

doi:10.3799/dqkx.2016.117

基于岩体结构特征的高速远程滑坡致灾范围评价

葛云峰¹, 唐辉明^{1*}, 李伟¹, 王亮清¹, 吴益平¹, 易贤龙¹, 熊承仁²

1. 中国地质大学工程学院, 湖北武汉 430074
2. 中国地质大学教育部长江三峡库区地质灾害研究中心, 湖北武汉 430074

摘要: 高速远程滑坡的演化机制与运动过程受控于岩体结构. 以重庆市武隆县鸡尾山滑坡为例, 采用地面激光扫描技术, 获取岩体结构面几何信息, 基于离散元数值模拟方法, 考虑岩体结构特征, 分析高速远程滑坡演化过程及其致灾范围. 研究结果表明: (1) 岩体结构特征由岩体内部发育的结构面所决定, 针对点云数据开展空间几何计算与聚类分析, 可以快速精细地获取岩体结构面产状信息, 从而进行岩体结构面识别与组别划分; (2) 将岩体结构特征评价结果导入离散元模型中, 能够实现高速远程滑坡致灾范围的快速评价目的, 并且取得了与实际滑动距离较为吻合的结果.

关键词: 高速远程滑坡; 岩体结构特征; 数值模拟; 聚类分析; 地面激光扫描; 离散元; 致灾范围.

中图分类号: P642.22 **文章编号:** 1000-2383(2016)09-1583-10 **收稿日期:** 2016-02-01

Evaluation for Deposit Areas of Rock Avalanche Based on Features of Rock Mass Structure

Ge Yunfeng¹, Tang Huiming^{1*}, Li Wei¹, Wang Liangqing¹, Wu Yiping¹, Yi Xianlong¹, Xiong Chengren²

1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
2. Three Gorges Research Center for Geo-hazard of Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: Evolution mechanism and movement process of rock avalanche are dominated by rock mass structure. The geometric information on rock discontinuities in Jiweishan landslide area was collected using terrestrial laser scanner (TLS). In addition, discrete element method (DEM), which takes into account the rock mass structure, was employed to investigate the evolution process and deposit areas of Jiweishan landslide. Results show that: (1) the features of rock mass structure were determined by rock discontinuities whose orientation was obtained by geometric calculations and cluster analysis on point cloud in a short time, and the identification and clustering of rock discontinuities were completed based on the distribution of orientation; (2) DEM and features of rock mass structure were combined to assess the deposit areas of rock avalanche, and simulation results have a good agreement with the actual situations.

Key words: rock avalanche; feature of rock mass structure; numerical simulation; cluster analysis; terrestrial laser scanner; discrete element method; deposit area.

0 引言

高速远程滑坡由于其破坏性大、波及范围广, 且难以预防, 容易导致灾害区极大的生命财产损失, 因

此常被人们形容为灾难性滑坡(catastrophic landslide)(程谦恭等, 2007; 张明等, 2010). 高速远程滑坡的发生具有普遍性, 在地球陆地、地球海底、月球、火星上均有报道, 一旦发生, 便为重大伤亡事故. 如

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(No.41230637); 中国博士后基金项目(No.2015M570671); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(No.CUGL150822); 岩土钻掘与防护教育部工程研究中心开放研究基金项目(No.201502).
作者简介: 葛云峰(1985—), 男, 讲师, 博士, 主要从事高速远程滑坡演化机理、岩体结构面粗糙度评价、地质工程与岩土工程数值模拟等研究.
E-mail: cug_gyf@foxmail.com
*** 通讯作者:** 唐辉明, E-mail: tanghm@cug.edu.cn

1963 年,意大利 Vajont 滑坡造成 2 000 余人死亡 (Genevois and Ghirotti, 2005); 1970 年,秘鲁 Huascarán 滑坡造成 25 000 多人死亡 (Keefer and Larsen, 2007); 1991 年,云南头寨沟滑坡造成 216 人死亡, 8 人受伤, 202 间房屋和 254 头牲畜被淹没, 冲毁农田 200 000 m², 直接经济损失达 1 200 万元 (唐川, 1991); 2000 年,西藏贡嘎滑坡截断藏布河道形成堰塞湖, 危及 4 000 的人生命财产安全, 造成 1.4 亿元经济损失 (刘伟, 2002); 2009 年,重庆鸡尾山滑坡造成 74 人遇难, 8 人受伤 (许强等, 2009); 2010 年,贵州关岭滑坡造成 99 人死亡或失踪 (刘传正, 2010) 等等。高速远程滑坡作为一种常见突发性地质灾害, 成因类型复杂, 影响因素及其作用过程多样, 如何在短时间内对其进行稳定性评价, 预测出滑坡影响范围, 及时为抗灾抢险防治措施方案的制定提供依据, 具有重大意义。

高速远程滑坡中以岩质类型最为常见, 根据岩体结构控制观点, 滑坡的变形与破坏受控于岩体结构及结构面的物理力学性质, 其稳定性在一定程度上取决于这些结构面 (孙广忠, 1988)。因此, 开展岩质高速远程滑坡快速评价的第 1 步是快速识别滑坡前岩体内部发育的结构面, 并评价岩体结构。近年来, 随着光电测量技术的长足进步, 发展出多种岩体结构面快速测量方法, 其中以三维激光扫描技术较为常用。目前, 从事该领域研究工作学者, 国内有董秀军 (2007)、施星波 (2010)、何秉顺等 (2007)、刘昌军等 (2011, 2014)、朱云福 (2012) 等, 国外有 Slob *et al.* (2005)、Lato *et al.* (2009)、Gigli and Casagli (2011)、Maerz *et al.* (2013) 等。因此, 通过三维激光扫描技术可以快速进行数据采集工作, 基于空间几何理论和计算机编程手段, 可以快速完成数据处理工作, 保证了岩体结构的快速评价。

随着计算机技术的不断进步, 解决工程地质问题的数值模拟理论与方法日趋完善, 解决的问题涉及面更为广范, 设计课题更趋深入, 加深了研究人员对工程地质现象的理解, 推动了工程地质学科的量化研究进程 (唐辉明等, 2001)。针对高速远程滑坡的数值模拟方法, 最基本的要求就是能够允许岩土体发生大位移、大角度变形, 目前国内外学者分别采用 Discontinuous Deformation Analysis (DDA) (肖诗荣等, 2010)、Particle Flow Code (PFC) (Tang *et al.*, 2009; 李祥龙等, 2012; 张龙等, 2012; 张亚飞等, 2015)、Dynamic Analysis (DAN) (Alpanda and Woglom, 2008; 高杨, 2014)、Computational Fluid

