩塌运动过程三维模拟

崩塌三维运动过程模拟软件由坡体地表模型构建、危岩体精细建模、崩塌运动过程模拟三个模块构成，其技术路线流程如图 3 所示。

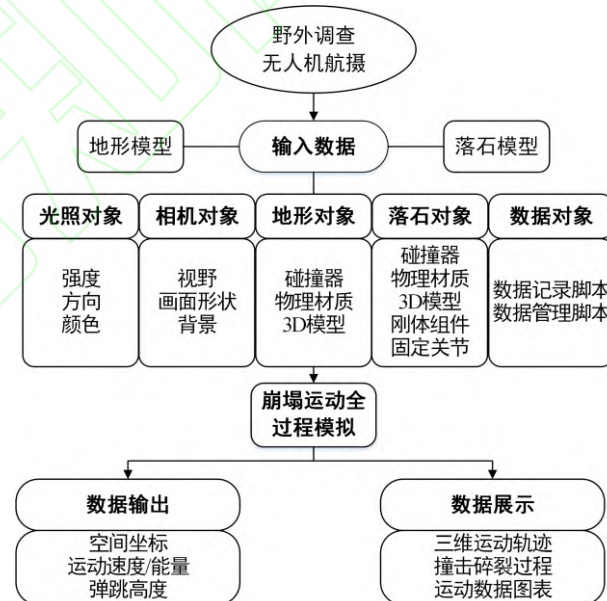


图 3 软件技术路线流程图

Fig.3 Flow Chart of Software Technology Route

### 2.1 坡体地表模型构建

坡体地表模型的构建有多种方式，包括读取灰度图生成地形模型、根据地形图用 Sketch Up 软件制作三维模型等方法。本文在现有方法基础上，提出了一种简便而准确的坡体地表模型构建方法。首先在研究区进行无人机航空摄影测量获取数字影像，对影像进行匀色畸变校正后导入 Context Capture 进行空中三角测量，新建重建项目构建 FBX 格式的三角网模型及 JPG 格式纹理贴图，继而将模型及贴图导入 Unity3D 中，调整坐标并添加碰撞体组件以完



成坡体地表模型的构建。

2.2 危岩体精细建模

危岩体是崩塌运动模拟的主体，需要精确设定各项参数以贴近实际情况以保证运动模拟效果的准确性<sup>[23]</sup>。开发无人机倾斜摄影结构面产状测量程序，该程序使用 C++语言开发，使用 OSG 引擎作为三维渲染引擎。利用 OSG 提供的 OSGB 格式模型加载插件,可直接将模型加载到场景中。在用户交互方面采用 QTGUI 作为 GUI 开发的底层依赖库,设计如图 4 的软件。用户加载模型后，选取较平整结构面上不共线的三个点，软件即可读取三点空间坐标并利用三点法<sup>[24]</sup>进行结构面产状计算。

无人机解译结合现场调查可以提取历史崩塌落石分布特征、岩体结构面特征、崩塌源区危岩体特征等信息，最终确定危岩体模型形状、尺寸、空间位置、空间姿态。落石在运动过程中的能量损失主要是由于摩擦和恢复，PhysX 物理引擎支持动摩擦系数、静摩擦系数及恢复系数的设定，通过多次调整参数值并进行模拟测试,最终确定各项物理参数。并依据上述参数在 Unity3D 中制作危岩体模型。坡体地表模型与危岩体模型共同构成崩塌灾害场景，是后续崩塌运动过程模拟及三维可视化展示的基础。



图 4 结构面产状测量程序界面

Fig.4 Interface of Structural Plane Occurrence Measurement Program

无人机解译结合现场调查可以提取历史崩塌落石分布特征、岩体结构面特征、崩塌源区危岩体特征等信息，最终确定危岩体模型形状、尺寸、空间位置、空间姿态。落石在运动过程中的能量损失主要是由于摩擦和恢复，PhysX 物理引擎支持动摩擦系数、静摩擦系数及恢复系数的设定，通过多次调整参数值并进行模拟测试,最终确定各项物理参数。并依据上述参数在 Unity3D 中制作危岩体模型。坡体地表模型与危岩体模型共同构成崩塌灾害场景，是后续崩塌运动过程模拟及三维可视化展示的基础。

