

柱状岩体崩塌动力特征与破碎规律

孔祥, 李 滨, 贺 凯, 罗 浩, 常文斌, 邢爱国

Dynamic characteristics and fragmentation evolution of columnar rockfall: A case study of the Zengziyan rockfall in Chongqing, China

KONG Xiangzhao, LI Bin, HE Kai, LUO Hao, CHANG Wenbin, and XING Aiguo

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202109008>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

青海省滑坡崩塌泥石流灾害时空分布特征

Temporal and spatial characteristics of landslide, rockfall and debris flow disasters in Qinghai Province during the period

魏正发, 曹小岩, 张俊才, 应忠敏, 严慧, 魏赛拉加 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(6): 134-142

重庆甄子岩崩塌落石动力学特征及危险性分区

孙敬辉, 石豫川 中国地质灾害与防治学报. 2019, 30(3): 6-11

基于无人机航测的丹霞地貌区危岩结构面识别与三维裂隙网络模型

Identification of dangerous rock structural planes and fracture network model in Danxia landform based on UAV aerial survey: A case study at simianshan scenic area of Chongqing

熊开治, 任志远, 赵亚龙, 杨忠平, 张黎健 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 62-69

金沙江结合带高位远程滑坡灾害链式特征遥感动态分析

Remote sensing dynamic analysis of chain characteristics of long range and high position landslide in Jinsha River junction zone: A case study of Baige landslide

黄细超, 余天彬, 王猛, 朱赛楠, 宋班, 刘文 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 40-51

广东佛山市高明区三洲盆地岩溶塌陷发育特征与时空分布规律

Characteristics and spatial-temporal distribution law of karst collapse in Sanzhou basin in Gaoming District of Foshan City, Guangdong Province

韩庆定, 罗锡宜, 易守勇, 邹杰 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(3): 131-139

库水位变动条件下柱状危岩体变形破坏机理

陈小婷, 王健, 黄波林, 谭建民 中国地质灾害与防治学报. 2019, 30(2): 9-18



DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202109008

孔祥翌, 李滨, 贺凯, 等. 柱状岩体崩塌动力特征与破碎规律——以重庆甄子岩崩塌为例 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(5): 1-10.

KONG Xiangzhao, LI Bin, HE Kai, *et al.* Dynamic characteristics and fragmentation evolution of columnar rockfall: A case study of the Zengziyan rockfall in Chongqing, China[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(5): 1-10.

柱状岩体崩塌动力特征与破碎规律 ——以重庆甄子岩崩塌为例

孔祥翌¹, 李 滨², 贺 凯³, 罗 浩¹, 常文斌¹, 邢爱国¹

(1. 上海交通大学海洋工程国家重点实验室, 上海 200240; 2. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081; 3. 中国地质调查局, 北京 100037)

摘要:柱状岩体崩塌具有分布范围广、破坏能力强、影响范围大的特点。2004 年 8 月 12 号, 重庆甄子岩 W12 危岩体发生崩塌, 崩塌体运动距离约 600 m, 形成显著超前空气冲击效应, 激起浮尘高度约 150 m。文章基于 MatDEM 离散元软件对甄子岩崩塌动力特征与破碎规律进行了研究, 建立了按照实际节理分布的崩塌模型, 实现了崩塌全过程的模拟, 并结合影像资料验证了模型的有效性, 在此基础上对 MatDEM 进行二次开发, 统计分析了崩塌过程中岩块粒径演化规律, 确定了崩塌过程中的四个显著颗粒破碎时刻, 分别为崩塌源区底部岩体受压破碎、中上部岩体撞击低速三角区、中部岩体撞击斜坡地面与上部岩体撞击斜坡地面。引入分形维数与双参数 Weibull 分布模型分析了崩塌前后颗粒破碎规律, 结果显示崩塌后颗粒破碎明显, 细粒颗粒占比显著增加。文章为岩体崩塌的动力特征与破碎规律的研究提供了依据。

关键词:柱状岩体崩塌; 甄子岩崩塌; 动力特征; 破碎规律; 分形维度; 双参数 Weibull 分布模型

中图分类号: P642.21

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2022)05-0001-10

Dynamic characteristics and fragmentation evolution of columnar rockfall: A case study of the Zengziyan rockfall in Chongqing, China

KONG Xiangzhao¹, LI Bin², HE Kai³, LUO Hao¹, CHANG Wenbin¹, XING Aiguo¹

(1. State Key Laboratory of Ocean Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;

3. China Geological Survey, Beijing 100037, China)

Abstract: Columnar rockfall occur widely in China and cause extreme damage to man-made structures and facilities. On 12 August 2004, Zengziyan W12 perilous rock collapsed and ran out a horizontal distance of 600 m. The rockfall caused airblast with a height of 150 m. In this paper, the dynamic characteristics and fragmentation evolution is studied based on the discrete element software MatDEM. The simulation of the rockfall process is achieved based on the discrete element model with real distribution of joints. The simulation is valid by comparing the simulation and video data. Through deeper development on

收稿日期: 2021-09-09; 修订日期: 2021-10-27

投稿网址: <https://www.zgdzhyfzxb.com/>

基金项目: 国家重点研发计划课题(2018YFC1504804)

第一作者: 孔祥翌(1997-), 男, 河南许昌人, 建筑与土木工程专业, 硕士研究生, 主要从事滑坡地质灾害研究。

E-mail: Kongxiangzhao@sjtu.edu.cn

通讯作者: 邢爱国(1971-), 男, 陕西咸阳人, 道路与铁道工程专业, 博士, 研究员, 主要从事地质灾害防治和环境岩土工程研究。

E-mail: xingaiquo@sjtu.edu.cn

MatDEM, the rock size evolution is analyzed, it was found that there were four significant breakage moments during the rockfall. The moments are rock compression breakage at the bottom of the rockfall, collision breakage of middle-upper rock mass with low-velocity triangle area, collision of middle and upper part of rock mass with ground, respectively. The fragmentation evolution of the pre- and post- rockfall is studied based on the fractal theory and dual parameters Weibull distribution. The results show that the proportion of fine particles increase obviously after the rockfall. This paper offers the basis of dynamic characteristics and fragmentation evolution of other rockfalls.

