

## 碎屑流滑坡变形及运动特征研究

石子健, 陈 稳, 盛逸凡, 徐光黎

**Deformation and movement characteristics of debris flow landslide: A case study of the Shaziba landslide in Enshi, China**

SHI Zijian, CHEN Wen, SHENG Yifan, and XU Guangli

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202306033>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 滑坡碎屑流冲击拦挡结构的离散元模拟

Discrete element simulation of the impact of landslide debris flow on resistive structures

张睿骁, 樊晓一, 姜元俊 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 148-148

#### 滑坡-碎屑流冲击导引结构的离散元模拟

Discrete element simulation of the landslide-debris flow impact guiding structure

张睿骁, 樊晓一, 姜元俊, 杨海龙 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 161-168

#### 德钦县城直溪河泥石流成灾模式及运动过程模拟

A study of the disaster model and movement process simulation of debris flow in the Zhixi River of Deqin County

王俊豪, 管建军, 魏云杰, 高培强, 梅傲霜, 张东伟 水文地质工程地质. 2021, 48(6): 187-195

#### 巫溪县西溪河北岸高位高危碎屑流滑坡特征与机理研究

A study of the characteristics and mechanism of high-risk debris flow landslide on the northern bank of the Xixi River in Wuxi county

李浩, 乐琪浪, 孙向东, 杨秀元, 李刚, 李兴虎 水文地质工程地质. 2019, 46(2): 13-13

#### 地形因子对偏转型滑坡-碎屑流运动参数的影响

Influence of terrain factors on the motion parameters of the turning-type landslide-debris flow

杨海龙, 樊晓一, 裴向军, 裴钻 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 129-129

#### 滑源区粒序分布及颗粒粒径对碎屑流冲击作用的影响研究

Particle sequence distribution and the effect of particle size on the impact effect in a fluidized landslide-debris flow

张志东, 樊晓一, 姜元俊 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 49-59



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202306033

石子健, 陈稳, 盛逸凡, 等. 碎屑流滑坡变形及运动特征研究——以恩施市沙子坝滑坡为例 [J]. 水文地质工程地质, 2025, 52(1): 149-158.

SHI Zijian, CHEN Wen, SHENG Yifan, et al. Deformation and movement characteristics of debris flow landslide: A case study of the Shaziba landslide in Enshi, China[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2025, 52(1): 149-158.

## 碎屑流滑坡变形及运动特征研究 ——以恩施市沙子坝滑坡为例

石子健<sup>1</sup>, 陈 稳<sup>1</sup>, 盛逸凡<sup>2</sup>, 徐光黎<sup>1,2</sup>

(1. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074;

2. 中国地质大学(武汉)地质调查研究院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 碎屑流滑坡往往具有高滑动速度及远距离滑移的运动学特征, 并且滑坡滑动易对周边环境造成严重的破坏和巨大的财产损失。2020 年 7 月 21 日, 在特大暴雨的持续影响下, 恩施沙子坝滑坡失稳滑动并发展为碎屑流滑坡, 最终在清江堆积形成堰塞湖。为了探究沙子坝滑坡滑动速度和位移等运动特征及运动演化规律, 通过高精度无人机正射影像构建滑坡三维数值模型, 基于室内试验获取滑体力学数据对模型细观参数进行标定, 最后, 使用颗粒流 PFC<sup>3D</sup> 软件模拟滑坡从失稳到堆积的过程。通过模拟可得: 沙子坝滑坡运动时间约 757 s, 平均速度可达 4.9 m/s, 平均滑移距离约 960 m。滑坡动力学过程可分为失稳滑动(0~18 s)、流态传播(18~331 s)及低速堆积(331~757 s)3 个阶段, 且在滑动过程中表现出了碎屑流滑坡的“超距、失距”特征以及碎屑流滑坡的体积增大效应。滑体在清江的堆积体呈现靠近滑出崖口方向堆积较厚, 远离滑坡方向较薄的类锥形堆积形态, 模拟结果与实际情况吻合较好。模型较好地再现了沙子坝滑坡从失稳到堆积的滑动过程, 可为类似碎屑流滑坡地质灾害的防治与研究提供参考。

**关键词:** 碎屑流滑坡; 数值模拟; 离散元; 变形演化; 运动过程

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2025)01-0149-10

## Deformation and movement characteristics of debris flow landslide: A case study of the Shaziba landslide in Enshi, China

SHI Zijian<sup>1</sup>, CHEN Wen<sup>1</sup>, SHENG Yifan<sup>2</sup>, XU Guangli<sup>1,2</sup>

(1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China;

2. Institute of Geological Survey, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China)

**Abstract:** Debris flow landslides usually exhibit high sliding speed and long-distance slip, and their unstable slide is easy to cause serious damage to the surrounding area and significant property loss. On July 21, 2020, under the continuous influence of heavy rainfall, the Shaziba landslide in Enshi lost stability and transformed into a debris flow landslide, ultimately depositing within the Qing River, forming a dammed lake. To explore its kinematic features, such as velocity and displacement, during the Shaziba landslide's sliding process and the evolving patterns of the landslide mass, a three-dimensional numerical model of the landslide was constructed using high-

收稿日期: 2023-06-19; 修订日期: 2023-11-16

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

基金项目: 湖北省科技厅重点研发项目(2021BCA219)

第一作者: 石子健(2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事地质灾害风险评估与防治研究工作。E-mail: [shizijian@cug.edu.cn](mailto:shizijian@cug.edu.cn)

通讯作者: 徐光黎(1963—), 男, 教授, 主要从事地质工程与地质灾害方面的教学研究工作。E-mail: [xu1963@cug.edu.cn](mailto:xu1963@cug.edu.cn)

precision ortho-images obtained from unmanned aerial vehicles (drones). The parameters of the model were calibrated based on the mechanical properties of the landslide mass obtained from laboratory tests. Finally, the Particle Flow Code (PFC3D) software was used to simulate the process of the Shaziba debris flow landslide from sliding to deposition. It is determined that the movement time of the landslide was approximately 757 seconds, with a maximum average velocity of 4.9 m/s, and an average sliding distance of about 960 m. The dynamic process of the landslide can be divided into three stages: unstable sliding (0 ~ 18 s), flow propagation (18 ~ 331 s), and low-speed deposition (331 ~ 757 s). Throughout the sliding process, it exhibited the characteristics of hyper-distance and loss-distance, as well as the volume-increasing effect of debris flow landslides. The deposition pattern of the landslide mass in the Qing River displayed a conical accumulation shape, with thick accumulation near the landslide exit and thin accumulation in the opposite direction of the landslide, which closely matched the actual situation. The model effectively reproduces the sliding process of the Shaziba landslide from instability to deposition. This study can provide valuable insights for the prevention and study of geological hazards related to debris flow landslides.