2.3 崩塌运动过程模拟及参数提取

崩塌运动过程模拟是软件核心功能模块，模拟危岩体从失稳下落到停止于坡底的运动全过程并获取其运动特征参数。具体实现路径为：利用 C#编写脚本程序获取物体三维坐标、速度、距下垫面距离等运动特征参数，并将该脚本程序添加到每一个危岩块体，将数据分类输出到表格文件，最终对数据进行分析处理得到动能、块石运动路径、块石运动路径下的地面高程等信息。

3 应用实例

3.1 基本概况

(1) 工程地质条件

谢家岩崩塌点属构造侵蚀剥蚀低中山地貌，该边坡坡脚高程约 1740m，坡顶高程为 1884m，危岩体分布高程约 1840m，相对高差 140~150m(图 5)。岩层倾向为 189°~193°，边坡倾向约 228°。该边坡属反向坡，岩层倾角 8°~18°。该边坡上陡下缓，上部岩壁坡角 70°~85°，形成陡崖，灰岩裸露，植被不发育，崖壁上部及崖顶发育大量危岩体；下部崩坡积物形成岩堆，覆盖于斜坡表面，坡角 15°~25°，斜坡被低矮灌木覆盖。坡底散落着早期崩塌块石，目前已建被动防护网，保护坡下居民房屋。

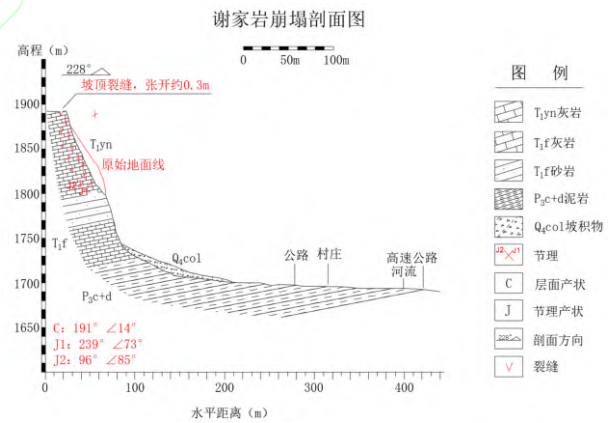


图 5 谢家岩崩塌工程地质剖面图

Fig.5 Engineering Geological Profile of Xiejiayan Collapse

(2) 历史崩塌落石的分布特征

谢家岩历史上有多次崩塌事件发生，坡面和坡底都有大量的落石堆积。通过现场实地调查及无人机航拍影像解译，发现坡底及两侧树林是大粒径崩塌块石的主要堆积区，块石堆积区全貌如图 6 所示。



图 6 崩塌堆积区及岩体结构面产状

Fig.6 Accumulation Area of Rockfalls and Joints Occurrence of Rock Mass

根据坡底堆积的块石数量与尺寸分布特征可知，体积在  $1.0\sim 5.0\text{m}^3$  的块石数量最多。其中，最大块石体积可达  $24\text{m}^3$ 。对比坡底情况，坡面上的落石块体数量更多，体积更小，坡面上大部分块石体积小于  $1\text{m}^3$ 。

### (3) 崩塌源区危岩体结构特征

岩体结构面特征对危岩体的形成起控制作用。利用自研结构面产状测量程序，加载无人机倾斜摄影建立的三维模型并进行产状数据的提取。由于危岩带中的三组主控结构面 C、J<sub>1</sub> 和 J<sub>2</sub> 在三维模型中出露明显且表现为平直的平面，可以选择每组结构面平面上不在同一直线上的三个点，利用三点法计算得到结构面产状。每组控制结构面进行 100 次测量，获得 100 条产状信息，结合现场实测各结构面产状信息对软件测量结果进行检验，倾向的误差平均值为  $3.7^\circ$ ，倾角的误差平均值为  $4.5^\circ$ ，与实测产状相差不大，并作出各产状对应的极射赤平投影极点图（图 7）。