Keywords: columnar rockfall; Zengziyan rockfall; dynamic characteristics; fragmentation evolution; fractal theory; dual parameters Weibull distribution

0 引言

柱状岩体崩塌在我国西南地区频繁发生,如 2004 年 8 月 12 日重庆甄子岩崩塌、2013 年 2 月 18 日贵州凯里市老山新村崩塌等,其具有分布范围广、破坏能力强、影响范围大等特点。在岩体崩塌过程中,危岩体不断破碎解体,形成由不同粒径岩块构成的碎屑物质集合体,即崩塌碎屑流,其致灾范围常超过数百米。因此,对此类崩塌动力特征与破碎规律的研究十分重要。

当前国内外学者对塔柱状岩体崩塌的动力特征与破碎规律研究较少,更多的是将塔柱状岩体简化为柱体崩塌研究其运动与堆积规律。Crosta 等^[1]基于 PFC^{2D} 研究了不同高宽比及连接准则的柱体崩塌,结合试验资料验证了离散元模拟柱体崩塌动力过程的可行性。Utili 等^[2]基于离散元研究了不同高宽比和摩擦条件下颗粒柱体表面随时间的演变过程,验证了离散元模拟柱体崩塌运动过程的有效性。Zhou 等^[3]基于离散元研究了颗粒柱的不同几何尺寸与颗粒摩擦系数的对混合粒径干颗粒流运动及堆积特征的影响。Huang 等^[4]将大型柱状岩体的崩塌概化为颗粒柱的崩塌,通过室内试验研究了柱体中不同粒径组分的运动特征。在实际崩塌中,节理、裂隙的存在对岩体的崩塌有着至关重要的作用,而地形又对堆积区的形态、颗粒破碎程度有较大影响,因此对真实崩塌的数值模拟研究尤为重要。

一些学者对甄子岩的演化机制、力学性能与失稳模式进行研究。陈智强与李渝生^[5]对甄子岩的形成演化机制与防治措施进行了研究。贺凯等^[6-8]基于现场调查、室内试验及数值计算等手段对甄子岩 W12 危岩体崩塌进行了详细研究,提出了塔柱状岩体压裂溃屈崩塌破坏模式,并从损伤力学角度揭示了塔柱状底部岩体的强度劣化机制。冯振等^[9]基于 UDEC 对甄子岩初始变形破坏进行了研究,发现甄子岩崩塌的触发条件为岩体软弱基座的破坏。孙敬辉等^[10]基于 Rockfall 软件对甄子岩不同尺寸崩塌落石的运动轨迹、速率、等进行研

究,将崩塌落石区进行了风险评估与危险性分区。但当前尚未有学者对甄子岩崩塌破碎全过程进行模拟研究。

基于 MatDEM 离散元软件对甄子岩 W12 危岩体崩塌动力特征与破碎规律进行了研究,依据实际节理分布建立了崩塌模型,实现了对崩塌运动全过程的模拟,通过与现场影像对比验证了模型的有效性,在此基础上,通过对 MatDEM 二次开发,统计分析了运动过程中岩块粒径分布演化规律,并引入分形维数与双参数 Weibull 分布模型对颗粒破碎程度进行了研究。

1 崩塌特征与地质气候条件

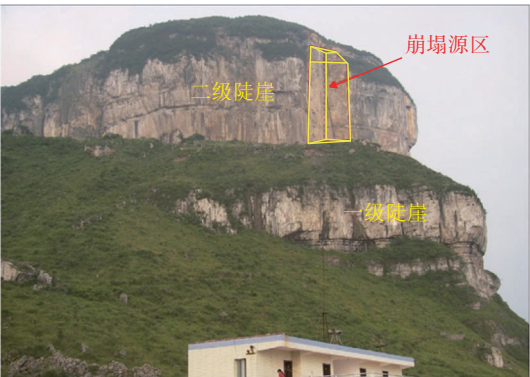
1.1 甄子岩崩塌特征

重庆市金佛山景区甄子岩危岩带的 W12 危岩体于 2004 年 8 月 12 日 12 时 53 分发生了大规模山体崩塌(文中简称甄子岩崩塌)。甄子岩崩塌体崩塌体高度为 250 m,宽度为 50 m,体积约为 $50 \times 10^4 \text{ m}^3$,运动距离距崖脚约 600 m,崩塌前后最大高差超过 500 m(图 1、图 2)。崩塌体结构破碎,节理裂隙十分发育,在坠落撞击基底层时与空气相互作用剧烈,形成显著的超前空气冲击效应,激起浮尘高度近 150 m。由于及时预警,此次崩塌未造成人员伤亡^[11]。

1.2 地质气候条件

甄子岩崩塌源区岩体所在斜坡结构为上部坚硬,中下部软弱的“上硬下软”型岩体结构(图 3)。危岩带由两级陡崖组成,一级陡崖由栖霞组和茅口组一段石灰岩组成;二级陡崖由茅口组三、四、五段石灰岩组成;危岩带中均有岩溶发育,二级陡崖多发育有溶洞,一级陡崖底部石灰岩与炭质页岩接触面上则以岩溶大泉为主要特征,局部仍见有溶洞。

由图 3 可知,崩塌体位于甄子岩二级陡崖,呈三棱柱状。其高约 250 m,宽约 50 m。崩塌源区岩层产状为 $280^\circ \sim 300^\circ \angle 4^\circ \sim 5^\circ$,呈缓内倾岩体结构,崩塌体主要受三组裂隙切割控制(图 4),① $310^\circ \angle 89^\circ (J_1)$,延伸长约 200 m,贯通至顶,张开宽度 2 m 左右,充填碎块石