**Keywords:** debris flow landslide; numerical simulation; PFC; deformation evolution; motion process

碎屑流滑坡的特征为高速远程滑动,且滑体在滑动过程中表现为碎屑状或者流态状。由于滑坡自身失稳后的高速滑动及远距离位移,往往引发灾难性事故,造成严重的生命财产损失<sup>[1]</sup>。1965年11月22—23日云南禄劝烂泥沟滑坡连续2次剧烈活动,摧毁4个村庄、造成444人遇难<sup>[2]</sup>;2003年7月13日三峡库区沙镇溪镇千将坪滑坡导致24人死亡及失踪,4个乡镇企业被摧毁<sup>[3]</sup>;2010年6月28日,贵州关岭岗乌镇大寨村发生碎屑流滑坡,致使两个村组被毁,99人遇难<sup>[4]</sup>;2017年6月24日四川省阿坝州茂县叠溪镇新磨村特大碎屑流滑坡,2 min内滑动2 500 m,致使83人死亡及失踪,3人受伤,103间房屋完全被毁<sup>[5]</sup>;2019年7月23日贵州水城县鸡场镇特大滑坡造成51人死亡及失踪<sup>[6]</sup>;2020年9月16日,贵州水城县发耳镇尖山营不稳定斜坡受降雨影响发生山体滑坡,滑动过程中破碎解体形成碎屑流,最终摧毁了两条公路<sup>[7]</sup>。因此,研究降雨影响下的碎屑流滑坡变形及运动特征,对于类似滑坡灾害的预测和预防具有重要意义。

对于碎屑流滑坡有许多研究方法,包括实地调查、理论研究、碎屑流物理模型试验以及数值模拟等<sup>[8]</sup>。其中实地调查受时空限制,主要应用于滑坡的快速风险评估<sup>[9-11]</sup>;由于实际滑坡的复杂情况,理论研究提出多种假设并适当简化条件<sup>[12-14]</sup>;物理模型试验在再现滑坡土体应力条件及滑动的流态化特征上具有一定的局限性<sup>[15-17]</sup>。与前3种方法相比,由于计算机技术的发展,数值模拟已成为碎屑流滑坡灾害研究的常用手段之一。其中,离散元(particle flow code, PFC)是一种从微观角度研究粒子之间运动和相互作

用的方法,通过球、墙单元分别模拟滑体颗粒和滑动界面,并通过控制模型的细观参数来反映各种性质的岩土体的宏观变形,在国内外碎屑流滑坡的运动演化特征研究中被广泛使用。胡晓波等<sup>[18]</sup>通过PFC<sup>3D</sup>模拟三溪村远程滑坡运动过程,揭示滑坡运动过程中岩土体的速度演化分布、堆积特征和能量转化关系;Zhu等<sup>[19]</sup>使用PFC<sup>2D</sup>软件研究徐扎碎屑流滑坡的动力特征以及滑坡岩土体在传播过程中的流态化情况;吴伟乐等<sup>[20]</sup>基于无人机航拍、野外调查和地质条件分析等手段,采用PFC<sup>3D</sup>方法对受强降雨影响下的重庆武隆牛儿湾流化滑坡远程运动成灾模式开展研究;Wang等<sup>[21]</sup>使用PFC<sup>3D</sup>数值模拟方法研究云南省昭通市鲁甸县红石岩滑坡的滑移速度、位移特征以及堆积特征。应用PFC方法可以较好地了解滑坡超远距离滑移中碎屑化过程以及滑坡从滑动到堆积过程中运动特征。

以湖北省恩施市沙子坝大型碎屑流滑坡为研究对象,借助灾后5 m分辨率的高精度无人机正射影像,构建滑坡三维地质模型。结合现场取样和室内试验资料,获取滑坡土体的物理力学参数。最后,通过PFC数值模拟方法对碎屑流滑坡的滑动阶段进行划分,并探讨特大暴雨影响下沙子坝滑坡从滑动到流态化的机理与运动过程。

## 1 沙子坝滑坡基本情况

### 1.1 地理及地质概况

沙子坝滑坡位于湖北省恩施市屯堡乡马者村。研究区属亚热带季风湿润气候,降雨充沛,雨热同期,

年平均降水量在 1 100 ~ 1 800 mm 之间, 且多集中在 5—9 月, 降雨多为大雨或暴雨。

研究区位于新华夏系第三隆起构造带内, 主要构造为 NE-SW 向褶皱, 构造侵蚀中山峡谷地貌。

滑坡区上部缓、中下部较陡, 总体坡向 200°。滑坡变形区南北长 1 200 ~ 1 600 m, 东西宽 500 ~ 700 m, 平均厚 24.5 m, 体积约 1 960×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>(图 1); 滑坡区出露地层由新至老为: ①第四系滑坡堆积层(Q<sup>del</sup>), 为粉质黏土, 局部含有少量碎石, 土体结构松散, 是滑体的主要组成部分; ②二叠系上统龙潭组(P<sub>2</sub>l), 由保安段(P<sub>2</sub>l<sup>1</sup>)薄层状硅质页岩、下窑段(P<sub>2</sub>l<sup>2</sup>)含燧石结核灰岩以及炭山湾段(P<sub>2</sub>l<sup>3</sup>)含煤系砂岩组成; ③二叠系下统茅口组(P<sub>1</sub>m), 岩性主要为厚层状灰岩、含燧石灰岩, 力学强度高, 在滑坡滑动过程中可视为滑床, 工程地质剖面见图 2。

### 1.2 沙子坝滑坡变形破坏过程

2020 年 7 月 16—18 日, 沙子坝滑坡受特大暴雨影响发生变形, 在滑坡体近后缘、S233 省道、多处房屋及地面出现拉裂缝, 拉裂缝总体发育为北西向, 长 3 ~ 20 m, 宽 2 ~ 10 cm。7 月 19—20 日, 滑坡右侧临沟段发生变形, 部分滑体变形滑动并堵塞右侧沟道, 滑坡变形加剧。7 月 21 日, 滑坡彻底失稳滑动。首先, 滑体沿 218°方向滑入冲沟并冲击挤压冲沟右岸, 导致沟槽滑体部分超覆西侧槽顶, 形成厚 5 ~ 9 m 的超覆堤埂, 并使右岸坡体 100 m 范围内产生数条近北东向的剪切裂缝。随后, 受西侧沟槽壁的阻碍, 滑坡滑动方向发生转变, 转向 195°方向滑动且滑体速度逐渐放