Dynamics (CFD) (王宏丹, 2006; 朱圻等, 2014; 王晓睿等, 2015)、FLO-2D (Li *et al.*, 2011; Wu *et al.*, 2013) 等常见的数值模拟方法, 对高速远程滑坡的运动速度、堆积特征、铲刮效应、气浪效应、影响范围、形成机制等方面开展了研究与验证, 取得了众多研究成果。但是仍存在以下不足之处: 模型没有精确考虑结构面分布情况, 忽略了岩体结构对岩质高速远程滑坡形成机制、演化机理与受灾范围的影响; 且大多数模拟是基于二维剖面开展研究, 结果具有一定的片面性。本文拟采用三维离散元程序 (3 Dimension Distinct Element Code, 简称 3DEC) 开展数值模拟试验研究 (Itasca Consulting Group Inc., 2007)。离散元法 (Discrete Element Method, 简称 DEM) 首先由 Cundall (1971) 提出, 并在学者 Lemos *et al.* (1985)、Cundall (1988) 和 Hart *et al.* (1988) 的努力下得到进一步发展。离散元法中, 研究者把岩体当成不连续介质对待, 认为其由岩块和结构面所组成, 结构面作为岩块间的边界条件, 允许岩块发生大变形和旋转运动, 可以较真实地模拟节理岩体的非线性变形强度特征。这些特性十分符合岩质高速远程滑坡数值模拟的研究要求。

本文以重庆武隆鸡尾山高速远程滑坡为例, 尝试采用三维激光扫描技术, 快速获取岩体结构面几何信息, 并将几何信息导入 3DEC 离散元模型中, 考虑岩体结构快速模拟鸡尾山滑坡的运动过程, 揭示变形破坏演化机制及其受灾范围。该思路对同类岩质高速远程滑坡具有一定的借鉴作用。

1 滑坡概况

2009 年 6 月 5 日下午 3 点左右, 位于重庆市武隆县铁矿乡红宝村长兴组发生大型高速远程滑坡 (图 1), 堆积体积 700×10^4 m³, 堆积长度 2 150 m, 平均堆积厚度 30 m, 灾难导致 74 人遇难, 8 人受伤, 给当地造成重大人身财产伤亡损失, 是我国近年来少有的一次灾难性事件, 受到研究学者的广泛关注 (Xu *et al.*, 2010; Yin *et al.*, 2010; 葛云峰等, 2014)。滑坡区域属中深切割溶蚀一构造中山地貌, 鸡尾山脉呈 NE55°展布, 总体地势南西高北东低, 呈单面山斜坡, 地形坡角为 20°~40°。局部地段陡崖发育, 高 50~150 m。研究区域最高海拔 1 652 m, 位于鸡尾山山顶; 最低海拔为 748 m, 位于铁匠沟沟底, 相对高差 904 m。滑坡区域主要出露三叠系、二叠系和志留系地层, 岩层层面平均产状为 345°∠30°, 自上而

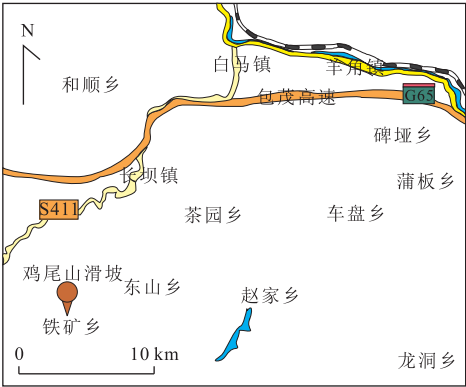


图 1 武隆鸡尾山高速远程滑坡地理位置示意

Fig.1 Location of Jiweishan rock avalanche in Wulong County, Chongqing City, China

据葛云峰(2014)



图 2 ILRIS-3_sD 型三维激光扫描仪安装示意

Fig.2 The field set up of 3-D laser scanning to measure geometric information of rock discontinuities

下分别是:下三叠统飞仙关组(T_1f)、下二叠统茅口组(P_1m)、下二叠统栖霞组(P_1q)、下二叠统梁山组(P_1l)、上志留统韩家店组(S_3hj)等。

2 岩体结构面识别

2.1 点云数据采集

根据试验要求,选择合适的野外露头.经过现场踏勘,选取滑源区附近小路旁的一处植被不发育且结构面分组明显的峭壁为扫描对象.采用中国地质大学(武汉)教育部长江三峡库区地质灾害研究中心购置的加拿大 Optech 公司 ILRIS-3_sD 型三维激光扫描仪进行数据采集(图 2),详细扫描参数见表 1 所示,扫描范围为 $3.85\text{ m}\times2.25\text{ m}$,当扫描间距设置为 1 mm 时,共获得 $8\,662\,500$ 个点云数据,如图 3a 所示,从仪器安装到扫描结束花费时间约 10 min .

2.2 数据处理

点云数据处理是岩体结构面识别的最重要步骤之一,包括数据去噪、数据拼接、坐标转换与信息提取,后两者为本文的研究重点,直接关系结果的可靠性.数据处理借助于计算机编程,实现岩体结构面半自动或全自动识别,可大幅度缩减工作时间,提高工作效率.