从图 7 中可得，每组结构面的产状信息分布比较集中，离散度较小。计算每组结构面 100 条产状信息的平均数，可得三组结构面的产状特征值分别为 C:  $191^\circ\angle 14^\circ$ ，J<sub>1</sub>:  $239^\circ\angle 73^\circ$ ，J<sub>2</sub>:  $96^\circ\angle 85^\circ$ ，并且绘制特征产状对应的上半球极射赤平投影。

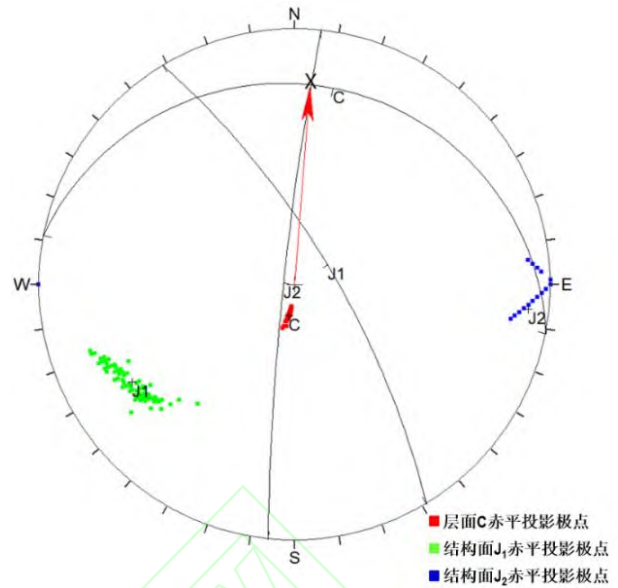


图 7 岩体结构面上半球极射赤平投影图

Fig.7 The Stereographic Projection of Rock Mass Structural Plane in Upper Hemisphere

谢家岩崩塌边坡上段坡度较大，近直立，岩体被三组主要结构面切割为块体，其中 J<sub>1</sub> 切割后形成岩体临空面。根据结构面的组合情况可以初步确定潜在崩塌体边界、规模和运动方向。J<sub>1</sub> 为临空面，C 和 J<sub>2</sub> 两组结构面相交于 X 点，OX 连线与 J<sub>1</sub> 倾向同一侧，并且倾角小于 J<sub>1</sub> 临空面的倾角，可得危岩体在 J<sub>1</sub> 临空面方向上是不稳定的。危岩主要分布危岩带的顶部及崖壁浅表部，其中，坡顶孤立式危岩数量较多，稳定性极差，失稳方式以拉裂-坠落式为主。

崩塌源区位于坡体顶部危岩带，危岩体被 3 组主要结构面组合切割为不同大小的块体，块体大小由结构面的间距控制。通过解译无人机摄影测量成果，针对体积大于  $0.1\text{m}^3$  的危岩体进行了统计，获得危岩区岩体结构面间距及危岩体体积如表 1 所示。统计结果与历史崩塌落石体积对比，危岩体的体积主要集中在  $0.5\sim 4\text{m}^3$  范围内，在坡底堆积的历史崩塌落石的体积主要集中在  $0.5\sim 5\text{m}^3$  范围内，二者有很强的关联性。

表 1 危岩带岩体结构面间距及危岩体体积

Tab.1 Structure Plane Spacing and Volume of Dangerous Rock Mass in Dangerous Rock Zone

	C 层面间距/m	J <sub>1</sub> 结构面间距/m	J <sub>2</sub> 结构面间距/m	危岩体体积/ $\text{m}^3$
范围	0.3~4.0	0.3~5.0	0.5~6.0	0.045~120
平均	1.3	1.8	2.5	5.85

