

基于块体离散元的高速远程滑坡灾害动力学研究

刘广煜¹, 徐文杰¹, 佟彬², 王立朝²

(1. 清华大学 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084; 2. 中国地质环境监测院, 北京 100081)

摘要: 高速远程滑坡的破裂及致灾机制一直是滑坡灾害难点之一。为了深入高速远程滑坡灾害动力学过程, 本文提出一种基于块体离散元法的黏结断裂模型, 并基于图形处理器(GPU)实现了高性能并行计算, 进而开发了地质体从连续到破裂解体过程的耦合模拟平台-耦合离散元程序(CoDEM)。在此基础上以2000年西藏易贡滑坡为例, 系统研究了滑坡体的“高位崩塌区崩解启动-老滑坡体复活-碎屑流高速流动-堰塞体形成”的全过程。通过对比数值计算结果和现场地质调查资料, 表明计算得到的堆积范围、物质组成与滑坡实际状态较为吻合。根据滑坡不同阶段的运动特征, 将滑坡灾害区分为4个部分: 启动区、缓冲区、流通区和刹车区。

关键词: 边坡工程; 高速远程滑坡; 黏结断裂模型; 块体离散元; 图形处理器(GPU); 耦合离散元程序(CoDEM)

中图分类号: P 64

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2019)08-1557-10

Study on dynamics of high-speed and long run-out landslide hazards based on block discrete element method

LIU Guangyu¹, XU Wenjie¹, TONG Bin², WANG Lichao²

(1. State Key Laboratory of Hydrosience and Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. China Institute of Geoenvironment Monitoring, Beijing 100081, China)

Abstract: The fracture and disaster-causing mechanism of high-speed and long run-out landslides is one difficulty of landslide disasters. In order to deeply study the dynamic process of landslides from continuum to discontinuum, a cohesive fracture model is proposed based on block discrete element method. High-performance parallel computing based on graphics processor unit(GPU) is achieved, and a coupling simulation platform called coupling discrete element method platform(CoDEM) is developed. Taking Yigong landslide as an example, the whole process of higher body collapsing, old landslide body resurrecting, debris flowing at a high speed and dam forming is studied systematically. Comparison between the numerical results and in-situ survey data is performed. It is shown that the numerical results including accumulation boundary and material components are in good agreement with the actual situation of the landslide. According to the dynamics characteristics during the landslide at different stages, the landslide area can be divided into four parts such as the initiation zone, the buffer zone, the circulation zone and the braking zone.

Key words: slope engineering; high-speed and long run-out landslide; cohesive fracture model; block discrete element method; graphics processing unit(GPU); coupling DEM(CoDEM)

收稿日期: 2019-03-07; **修回日期:** 2019-05-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51679123, 51879142); 中国地质调查局项目(DD20160280)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant Nos. 51679123 and 51879142) and China Geological Project(Grant No. DD20160280)

作者简介: 刘广煜(1995-), 男, 2017年毕业于山东大学城市地下空间专业, 现为博士研究生, 主要从事地质灾害方面的研究工作。E-mail: liuguangyusdu@outlook.com。通讯作者: 徐文杰(1978-), 男, 博士, 现任副教授。E-mail: wenjiexu@tsinghua.edu.cn

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2019.0158

1 引言

高速远程滑坡具有运动速度快、运动距离长、灾害范围大、破坏力强等特点，一直是国内外工程地质和地质灾害领域研究的热点问题之一。高速远程滑坡在运动过程中，滑坡体不断解体、碎裂，并最终转化为碎屑流体，形成“崩-滑-流”复合灾害链^[1]。近年来，我国西南地区发生多起高速远程滑坡灾害事故，并给临近的居民和工程建设造成了极大的危害。以2008年5.12汶川地震($M_s8.0$)为例，地震中诱发了多起高速远程滑坡，如：映秀牛圈沟滑坡运动距离达3.2 km，造成50人遇难^[2]；青川东河口滑坡运动距离长达2.4 km，掩埋了4个村庄，造成约780人遇难；2009年重庆市武隆县鸡尾山约500万 m^3 山体发生崩塌破坏，形成厚30 m、长约2200 m的堆积区，造成74人遇难^[3]；2010年由突降暴雨引发的贵州关岭滑坡，总滑程1.5 km，体积约174.9万 m^3 ，致使99人遇难^[4]。这一系列高速远程滑坡灾害事件，给防灾减灾技术和理论进一步发展提出了迫切需求。

近些年来，国内、外学者对高速远程滑坡的运动机制和远程效应开展了一系列相关的研究。通过现场调查和研究，K. Sassa^[5]认为碎屑流在冲积层、淤积层上运动时，会铲刮底部形成一层近似饱和的淤泥层，并产生超静孔隙水压力，从而使碎屑流给地面的有效应力减小，摩擦阻尼降低，产生高速运动；黄润秋等^[6]通过现场调查大光包高速远程滑坡，描述了碎屑流的堆积物颗粒的形态特征，进而推断滑坡产生的机制和过程；殷跃平等^[7]认为气垫层作用及气浪作用在碎屑流运动阶段影响显著研究，使高速远程崩滑-碎屑流呈现流体化特征；在室内模型试验方面，郝明辉等^[8]采用大型滑槽，分析了碎屑粒径和滑床糙率对运动距离的影响；王玉峰等^[9]设计了流化床试验装置，研究了高速碎屑流在不同粒径下裹气流态化的特性；许强等^[10]结合遥感、无人机航拍、地面合成孔径雷达监测等多种技术手段，多角度分析新磨村高速远程滑坡的成因，并提出对西南山区隐蔽性高位崩滑灾害进行排查和主动防范对策。然而由于高速远程滑坡的突发性、隐蔽性；高速运动过程中碎屑流底部与地面之间、碎屑流内部固体颗粒之间、碎屑流固体颗粒与间流体(水或者空气)存在复杂的相互作用；模型试验存在“尺寸效应”，难以实现复杂的边界条件；现场地质

调查测量手段受限等原因，采用模型试验和现场勘察难以准确反映其运动过程及机制。

随着近年来计算技术的发展，数值模拟方法在研究滑坡破裂过程及运动机制等方面发挥了重要的作用。C. Y. Kuo等^[11]通过连续性介质力学方法，建立了台湾桃岭滑坡的准三维模型，模拟了滑坡运动过程；W. J. Xu等^[12]利用动态有限元法，通过对唐家山滑坡的数值模拟，提出了地震诱发的高速滑坡运动过程分为四阶段；J. H. Wu和C. H. Chen^[13]通过大变形不连续变形分析法(DDA)研究滑坡运动中岩石块体的运动；张龙等^[14]通过离散元法(DEM)，利用PFC^{3D}软件对重庆鸡尾山高速远程滑坡破坏失稳全过程进行模拟；葛云峰等^[15]建立了重庆鸡尾山滑坡的四面体网格，设计正交试验，基于块体离散元法软件3DEC研究了鸡尾山高速远程滑坡稳定性的影响因素。C. H. Lin和M. L. Lin^[16]利用离散元法，将单轴试验的数值结果与实验结果进行了对比，确定离散单元间的细观参数，对滑坡的危险区进行模拟，预测滑坡灾害可能发生的位置及影响范围。G. Scaringi等^[17]分别使用基于连续介质力学方法的软件MassMov2D和Massflow以及基于非连续介质力学方法的软件PFC和MatDEM再现了新磨村滑坡全过程，将结果对比发现，对于沉积物的厚度和几何形状，通过多种数值方法和数值模型计算得到的结果难以一致，但是每个软件的模拟结果在主要运动特征方面类似。