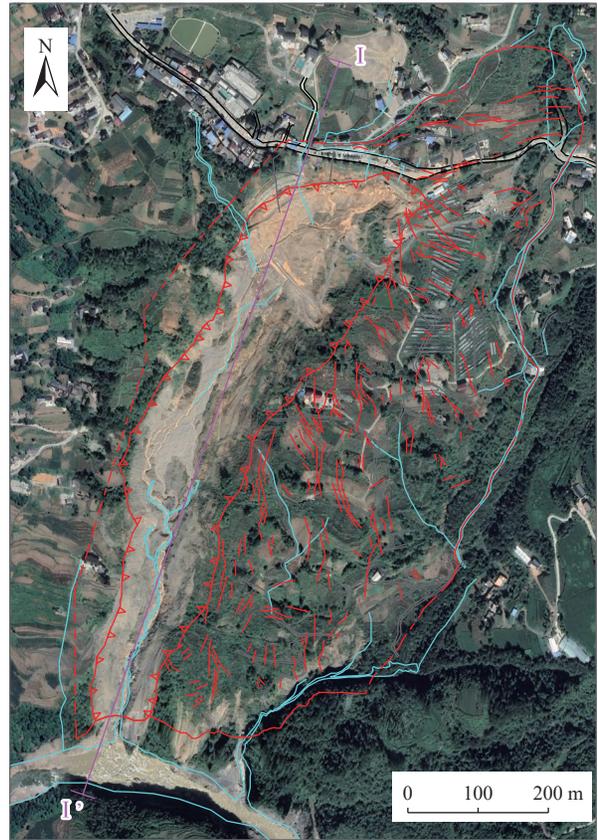


图 1 沙子坝滑坡平面图

Fig. 1 Shaziba landslide plane diagram

缓。约 436×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup> 滑体顺沟道冲入清江形成堰塞湖, 滑坡凹槽最终形成, 面积约 21.8×10<sup>4</sup> m<sup>2</sup>, 槽深 10 ~ 40 m, 平均深度 20 m。

根据沙子坝滑坡勘查报告, 7 月 1—20 日该地 20 d 降雨量累计已达 524.2 mm, 仅 7 月 17 日降雨量就达

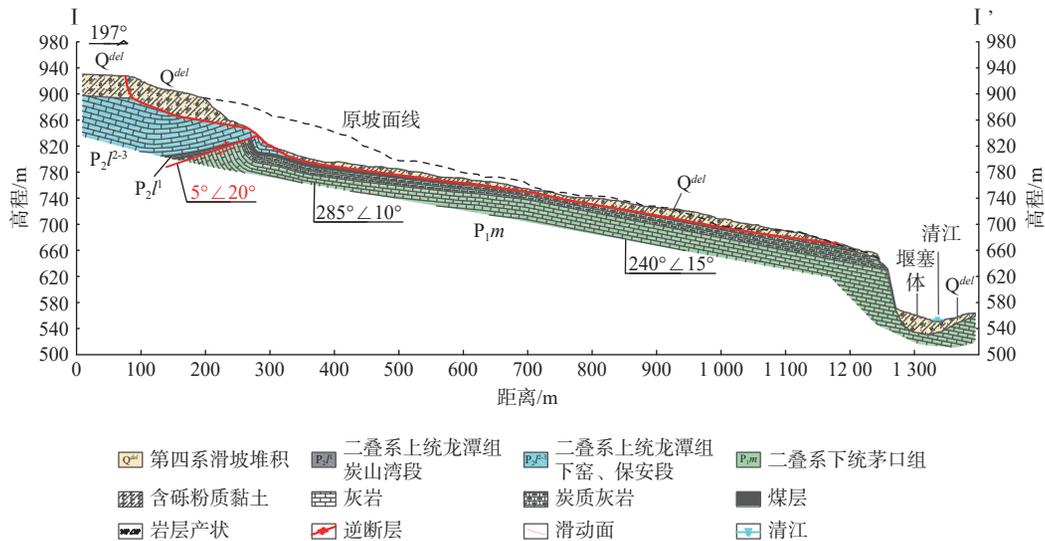


图 2 沙子坝滑坡工程地质典型剖面

Fig. 2 Typical profile of engineering geology of Shaziba landslide

191.6mm(图3);恩施市7月多年平均降雨量为287.86mm,灾害发生前的降雨强度远超同期降雨强度。

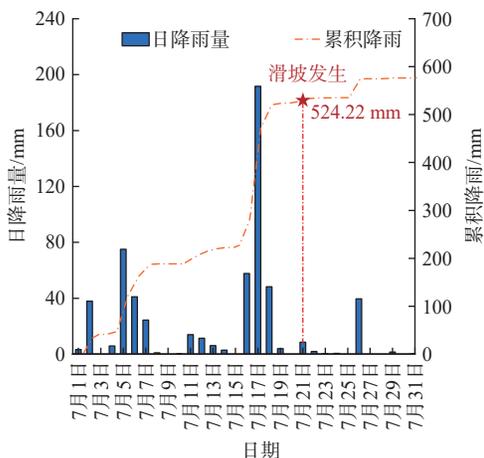


图3 7月降雨监测数据  
Fig. 3 Monitoring data of rainfall in July

滑坡灾害致使12户房屋毁坏、750m省道损毁、96.7ha林果园及早地毁坏,造成经济损失5845.13万元,并危及滑坡影响区145户1057人,潜在经济损失4亿元,构成特大型滑坡地质灾害,如图4所示。

## 2 研究方法

### 2.1 沙子坝滑坡数值模型

使用PFC<sup>3D</sup>对沙子坝滑坡高速远程的动力性质和演变进行模拟。对于已知滑动面滑坡的数值模拟,滑床以下部分的土体采用墙单元进行替换而非继续使用球单元堆砌构建<sup>[22]</sup>。在PFC的各种黏结接触模型中,平行黏接模型能够较好地模拟岩土体的粒间拉、

剪、弯矩等力学特性<sup>[23-25]</sup>,选取平行黏结模型表征强降雨影响下含水相和土相的高含水率条件下粉质黏土的力学性质。

为避免模型精度对滑坡的滑动特征与堆积形式的影响,通过无人机正射的方式获取高精度的滑坡滑动面及周边地形的数据,构建沙子坝滑坡的3D模型(图5)。其中,滑动面的精度为5m,由34056个墙单元组成,滑体由半径范围为1.2~3.5m的共21583个球单元组成。在构建碎屑流滑坡滑动的数值模型过程中,除了构建流通区域和堆积区域外,还要确定滑体滑动流失的主要区域,即滑动区的大小和位置。通过获取沙子坝滑坡在滑动前后的同区域同精度的DEM栅格影像资料,使用ArcGIS的栅格分析工具,提取等高线并对比滑动前后滑坡区域等高线的变化确定沙子坝滑坡滑动的主要区域<sup>[26]</sup>,通过使用Rhino软件修复并构造滑前地形面。同时,在滑体的前、中、后3部位分别设置3个监测点,共计9个(NO.1—NO.9),以监测滑坡滑动过程中速度、位移及滑动趋势特征。

### 2.2 滑坡模型参数标定

目前,对于PFC细观接触参数的确定,主要方法是构建模拟实验并调整参数,直到模拟结果与宏观试验所表现的岩土体力学指标相匹配<sup>[27-30]</sup>。因此,采用虚拟直剪实验和宏观直剪实验进行对比验证(图6)。其中,滑体为现场取样,在实验室内测定滑体土的密度、含水率等参数,并使用电动四联直剪仪进行快剪试验(3~5min内完成试验),试验获取的滑体土应力应变曲线作为PFC虚拟直剪试验参数标定的参考依