(a) 甑子岩崩塌两级陡崖地貌 (W12)



(b) 甑子岩崩塌源区 (W12)

图 1 甑子岩地貌特征与崩塌源区

Fig. 1 Image of the landform and source area of the Zengziyan rockfall

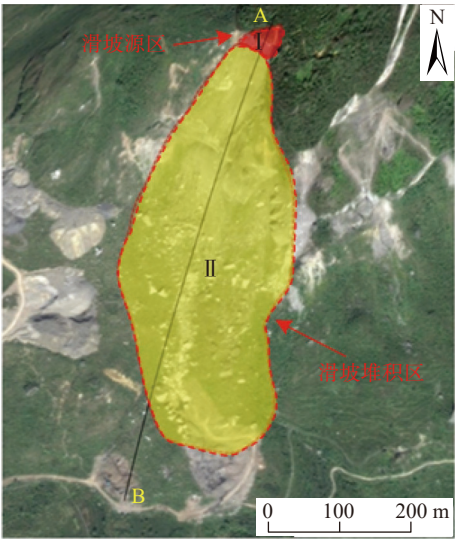


图 2 甑子岩崩塌卫星影像

Fig. 2 Aerial image of the Zengziyan rockfall

土,下部张开 20~30 cm,无充填,裂面见钙泥质物,构成危岩体北侧边界;② 25°∠89°(J_2),延伸长度 200 m,张开约 10 cm,无充填,局部充填碎石,裂面见钙质物,贯通至顶,构成南侧边界;③ 组裂隙(J_3)为层间裂隙在

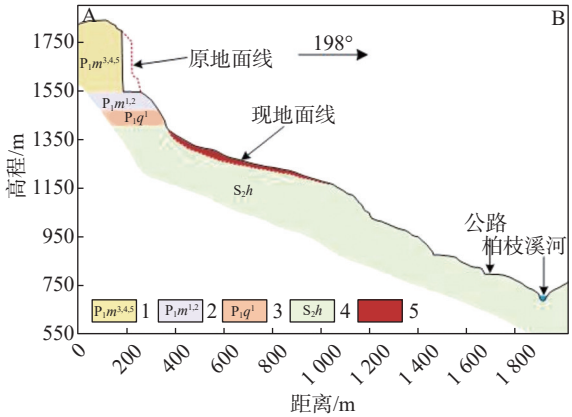


图 3 甑子岩崩塌断面图(沿图 2 中 A-B 断面)

Fig. 3 Geological profile of the Zengziyan rockfall along line A-B in fig. 2

1—二叠系下统茅口组三、四、五段;2—二叠系下统茅口组一、二段;3—二叠系下统栖霞组;4—志留系中统韩家店组;5—崩塌堆积体

危岩体中部、下部形成凹岩腔,高 0.50 m。 J_1 、 J_2 两组节理将山体分割成三棱柱形危岩体,危岩体西南面临空,加之危岩体底部基座为软弱页岩,导致岩体底部在上覆岩体的自重作用下,容易发生压缩流变及剪切流变。

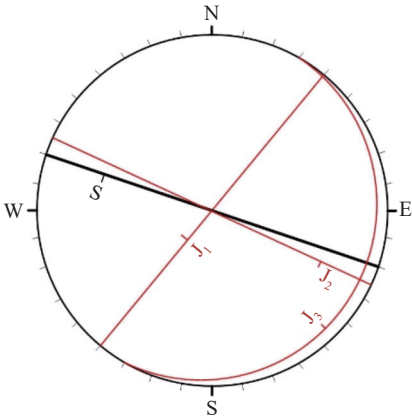


图 4 甑子岩崩塌节理分布

Fig. 4 Stereographic projection of joints of the Zengziyan rockfall

金佛山地区属亚热带温湿气候,具有“气候温和、雨量充沛、绵雨久、湿度大”等特征。危岩体崩塌发生于该地区雨季(5—9月),在节理裂隙、溶蚀管道等通道的优势入渗作用下,降水会显著降低硬岩底部软弱层强度,岩溶作用进一步加大了这种趋势,引起差异沉降或局部崩塌,反过来又导致岩体节理裂隙扩大,形成恶性循环,最终使岩体稳定性降低,发生崩塌。