连续性介质力学方法(例如，有限元、流体力学)难以模拟滑坡体从连续体到非连续体的过程，而非连续性介质力学方法(例如，离散元法，大变形不连续变形分析法等)在模拟非连续介质方面具有优势，在近几十年来发展迅速。离散元法根据颗粒类型可以分为2类，球体离散元和块体离散元。对于球体离散元，D. O. Potyondy和P. A. Cundall^[18]提出了黏结颗粒模型(BPM)，用于模拟岩石的破裂，目前已经得到学界广泛认可，其方法是在颗粒接触力的计算时引入法向和切向黏聚力，多个球颗粒类似被“黏”在一起，形成团簇；为扩大BPM模型的应用，使其适用于脆性岩石，S. Luc和D. Fredericvictor^[19]引入了接触变化参数，提高颗粒间的互锁效应。但是球体离散元在模拟岩体时，球颗粒形成的团簇中存在一定的空隙，体积与真实的岩石存在偏差，进而导致模拟岩石的转动和平动存在一定的误差，因而在岩质滑坡的建模和模拟方面存在一定的局限；而利用块体离散元可以克服这一弱点，建立

更接近真实岩体的多面体颗粒系统, P. A. Cundall^[20]在多面体接触时引入了黏聚力, 能够实现岩体的破裂, 可以模拟岩体中节理的作用, 并提出了公共面法判断颗粒间的接触类型(点点接触, 点面接触, 面面接触等)。目前该算法已经发展为软件 3DEC, 可以广泛应用到岩体破裂、滑坡等问题的数值模拟^[21-22]。在块体离散元中, 由于接触判断较为复杂, 导致计算效率较低, 难以解决大规模计算问题。为解决块体离散元的计算效率问题, N. Govender 等^[23-25]利用近年来发展迅速的图形处理器(GPU)进行高性能并行计算, 但是其模拟计算主要是应用在工业领域(料斗卸料、磨机效果等), 块体间的接触本构模型相对简单, 难以用于岩土体破裂过程的计算。因此, 发展能够高效地模拟岩土体断裂、变形、失稳至大变形的数值计算软件, 对于滑坡灾害机制研究及预警有十分重要的意义。为了进一步发展高速远程滑坡计算分析方法, 深入研究其动力学机制和灾害机制, 本文基于块体离散元法, 提出了一种黏结断裂模型, 并采用图形处理器(GPU)并行加速实现了高性能计算分析, 可以较好地用于滑坡体灾变过程中连续体到非连续体及破裂过程的转化研究。在此基础上, 应用于 2000 年易贡高速远程滑坡灾害动力学全过程研究。

2 离散元分析方法

离散单元法(DEM)由 P. A. Cundall 和 O. D. L. Strack^[26]在 1979 年提出, 40 年来该方法已经广泛应用在颗粒材料、岩土工程及地质灾害等领域^[27]。离散单元法作为非连续介质力学中的一种方法, 相较于连续介质力学方法, 它在解决岩土体大变形及破裂问题等方面具有显著的优势。在离散元法中, 每个时间步内, 每个颗粒都需要进行接触检测, 计算接触力和接触力矩, 更新颗粒位置和速度。接触检测分为 2 步, 首先进行粗接触检测, 得到该颗粒周围的颗粒, 其次进行细接触检测, 计算得到接触点、接触法线方向、嵌入深度, 用于下一步的接触力和接触力矩求解。最后, 分别对接触力和接触力矩求和, 基于牛顿第二定律进行插值, 更新颗粒的速度和位置。

2.1 黏结断裂模型

在采用块体离散元模拟块体间接触断裂时, 所采用的接触本构及断裂破坏准则直接影响了计算分析结果。目前已有的接触本构计算中, 为了简化计

算, 将整个接触面的断裂作为整体考虑^[20], 一旦满足破坏准则接触面将整体发生断裂, 从而使其难以模拟接触面的渐进破坏特征。

为了模拟块体间接触断裂的渐进破坏特征, 本文基于块体离散元法提出了一种黏结断裂模型, 用于两块体间接触力的计算。在该模型中, 数值模型需要划分为一系列面-面接触块体, 假定面-面接触的相邻块体之间存在黏聚力。进而, 所有的面-面接触对划分为一系列的点-点接触, 如图 1 所示。将破裂准则引入到点-点接触中, 如果法向或者切向接触力超过设定的强度值, 点-点接触的法线方向或者切线方向会发生断裂。对于每个点-点接触对, 接触面定义为由 4 个点形成的四边形(图 1 中的点 A_i), 四个点分别是接触点(图 1 中的点 P_i), 边的中点(图 1 中的 M_i)以及面心(图 1 中的点 C)。在本模型中, 两块体之间的黏结断裂前, 假定两块体的法线方向是 2 个面的法线方向的平均。

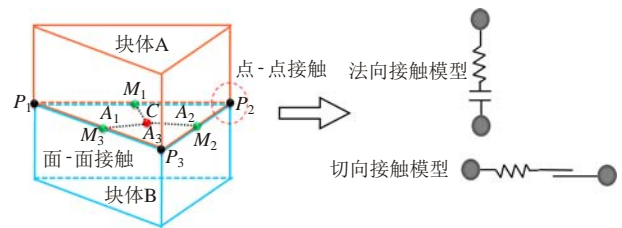


图 1 破裂前的黏结断裂模型

Fig.1 Cohesive fracture model(CFM) before fracturing

点-点接触的法向和切向作用力由法向刚度(k_n)和切向刚度(k_s)控制, 如图 2^[18]所示。如果 2 个黏结的块体分别是 A 和 B, 其接触力可以定义为所有的点-点接触的接触力之和, 其计算公式为

$$F_n = \sum_{i=1}^m F_{n_i} \quad (1)$$

$$F_s = \sum_{i=1}^m F_{s_i} \quad (2)$$

$$F_{n_i} = k_{n_i} u_{n_i} \mathbf{n} \quad (3)$$

$$F_{s_i} = \{F_{s_i}\}_{update} + k_{s_i} \Delta u_{s_i} \quad (4)$$

式中: m 为两块体的点-点接触数量, \mathbf{n} 为接触两块体间的法线方向, Δu_{s_i} 为接触点对的相对切向位移, $u_{n_i} = (\mathbf{P}_A - \mathbf{P}_B) \cdot \mathbf{n}$ 为接触点对连线在法线方向上的投影, k_{n_i} 和 k_{s_i} 分别为接触点上的法向和切向刚度, 其计算公式为

$$k_{n_i}^{AB} = \frac{(E^A + E^B)A_i}{L^A + L^B} \quad (5)$$

$$k_{s_i}^{AB} = k_{n_i}^{AB} \frac{V_i^A + V_i^B}{2} \quad (6)$$

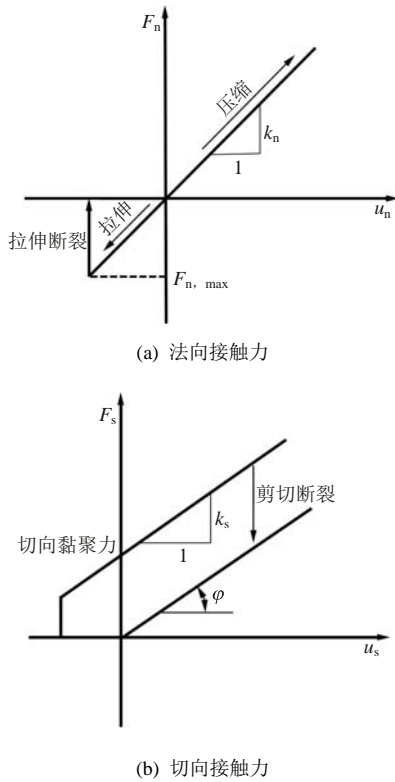


图2 黏结的点-点接触本构^[18]