2.2.1 坐标转换 三维激光扫描仪获取的点云数据坐标原点位于转动平台下方的一螺丝孔处,需要将该数据转换至大地坐标系下(图 4).在现场选取一具代表性结构面进行测量,获取其产状信息(α_1/β_1);然后在点云数据中,选取同样的岩体结构面并提取 3 个点坐标 $P_1(x_1, y_1, z_1)$, $P_2(x_2, y_2,$

表 1 三维激光扫描参数

Table 1 The information about the scanning

参数	描述
脉冲模式	第一脉冲
扫描模式	步进式扫描
扫描起始位置	左下角
扫描方向	水平
扫描距离(m)	8.39
X 方向扫描间距(mm)	1
Y 方向扫描间距(mm)	1

$z_2)$, $P_3(x_3, y_3, z_3)$,通过 3 点坐标即可定义平面方程,

$$AX + BY + CZ + D = 0,$$
 (1)

其中,

$\left(\frac{A}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}, \frac{B}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}, \frac{C}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}\right)$ 为该平面的单位法向量,则 $ABCD$ 可以通过下述公式求得,

$$\begin{cases} A = y_1(z_2 - z_3) + y_2(z_3 - z_1) + y_3(z_1 - z_2); \\ B = z_1(x_2 - x_3) + z_2(x_3 - x_1) + z_3(x_1 - x_2); \\ C = x_1(y_2 - y_3) + x_2(y_3 - y_1) + x_3(y_1 - y_2); \\ D = -[x_1(y_2z_3 - y_3z_2) + x_2(y_3z_1 - y_1z_3) + \\ x_3(y_1z_2 - y_2z_1)]. \end{cases}$$
 (2)

假设岩体结构面的单位法向量为 (x, y, z) ,而三维激光扫描仪工作原理为激光反射,只能扫描出露较好的面,因此单位法向量中 $z > 0$, (x, y, z) 为岩体结构面的单位外法向量,根据下述公式即可求取在大地坐标系中的同一岩体结构面的倾向 α_2 与倾角 β_2 ,

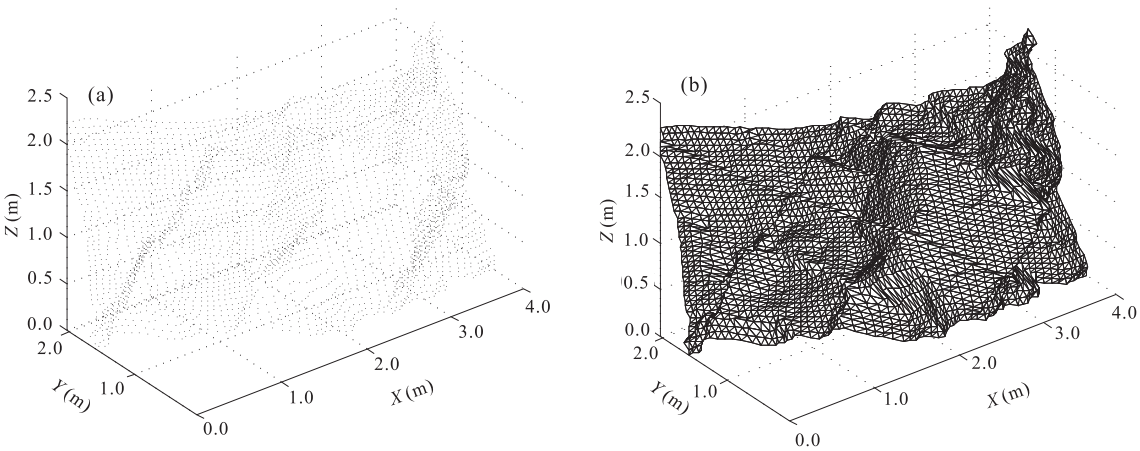


图 3 岩体结构面点云数据及重建示意
Fig.3 Schematic diagram of points cloud and reconstruction of rock discontinuities

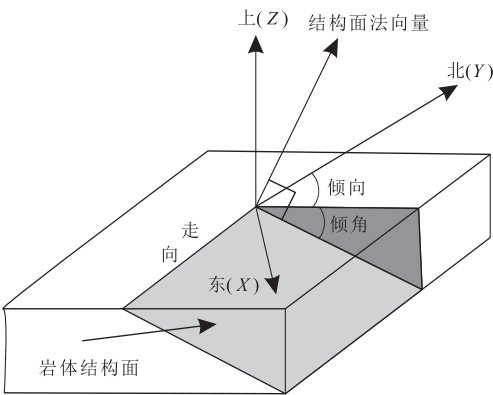


图 4 大地坐标系及其产状定义
Fig.4 The definition of joint orientation and geodetic co-ordinate system

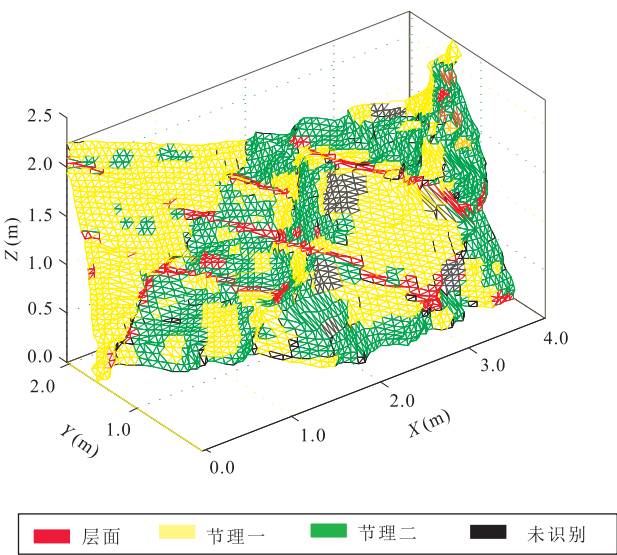


图 5 岩体结构面点云数据聚类分组结果
Fig.5 Clustering results of rock discontinuities points cloud

$$\left\{\begin{aligned} \beta_2 &= \arccos(z); \\ \text{if } x \geq 0, y \geq 0, \alpha_2 &= \arcsin(x/\sin\beta_2); \\ \text{if } x < 0, y > 0, \alpha_2 &= 360^\circ - \arcsin(-x/\sin\beta_2); \\ \text{if } x < 0, y < 0, \alpha_2 &= 180^\circ - \arcsin(x/\sin\beta_2); \\ \text{if } x > 0, y < 0, \alpha_2 &= 180^\circ + \arcsin(-x/\sin\beta_2). \end{aligned}\right.$$

(3)

因为在两个坐标系统中,倾角的定义同为平面与水平面之间的夹角,区间为 $[0^\circ, 90^\circ]$,所以 $\alpha_1 = \alpha_2$.倾向因为系统坐标与大地坐标中正北方向选取不一致,故存在差异,

$$\Delta = \alpha_1 - \alpha_2 .$$

(4)

根据倾向之差 Δ ,对点云数据计算出的其他所有结构面倾向进行坐标旋转,使得两坐标系统中的正北方向重合,完成坐标转换工作.