2 离散元数值模拟

2.1 MatDEM 模型建立

甑子岩崩塌 MatDEM 模型如图 5 所示。模型宽

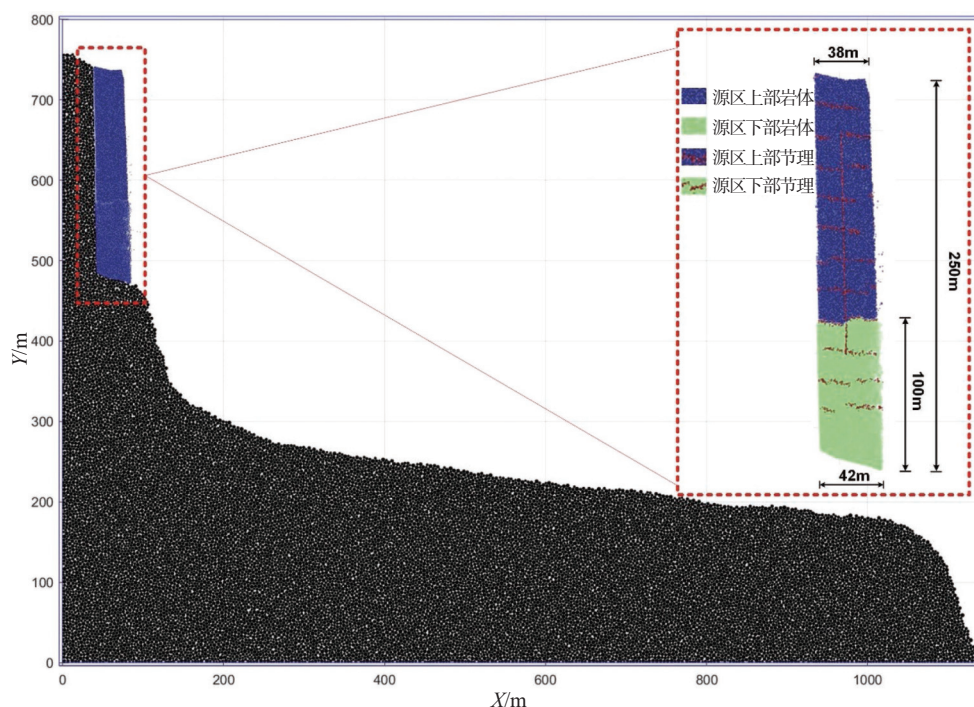


图 5 甌子岩崩塌 MatDEM 模型

Fig. 5 MatDEM model of the Zengziyan rockfall

1 200 m, 高 800 m, 其中源区宽 38~42 m, 高约 250 m, 高宽比 a 为 5.95~6.58。模型主要由崩塌源区与刚性基底层组成, 崩塌源区由活动颗粒胶结而成, 可遵循牛顿第二定律计算产生速率及位移, 刚性基底层由边界刚性单元组成, 仅参与受力计算, 并不产生速率与位移。

根据岩体中存在着的三组节理面将模型源区分为三部分, 源区下部高度为 100 m 的区域由强度较低的胶结单元组成, 源区上部高度为 150 m 的区域由强度较高的胶结单元组成。因 J1 与 J2 两组节理在二维平面模型中表现一致, 因此节理仅分为两组。横向节理 J3 与水平方向夹角为 $0^\circ \sim 5^\circ$, 间距约 20 m; 竖向节理在横向上位于源区中部, 竖直延伸, 上下各留约 50 m。

模型以破坏源区下部 20% 高度内的单元连接作为模型的触发条件, 模拟基底压碎的情况。

2.2 MatDEM 模型参数确定

贺凯等^[6-8]曾对甌子岩地区采集的岩样开展了岩体物理力学性质试验。甌子岩崩塌源区中上部主要为二叠系下统茅口组四、五段, 因二者强度相近, 故采用相同强度参数。源区下部主要为二叠系下统茅口组三段, 受岩溶发育、人类工程活动及气候因素影响, 岩体强度较低。因源区岩体在失稳前已经历严重的风化或扰动, 其强度较完整岩体有较大折减, 所以文章所采用的材料参数在贺凯所得试验结果上有所折减。

离散元法通过堆积具有特定力学参数的颗粒以更好地实现对自然岩土体散粒特性的模拟。其整体力学性质与其单元间的接触关系、力学参数和堆积方式等有关^[12]。因此采用 MatDEM 内置的材料参数标定程序 BoxMatTraining 进行离散元宏观参数转换, 其原理为对基于随机堆积而成的试样做模拟三轴试验, 并根据试验结果不断调整输入参数, 直至试验结果与真实情况基本一致, 以完成材料参数的训练。材料力学参数如表 1 所示。

表 1 模型材料力学参数

Table 1 Mechanical parameters of the Zengziyan rockfall model

材料属性	符号与单位	源区上部岩体	源区下部岩体	节理
密度	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	2 700	2 700	2 600
弹性模量	E/GPa	65	58	8
泊松比	ν	0.20	0.17	0.14
抗拉强度	C_u/MPa	5.3	1.4	0.9
抗压强度	T_u/MPa	51	13	3
内摩擦系数	μ	0.87	0.7	0.7
单元直径	d_i/m	0.4 ± 0.08	0.4 ± 0.08	0.4 ± 0.08

2.3 MatDEM 二次开发

基于 MatDEM 计算数据进行二次开发以研究岩体破碎过程, 文章参考了奚悦^[13]的研究作为岩块的确定准则。在岩块的运动过程中, 由于碰撞等因素, 部分颗粒

单元间的胶结会遭到破坏,另一部分颗粒单元间仍保持胶结状态。文章认为存在连接的两个单元属于同一个岩块。考虑天然岩体中节理、裂隙分布的多样性,由颗粒胶结组成的条状结构、多个颗粒胶结形成闭环与在闭环上向外延伸单元均被判定为岩块。

许多学者使用等效粒径的概念研究岩体破碎的粒径分布,经过对比试算,选用等效粒径计算公式如下:

$$d = \sqrt{V_f/V_0} \quad (1)$$

式中: d ——岩块的等效粒径;

V_f ——岩块体积;

V_0 ——模型总体积。

二次开发原理:在 MatDEM 每一计算时间步中均记录有单元接触矩阵 $d.mo.nBall$ 与单元连接分布矩阵 $d.mo.bFilter$, 单元接触包括压缩、拉伸、剪切三种接触模式,压缩接触的单元间并不一定存在连接,因此单元接触矩阵并不能表示与一个单元胶结的所有单元,将两矩阵结合起来可获得与一个单元接触胶结的所有单元,将单元连接矩阵中所有具有相同元素的行归纳在一起,去除重复元素并与单元接触矩阵相对照,即可得到岩块分布矩阵。

2.4 分维特征与 Weibull 分布模型

岩体崩塌过程中岩块将不断发生摩擦、撞击,导致颗粒破碎,因此引入分形几何理论中的分形维数 D 描述岩块破碎后的粒度属性,当粒径分布越分散,岩块粒径越小,则 D 值越大。采用 Gates-Gaudin-Schuhmann (GGS) 分布计算分形维数^[14]。

$$M(d < d_i)/M_T = (d_i/d_{\max})^n \quad (2)$$

式中: $M(d < d_i)$ ——等效粒径小于 d_i 岩块的累积质量;

M_T ——岩块总质量;