Fig.2 Meso mechanical response of point-point contact in bond interactions^[18]

式中： A_i 为接触点 P_i 上的接触面积(图1中的面 A_i)； E 为杨氏模量； ν 为泊松比； L 为特征长度，其值等于与块体等体积球的半径。

定义法向最大拉力 $F_{max}^{n_i}$ 和切向最大作用力 $F_{max}^{s_i}$ 用于破裂准则的描述，法向最大拉力 $F_{max}^{n_i}$ 定义为法向黏聚力 C_n 的函数：

$$F_{max}^{n_i} = C_n A_i \tag{7}$$

根据莫尔-库仑准则，切向最大作用力 $F_{max}^{s_i}$ 定义为切向黏聚力 C_s 和内摩擦角 φ 的函数：

$$F_{max}^{s_i} = F_{n_i} \tan \varphi + C_s A_i \tag{8}$$

点-点接触的破裂准则分为2种情况，法向断裂和切向断裂如图2所示：

(1) 2个接触点对的法向接触力超过法向最大拉力($F_{max}^{n_i}$)，接触点对处黏结发生断裂，相应的法向和切向黏聚力设为0。

(2) 2个接触点对的切向黏聚力超过切向最大作用力($F_{max}^{s_i}$)，接触点对切向黏结断裂，相应的法向和切向黏聚力设为0。断裂准则总结为

$$\left. \begin{aligned} C_{n_i} = 0, C_{s_i} = 0 & \quad (-F_{n_i} > F_{max}^{n_i}) \\ C_{n_i} = 0, C_{s_i} = 0 & \quad (F_{s_i} > F_{max}^{s_i}) \end{aligned} \right\} \tag{9}$$

一旦相邻块体的面-面接触上的所有点-点接

触发生断裂，两块体之间的黏结发生断裂，法向和切向黏聚力均设置为0，两块体间的接触状态从黏结改为断裂状态，块体间仅考虑摩擦接触。

对于黏结发生断裂接触对和新出现接触的接触对，本文采用N. Govender等^[23]发展的显式凸多面体接触计算方法，并通过接触体积求得块体间的接触力(见图3)，并通过该计算接触体。如果2个黏结断裂的块体分别是A和B，并且两块体均为凸多面体，2个块体的相互接触同样会形成一个块体，同样是凸多面体，顶点为 V_i ，质心为 O ，以及围成凸多面体的各个面法线方向 n_A 和 n_B (见图3)。基于该接触的凸多面体，可以计算得到接触对块体A和B的法线方向，嵌入深度，接触面积，由此计算得到块体A和B的接触力。并根据每个面(图3中的 A_A 和 A_B)的面积权重，可以计算块体B对块体A的法线方向 n ：

$$n = 0.5 \left(\frac{\sum_{i=1}^{m_A} A_{A_i} n_{A_i}}{\sum_{i=1}^{m_A} A_{A_i}} - \frac{\sum_{i=1}^{m_B} A_{B_i} n_{B_i}}{\sum_{i=1}^{m_B} A_{B_i}} \right) \tag{10}$$

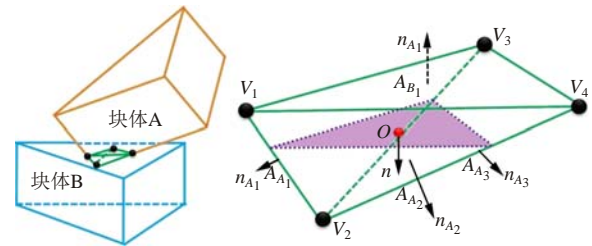


图3 断裂后的接触体积法
Fig.3 Contact volume method after fracturing

嵌入深度(u_n)是块体顶点连线在法线方向上的最大值，接触面积(A)定义为接触体积除以嵌入深度。块体A和B间的作用力计算如下：

$$F_n = k_n u_n n \tag{11}$$

$$F_s = \{F_s\}_{update} + k_s \Delta u_s \tag{12}$$

$$k_n^{AB} = \frac{(E^A + E^B)A}{L^A + L^B} \tag{13}$$

$$k_s^{AB} = k_n^{AB} \frac{V^A + V^B}{2} \tag{14}$$

$$F_{max}^n = 0 \tag{15}$$

$$F_{max}^s = F_n \tan \varphi \tag{16}$$

2.2 GPU高性能算法

对于由上百万单元的大尺度数值模型，如果采用串行构架的程序，整个迭代计算过程是非常耗时的。实际上，每个单元执行的接触检测等步骤是相对较独立的，适合并行程序框架。近年来，并行程

序越来越受到研究人员重视。比起传统的中央处理器(CPU)的并行方法,图形处理器(GPU)有一个更好的并行架构,能够同时处理上千条线程,是 CPU 的几百倍甚至几千倍^[28]。计算统一设备架构(CUDA)是一个并行编程平台,能够方便用户轻松地编写基于 GPU 的并行代码。CUDA 由两部分构成,主机端(host)和设备端(device)。主机端在 CPU 上执行,存储在其内存;设备端在 GPU 上执行,存储在其显存。

为了提高计算效率,本文将所提出的黏结断裂模型应用于 N. Govender 等^[24]提出的 GPU 算法,开发了用于地质体从连续到非连续耦合过程计算分析的程序框架 Coupling Discrete Element Model Platform (CoDEM)。图 4 为并行框架下 CoDEM 程序流程图,程序可以分成两部分:一方面,在 CPU 上执行存储,包括数据(包括块体的位置、速度和细观参数等)读取,数据在 CPU 和 GPU 的互相传输;另一方面,在 GPU 上执行存储,包括邻居搜索、接触检测等核函数的执行。