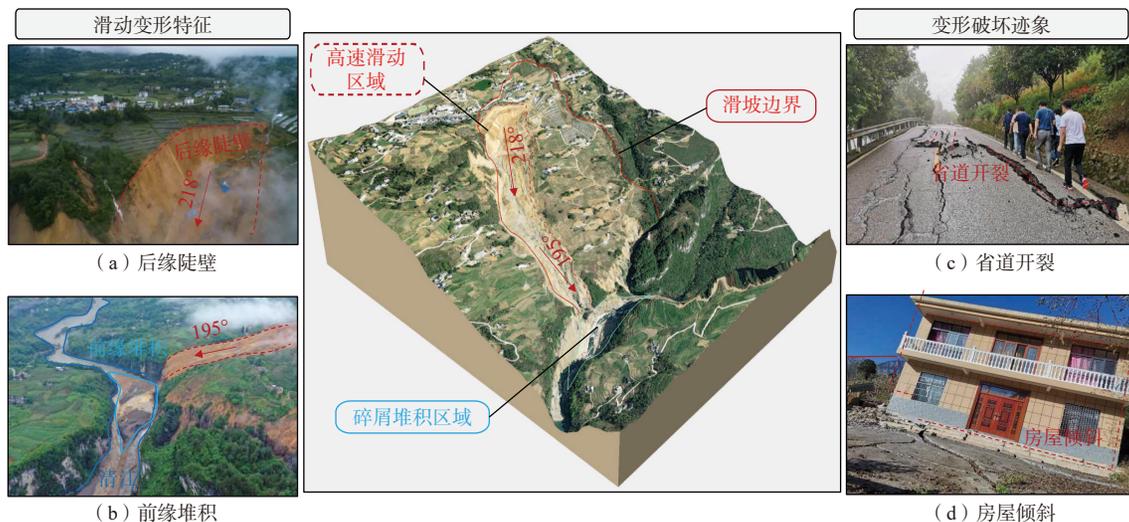


图4 沙子坝滑坡变形特征及破坏迹象

Fig. 4 Deformation characteristics and failure signs of Shaziba landslide

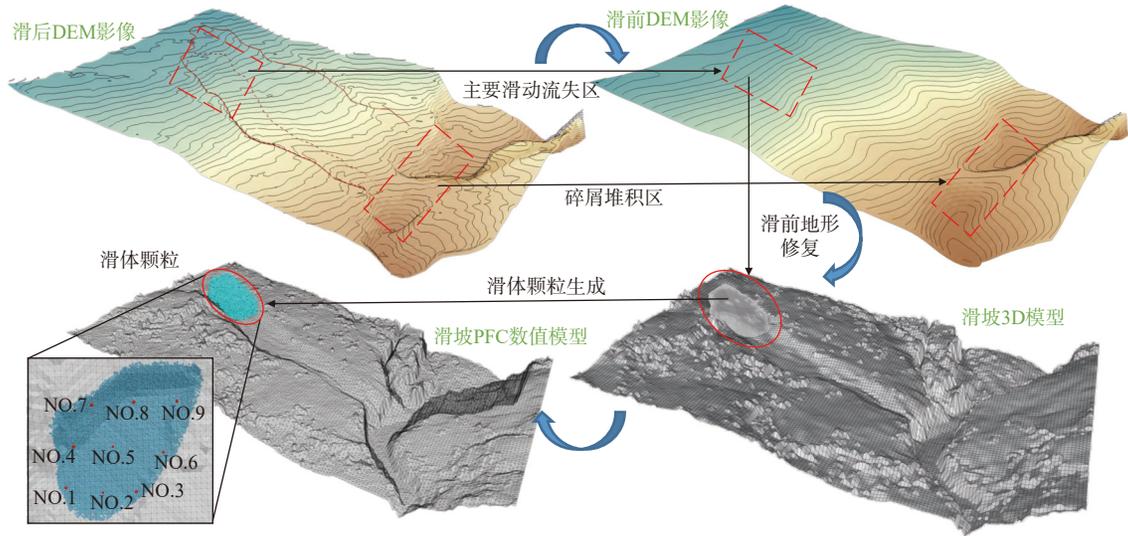


图5 滑坡模型构建流程示意图

Fig. 5 Schematic diagram of landslide model construction process

据, 滑体土物理力学参数见表1。

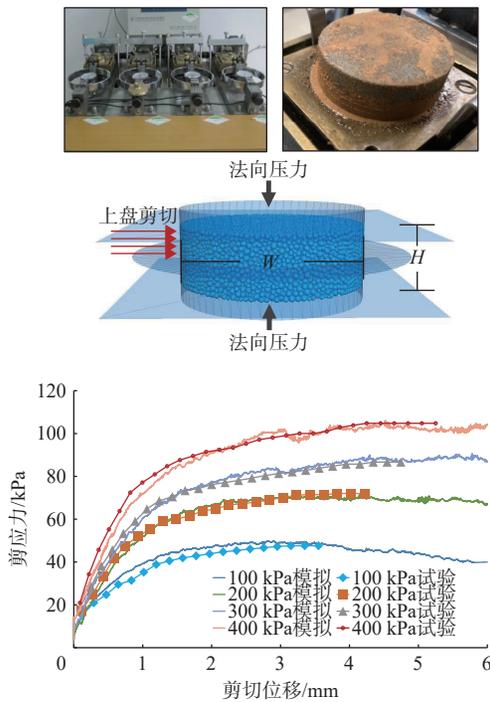


图6 虚拟直剪试验及参数拟合曲线

Fig. 6 Virtual direct shear test and parameter fitting curves

表1 滑体物理力学参数表

Table 1 Physical and mechanical parameters of slip mass

	干重度/(g·cm <sup>-3</sup> )	含水率/%	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
粉质黏土	15.56	35.3	24.42	12.02

为获得滑坡模型的细观参数, 在虚拟实验中通过伺服条件调整上下墙体的速度, 使球单元承受的法向压力的数值尽可能维持在目标压力数值附近, 然后再

与宏观直剪实验在 100, 200, 300, 400 kPa 4 种法向压力得到的应力应变曲线进行比较, 获得 PFC 中沙子坝滑坡高含水率粉质黏土从失稳滑动到最终堆积整个运动过程中所用的细观力学参数标定值, 拟合所得的细观参数见表2。

表2 滑坡模型细观参数表

Table 2 Microscopic parameters of landslide model

细观参数	关键词	参数值
颗粒密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	density	2.07×10 <sup>3</sup>
黏结半径/m	bond_gap	R×0.01
有效模量/Pa	emod	1.2×10 <sup>7</sup>
刚度比	kratio	1.5
黏结有效刚度/Pa	pb_emod	1.2×10 <sup>7</sup>
黏结刚度比/Pa	pb_krat	1.2
摩擦系数	fric	0.3
抗拉强度/Pa	pb_ten	1.7×10 <sup>5</sup>
黏结强度/Pa	pb_coh	1.0×10 <sup>7</sup>
颗粒摩擦角/(°)	pb_fa	34