### 3.2 崩塌运动全过程模拟

利用崩塌运动全过程模拟软件，结合研究区基础数据，对谢家岩崩塌运动全过程进行模拟及分析。



### (1) 数据准备

使用软件进行崩塌运动全过程模拟需要准备的数据主要包括两部分：坡体数据和危岩体特征参数。坡体数据主要是无人机航空倾斜摄影建立的数字地表模型。

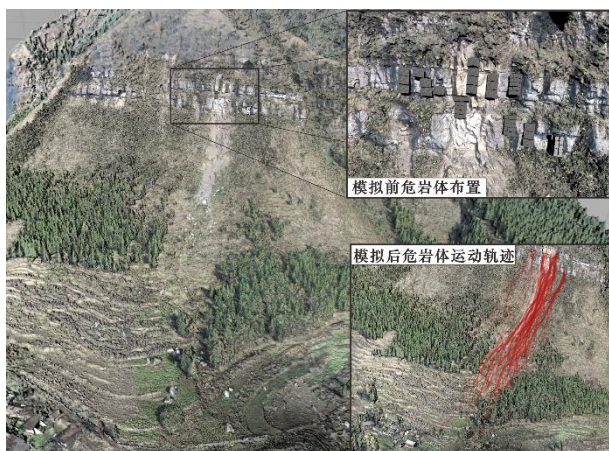


图 8 谢家岩崩塌运动全过程模拟

Fig.8 Whole Process Simulation of a Collapse Movement in Xiejiayan

危岩体数据包括块体形状、尺寸、密度、结构面抗剪强度、动摩擦系数、静摩擦系数、弹跳系数。选用立方体作为块体形状的原因是其更接近于研究区域的落石形状及危岩带中结构面组合切割形成的块体形状。d1、d2 和 d3 表示危岩体的尺寸，依据危岩带岩体结构面间距及历史落石块体尺寸特征选取。综合室内实际测量及工程类比确定灰岩密度  $2.26\text{g/cm}^3$ ，综合软件内模拟实验及室内剪切试验将固定关节断裂力阈值设置为  $1000\text{N}$ 。斜坡表面特征参数则是通过模拟实验对参数进行反演测试，确定动摩擦系数为  $0.3$ ，静摩擦系数为  $0.3$ ，弹跳系数为  $0.6$ 。依据历史崩塌源区位置以及控制结构面产状确定危岩体的空间位置及形态。综上，危岩体特征参数取值如表 2 所示。

表 2 危岩体特征参数设定

Tab.2 Setting of Characteristic Parameters of Dangerous Rock Mass

形状	d1/md2/md3/m	密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	固定关节断裂力	动摩擦	静摩擦	弹跳
			阈值	系数	系数	系数
立方体	3	3	3	2.26	100	0.3
	1.5	1.5	1.5			

### (2) 模拟运动过程

崩塌运动过程模拟结果如图 9 所示。以 75 号岩块为例，可见该岩块所属危岩体失稳后首先表现为重力作用下的自由落体运动，在撞击在下部裸露岩体后，岩块受力超过结构面抗剪强度，结构面断裂

形成三块独立岩块继续滚动。75 号岩块与坡面接触碰撞后发生弹跳，由于坡度较陡，下落后又与坡面碰撞发生了三次碰撞弹跳后到达坡底地形较缓地带。在四次高度较低的碰撞弹跳后，沿着坡面滚动一段距离，在坡表摩擦力的作用下最终停止，未达到被动防护网。