2.2.2 结构面分组与参数提取 对点云数据进行三角化剖分,将露头离散为一系列的三角平面(图

表 2 各岩体结构面几何参数统计

Table 2 Summary of 3 types of discontinuities orientation, spacing and trace length statistics

组号	几何参数	分布形式	区间	均值	标准差	类型
1	倾向($^\circ$)	正态分布	291~16	343	15.73	层面
	倾角($^\circ$)	正态分布	13~50	28	6.72	
2	倾向($^\circ$)	正态分布	160~190	177	7.05	节理一
	倾角($^\circ$)	对数分布	51~79	59	4.70	
3	倾向($^\circ$)	正态分布	93~305	110	6.94	节理二
	倾角($^\circ$)	正态分布	70~90	87	5.65	

3b),根据公式(1)、公式(2)和公式(3)求取所有平面的产状信息,基于 K 均值、 FKM 等聚类方法对产状信息进行聚类.结合实际情况,将岩体结构面分为3组(图5):层面(红色)、节理一(黄色)与节理二

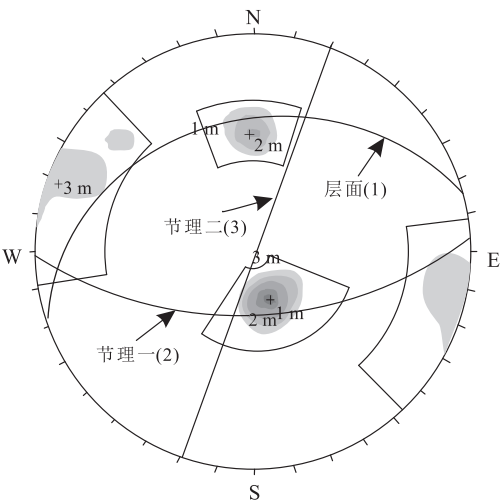


图 6 上半球等角度极限赤平投影图中的岩体结构面分组情况
Fig.6 Fracture sets on an upper hemispherical equal area polar plot for the orientation data based on geological survey

(绿色).将产状信息导入 DIPS V. 5.1 软件中作进一步分组处理,最终结果为层面平均产状为 $343^{\circ}/28^{\circ}$;节理一为 $177^{\circ}/59^{\circ}$,节理二为 $110^{\circ}/87^{\circ}$ (图 6),详细结果见表 2 所示.

3 3DEC 数值模拟

本文中数值模拟工作主要用于评价鸡尾山高速远程滑坡的演化机制与致灾范围,在 XYZ23DEC 软件接口的帮助下,可以在短时间内完成,实现快速评价目的.

3.1 模型建立

在地形数据与地质调查基础上,利用 MAT-

LAB 编写的 XYZ23DEC 程序快速建立研究区域的 3DEC 离散元地质模型,坐标原点(0,0,0)位于模型西南角,模型水平总尺度为 $1\,650\text{ m}\times 2\,900\text{ m}$,如图 7 所示.图中不同颜色表示不同地层,滑体位于二叠系下统茅口组 (P_1m) 与二叠系下统栖霞组上段 (P_1q^3) 内,裂缝 T0、T1、T2 以及滑动面分别构成了滑坡的主要边界条件.另外,由于 3DEC 不可产生非贯通性节理,为了创建 T0、T1、T2 等节理(裂缝),相应产生了两条实际不存在的虚拟节理(fictitious joints)(详见图 7 中虚线所示),从而达到模型创建目的.这些虚拟节理的产生虽然无法避免,但是在后续的运行计算中,可以通过赋予一定的力学参数,使得发育虚拟节理的岩块表现出与完整岩块一致的力学行为来加以处理(Kulatilake *et al.*,1992).

将上节中快速获取的岩体结构面产状等统计信息,根据各组结构面产状的统计参数(均值与标准差),通过 JSET 命令使滑体中产生具有同样统计特征(均值与标准差)的节理,相应极限赤平投影图的节理产状分布情况(图 8a)与图 6 极其吻合.值得注意的是,这种相似是统计意义上的相似.自然界岩体结构面的发育具有明显的随机性,其形态规模多样且复杂多变,对岩体结构面难以进行确定性描述.然而,大量工程实践表明,岩体结构面的产生与地质构造运动密切相关,相同期次的构造活动下,产生的岩体结构面具有类似的分布特征.这就意味着从统计角度来对岩体结构面的发育进行定量描述具有合理性.目前,基于 Monte Carlo 原理,根据各组结构面的统计参数,产生相应的岩体结构面几何信息,以此研究节理岩体的

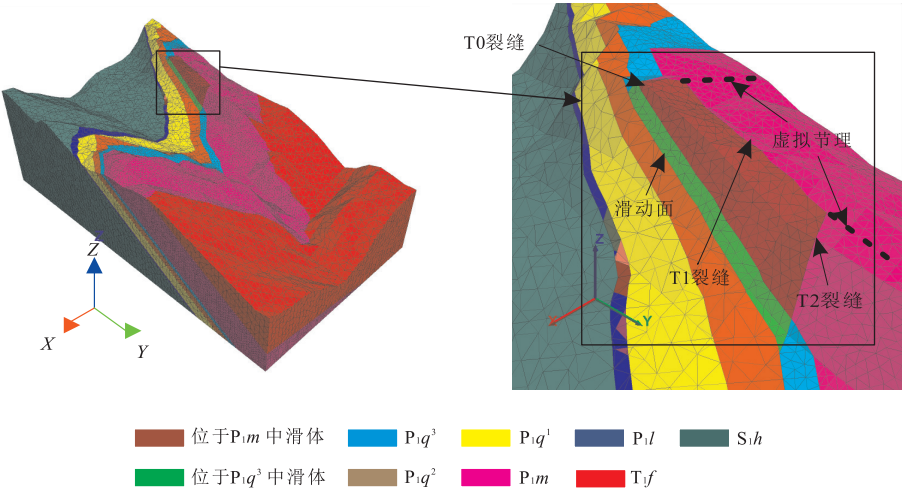


图 7 武隆鸡尾山高速远程滑坡 3DEC 离散元地质模型及其滑动面、T0、T1、T2 裂缝滑体边界示意
Fig.7 The numerical model for Jiweishan landslide and location of sliding plane, crack T0, crack T1, and crack T2
据葛云峰(2014)