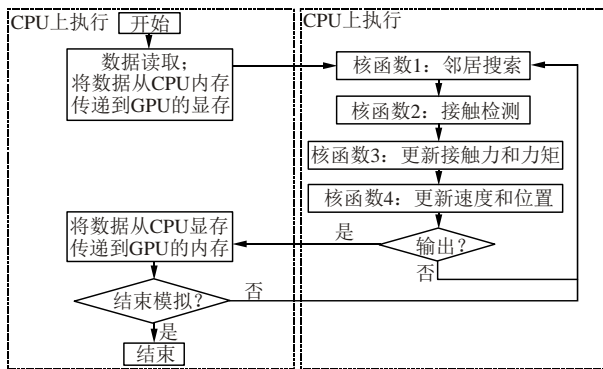


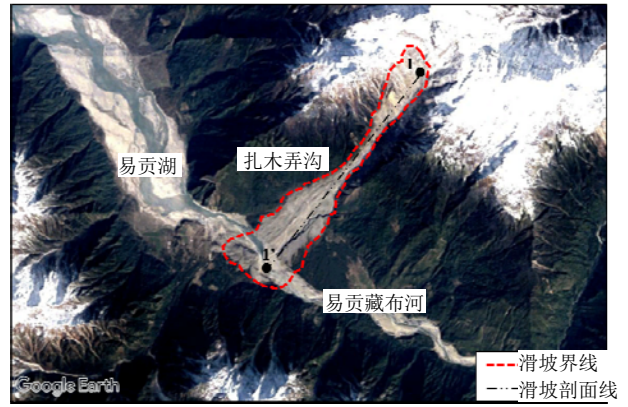
图 4 GPU 并行框架下的 CoDEM 程序流程图

Fig.4 Flow chart of GPU-based software CoDEM in parallel framework

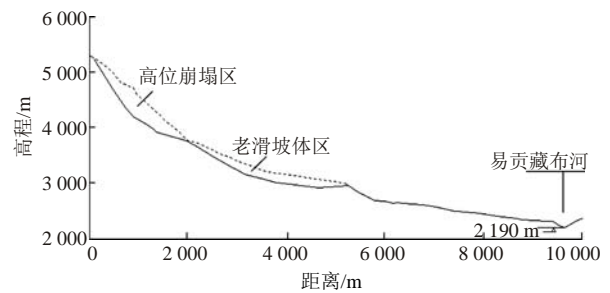
3 易贡滑坡区崩滑概况

2000 年西藏波密县易贡乡易贡藏布河左岸的扎木弄沟发生滑坡(见图 5(a))。滑坡区高差 3 332 m,海拔最低处位于易贡藏布河谷,高程约 2 188 m;海拔最高处约 5 520 m(见图 5(b))。灾害发生时,体积 $(2.8\sim 3.0)\times 10^8\text{ m}^3$ 的山体发生失稳滑动,在沟谷中形成长约 2 500 m,宽约 2 500 m,最大厚度 100 m,平均厚度 60 m,面积约 5 km²的堰塞体,阻塞易贡藏布河,威胁下游数千人的生命和财产安全^[29]。

构成易贡滑坡岩层主要包括:花岗岩,主要分布在海拔 4 100 m 以上,构造裂隙发育切割成破碎状;大理岩、石英片岩,主要分布在海拔 2 600~



(a) 滑坡区范围



(b) 滑坡 1-1'剖面示意图

图 5 易贡高速远程滑坡区

Fig.5 Yigong high-speed and long run-out landslide area

4 100 m, 裂隙及构造面较发育;第四系土石混合物,分布在坡麓^[29]。根据已有的研究成果^[30],易贡滑坡发生主要是由于冰雪融化导致高位滑坡区的楔形岩体饱水失稳,崩塌后以极高的速度冲击老滑坡体,激发沟内碎屑物质,形成块石-碎屑流,高速下滑入江,形成“土-石-水-气”混合物,堵塞易贡藏布江。高位滑坡区崩塌前,坡角 40°~50°,坡床较为平缓,坡度在 25°以上;滑坡发生后该部位滑坡床成“V”型悬谷(见图 5)。下部老滑坡体滑床坡角在 20°~40°,局部陡峭。滑坡下游沟谷坡度相对平缓。

根据现场调查^[29],滑坡堆积区具有环带状分布的特点(见图 6):中轴部地带为块石堆积区(I),块石含量超过 90%,块体越靠近谷底,直径越小,其中块石 90%以上是花岗岩,来自高位崩塌区(图 6 中黄色区域);环绕中轴部的地带为碎屑、砂及粉尘堆积带(II),可以分为 2 类区域,一类主要是由砂、碎屑构成(图 6 中红色区域),另一类由砂、碎屑及块石组成,其中块石含量 20%~30%,物质成分以花岗岩为主(图 6 中蓝色区域);再向外依次为铲削-碎屑叠加堆积带(III)(图 6 中绿色区域)和气流波及影响带(IV),此处仅有少量块石存在,大多为松散堆积物。

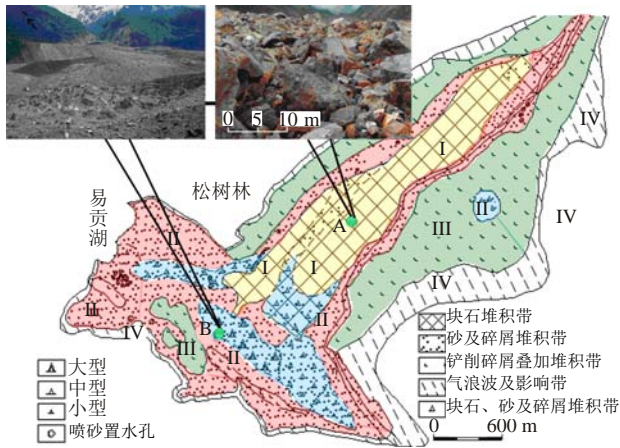


图6 易贡滑坡堆积区概况(根据 Q. Xu 等^[29]修改)

Fig.6 Overview of Yigong landslide accumulation area (modified after Q. Xu et al^[29])

4 易贡高速远程滑坡全过程模拟

4.1 计算模型

为了研究滑坡体的高速运动过程, 本文选取研究滑坡体的主剖面(见图 5(b))构建数值计算模型(见图 7)。模型由滑坡体和滑坡床组成, 滑坡体分为高位崩塌区和老滑坡体区, 高位崩塌区由 42 319 个六面体构成, 老滑坡体区由 36 001 个六面体构成, 滑坡床由 3 131 个六面体组成。根据滑坡区地层岩性的描述, 高位崩塌区和老滑坡体区其块体间接触参数见表 1, 计算采用本文开发的软件耦合模拟平台 Coupling Discrete Element Method Platform (CoDEM), 整个计算过程仅耗时 5 h。