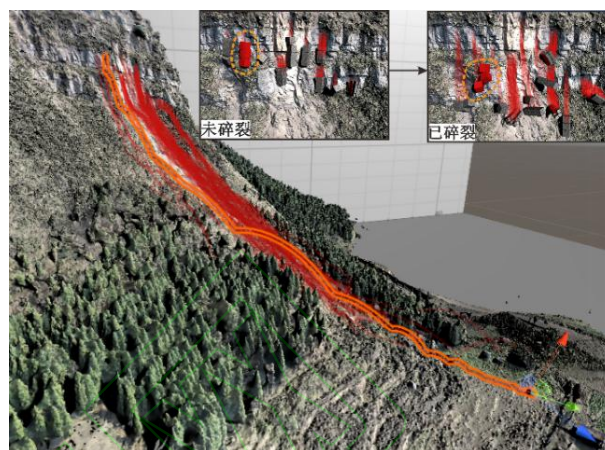


图 9 75 号岩块运动全过程

Fig.9 Whole Movement Process of No.75 Rock Block

### 3.3 结果分析

在崩塌灾害影响范围方面，通过模拟可以获得每个危岩块石的三维运动路径，从而反映块石运动的方向、空间位置以及与特定地物发生碰撞的可能性。观察多个块石运动路径的疏密程度以及块石与坡表接触点的统计，能够得到坡表各个区块遭受块石碰撞的频数。模拟落石堆积范围结果与现场调查坡底落石堆积范围较吻合。

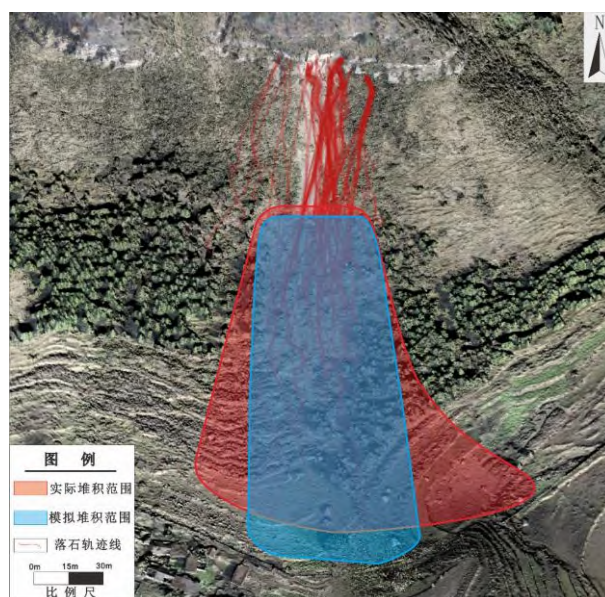


图 10 落石堆积范围对比

Fig.10 Comparison of Rockfall Accumulation Range

在单体块石运动特征方面，软件模拟落石的运动过程符合现实物理规律。模拟落石运动全过程中

速度的变化特征为：块石在重力作用下失稳，沿坡面向坡下运动的过程中由于重力势能转化为动能而逐渐加速；块石在与坡面碰撞过程中，考虑恢复系数的影响而速度降低，弹起时动能转化为重力势能而导致速度降低，下落过程中又会逐渐加速；最终在动摩擦力的作用下逐渐减速至停止。在坡度较陡的位置坡降较大，块石在撞击到地表凸出点后弹跳高度也较大，当达到坡体中部时动能达到最大，最大的弹跳高度也通常出现在此处。

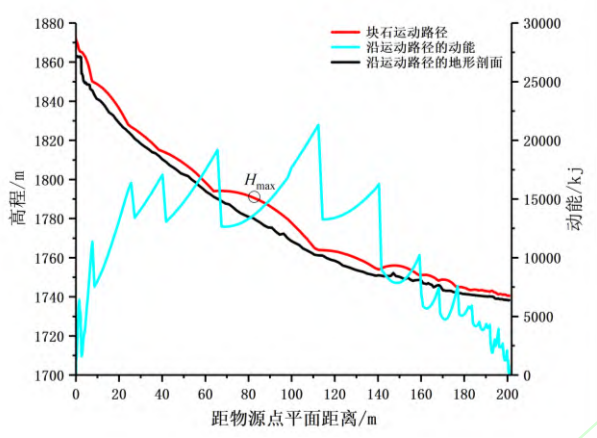


图 11 75 号岩块运动路径下地形剖面及动能的变化  
Fig.11 Changes of Terrain Profile and Kinetic Energy on the Movement Path of Block 75