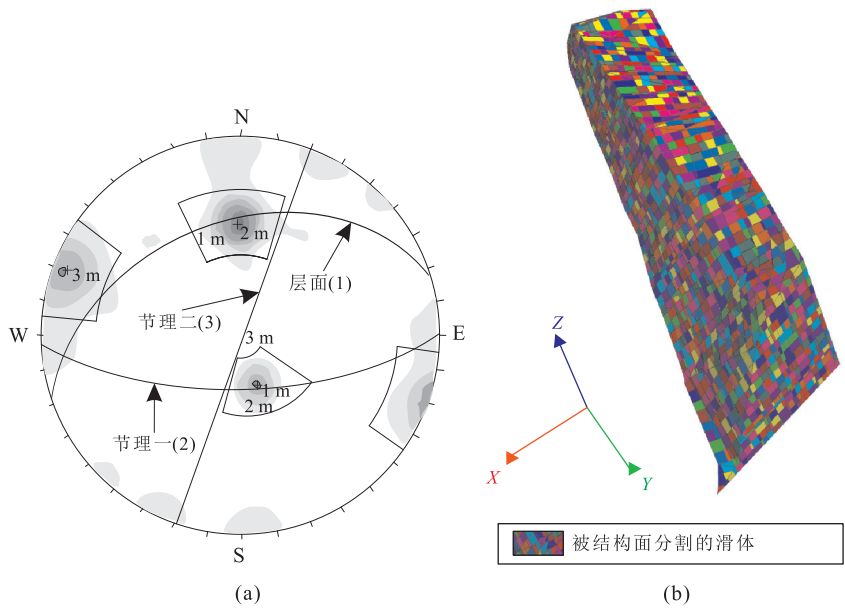


图 8 数值模拟中结构面分布情况与岩体结构特征

Fig.8 The characteristics of fractures distribution and rock mass structure applied on numerical simulation

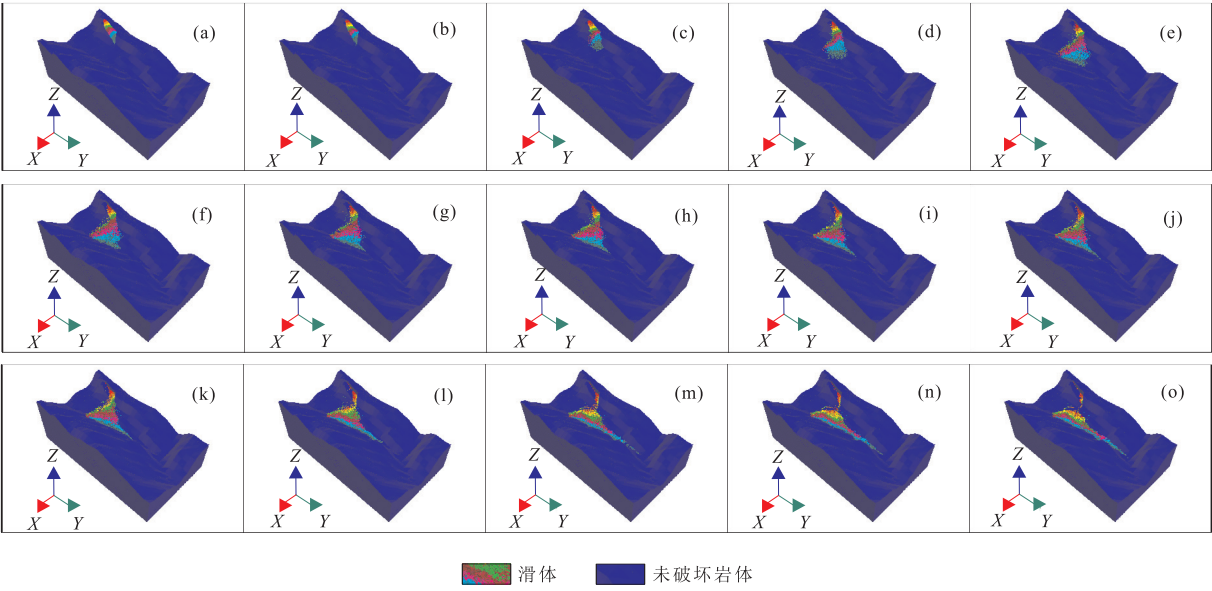


图 9 不同时步下的滑坡变形破坏演化特征

Fig.9 Deformation and failure evolution of Jiweishan landslide under different time steps

a.时步=1 000;b.时步=10 000;c.时步=20 000;d.时步=30 000;e.时步=40 000;f.时步=50 000;g.时步=60 000;h.时步=70 000;i.时步=80 000;j.时步=90 000;k.时步=100 000;l.时步=200 000;m.时步=300 000;n.时步=400 000;o.时步=500 000

力学特征 (Priest and Hudson, 1981; Kulatilake and Wu, 1984). 本研究中产生的三组岩体结构面, 互相交叉联合将整个滑体部分切割成不同大小、不同体积、不同形状岩块, 如图 8b 所示. 这表明数值模拟中根据统计特征产生的岩体结构面产状在很大程度上, 可以准确反映岩体结构面产状的实际分布规律, 所采用模型能够考虑岩体结构特征.