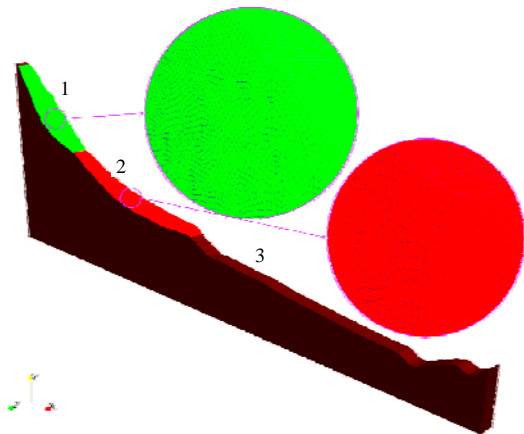


图7 易贡高速远程滑坡地质模型网格

Fig.7 The geological model of Yigong landslide

4.2 易贡高速远程滑坡堆积体特征

图 8 显示了计算得到的易贡滑坡在最终堆积状态下的整体形态以及物质组成, 堆积范围总体上可以分为三部分: 块石堆积区、块石碎屑堆积区和碎

表 1 易贡滑坡细观力学参数设置

Table 1 Meso-mechanical parameters for Yigong landslide

| 材料分区 | 密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$ | 杨氏模量 E / GPa | 泊松比 ν | 法向黏聚力 C_n / MPa | 切向黏聚力 C_t / MPa | 静摩擦角 $(^\circ)$ | 动摩擦角 $(^\circ)$ |
|-------|---|-----------------------|-----------|--------------------------|--------------------------|-----------------|-----------------|
| 高位崩塌区 | 2 800 | 20 | 0.5 | 40.0 | 80 | 25 | 10 |
| 老滑坡体区 | 2 400 | 20 | 0.5 | 0.5 | 1 | 25 | 10 |
| 滑坡床 | 2 800 | 20 | 0.5 | 0.0 | 0 | 20 | 20 |

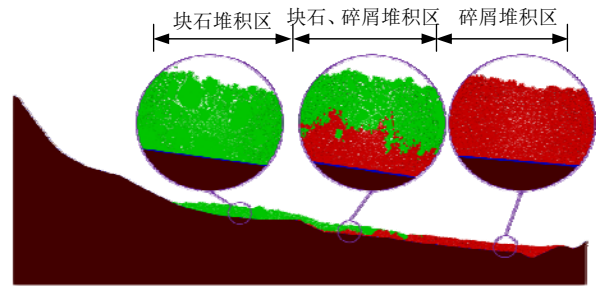


图8 易贡滑坡堆积体的范围及物质组成

Fig.8 Boundary and material composition of Yigong landslide accumulation body

屑堆积区。块石堆积区, 块体尺寸较大, 块石之间充填着一定数量的松散堆积体, 块石占的比例能够达到 85%左右, 并且该区物质成分以高位崩塌区的物质为主。块石堆积区的高程与图 6 所示的 I 区相吻合, 其物质成分与实际(高位崩塌区的花岗岩为主)一致。块石碎屑堆积区, 该区块石含量相对较少, 占比在 30%左右, 其尺寸相较于块石堆积区的尺寸明显减小; 并且在此区域, 可以看到明显的高位崩塌区与老滑坡体的混合, 岩体崩塌后带着巨大的动能冲击压缩老滑坡体, 导致老滑坡体迅速的解体崩塌, 并夹带着老滑坡体崩塌后形成的碎屑往前运动。块石碎屑堆积区与图 6 中蓝色区域的物质组成类似, 主要包含碎屑及块石, 块石占比与实际相吻合, 同时发现模拟结果也具有实际滑坡中块石含量、块石粒径随着运动距离越来越小的特点。碎屑堆积区, 位于堰塞坝的位置, 物质成分主要由老滑坡体提供, 在此处基本找不到块体存在(见图 8), 原因在于尺寸较大的岩石由于长距离的滑动, 已经停在块石碎屑堆积区。如图 8 所示, 此区域能够与实际的碎屑、砂及粉尘堆积带 II 区及铲削-碎屑叠加堆积带 III 区相对应, 块石含量极低, 同时形成了堰塞体阻塞易贡藏布河。