根据对历史崩塌的实地调查及走访当地居民，谢家岩曾发生多次崩塌灾害，危岩带岩体结构破碎，形成充足的物源，在暴雨、地震等触发因素下可能会继续发生崩塌，数值模拟结果可以为崩塌的防治提供支持。根据崩塌灾害影响范围、块石运动路径以及最终堆积范围，能够确定防治工程设置范围。根据块石运动路径上距坡体表面的高度及动能大小，能够为防治工程的高度及防护强度设计提供依据。

## 4 结论

针对西南山区地质灾害频发且常见崩塌模拟软件存在较大局限性的挑战，本文提出了一种通过 Unity3D 引擎构建崩塌灾害场景并利用物理引擎模拟崩塌落石运动全过程的方法，在此基础上开发了一款崩塌运动全过程模拟软件。

(1)根据无人机航空摄影建模结合实地调查获取危岩体及落石特征数据，结合反演分析确定危岩体模型各项参数，构建危岩体地质-力学模型。利用无人机倾斜摄影建模制作坡体三维地表模型并导入 Unity3D 构建坡体模型。利用 Unity3D 集成的 PhysX 物理引擎进行 CPU-GPU 高性能并行计算崩塌运动

过程数值模拟，编写程序获取崩塌影响范围及落石运动特征，最终对数据进行分析处理得到动能、块石运动路径、块石运动路径下的地面高程等信息，能够为崩塌灾害防治工程设计及评价提供支持。

(2)应用该软件在谢家岩进行崩塌运动全过程模拟，得到的落石运动全过程三维路径相比传统二维数值模拟仅选取单剖面方向模拟更为准确，且考虑了岩体结构特征及撞击碎裂过程。模拟落石堆积范围结果与现场调查坡底落石堆积范围较吻合。

(3)利用 Unity3D 引擎的漫游功能及场景渲染能力，实现了崩塌灾害全过程三维动态可视化展示，具有真实感、直观性更强的特点。在保证数值模拟结果准确的同时，能够大大提高用户对崩塌灾害场景的认知与交互，满足地质灾害管理部门高效获取信息进行决策的要求。

## 参考文献(References) :

[1] Xu Qiang, Dong Xiujun, Li Weile. Integrated Space Air Ground Early Detection, Monitoring and Warning System for Potential Catastrophic Geohazards[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(7): 957-966. (许强,董秀军,李为乐.基于天-空-地一体化的重大地质灾害隐患早期识别与监测预警[J].武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(7): 957-966.)

[2] Chen Hongkai, Dong Ping, Tang Hongmei. The Status Quo and Trends of Perilous Rock and Collapse Disaster[J]. *Journal of Chongqing Normal University(Natural Science)*, 2015,32(6):53-60+2. (陈洪凯, 董平, 唐红梅. 危岩崩塌灾害研究现状与趋势[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2015, 32(6): 53-60+2)

[3] 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(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)

[4] Zheng Guang, Xu Qiang, Ju Yuanzhen, et al. The Pusacun Rockavalanche On August 28,2017 In Zhangjiawan Nayongxian, Guizhou: Characteristics And Failure Mechanism.[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2018,26(1):223-240(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)

[5] Xu Qiang, Li Weile, Dong Xiujun,et al. The Xinmocun landslide on June 24, 2017 in Maoxian, Sichuan: characteristics and failure mechanism[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017,36(11):2612-2628(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)

[6] Huang Runqiu, Liu Weihua. In-situ Test Study of Characteristics of Rolling Rock Blocks based on Orthogonal Design[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009,8(5) :882- 891(黄润秋, 刘卫华. 基于正交设计的滚石运动特征现场试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009 , 8(5) : 882 -891)

[7] Ye Siqiao, Chen Hongkai, Tang Hongmei. The Calculation Method for the Impact Force of the Rockfall[J]. *China Railway Science*, 2010,31(6):56-62(叶四桥, 陈洪凯, 唐红梅. 落石冲击力计算方法[J]. 中国铁道科学, 2010, 31(6) : 56-62)

[8] Lambert Stéphane, Nicot François. Rockfall Engineering[M]. John Wiley & Sons, Inc.:2013-02-28.