3.2 数值模拟结果分析

在上述模型基础上开展武隆鸡尾山高速远程滑坡的变形破坏演化过程数值模拟研究, 快速评价滑坡的致灾范围, 将不同时间步下的数值模拟结果进行展示 (图 9a~9o), 可以看出: 滑体前缘岩体首先发生破坏、滑向东面的铁匠沟中, 后缘岩体随着前缘岩体的破坏逐步崩解破坏, 依次向铁匠沟方向滑动. 滑

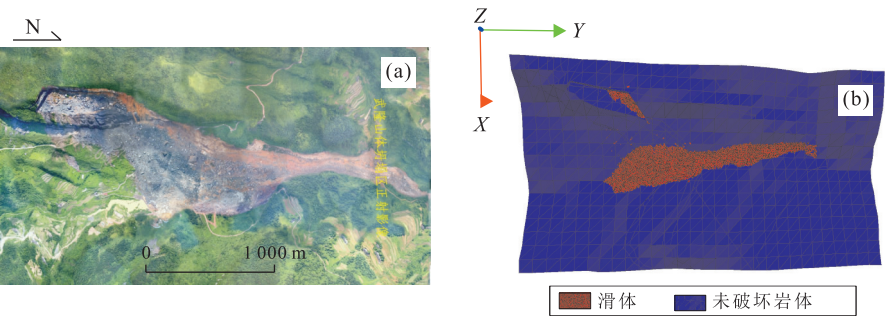


图 10 鸡尾山高速远程滑坡数值模拟与实际致灾范围对比

Fig.10 Comparison of influence scope between aerial photo and simulation result

a.滑坡堆积特征航拍图(来源:重庆市土地勘测规划院、中国测绘科学研究院);b.数值模拟堆积特征

体各个部分运动规律不一致的主要原因是受各自所处边界条件的制约影响.在 3DEC 离散元数值模型中,滑动面的产状为 $345^{\circ}\angle 30^{\circ}$,滑体在本身重力作用下本应沿着滑动面真倾向方向滑向山内,但受到前缘山体的阻挡作用,在分力作用下滑体前缘部分(关键块体)便沿 T2 裂缝走向(视倾向)发生破坏.滑体后缘部分(驱动块体)在破坏过程中起到推动作用,本身重力分量作为推力作用在关键块体上,提高了关键块体沿 T2 裂缝走向上的分力,加剧了关键块体的破坏.同时在关键块体失稳后,产生足够空间,驱动块体紧跟其后也发生破坏.滑体破坏后快速滑入铁匠沟与对面山体发生碰撞,运动方向发生改变(图 9e~9h),滑体随后顺沟运动,在铁匠沟下游与另一冲沟交汇处停止堆积.

高速远程滑坡的滑动距离是指滑坡后缘最高处至滑坡堆积体最前缘之间的水平距离(Hsü,1975),数值模拟中通过获取两点处的空间坐标 $P_1(X_1, Y_1, Z_1)$ 和 $P_2(X_2, Y_2, Z_2)$,单位为 m.按公式(4)计算两点的水平距离获得相应的滑动距离 L (单位: m).那么,

$$L = \sqrt{(Y_2 - Y_1)^2 + (X_2 - X_1)^2} . \tag{4}$$

通过鸡尾山高速远程滑坡破坏后正射影像与现场测量,获得滑坡实际滑动距离为 2 150 m,而基于 3DEC 数值模拟的高速远程滑坡滑动距离为 2 285 m(图 10),说明本文开展的 3DEC 离散元数值模拟研究,能较真实地再现滑坡变形破坏全过程,预测出合理的致灾范围.

4 结论

(1)岩质高速远程滑坡的演化机制与运动过程受控于岩体结构.而岩体结构由其内部发育的各种

岩体结构面所决定,岩体结构面相互交叉联接,将岩体切割为不同大小、不同形状与不同体积的岩块,同时岩体结构面的存在对岩体结构的力学机制也存在较大影响.

(2)三维激光扫描技术作为一种非接触测量方法,可以快速精细地获取岩体结构面几何信息,并且通过计算机编程语言,实现岩体结构面的快速识别,并半自动或自动提取岩体结构面的产状参数.

(3)3DEC 数值模拟技术不仅能够满足高速远程滑坡岩体的大变形要求,并且可以和岩体结构面调查结果相联系,考虑岩体结构进行滑坡稳定性评价,可以实现快速评价目的,为评价高速远程滑坡的防灾预警范围提供依据,对同类滑坡案例具有一定的借鉴作用.

致谢:感谢中国地质大学(武汉)教育部长江三峡库区地质灾害研究中心王菁莪老师提供的三维激光扫描仪和技术帮助;感谢中国地质大学(武汉)工程学院游志诚、刘文远、詹红志同学在野外数据采集过程中付出的辛苦劳动.

References

Alpanda, S., Woglom, K. K. A. G., 2008. Numerical Modelling of the Dynamics of Debris Flows and Rock Avalanches. *Geomechanics & Tunnelling*, 1(2): 112—119. doi: 10.1002/geot.200800010

Cheng, Q. G., Zhang, Z. Y., Huang, R. Q., 2007. Study on Dynamics of Rock Avalanches: State of the Art Report. *Journal of Mountain Science*, 25(1): 72—84 (in Chinese with English abstract).

Cundall, P. A., 1971. A Computer Model for Simulation Progressive Large-Scale Movements in Blocky Rock System. In: *Processing of the International Symposium Rock Fracture*, ISRM. Proc. 2, 129—136.