$d_{\max}$ ——岩块的最大等效粒径。

对式(2)等式两边取自然对数,则可变为式(3):

$$\ln[M(d < d_i)/M_T] = n \cdot \ln(d_i/d_{\max}) \quad (3)$$

式中: n ——因变量 $M(d < d_i)/M_T$ 对自变量 $\ln(d_i/d_{\max})$ 直线的斜率。

Turcotte^[15]推导出在 GGS 分布中分形维数 D 与式(3)中的 n 关系如下:

$$D = 3 - n \quad (4)$$

引入双参数 Weibull 分布模型对崩塌前后岩块的粒径分布进行描述,公式为:

$$P = 1 - \exp\left[-\left(\frac{d}{d_c}\right)^\beta\right] \quad (5)$$

式中: d_c ——尺度参数,可以用于衡量粒径分布中细粒岩块占比, d_c 值越小,模型中的细粒岩块占比越大;

β ——形状参数,可用于衡量粒径分布的广度, β 值越大,粒径分布越窄。

3 模拟结果分析

3.1 崩塌速率演化与有效性验证

甑子岩崩塌过程速率演化如图 6 所示。整个崩塌过程持续 26.8 s。当运动开始 $t=1.6$ s 时,崩塌岩体顶部有明显位移差产生,岩体中下部有水平位移趋势,受地形作用,岩体底部形成低速三角区域,其单元速率基本为 0,岩体其他部位单元速率基本相同,为 15 m/s。当 $t=3.2$ s 时,岩体顶部位移差继续增大,最大位移达 50 m,受单元速率与地形影响,中下部崩塌岩体水平位移明显,部分单元已滑出一级陡崖,崩塌岩体平均速率增加至 20 m/s。 $t=4.8$ s 时,上部岩体有明显沿节理裂隙面破裂迹象,破裂后的两部分运动速率有明显差异,其平均速率分别为 26.8 m/s 与 29.2 m/s,崩塌体底部已开始凌空飞行,最大速率为 35 m/s,在低速三角区域与下落运动部分间有明显速率过渡区出现。

$t=6.4$ s 时,崩塌岩体已沿节理裂隙面明显分离,凌空飞行速率已超过 40 m/s,崩塌体前缘少量颗粒已开始撞击底面刚性模型。 $t=8.0$ s 时,斜坡地面已形成堆积,凌空飞行的岩体沿内部横向节理面有解体迹象,竖向节理右侧岩体坠落速率明显增加,已超过 35 m/s。 $t=9.6$ s 时,崩塌体处低速三角区域外均以进入凌空飞行状态,竖向节理左侧岩体速率为 35.6 m/s。当 $t=12.8$ s 时,甑子岩上部岩体已基本结束凌空飞行坠落至斜坡地面,此时破碎岩体仍具有较高的速率,破碎岩体将继续发生摩擦、移动、撞击、破碎解体等过程,直至动能全部消散。 $t=26.8$ s 时,崩塌岩体各部分动能基本已消散完成,堆积区已经形成,通过测量可知堆积区长度为 450 m,最大堆积厚度为 40 m。

通过与甑子岩崩塌影像进行对比,可证实 MatDEM 崩塌模拟的有效性。图 7 为甑子岩(W_{12})崩塌过程影像。当 $T=6$ s 时,源区中上部岩体间有碎屑溅射,说明此时按已经发生破碎,与 MatDEM 模拟中 $t=6.4$ s 时情况一致。当 $T=9.3$ s 时,崩塌体整体已开始离开一级陡崖进入凌空坠落状态,与 MatDEM 模拟中 $t=9.6$ s 时的岩体运动一致。在 $T=21.2$ s 之后,甑子岩崩塌已基本完成,在影像中仅剩崩塌形成的冲击气浪仍在扩散,与模拟中的 $t=26.8$ s 时的情况相同。通过对比影像资料与