### 3 数值模拟结果

#### 3.1 沙子坝滑坡的动力学特征分析

根据监测点速度曲线(图8)、监测点位移曲线(图9)及滑体平均速度曲线数据(图10)可发现: 从模拟开始沙子坝滑坡滑体颗粒经历了约18 s的突然加速阶段, 该阶段颗粒速度较高, 但位移数值较低, 且由图7可知: 滑体仍呈较为完整的整体; 随后, 颗粒平均速度开始降低, 并且随着模拟的进行, 前后滑体颗粒速度逐渐出现差异, 由图7可知: 滑体前部颗粒逐渐脱离滑体整体; 最后, 在模拟进行331 s后, 前部颗粒

开始坠江堆积,滑体平均速度缓慢减速,最终部分滑体颗粒堆积形成堰塞坝。因此,根据沙子坝滑坡从失稳到堆积的运动特征,可将沙子坝碎屑流滑坡的动力

学过程分为 3 阶段:失稳滑动阶段、流态传播阶段和低速堆积阶段。

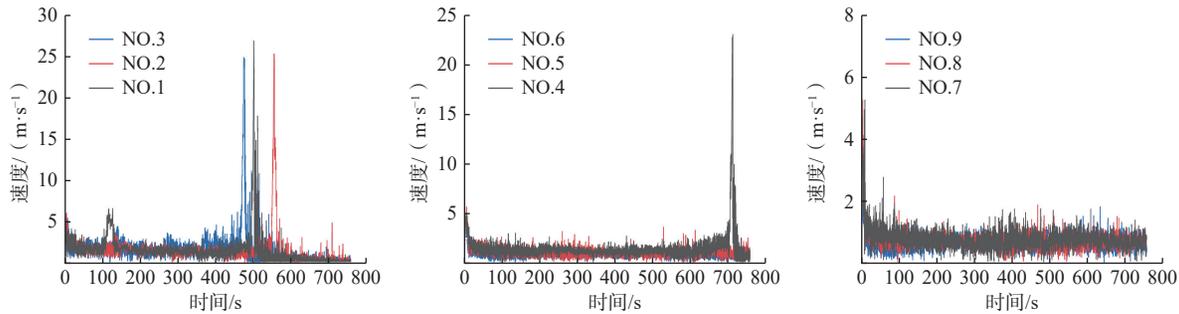


图 7 监测点速度曲线

Fig. 7 Velocity curve of the monitoring point

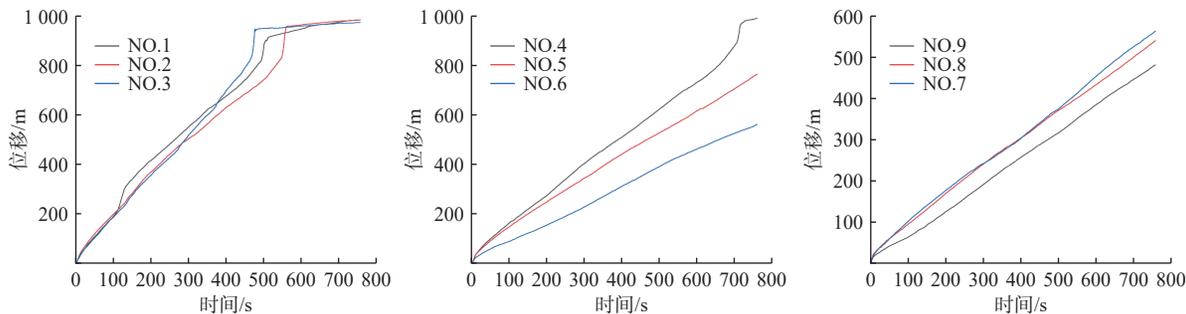


图 8 监测点位移曲线

Fig. 8 Displacement of the monitoring points

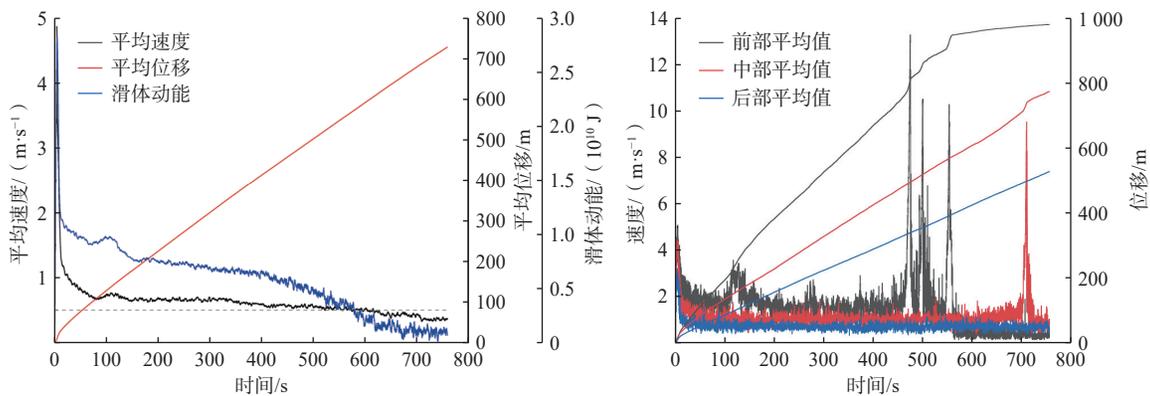


图 9 滑坡平均参数曲线

Fig. 9 Average parameter curves of landslide

(1)失稳滑动阶段(0~18 s):

在重力作用下,滑坡失稳滑动,势能转化为动能,滑动速度突然增加。由图 10 可知,其平均初始滑动速度在 6 s 时达到了 4.8 m/s,在 18 s 期间平均滑移 39 m。在初始滑动阶段,滑体不同位置的监测点的滑动峰值速度 4.7~6.2 m/s,速度基本相同。此时,土体的黏结

尚未全部破坏,滑体相对完整,可视为一个整体。

(2)流态传播阶段(18~331 s):

碎屑流滑坡的能量传递理论<sup>[31-32]</sup>揭示,随着滑体滑动,能量通过颗粒碰撞逐渐从滑体后部向前端传递,导致滑体的速度变化产生差异,滑坡中前部滑动速度增加较快而逐步脱离。由前部监测点速度图、位