[9] Liang Zhangbin. Study on Motion Feature of Rockfalls[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2008(梁璋彬. 崩塌落石的运动特征研究—以黄金坪水电站“6.18”崩塌为例[D]. 成都: 成都理工大学, 2008)

[10] Dorren L, Berger F, Putterli U S . Real-size experiments and 3-D simulation of rockfall on forested and non-forested slopes[J]. *Natural Hazards & Earth System Sciences*, 2006, 6(1):145-153.

[11] Wang Xiang, Pai Lifang, Wu Honggang. Simulation Analysis and Experimental Study on The Damage of Bridge Structure Caused by Tilt Collapse and Rockfall on The Slope of Lalin Railway[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(8): 1622-1633(王翔, 牌立芳, 吴红刚. 拉林铁路变坡面倾角崩塌落石对桥梁结构破坏作用的模拟分析与实验[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(8): 1622-1633)[12] Hengxing Lan, C. Derek Martin, C.H. Lim. RockFall analyst: A GIS extension for three-dimensional and spatially distributed rockfall hazard modeling[J]. *Computers and Geosciences*, 2006, 33(2).

[13] Bartingale R, Higgins J D, Andrew R, et al. Colorado Rockfall Simulation Program Version 5.0[C] Highway Geology Symposium. 2009.

[14] Wang, Yuannian. Three-dimensional rock-fall analysis with impact fragmentation and fly-rock modeling.[D] The University of Texas at Austin., 2009.

[15] Cai Yi. Design and Implementation of The Virtual Tourism System of Jinsi Gorge Geopark Based on Unity3d[D]. Xian: Xian University of Science and Technology, 2012(蔡翊. 基于Unity3d的金丝峡地质公园虚拟旅游系统的研究与实现[D]. 西安: 西安科技大学, 2012)

[16] Cui Jianwei. Design of Metallurgical Machinery Dynamic

Demonstration System Based on PhysX[J]. *Computer and Modernization*, 2012(5): 113-115(崔建伟. 基于PhysX的冶金机械演示系统设计[J]. 计算机与现代化, 2012(5): 113-115)

[17] Li Weilian, Zhu Jun, Zhang Yunhao, et al. A Fusion Modeling and Interaction Method with Spatial Semantic Constraint for Debris Flow VR Scene[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(7): 1073-1081. DOI: 10.13203/j. whu- gis20180329 (李维炼, 朱军, 张昀昊, 等. 空间语义约束的泥石流灾害 VR 场景融合建模及交互方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2020, 45(7): 1073-1081.)

[18] Yung Piao Chiu, Yan Chyuan Shiau, Shu Jen Song. A Study on Simulating Landslides Using Unity Software[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, 3926.

[19] Liu Guoyang. Three-Dimensional DDA Contact Model and Failure Law Investigation of Rockfall[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019(刘国阳. 三维 DDA 接触模型与边坡滚石破坏规律研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019)

[20] Cheng liangxia. Study on Collapse Formation Mechanism and Risk Assessment of The Slope near the Highway from Yingxiu to Wolong after “5.12” Wenchuan Earthquake[D]. Xian: Changan university, 2014(成良霞. “5.12”汶川地震后映卧公路边坡崩塌灾害形成机理与危险性评估研究[D]. 西安: 长安大学, 2014)

[21] Ondercin, Matthew. An Exploration of Rockfall Modelling through Game Engines.[D] Queen's University (Canada), 2016

[22] Sala, Zac. Game-Engine Based Rockfall Modelling: Testing and Application of a New Rockfall Simulation Tool.[D] Queen's University (Canada), 2016

[23] Ye Zhen, Xu Qiang, Liu Qian, et al. Application of Unmanned Aerial Vehicle Oblique Photogrammetry to Investigation of High Slope Rock Structure[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(11): 1739-1746.(叶震, 许强, 刘谦, 等. 无人机倾斜摄影测量在边坡岩体结构面调查中的应用[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2020, 45(11): 1739-1746.)