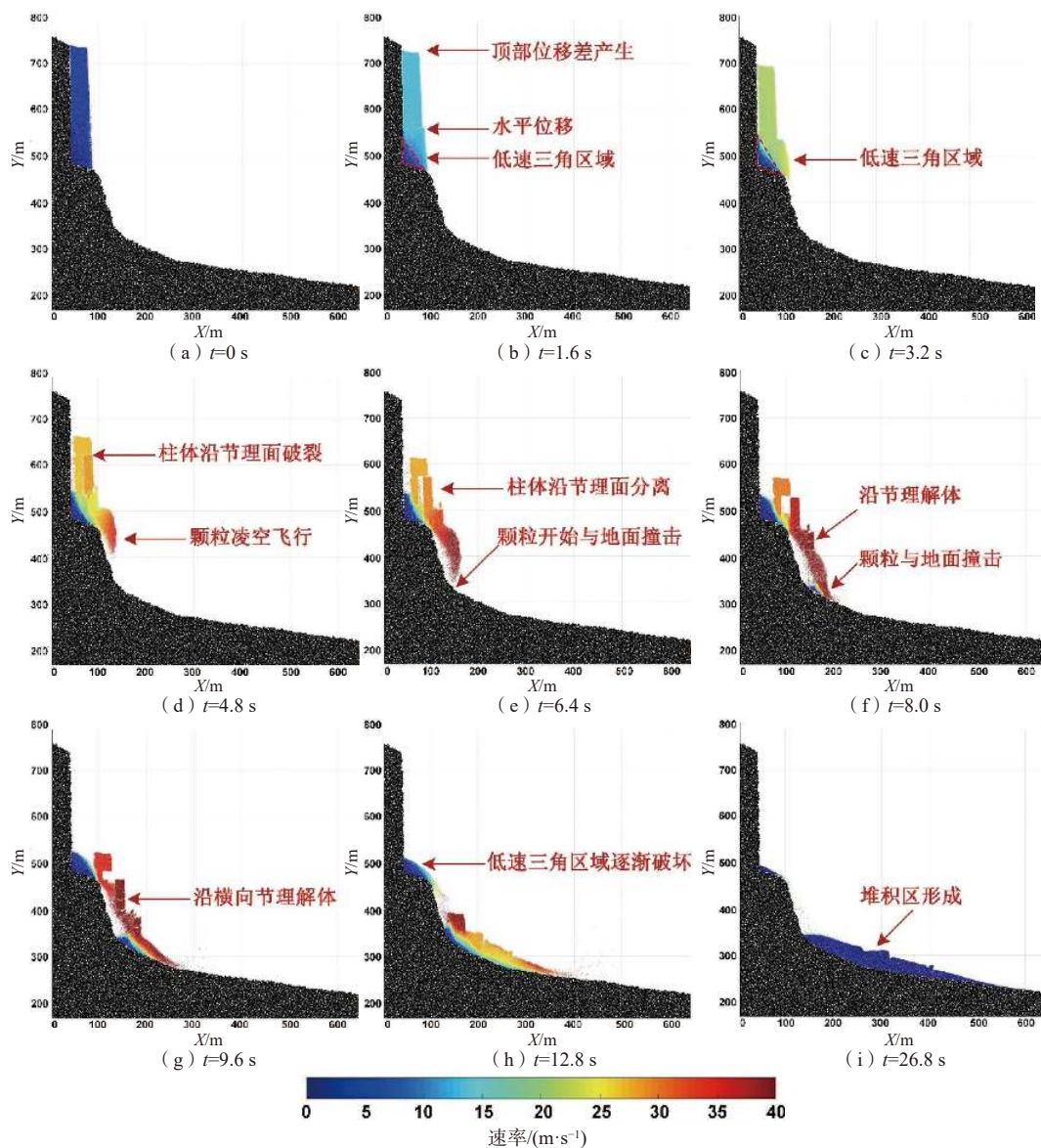


图 6 甄子岩崩塌速度演化

Fig. 6 Velocity evolution of the Zengziyan rockfall

MatDEM 模型可证明离散元模拟的有效性,该模型可以反映甄子岩崩塌的动力特征。

3.2 崩塌动力破碎演化

甄子岩崩塌过程中碎屑等效粒径分布演化如图 8 所示。当 $t=1.6$ s 时,崩塌体底部内侧相对较完整的岩体破碎成为基本单元,中上部岩体沿预设节理面破裂明显,完整的岩体被分割为不同等效粒径的岩体,等效粒径范围为 8~21 m。 $t=3.2$ s 时,崩塌体开始运动至一级陡崖外,中上部岩体自下而上开始破裂解体,等效粒径降低至 0~8 m。 $t=4.8$ s 时,中上部岩体沿节理裂隙面破裂、坠落,因与低速三角区域摩擦、撞击导致颗粒破碎明显,等效粒径降至 4 m 左右,凌空飞行的岩体大部

分已破碎为基本颗粒。

$t=6.4$ s 时,岩体顶部基本未发生破碎,岩体沿节理面已明显分离,基本颗粒单元包裹大粒径岩体凌空飞行。 $t=8.0$ s 时,竖向节理右侧的岩块已滑离一级陡崖,等效粒径维持在 8 m 左右,凌空飞行的中部岩体等效粒径降至 2 m。当 $t=9.6$ s 时,除低速三角区域外崩塌源区已滑出一级陡崖,顶部岩体等效粒径仍维持在 20 m 左右,凌空飞行的岩块与斜坡堆积区产生的碰撞对岩块造成了再次破碎,大部分等效粒径已基本降低至基本颗粒单元,少部分岩块等效粒径为 2 m 左右。 $t=12.8$ s 时,崩塌源区大部分岩体已形成堆积,仍有等效粒径为 4 m、8 m 的岩块存在,顶部岩体发生破碎粒径降低至 0~

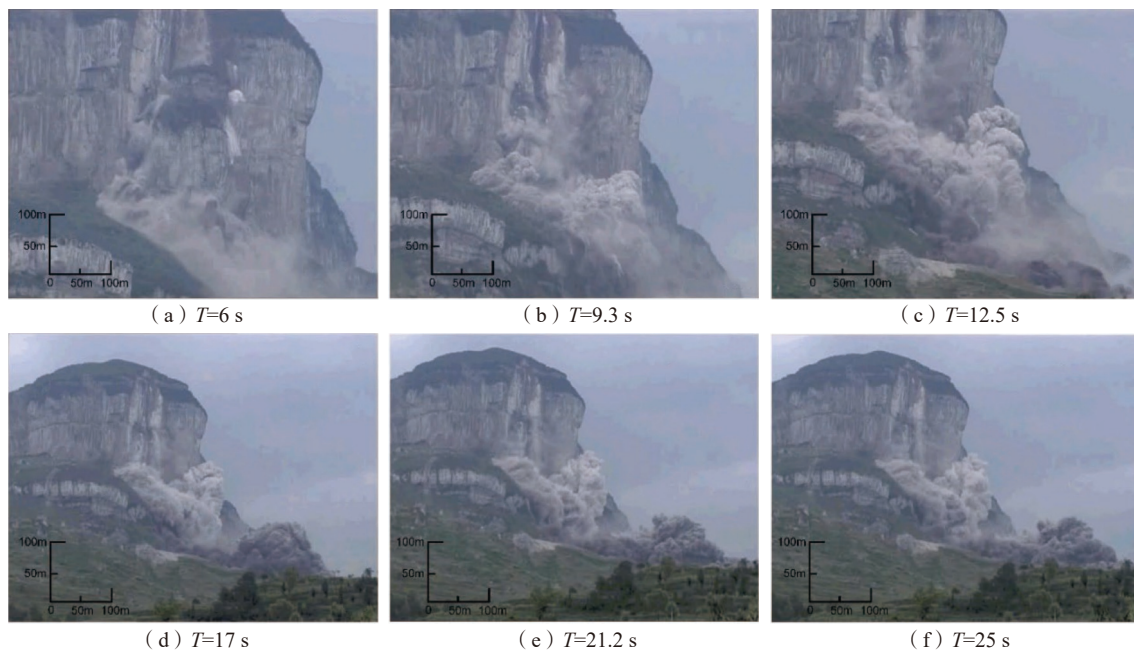


图 7 甑子岩崩塌现场影像资料

Fig. 7 Video data of the Zengziyan rockfall

13.5 m, 根据图 6, 此时颗粒仍具有较大动能, 颗粒将在堆积区进一步撞击破碎。 $t=26.8$ s 时, 崩塌运动结束, 堆积区形成, 大部分岩体已破碎为基本颗粒单元, 但在减速堆积过程中岩体破碎不明显, 大粒径岩块基本集中在堆积体表面, 呈现反粒序堆积分布特征。