综上所述可以看出, 数值计算得到的滑坡堆积特征与实际较为吻合, 从而也在一定程度上验证了本文

提出的数值计算分析方法在模拟高速远程滑坡灾害研究方面的有效性。

4.3 易贡高速远程滑坡运动机制

图 9, 10 显示了数值计算得到的易贡滑坡变形破坏的全过程。随着时间的发展, 高位崩塌区首先

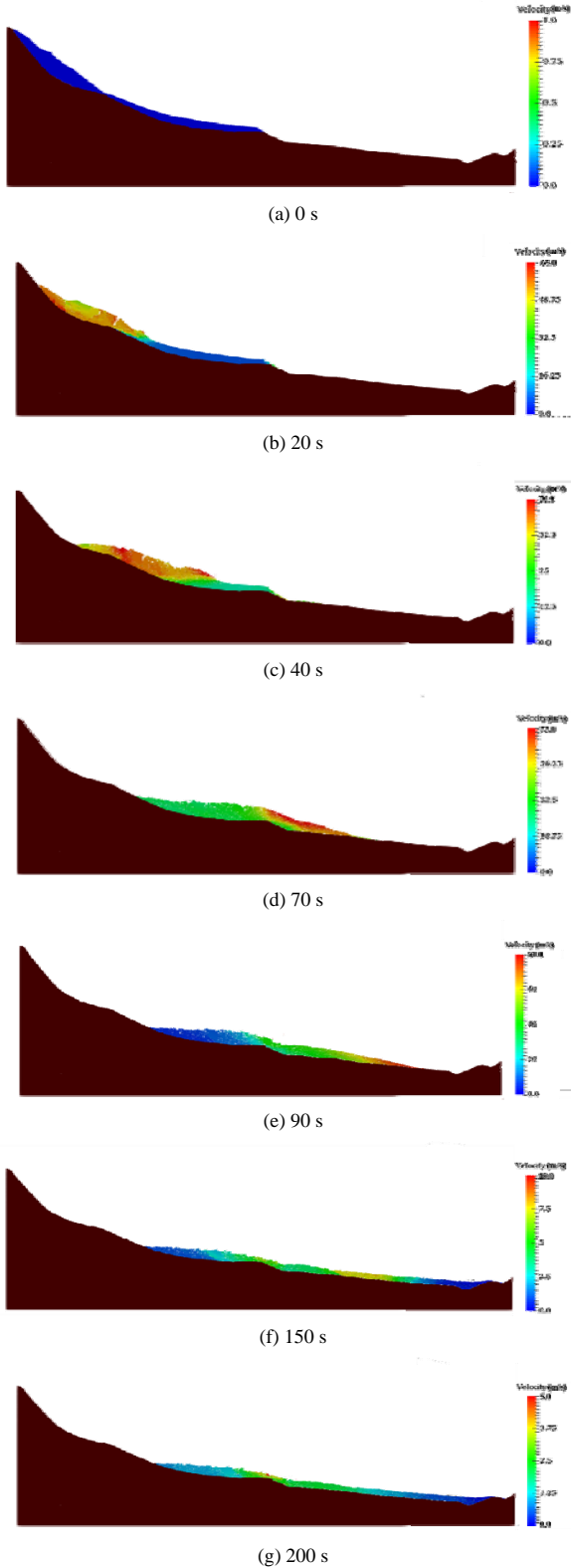


图 9 不同时刻滑坡的速度云图
Fig.9 Speed cloud maps of landslide at different stages

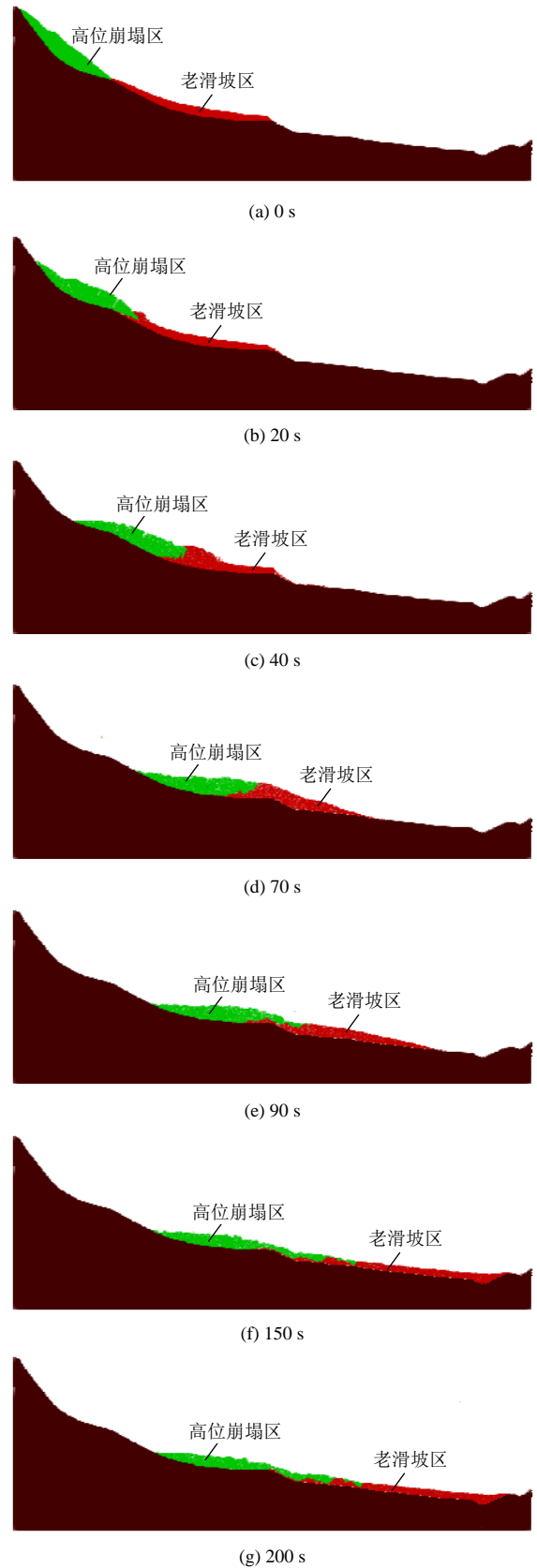


图 10 不同时刻滑坡体的位置
Fig.10 Positions of the landslide body at different stages

启动, 以较高的速度向下运动, 对下部的老滑坡区, 形成明显的“刮铲作用”, 并诱发了老滑坡体复活。

由于老滑坡体属于松散堆积体,强度较低,受高位崩塌区挤压的作用,形成高速流动的块石-碎屑流沿着沟谷向下运动。在接近沟口部位,由于坡度逐渐变缓,同时受沟床及两岸的阻隔,碎屑流速度逐渐降低。当冲出沟口后,撞击对岸山体,并在对岸山体的阻隔作用下,滑坡体速度急剧降低,堆积于河谷,形成堰塞体阻塞易贡藏布河。为深入研究滑坡体不同部位的运动特征,分别选取高位崩塌区和老滑坡体的坡脚、坡中、坡顶处的6个块体的运动特征进行监测(见图 11(a))。

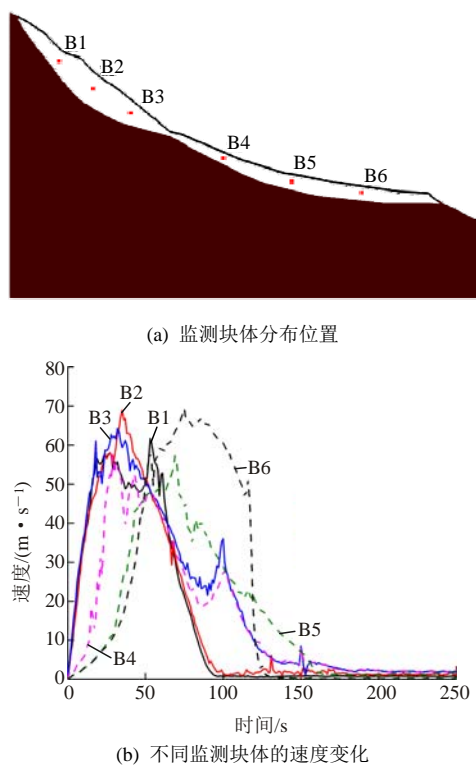


图 11 监测块体的位置及运动特征

Fig.11 Position and motion characteristics of the monitoring block

根据图 9 所示的易贡滑坡的运动全过程,可将其分 4 个阶段,即:

(1) 滑移启动阶段(小于 15 s)。高位崩塌区极快的加速度开始启动(见图 9),整个高位崩塌区向下滑移并冲剪出口向前运动,前缘上抬后局部悬空,在重力作用下发生折断,导致崩塌体在前半部分出现多处破裂(见图 10(b)),这与 Q. Xu 等^[29]所述一致。

(2) 崩塌挤压阶段(15~50 s)。受到老滑坡的阻隔作用(见图 10(c)),高位崩塌岩体各部位速度均有所波动(见图 11),并开始出现下降趋势;与此同时,受来自上部崩塌岩体的高速撞击和挤压作用,下方老滑坡体的速度开始迅速增加,增加的顺序明显可以看到是从坡顶、坡中、坡底(见图 11)。因此,高位

崩塌区挤压作用是造成老滑坡体复活的主要因素。

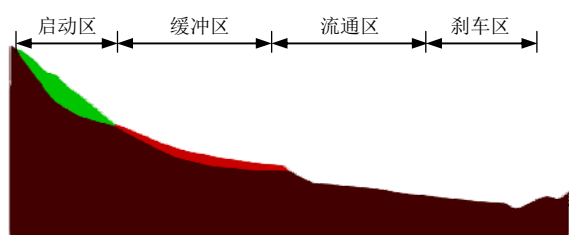
(3) 碎屑流动阶段(50~100 s)。由于老滑坡体处于临空状态,在高位崩塌区的滑体挤压推动作用下,老滑坡体解体崩塌,各部位速度持续增加(B4, B5, B6),进而形成碎屑流,高位崩塌区坡脚处的块石与碎屑开始融合,沿着沟谷向下游涌去(见图 10(d), (e))。同时,由于老滑坡体的阻隔作用,高位崩塌区所有部位的块体都有不同程度的减速,但是坡顶和坡中处块体减速幅度最大(B1, B2),并逐渐稳定;坡底处块体出现速度的“次高峰”(B3),这是由于坡底处的块体相对坡顶和坡底处在挤压作用下更破碎,小块体和碎屑混合,速度再次上升,冲向沟口。

(4) 刹车减速阶段(100 s 后)。随着向下运动,由于距离沟口部位的地形逐渐变缓,同时受沟床和沟谷的摩擦作用,以及冲出沟口后对岸山体阻隔,碎屑流速度迅速降低。如图 11(b)所示, B6 块体是位于块石碎屑流的前方,速度达到 70 m/s,遭到对面山体的阻挡后,速度迅速降低,很快达到静止状态,类似于“急刹车”; B5 块体处于块石碎屑流的中部,减速明显慢于 B6 块体,其减速主要是通过撞击已经减速的块体以及摩擦效应,其撞击减速亦即与图 11 中相应曲线出现多次突变的现象相对应; B3 和 B4 块体减速幅度明显慢于 B5, B6 块体,其减速主要通过摩擦作用,减速过程缓慢。