[24] Huang Haining, Huang Jian, Zhou Chunhong, et al. Application of UAV Images to Rockfall Investigation at the High and Steep slope[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2019, 46(6): 149-155(黄海宁, 黄健, 周春宏, 等. 无人机影像在高陡边坡危岩体调查中的应用[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(6): 149-155.)

## A Method of Using Unity3D to Simulate the Whole Process of Three-dimensional Movement of Rockfall

WANG Hao<sup>1</sup> HUANG Jian<sup>1</sup> HUANG Xiang<sup>1</sup> YUAN Jingqing<sup>1</sup> HE Zicheng<sup>1</sup>

<sup>1</sup> State Key Laboratory of Geo-hazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

**Abstract: Objectives:** Rockfall occur frequently in the mountainous areas of southwest China, which is easy to cause huge casualties and property losses. A rapid simulation method of the collapse process is urgently needed. At present, the commonly used collapse simulation software still has obvious shortcomings, such as low terrain accuracy, failure to consider the structural characteristics of rock mass, failure to realize block collision and fragmentation, etc., and the logic operation based on Central Processing Unit (CPU) only limits the calculation speed. In this paper, a new method for rapid simulation of the three-dimensional motion process of collapse is proposed. **Methods:** The Unmanned aerial vehicle (UAV) aerial photography modelling combined with field investigation is used to obtain the slope surface model and determine the characteristic parameters of rockfall. The simulation software of large-scale collapse movement process is developed by using Unity3D platform which integrates PhysX physics engine and Central Processing Unit-Graphics Processing Unit (CPU-GPU) parallel computing capability. **Results:** The software can reproduce the whole process of collapse-impact-fragmentation-accumulation; It can output the three-dimensional trajectory, velocity, energy and jumping height of collapse, which provides reliable basis for the design of collapse prevention and control. Finally, taking Xiejiayan collapse in Nayong, Guizhou Province as a prototype case, three-dimensional simulation and verification of the collapse movement process are carried out. The simulation results of the rockfall accumulation range are in good agreement with the field investigation of the rockfall accumulation range at the bottom of the slope, and the movement characteristics of the simulated single block rock conform to the real physical laws, which indicates the feasibility and practicability of this method. **Conclusions:** This method can solve the problem of simulation, analysis and visualization of the whole process of three-dimensional movement of rockfall.

**Key words:** Rockfall; Unmanned aerial vehicle; Movement simulation; Physical engine; Visualization

**Foundation support:** National Innovation Research Group Science Fund (No.41521002);

**First Author:** Wang Hao, master candidate, specializes in UAV photogrammetry and collapse disaster research. E-mail: 964861905@qq.com

**Corresponding author:** Huang Jian, PhD, associate professor. E-mail: hjian.2010@qq.com

## 网络首发:

**标题:** 利用网络游记分析不同类型游客的旅游流网络特征差异

**作者:** 李秋萍, 陈宇, 栾学晨

**收稿日期:** 2021-05-17

**DOI:** 10.13203/j.whugis.20210045

## 引用格式:

王豪, 黄健, 黄祥, 等. 一种利用 Unity3D 模拟崩塌三维运动全过程的方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2021, DOI: 10.13203/j.whugis.20210237 (WANG Hao, HUANG Jian, HUANG Xiang, et al. A Method of Using Unity3D to Simulate the Whole Process of Three-dimensional Movement of Rockfall [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, DOI: 10.13203/j.whugis.20210237)

网络首发文章内容和格式与正式出版会有细微差别, 请以正式出版文件为准!

您感兴趣的其他相关论文:

## 街景影像下的临街建筑风格映射及地图生成方法

徐虹, 王禄斌, 方志祥, 等.

武汉大学学报·信息科学版, 2021, 46(5): 659-671

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20200445>

### 九寨沟核心景区多源遥感数据地质灾害解译初探

董秀军, 许强, 余金星, 等.

武汉大学学报·信息科学版, 2020, 45(3): 432-441

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20190076>