岩体崩塌基本单元增长率与最大平均速率如图 9 所示, 基本单元增长率峰值点与甑子岩崩塌各阶段密切相关, 由此可确定甑子岩崩塌过程中存在四个显著的破碎时刻, 即基本单元增长率中的 4 个明显峰值点, 其分别是崩塌源区底部岩体受压破碎、中上部岩体撞击低速三角区、中部岩体撞击斜坡地面与上部岩体撞击斜坡地面。因颗粒破碎原因不一致, 因此基本单元增长率曲线与最大平均速率曲线变化规律并不完全一致。图中最大平均速率曲线仅有一个峰值, 是因为在崩塌过程中岩体首先进入受底部岩体约束的坠落状态, 之后滑出一级陡崖进入凌空飞行状态, 单元速率持续增加, 直至岩体撞击斜坡地面开始减速, 因此最大平均速率最值点发生于大部分岩体在凌空飞行时的阶段。

3.3 分维特征与 Weibull 曲线拟合

甑子岩崩塌前后岩块质量分布如图 10 所示。崩塌前后拟合直线的斜率分别为 0.95 与 0.88, R^2 值均为 0.96, 岩块质量分布基本符合公式 3 获得的直线。通过计算得到崩塌前后岩块的分维值分别为 2.05 与 2.12, 分维值越高表示岩块的破碎情况越显著, 由此可知甑子岩崩塌后岩块破碎明显。

岩体崩塌前后等效粒径级配曲线如图 11 所示, 采用了双参数 Weibull 分布模型进行曲线拟合, 崩塌前后尺度参数 d_c 由 15.839 3 降低至 3.767 5, 说明岩块尺寸明显降低, 细粒岩块在粒径分布占比中明显增长。崩塌前后形状参数 β 由 1.153 升高至 1.436, 说明岩块破碎后等效粒径范围明显减小, 崩塌后等效粒径大于 5 m 的岩块明显减少, 岩块粒径主要集中在 0 ~ 2.7 m。

4 讨论

关于甑子岩崩塌的研究之前多集中于其启动机理与稳定性分析^[5-6, 8-9], 其运动过程的研究多为基于影像资料分析其运动特征^[7], 文章实现了对甑子岩危岩体崩塌运动全过程的离散元模拟, 模拟的崩塌过程与影像资料相吻合, 并引入分形维数与双参数 Weibull 分布模型对堆积颗粒进行了分析。模拟崩塌过程中危岩体底部低速三角区域的出现及其形态特征与许多学者在室内试验中观测到的基本一致^[16-17], 崩塌堆积区最终呈现反粒序堆积分布特征^[18]。

许多学者将柱状岩体崩塌问题简化为颗粒柱崩塌进行研究, 基于室内试验与数值模拟研究柱体高宽比、颗粒间粘结状态对运动过程与堆积分布的影响^[2, 16, 19]。但如甑子岩危岩体、重庆箭穿洞危岩体、新疆盖孜河危岩群体等一般位于高处^[20-21], 其崩塌过程常伴随凌空飞行阶段与落地后撞击斜坡发生二次破碎阶段, 破碎颗粒能量与粒径均会发生较大改变, 因此, 之后可进一步