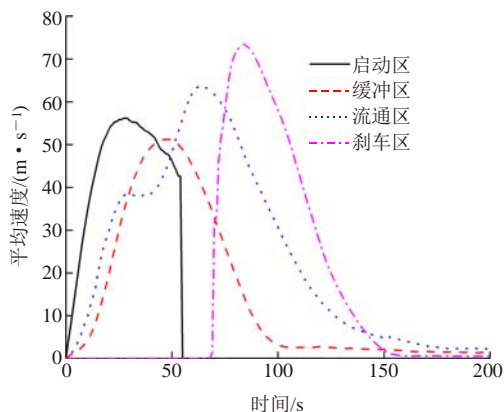
为深入研究高速远程滑坡运动特征,分析不同部位滑坡体的运动特点,本文对滑坡体沿程的运动状态进行了监测分析。首先将整个滑坡范围分成若干个条块,计算每个时间步下各条块内所有块体的平均速度,并输出该条块的平均速度随时间的变化曲线。图 12 显示了滑坡沿程各部位的运动特征,从总体上来看,可将整体的运动区域可以分为 4 个部分:

(1) 启动区。该部位大致与高位崩塌区相对应,该区域内在 0~15 s 内,以极大的加速度瞬间加速到将近 60 m/s,迅速冲击老滑坡体区。但是在 50 s 后,该区平均速度迅速减至 0 m/s,表明该区中的物质已经全部离开本区。在该区中速度有一定程度的下降,但仍能够保持该区平均速度峰值的 70%,因而该区具有加速快、速度高的特点。

(2) 缓冲区。该区域与老滑坡体区相对应,该区达到峰值时,高位崩塌区的速度降低至 0 m/s,同时注意到,由于高位崩塌区与老滑坡体的挤压撞击导致能量损失,缓冲区的峰值低于启动区的峰值。缓冲区速度在达到峰值后,在缓冲区的原静止的块体受冲击后基本流出该区,剩余部分大的块石和少量碎屑在该区中,在摩擦的作用下平均速度逐渐降



(a) 易贡滑坡运动分区



(b) 不同部位的滑坡体速度演化

图 12 易贡滑坡运动分区及各分区滑坡运动特征

Fig.12 Movement section of Yigong landslide and movement characteristics of each section landslide

低。因而该区加速慢，速度峰值低，具有“缓冲”的特点。

(3) 流通区。该区域滑坡体的加速过程相较于缓冲区要快，在 15 s 前完成第一次的加速，15~50 s 平均速度有降低的趋势，由图 9(b)分析可知，块体从一定坡度的滑下撞击滑坡床，导致能量的损失，而又有速度较大的块体补充进入该区域，导致平均速度降低的趋势比较小。撞击滑坡床导致的减速作用在 40~70 s 范围减弱，同时该区平均速度迎来第二次上升，是由于块体在巨大的高差下的势能转化为动能，平均速度峰值明显高于启动区的峰值，甚至达到 70 m/s。该区运动距离长，70 s 后在摩擦作用下开始减速。相较于刹车区，该区减速作用更慢。因而该区具有减速时间长，平均速度峰值高的特点。

(4) 刹车区。该区域滑坡体的减速作用最为显著。在 100 s 达到峰值后，该区速度迅速锐减至不足 5 m/s，在沟谷底和对面山体的阻挡作用下，整个区域平均速度能够迅速降低。

5 结论

高速远程滑坡一直是地质灾害领域研究的热点和难点问题之一。为了高效地模拟滑坡体灾变过程中的高速运动及解体过程，本文提出了基于块体离

散元法的可以用于模拟接触间渐进断裂过程的黏结断裂模型，并将其实现了 GPU 高性能并行加速计算，开发了用于模拟地质体从连续介质到非连续介质破裂全过程的软件 CoDEM。基于该软件，以易贡滑坡为例，研究了高速远程滑坡的灾害动力学。得到结论如下：

(1) 根据数值计算及现场地质调查结果，易贡滑坡破裂、解体至堆积的全过程由以下几个阶段构成：高位崩塌区迅速崩塌，进而崩塌区产生的块石以极高的速度冲击老滑坡体，导致老滑坡体的复活，形成碎屑流以极高的速度冲向对岸山体，在对岸山体的阻隔、撞击及摩擦作用下，形成堰塞体堵塞易贡藏布江。

(2) 滑坡堆积区域大致可以分为 3 个部分，块石堆积区、块石碎屑堆积区和碎屑堆积区。将模拟得到的堆积范围、物质成分与实际相对比，两者体现出明显的一致性，验证了黏结断裂模型可以实现高速远程滑坡崩解、破裂直至形成堆积体的全过程，能够有效地模拟滑坡等岩土体的大变形问题。

(3) 根据不同部位的运动特点，将滑坡灾害影响区分为 4 个部分：启动区、缓冲区、流通区和刹车区。启动区加速快，速度较高，高位崩塌区产生大量的破裂形成块石；缓冲区速度较启动区稍低，加速慢，老滑坡体类似“缓冲”作用；流通区速度高，减速慢，在此区域内滑坡体的势能转化为动能，形成碎屑流；刹车区，碎屑流撞击对岸山体，导致极快地锐减至 0 m/s。

参考文献(References):

- [1] 黄润秋. 20 世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 433 - 454.(HUANG Runqiu. Large-scale landslides and their sliding mechanisms in China since the 20th century[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(3): 433 - 454.(in Chinese))
- [2] 朱 圻, 程谦恭, 王玉峰, 等. 高速远程滑坡超前冲击气浪三维动力学分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(10): 2 909 - 2 926.(ZHU Yin, CHENG Qiangong, WANG Yufeng, et al. Three-dimensional modelling and dynamic analysis of the airblast generated by rock avalanche[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(10): 2 909 - 2 926.(in Chinese))
- [3] 许 强, 黄润秋, 殷跃平, 等. 2009 年 6·5 重庆武隆鸡尾山崩滑灾害基本特征与成因机制初步研究[J]. 工程地质学报, 2009, 17(4): 433 - 444.(XU Qiang, HUANG Runqiu, YIN Yueping, et al. The Jiweishan landslide of June 5, 2009 in Wulong, Chongqing: Characteristics and failure mechanism[J]. Journal of Engineering Geology, 2009, 17(4): 433 - 444.(in Chinese))
- [4] 殷跃平, 朱继良, 杨胜元. 贵州关岭大寨高速远程滑坡 - 碎屑流研究[J]. 工程地质学报, 2010, 18(4): 445 - 454.(YIN Yueping, ZHU Jiliang, YANG Shengyuan. Investigation of a high speed and long