- Cundall, P. A., 1988. 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. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 25(3):107—116. doi:10.1016/0148—9062(88)92293—0
- Dong, X. J., 2007. The Three-Dimensional Laser Scanning Technique and Research on Its Engineering Application (Dissertation). Chengdu University of Technology, Chengdu (in Chinese with English abstract).
- Gao, Y., 2014. Scraping Dynamic Analysis of the Rapid and Long Runout Landslide—A Case Study of Jiweishan Rockslide in Wulong, Chongqing (Dissertation). Chang'an University, Xi'an (in Chinese with English abstract).
- Ge, Y. F., 2014. Research on Roughness and Peak Shear Strength for Rock Discontinuities Based on BAP (Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan (in Chinese with English abstract).
- Ge, Y. F., Tang, H. M., Xiong, C. R., et al., 2014. Effect of Sliding Plane Mechanical Parameters on Landslide Stability—A Case Study of Jiweishan Rockslide in Wulong. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 33(Suppl.2):3873—3884 (in Chinese with English abstract).
- Genevois, R., Ghirotti, M., 2005. The 1963 Vaiont Landslide. *Giornale di Geologia Applicata*, 1: 41—52. doi: 10.1474/GGA.2005—01.0—05.0005
- Gigli, G., Casagli, N., 2011. Semi-Automatic Extraction of Rock Mass Structural Data from High Resolution LiDAR Point Clouds. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 48(2):187—198. doi:10.1016/j.ijrmms.2010.11.009
- Hart, R., Cundall, P. A., Lemos, J., 1988. Formulation of a Three-Dimensional Distinct Element Model—Part II. Mechanical Calculations for Motion and Interaction of a System Composed of Many Polyhedral Blocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 25(3):117—125. doi:10.1016/0148—9062(88)92294—2
- He, B. S., Ding, L. Q., Sun, P., 2007. The Application of 3-D Laser Scanning Technology in Rock Joint Sets Identification. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 5(1):43—48 (in Chinese with English abstract).
- Hsü, K. J., 1975. Catastrophic Debris Streams (Sturzstroms) Generated by Rockfalls. *Geological Society of America Bulletin*, 86(1):129.
- Keefer, D. K., Larsen, M. C., 2007. GEOLOGY: Assessing Landslide Hazards. *Science*, 316(5828):1136—1138. doi:10.1126/science.1143308
- Itasca Consulting Group Inc., 2007. 3DEC—3 Dimensional Distinct Element Code User's Guide Version 4.1. Minneapolis, Minnesota.
- Keefer, D. K., Larsen, M. C., 2007. GEOLOGY: Assessing Landslide Hazards. *Science*, 316(5828):1136—1138. doi:10.1126/science.1143308
- Kulatilake, P. H. S. W., Ucpirtti, H., Wang, S., et al., 1992. Use of the Distinct Element Method to Perform Stress Analysis in Rock with Non-Persistent Joints and to Study the Effect of Joint Geometry Parameters on the Strength and Deformability of Rock Masses. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 25(4):253—274. doi:10.1007/bf01041807
- Kulatilake, P. H. S. W., Wu, T. H., 1984. Sampling Bias on Orientation of Discontinuities. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 17(4):243—253. doi:10.1007/bf01032337
- Lato, M., Diederichs, M. S., Hutchinson, D. J., et al., 2009. Optimization of LiDAR Scanning and Processing for Automated Structural Evaluation of Discontinuities in Rock-masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46(1):194—199. doi:10.1016/j.ijrmms.2008.04.007
- Lemos, J. V., Hart, R. D., Cundall, P. A., 1985. A Generalized Distinct Element Program for Modeling Jointed Rock Mass. Proceedings of the International Symposium on Fundamentals of Rock Joints, Bjorkliden, Sweden, 335—343.
- Li, M. H., Sung, R. T., Dong, J. J., et al., 2011. The Formation and Breaching of a Short-Lived Landslide Dam at Hsiolin Village, Taiwan—Part II: Simulation of Debris Flow with Landslide Dam Breach. *Engineering Geology*, 123(1—2):60—71. doi:10.1016/j.enggeo.2011.05.002
- Li, X. L., Tang, H. M., Xiong, C. R., et al., 2012. Influence of Substrate Ploughing and Erosion Effect on Process of Rock Avalanche. *Rock and Soil Mechanics*, 33(5):1527—1534, 1541 (in Chinese with English abstract).
- Liu, C. J., Ding, L. Q., Sun, D. Y., 2011. Automatic Fuzzy Clustering Analysis and Geometric Information Acquisition of Rock Mass Discontinuities Based on Laser Point Cloud Data. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 30(2):358—364 (in Chinese with English abstract).
- Liu, C. J., Ding, L. Q., Zhang, S. F., et al., 2014. Fuzzy Cluster

- Analysis of Rock Mass Discontinuity of Tunnel Based on Laser Measurement and FKM Clustering Algorithm. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 44(1):285—294 (in Chinese with English abstract).
- Liu, C. Z., 2010. Preliminary Findings on Dazhai Landslide-Debris Flow Disaster in Guizhou Province of June 28, 2010. *Journal of Engineering Geology*, 18(5): 623—630 (in Chinese with English abstract).
- Liu, W., 2002. Study on the Characteristics of Huge Scale-Super Highspeed-Long Distance Landslide Chain in Yigong, Tibet. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 13(3): 9—18 (in Chinese with English abstract).
- Maerz, N. H., Youssef, A. M., Otoo, J. N., et al., 2013. A Simple Method for Measuring Discontinuity Orientations from Terrestrial LiDAR Data. *Environmental & Engineering Geoscience*, 19(2): 185—194. doi:10.2113/gsee-geosci.19.2.185
- Priest, S. D., Hudson, J. A., 1981. Estimation of Discontinuity Spacing and Trace Length Using Scanline Surveys. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 18(3): 183—197. doi:10.1016/0148—9062(81)90973—6
- Shi, X. B., 2010. Research for Identifying Structural Plane Based on Three-Dimensional Laser Scanning Data (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Slob, S., van Knapen, B. V., Hack, R., et al., 2005. Method for Automated Discontinuity Analysis of Rock Slopes with Three-Dimensional Laser Scanning. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1913: 187—194. doi:10.3141/1913—18
- Sun, G. Z., 1988. Rock Mass Structural Mechanics. Science Press, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Tang, C. L., Hu, J. C., Lin, M. L., et al., 2009. The Tsaoiling Landslide Triggered by the Chi-Chi Earthquake, Taiwan: Insights from a Discrete Element Simulation. *Engineering Geology*, 106(1—2): 1—19. doi:10.1016/j.enggeo.2009.02.011
- Tang, C., 1991. A Study on Large-Scale Catastrophic Landslide at Touzhai Gully of Zhaotong. *Yunnan Geographic Environment Research*, 3(2): 64—71 (in Chinese with English abstract).
- Tang, H. M., Yan, E. C., Hu, X. L., 2001. The Theory and Method of Numerical Simulation in Engineering Geology. China University of Geosciences Press, Wuhan (in Chinese with English abstract).
- Wang, H. D., 2006. Study on Mechanism of Airblast Created by High-Speed Landslide (Dissertation). Southwest Jiaotong University, Chengdu (in Chinese with English abstract).
- Wang, X. R., Zhang, Z., Jia, X. F., 2015. Analysis of Numerical Simulation of Tunnel Excavation Based on High Performance Parallel Finite Element Computing. *Earth Science*, 40(12): 2119—2124 (in Chinese with English abstract).
- Wu, Y. H., Liu, K. F., Chen, Y. C., 2013. Comparison between FLO-2D and Debris-2D on the Application of Assessment of Granular Debris Flow Hazards with Case Study. *Journal of Mountain Science*, 10(2): 293—304. doi:10.1007/s11629—013—2511—1
- Xiao, S. R., Liu, D. F., Hu, Z. Y., 2010. Study of High Speed Slide Mechanism of Qianjiangping Landslide in Three Gorges Reservoir Area. *Rock and Soil Mechanics*, 31(11): 3531—3536 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Q., Huang, R. Q., Yin, Y. P., et al., 2009. The Jiweishan Landslide of June 5, 2009 in Wulong, Chongqing: Characteristics and Failure Mechanism. *Journal of Engineering Geology*, 17(4): 433—444 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Q., Fan, X. M., Huang, R. Q., et al., 2010. A Catastrophic Rockslide-Debris Flow in Wulong, Chongqing, China in 2009: Background, Characterization, and Causes. *Landslides*, 7(1): 75—87. doi:10.1007/s10346—009—0179—y
- Yin, Y. P., Sun, P., Zhang, M., et al., 2010. Mechanism on Apparent Dip Sliding of Oblique Inclined Bedding Rockslide at Jiweishan, Chongqing, China. *Landslides*, 8(1): 49—65. doi:10.1007/s10346—010—0237—5
- Zhang, L., Tang, H. M., Xiong, C. R., et al., 2012. Movement Process Simulation of High-Speed Long-Distance Jiweishan Landslide with PFC^{3D}. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 31(Suppl.1): 2601—2611 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, M., Yin, Y. P., Wu, S. R., et al., 2010. Development Status and Prospects of Studies on Kinematics of Long Runout Rock Avalanches. *Journal of Engineering Geology*, 18(6): 805—817 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. F., Xu, G. L., Shen, Y. J., et al., 2015. PFC^{3D} Mesoscopic Simulation of Self-Boring In-Situ Shear Pressure-Meter Model Tests. *Earth Science*, 40(11): 1922—1932 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, Q., Cheng, Q. G., Wang, Y. F., et al., 2014. Mechanism of Airblasts of Rapid and Long-Runout Landslide at Niujuangou. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 33(6): 1212—1226 (in Chinese with English abstract).