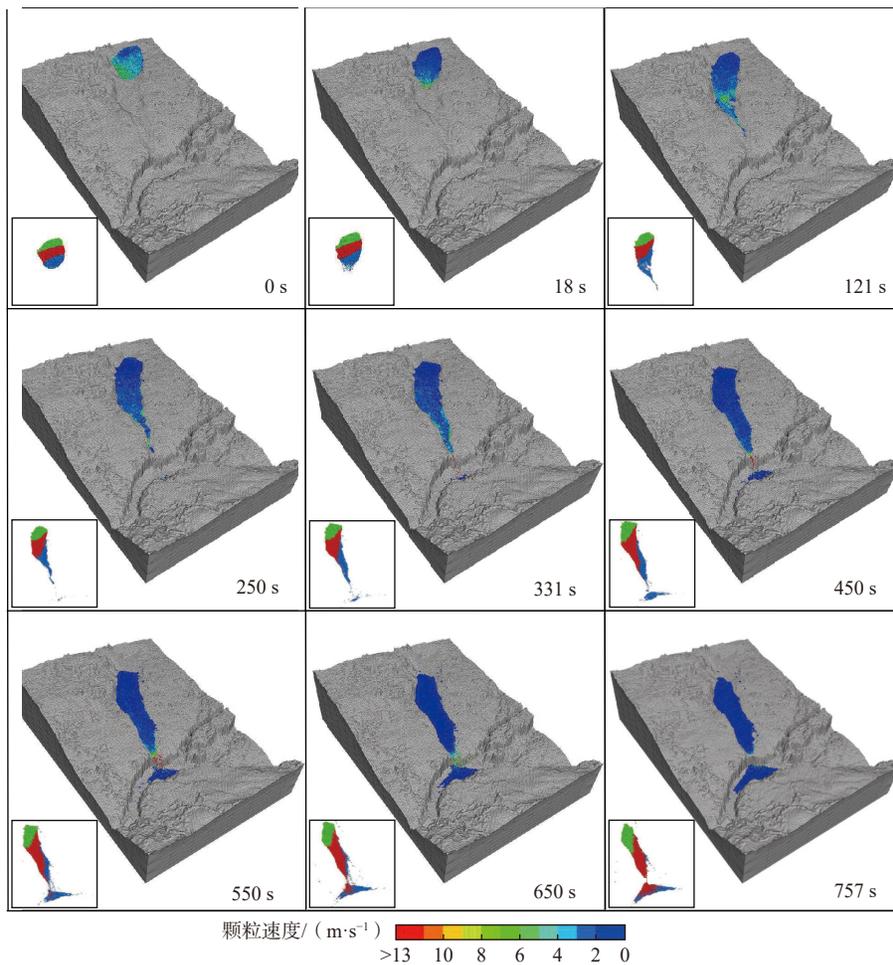


图 10 沙子坝滑坡运动模拟图

Fig. 10 Simulated movement process of the Shaziba landslide

移曲线图和过程图可知,在滑坡快速失稳滑动之后,滑体的前部以 1.6~2.5 m/s 的速度沿 218°主滑方向快速滑动,而滑体后部速度为 0.8~1.1 m/s,滑体前后表现出速度差,滑体从相对完整的状态逐步向碎屑状态转化。随后,在滑体滑移约 210 m(18~121 s)后与西侧沟槽壁碰撞,主滑方向逐渐转变为 195°,滑体颗粒间的黏结受碰撞及速度差影响发生断裂,由滑坡运动过程图可知,前部滑体表现出碎屑状特征,前部滑体转向后明显脱离滑体整体,其速度维持在 1.2~1.6 m/s 左右进行匀速滑动,滑动约 640 m 后坠江堆积(121~331 s)。

通过滑坡剖面(图 2)可知,在滑坡主滑方向发生转变的区域,滑床岩层的倾角由 10°转变为 15°,并且由于滑体前部逐步脱离整体解体而碎屑化,使得前部滑体 1 号、2 号、3 号监测点出现 5.9 m/s 的第二峰值速度,随后,前部滑体颗粒受摩擦以及地形碰撞因素等影响,其滑动速度逐渐降低至稳定;受地形因素和

滑体前部的碰撞、摩擦的阻碍,滑体中部监测点的速度没有明显的第二峰值以及流态化滑动迹象;滑体后部滑动速度较慢,监测点平均速度为 0.8 m/s。

(3) 低速堆积阶段(331~757 s):

滑体前部进入清江,受河谷地形因素的影响,坠江滑体颗粒的速度降低,并在清江内逐渐堆积。根据位移图可知,沙子坝滑坡碎屑化滑动过程中,靠滑坡左侧监测点(1 号、4 号、7 号)的滑动速度较右侧监测点(3 号、6 号、9 号)快,最终在 763 s,前部滑体大部分已基本滑入江中,中部左侧滑体部分滑入清江,形成堰塞坝。通过沙子坝滑坡最终堆积结果以及监测点位移可以发现,滑体的前部平均滑动距离 960 m 左右,远高于其滑体后部的 540 m,且由于前后滑体滑动速度以及滑动距离的差异,最终堆积时的形态尺寸远大于初始尺寸,表现为碎屑流滑坡的体积增大效应。

### 3.2 沙子坝滑坡的堆积特征分析

滑坡在 195°剖面方向上的最终沉积特征如图 11

所示。滑体颗粒在滑坡凹槽内的堆积长度约为 720 m, 最大堆积深度可达 24 m, 堆积形态两端薄中间厚, 与实际堆积形式类似, 但模拟堆积长度略短于实际滑体的堆积长度。

滑体颗粒在清江的堆积在靠近滑出崖口方向堆积较厚, 远离滑坡方向较薄, 堰塞坝中部堆积厚度约 36 m。模拟的堰塞坝堆积特征与实际堆积结果吻合较好, 验证了 PFC 模型的有效性。