- run-out rockslide-debris flow at Dazhai in Guanling of Guizhou Province[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2010, 18(4): 445 - 454.(in Chinese)
- [5] SASSA K. Geotechnical model for the motion of landslides[C]// *Proceedings of the 5th International Symposium on Landslides*. [S. l.]: [s. n.], 1988: 37 - 55.
- [6] 黄润秋, 裴向军, 李天斌. 汶川地震触发大光包巨型滑坡基本特征及形成机制分析[J]. *工程地质学报*, 2008, 16(6): 730 - 741.(HUANG Runqiu, PEI Xiangjun, LI Tianbin. Basic characteristic and formation mechanism of the largest scale landslide at Daguangbao occurred during the Wenchuan Earthquake[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2008, 16(6): 730 - 741.(in Chinese))
- [7] 殷跃平, 潘桂棠, 刘宇平, 等. 汶川地震地质与滑坡灾害概论[M]. 北京: 地质出版社, 2009: 1 - 10.(YIN Yueping, PAN Guitang, LIU Yuping, et al. *Introduction to Wenchuan earthquake geology and landslide disaster*[M]. Beijing: Geological Publishing Press, 2009: 1 - 10.(in Chinese))
- [8] 郝明辉, 许强, 杨磊, 等. 滑坡-碎屑流物理模型试验及运动机制探讨[J]. *岩土力学*, 2014, 35(增1): 127 - 132.(HAO Minghui, XU Qiang, YANG Lei, et al. Physical modeling and movement mechanism of landslide-debris avalanches[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(Supp.1): 127 - 132.(in Chinese))
- [9] 王玉峰, 程谦恭, 张柯宏, 等. 高速远程滑坡裹气流态化模型试验研究[J]. *岩土力学*, 2014, 35(10): 2 775 - 2 786.(WANG Yufeng, CHENG Qiangong, ZHANG Kehong, et al. Study of fluidized characteristics of rock avalanches under effect of entrapped air[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(10): 2 775 - 2 786.(in Chinese))
- [10] 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): 2 612 - 2 628.(XU Qiang, LI Weile, DONG Xiujun, et al. The Xinmocu landslide on June 24, 2017 in Maoxian, Sichuan: Characteristics and failure mechanism[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(11): 2 612 - 2 628.(in Chinese))
- [11] KUO C Y, TAI Y C, BOUCHUT F, et al. Simulation of Tsaoling landslide, Taiwan, based on Saint Venant equations over general topography[J]. *Engineering Geology*, 2009, 104(3/4): 181 - 189.
- [12] XU W J, XU Q, WANG Y J. The mechanism of high-speed motion and damming of the Tangjiashan landslide[J]. *Engineering Geology*, 2013, 157: 8 - 20.
- [13] WU J H, CHEN C H. Application of DDA to simulate characteristics of the Tsaoling landslide[J]. *Computers and Geotechnics*, 2011, 38(5): 741 - 750.
- [14] 张龙, 唐辉明, 熊承仁, 等. 鸡尾山高速远程滑坡运动过程PFC3D模拟[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(增1): 2 601 - 2 611.(ZHANG Long, TANG Huiming, XIONG Chengren, et al. Movement process simulation of high-speed long-distance Jiweishan landslide with PFC3D[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(Supp.1): 2 601 - 2 611.(in Chinese))
- [15] 葛云峰, 唐辉明, 熊承仁, 等. 滑动面力学参数对滑坡稳定性影响研究——以重庆武隆鸡尾山滑坡为例[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(增2): 3 873 - 3 884.(GE Yunfeng, TANG Huiming, XIONG Chengren, et al. Effect of sliding plane mechanical parameters on landslide stability——A case study of Jiweishan rockslide in Wulong, Chongqing[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(Supp.2): 3 873 - 3 884.(in Chinese))
- [16] LIN C H, LIN M L. Evolution of the large landslide induced by Typhoon Morakot: a case study in the Butangbunasi River, Southern Taiwan using the discrete element method[J]. *Engineering Geology*, 2015, 197: 172 - 187.
- [17] SCARINGI G, FAN X, XU Q, et al. Some considerations on the use of numerical methods to simulate past landslides and possible new failures: the case of the recent Xinmo landslide(Sichuan, China)[J]. *Landslides*, 2018, 15(7): 1 359 - 1 375.
- [18] POTYONDY D O, CUNDALL P A. A bonded-particle model for rock[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, 41(8): 1 329 - 1 364.
- [19] LUC S, FRÉDÉRIC-VICTOR D. A DEM model for soft and hard rocks: Role of grain interlocking on strength[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2013, 61(2): 352 - 369.
- [20] CUNDALL P A. Formulation of a three-dimensional distinct element model—Part I. A scheme to detect and represent contacts in a system composed of many polyhedral blocks[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1988, 25(3): 107 - 116.
- [21] ITASCA. 3DEC(Three-dimensional distinct element code)[M]. USA: Itasca Consulting Group Inc., 2013: 1 - 55.
- [22] BRIDEAU M A, STURZENEGGER M, STEAD D, et al. Stability analysis of the 2007 Chehalis lake landslide based on long-range terrestrial photogrammetry and airborne LiDAR data[J]. *Landslides*, 2012, 9(1): 75 - 91.
- [23] GOVENDER N, RAJAMANI R K, KOK S, et al. Discrete element simulation of mill charge in 3D using the BLAZE-DEM GPU framework[J]. *Minerals Engineering*, 2015, 79: 152 - 168.
- [24] GOVENDER N, WILKE DN, PIZETTE P, et al. A study of shape non-uniformity and poly-dispersity in hopper discharge of spherical and polyhedral particle systems using the Blaze-DEM GPU code[J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2017, 319: 318 - 336.
- [25] GOVENDER N, WILKE D N, WU C Y, et al. Hopper flow of irregularly shaped particles(non-convex polyhedra): GPU-based DEM simulation and experimental validation[J]. *Chemical Engineering Science*, 2018, 188: 34 - 51.
- [26] CUNDALL P A, STRACK O D L. A discrete numerical model for granular assemblies[J]. *Geotechnique*, 1979, 29(1): 47 - 65.
- [27] 王泳嘉, 邢纪波. 离散单元法及其在岩土力学中的应用[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 1991: 1 - 8.(WANG Yongjia, XING Jibo. *Discrete element method and its application in geotechnical mechanics*[M]. Shenyang: Northeastern University Press, 1991: 1 - 8.(in Chinese))
- [28] 刘明贵, 刘绍波, 张国华. GPU通用计算模式在岩土工程中的应用[J]. *岩土力学*, 2010, 31(9): 3 019 - 3 024.(LIU Minggui, LIU Shaobo, ZHANG Guohua. Application of general-purpose computation on GPUs to geotechnical engineering[J]. *Rock and Soil Mechanism*, 2010, 31(9): 3 019 - 3 024.(in Chinese))
- [29] XU Q, SHANG Y, ASCH T V, et al. Observations from the large, rapid Yigong rock slide-debris avalanche, southeast Tibet[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2012, 49(5): 589 - 606.
- [30] 殷跃平. 西藏波密易贡高速巨型滑坡特征及减灾研究[J]. *水文地质工程地质*, 2000, 27(4): 8 - 11.(YIN Yueping. Rapid huge landslide and hazard reduction of Yigong River in the Bomi, Tibet[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2000, 27(4): 8 - 11.(in Chinese))