- Zhu, Y. F., 2012. The Theory and System Development of Discontinuity Identification Based on 3D Laser Scanning Data (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献**
- 程谦恭, 张倬元, 黄润秋, 2007. 高速远程崩滑动力学的研究现状及发展趋势. 山地学报, 25(1): 72—84.
- 董秀军, 2007. 三维激光扫描技术及其工程应用研究(硕士学位论文). 成都: 成都理工大学.
- 高杨, 2014. 高速远程滑坡铲刮动力学分析——以重庆武隆鸡尾山滑坡为例(硕士学位论文). 西安: 长安大学.
- 葛云峰, 2014. 基于 BAP 的岩体结构面粗糙度与峰值抗剪强度研究(博士学位论文). 武汉: 中国地质大学.
- 葛云峰, 唐辉明, 熊承仁, 等, 2014. 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. 岩石力学与工程学报, 33(增刊 2): 3873—3884.
- 何秉顺, 丁留谦, 孙平, 2007. 三维激光扫描系统在岩体结构面识别中的应用. 中国水利水电科学研究院学报, 5(1): 43—48.
- 李祥龙, 唐辉明, 熊承仁, 等, 2012. 基底刮铲效应对岩石碎屑流停积过程的影响. 岩土力学, 33(5): 1527—1534, 1541.
- 刘昌军, 丁留谦, 孙东亚, 2011. 基于激光点云数据的岩体结构面全自动模糊群聚分析及几何信息获取. 岩石力学与工程学报, 30(2): 358—364.
- 刘昌军, 丁留谦, 张顺福, 等, 2014. 基于激光测量和 FKM 聚类算法的隧洞岩体结构面的模糊群聚分析. 吉林大学学报(地球科学版), 44(1): 285—294.
- 刘传正, 2010. 贵州关岭大寨崩滑碎屑流灾害初步研究. 工程地质学报, 18(5): 623—630.
- 刘伟, 2002. 西藏易贡巨型超高速远程滑坡地质灾害链特征研析. 中国地质灾害与防治学报, 13(3): 9—18.
- 施星波, 2010. 基于三维激光扫描数据的岩体结构面产状识别方法研究(硕士学位论文). 北京: 中国地质大学.
- 孙广忠, 1988. 岩体结构力学. 北京: 科学出版社.
- 唐川, 1991. 昭通头寨沟特大型灾害性滑坡研究. 云南地理环境研究, 3(2): 64—71.
- 唐辉明, 晏鄂川, 胡新丽, 2001. 工程地质数值模拟的理论与方法. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 王宏丹, 2006. 高速远程滑坡超前冲击气浪机理研究(硕士学位论文). 成都: 西南交通大学.
- 王晓睿, 张振, 贾晓风, 2015. 基于高性能并行计算的隧道开挖数值模拟. 地球科学, 40(12): 2119—2124.
- 肖诗荣, 刘德富, 胡志宇, 2010. 三峡库区千将坪滑坡高速滑动机制研究. 岩土力学, 31(11): 3531—3536.
- 许强, 黄润秋, 殷跃平, 等, 2009. 2009 年 6·5 重庆武隆鸡尾山崩滑灾害基本特征与成因机理初步研究. 工程地质学报, 17(4): 433—444.
- 张龙, 唐辉明, 熊承仁, 等, 2012. 鸡尾山高速远程滑坡运动过程 PFC^{3D} 模拟. 岩石力学与工程学报, 31(增刊 1): 2601—2611.
- 张明, 殷跃平, 吴树仁, 等, 2010. 高速远程滑坡碎屑流运动机理研究发展现状与展望. 工程地质学报, 18(6): 805—817.
- 张亚飞, 徐光黎, 申艳军, 等, 2015. 自钻式原位剪切旁压模型试验颗粒流模拟. 地球科学, 40(11): 1922—1932.
- 朱圻, 程谦恭, 王玉峰, 等, 2014. 牛圈沟高速远程滑坡超前冲击气浪机制分析. 岩石力学与工程学报, 33(6): 1212—1226.
- 朱云福, 2012. 基于三维激光扫描数据的岩体结构面识别方法研究及系统研制(硕士学位论文). 北京: 中国地质大学.