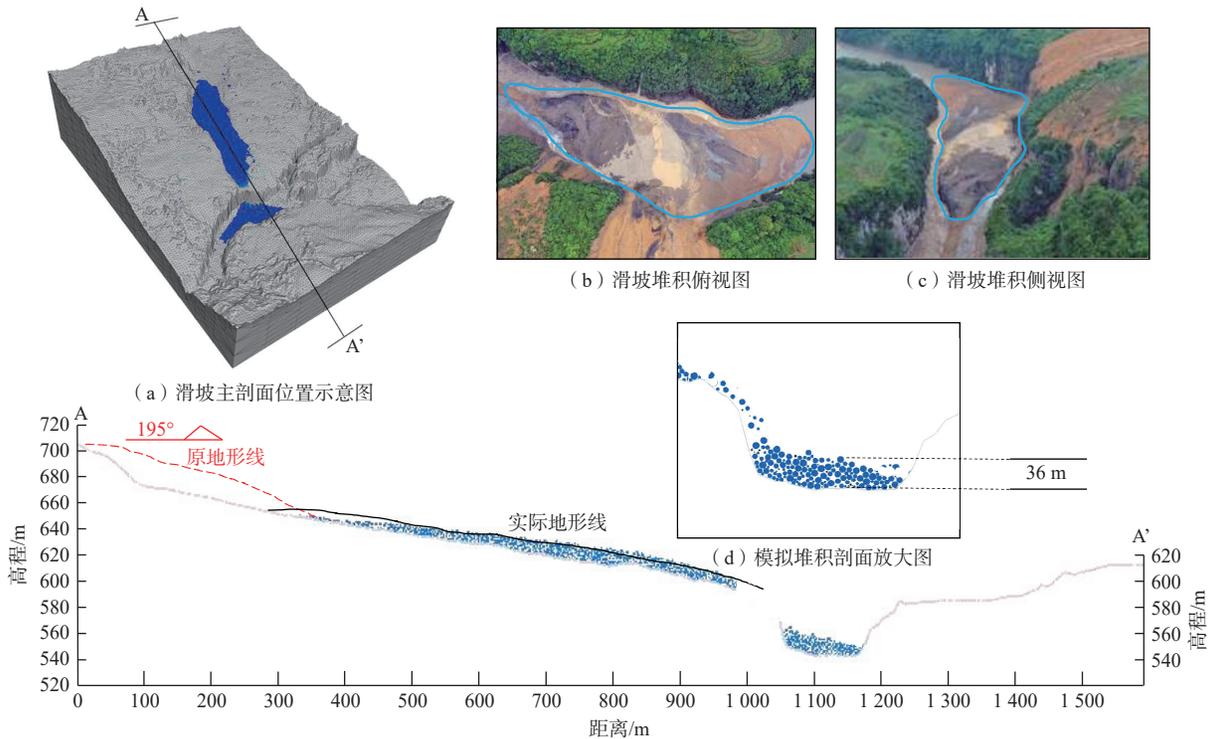


图 11 滑坡模型主滑剖面图

Fig. 11 Main slip section of landslide model

### 4 结论

(1) 沙子坝滑坡的动力学过程可分为失稳滑动、流态传播及低速堆积 3 个阶段。

(2) 沙子坝滑坡滑动过程中表现出了明显的碎屑流滑坡特征, 滑体前部颗粒速度和位移量远高于中后部滑体颗粒, 即碎屑流滑坡的“超距、失距”特征。

(3) 沙子坝滑坡最终在滑坡凹槽堆积时, 形态尺寸远大于初始尺寸, 即碎屑流滑坡的体积增大效应。最终, 滑体在滑坡凹槽内的最大堆积深度约 24 m, 堆积长度约为 720 m。

(4) 滑体在清江的堆积特征呈现靠近滑出崖口方向堆积较厚, 远离滑坡方向较薄的类锥形堆积形态, 模拟的堆积特征与清江堆积结果吻合较好。

颗粒流软件模拟较好地再现了沙子坝滑坡从失稳到堆积的滑动过程, 可为类似碎屑流滑坡地质灾害的防治与研究提供参考。

### 参考文献 (References) :

[ 1 ] 张明, 殷跃平, 吴树仁, 等. 高速远程滑坡-碎屑流运动机理研究发展现状与展望 [J]. 工程地质学报, 2010, 18(6): 805 - 817. [ ZHANG Ming, YIN Yueping, WU Shuren, et al. Development status and prospects of studies on kinematics of long runout rock avalanches [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2010, 18(6): 805 - 817. (in Chinese with English abstract) ]

[ 2 ] 文宝萍, 王凡. 1965 年烂泥沟滑坡前兆、高速远程运动及后期演化特征 [J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(6): 72 - 80. [ WEN Baoping, WANG Fan. Precursors and motion characteristics of the 1965 lannigou rockslides and the subsequent evolution [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(6): 72 - 80. (in Chinese with English abstract) ]

[ 3 ] 杨海平, 王金生. 长江三峡工程库区千将坪滑坡地质特征及成因分析 [J]. 工程地质学报, 2009, 17(2): 233 - 239. [ YANG Haiping, WANG Jinsheng. Geological features and cause analysis of Qianjiangping landslide of July 13, 2003 on Three Gorges Reservoir [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2009, 17(2): 233 - 239.

- (in Chinese with English abstract) ]
- [ 4 ] 易连兴. 西南岩溶山区复合水动力场滑坡影响模式——以关岭县大寨滑坡为例 [J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(4): 43 – 50. [ YI Lianxing. Impact model of landslide with complex hydrodynamic field in Karst Mountain areas of southwest China: A case study of the Dazhai landslide in Guanling County[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(4): 43 – 50. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 5 ] 殷跃平, 王文沛, 张楠, 等. 强震区高位滑坡远程灾害特征研究——以四川茂县新磨滑坡为例 [J]. 中国地质, 2017, 44(5): 827 – 841. [ YIN Yueping, WANG Wenpei, ZHANG Nan, et al. Long runout geological disaster initiated by the ridge-top rockslide in a strong earthquake area: A case study of the Xinmo landslide in Maoxian County, Sichuan Province[J]. Geology in China, 2017, 44(5): 827 – 841. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 6 ] ZHAO Weihua, WANG Rui, LIU Xiuwei, et al. Field survey of a catastrophic high-speed long-runout landslide in Jichang Town, Shuicheng County, Guizhou, China, on July 23, 2019[J]. Landslides, 2020, 17(6): 1415 – 1427.
- [ 7 ] 张磊, 周银朋, 庄宇, 等. 贵州水城尖山营滑坡动力学特性分析与隐患点致灾范围预测 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34(3): 1 – 7. [ ZHANG Lei, ZHOU Yinpeng, ZHUANG Yu, et al. Dynamic analysis and prediction of rear slope affected area of the Jianshanying landslide in Shuicheng County, Guizhou Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(3): 1 – 7. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 8 ] 高浩源, 高杨, 殷跃平, 等. 青藏高原高位远程滑坡动力学研究的新问题 [J]. 地质力学学报, 2022, 28(6): 1090 – 1103. [ GAO Haoyuan, GAO Yang, YIN Yueping, et al. New scientific issues in the study of high-elevation and long-runout landslide dynamics in the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of Geomechanics, 2022, 28(6): 1090 – 1103. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 9 ] MUCEKU Y, KORINI O. Landslide and slope stability evaluation in the historical town of Kruja, Albania[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2014, 14(3): 545 – 556.
- [ 10 ] FAN Xuanmei, XU Qiang, SCARINGI G, et al. Failure mechanism and kinematics of the deadly June 24th 2017 Xinmo landslide, Maoxian, Sichuan, China[J]. Landslides, 2017, 14(6): 2129 – 2146.
- [ 11 ] SCHEIDEGGER A E. On the prediction of the reach and velocity of catastrophic landslides[J]. Rock Mechanics, 1973, 5(4): 231 – 236.
- [ 12 ] DAVIES T R H. Spreading of rock avalanche debris by mechanical fluidization[J]. Rock Mechanics, 1982, 15(1): 9 – 24.
- [ 13 ] XIN Peng, LIANG Changyu, WU Shuren, et al. Kinematic characteristics and dynamic mechanisms of large-scale landslides in a Loess Plateau: A case study for the north bank of the Baoji stream segment of the Wei River, China[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2016, 75(2): 659 – 671.
- [ 14 ] 杨明钰, 陈红旗, 祁小博, 等. 基于可靠度理论的地震滑坡运动距离预测模型 [J]. 中国地质调查, 2023, 10(3): 102 – 109. [ YANG Mingyu, CHEN Hongqi, QI Xiaobo, et al. Prediction model for the landslide movement distance induced by earthquake based on the reliability theory[J]. Geological Survey of China, 2023, 10(3): 102 – 109. (in Chinese) ]
- [ 15 ] SULPIZIO R, CASTIONI D, RODRIGUEZ-SEDANO L A, et al. The influence of slope-angle ratio on the dynamics of granular flows: Insights from laboratory experiments[J]. Bulletin of Volcanology, 2016, 78(11): 77.
- [ 16 ] DEANGELI C. Laboratory granular flows generated by slope failures[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2008, 41(1): 199 – 217.
- [ 17 ] 雷先顺, 朱大勇, 刘诚, 等. 考虑滑道坡度和宽度的滑坡模型试验研究 [J]. 岩土力学, 2017, 38(5): 1281 – 1288. [ LEI Xianshun, ZHU Dayong, LIU Cheng, et al. Model test study of the effect of slope angle and chute width on landslide[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(5): 1281 – 1288. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 18 ] 胡晓波, 樊晓一, 唐俊杰. 基于离散元的高速远程滑坡运动堆积特征及能量转化研究——以三溪村滑坡为例 [J]. 地质力学学报, 2019, 25(4): 527 – 535. [ HU Xiaobo, FAN Xiaoyi, TANG Junjie. Accumulation characteristics and energy conversion of high-speed and long-distance landslide on the basis of Dem: A case study of sanxicun landslide[J]. Journal of Geomechanics, 2019, 25(4): 527 – 535. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 19 ] ZHU Yuxuan, DAI Fuchu. Insights into the kinetic and fragmentation characteristics of a ridge-top rock avalanche based on field investigation and discrete element simulation[J]. Bulletin of Engineering Geology and the

- [Environment](#), 2021, 80(3): 2085 – 2099.
- [20] 吴伟乐, 贺凯, 高杨, 等. 强降雨条件下碎屑岩滑坡远程运动模拟分析——以牛儿湾滑坡为例 [J]. [地质力学学报](#), 2022, 28(6): 1115 – 1126. [ WU Weile, HE Kai, GAO Yang, et al. Long-runout fluidization disaster simulation analysis of elastic landslide under heavy rainfall: A case study of the Niuerwan landslide[J]. [Journal of Geomechanics](#), 2022, 28(6): 1115 – 1126. (in Chinese with English abstract) ]
- [21] WANG Huanling, LIU Shiqi, XU Weiya, et al. Numerical investigation on the sliding process and deposit feature of an earthquake-induced landslide: A case study[J]. [Landslides](#), 2020, 17(11): 2671 – 2682.
- [22] WEI Li, CHENG Hualin, DAI Zili. Propagation modeling of rainfall-induced landslides: A case study of the shaziba landslide in Enshi, China[J]. [Water](#), 2023, 15(3): 424.
- [23] TANG Chaolung, HU Jyrching, LIN Minglang, et al. The Tsaoling landslide triggered by the Chi-Chi earthquake, Taiwan: Insights from a discrete element simulation[J]. [Engineering Geology](#), 2009, 106(1/2): 1 – 19.
- [24] 郭长宝, 王磊, 李任杰, 等. 西藏贡觉粉砂质泥岩工程地质特性与蠕变强度研究 [J]. [水文地质工程地质](#), 2021, 48(5): 54 – 64. [ GUO Changbao, WANG Lei, LI Renjie, et al. Engineering geology properties and creeping strength characteristics of the silty mudstone in Gongjue County in Tibet of China[J]. [Hydrogeology & Engineering Geology](#), 2021, 48(5): 54 – 64. (in Chinese with English abstract) ]
- [25] 陈果, 钮志林, 樊晓一, 等. 高速远程滑坡沿程速度演化与冲击力分布研究——以三溪村滑坡为例 [J]. [自然灾害学报](#), 2022, 31(3): 232 – 241. [ CHEN Guo, NIU Zhilin, FAN Xiaoyi, et al. Velocity evolution and impact force distribution of high-velocity and long-runout landslide debris flow along the way: A case study of Sanxi Village landslide[J]. [Journal of Natural Disasters](#), 2022, 31(3): 232 – 241. (in Chinese with English abstract) ]
- [26] DUMAN T Y. The largest landslide dam in Turkey: Tortum landslide[J]. [Engineering Geology](#), 2009, 104(1/2): 66 – 79.
- [27] XU Zhenhao, WANG Wenyang, LIN Peng, et al. A parameter calibration method for PFC simulation: Development and a case study of limestone[J]. [Geomechanics and Engineering](#), 2020, 22: 97 – 108.
- [28] 赵国彦, 戴兵, 马驰. 平行黏结模型中细观参数对宏观特性影响研究 [J]. [岩石力学与工程学报](#), 2012, 31(7): 1491 – 1498. [ ZHAO Guoyan, DAI Bing, MA Chi. Study of effects of microparameters on macroproperties for parallel bonded model[J]. [Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering](#), 2012, 31(7): 1491 – 1498. (in Chinese with English abstract) ]
- [29] 阿比尔的, 郑颖人, 冯夏庭, 等. 平行黏结模型宏细观力学参数相关性研究 [J]. [岩土力学](#), 2018, 39(4): 1289 – 1301. [ ABI ERDI, ZHENG Yingren, FENG Xiating, et al. Relationship between particle micro and macro mechanical parameters of parallel-bond model[J]. [Rock and Soil Mechanics](#), 2018, 39(4): 1289 – 1301. (in Chinese with English abstract) ]
- [30] 周博, 汪华斌, 赵文锋, 等. 黏性材料细观与宏观力学参数相关性研究 [J]. [岩土力学](#), 2012, 33(10): 3171 – 3175. [ ZHOU Bo, WANG Huabin, ZHAO Wenfeng, et al. Analysis of relationship between particle mesoscopic and macroscopic mechanical parameters of cohesive materials[J]. [Rock and Soil Mechanics](#), 2012, 33(10): 3171 – 3175. (in Chinese with English abstract) ]
- [31] 葛云峰, 周婷, 霍少磊, 等. 高速远程滑坡运动堆积过程中的能量传递机制 [J]. [地球科学](#), 2019, 44(11): 3939 – 3949. [ GE Yunfeng, ZHOU Ting, HUO Shaolei, et al. Energy transfer mechanism during movement and accumulation of rockslide avalanche[J]. [Earth Science](#), 2019, 44(11): 3939 – 3949. (in Chinese with English abstract) ]
- [32] 陶伟, 胡晓波, 姜元俊, 等. 颗粒粒径对滑坡碎屑流动力特征及能量转化的影响——以四川省三溪村滑坡为例 [J]. [地质通报](#), 2023, 42(9): 1610 – 1619. [ TAO Wei, HU Xiaobo, JIANG Yuanjun, et al. Influence of particle size on energy evolution of debris flow in landslide based on DEM: A case study of Sanxicun landslide[J]. [Geological Bulletin of China](#), 2023, 42(9): 1610 – 1619. (in Chinese with English abstract) ]

编辑: 王支农