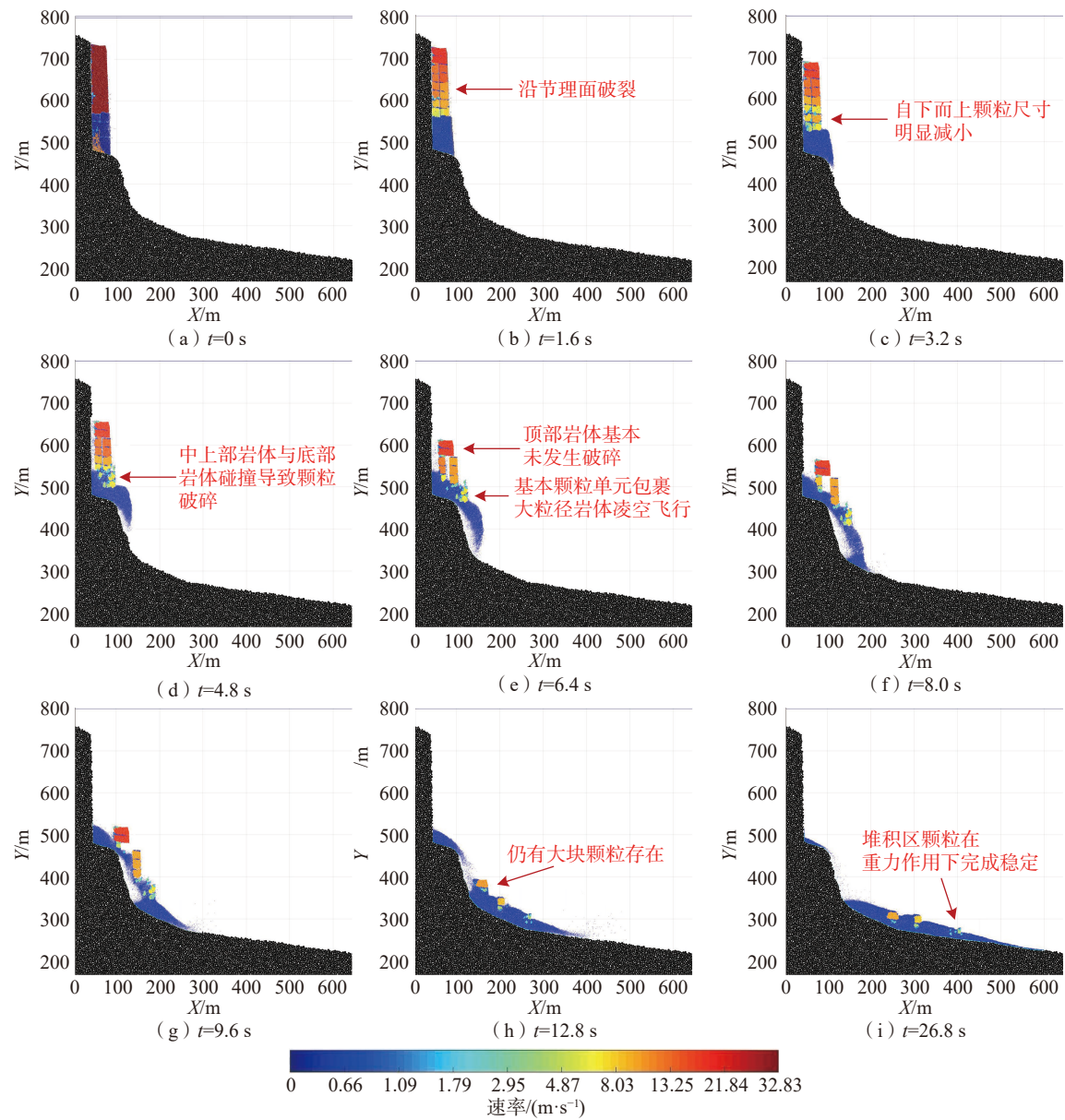


图 8 甌子岩崩塌岩块粒径演化

Fig. 8 Size evolution of the Zengziyan rockfall's fragments

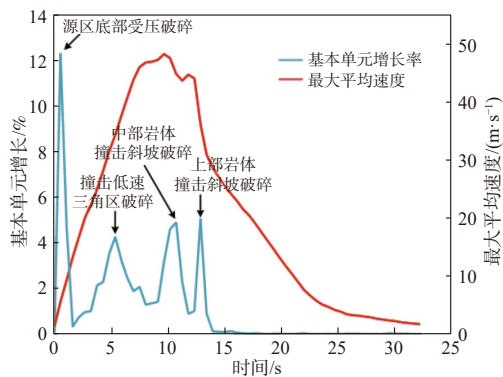


图 9 崩塌基本单元增长率与最大平均速率曲线

Fig. 9 Curve of growth rate of basic elements and maximum average velocity of the Zengziyan rockfall

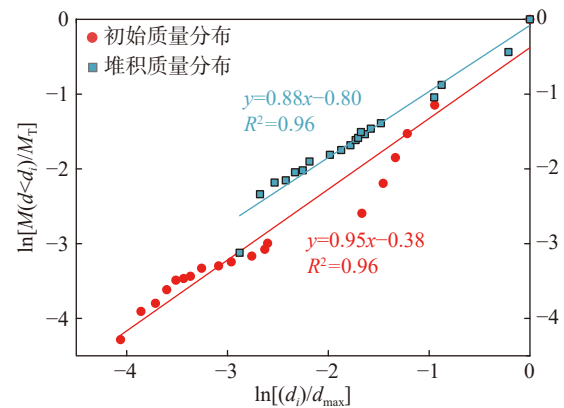


图 10 甌子岩崩塌岩块质量分布

Fig. 10 Mass distribution of rock block of the Zengziyan rockfall

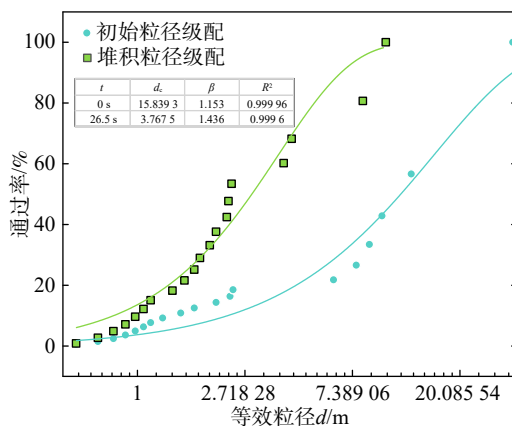


图 11 崩塌堆积岩块级配曲线

Fig. 11 Grain size distribution of rock blocks of the rockfall

研究颗粒柱高程、斜坡角度及坡面摩擦系数等对柱体崩塌破碎影响。一些学者对实际柱状危岩体崩塌进行了数值模拟研究,但其关注点多在于崩塌运动过程的分析,较少引入颗粒单元破碎、分维特征等内容对崩塌堆积体进行分析,文章补充了这方面的空白,在未来也可通过现场调查甄子岩堆积体分布特征进行进一步优化数值模拟模型^[22-23]。

5 结论

(1) 文中基于 MatDEM 离散元软件,实现了对按照真实节理分布的甄子岩 W12 危岩体崩塌全过程模拟,并通过与影像资料对比验证了数值模拟的有效性。

(2) 通过对 MatDEM 二次开发,统计分析了甄子岩崩塌全过程等效粒径演化与破碎规律,确定了崩塌过程中岩体四个显著的颗粒破碎时刻,分别是崩塌源区底部岩体受压破碎、中上部岩体撞击低速三角区、中部岩体撞击斜坡地面与上部岩体撞击斜坡地面。

(3) 引入了分形维数与双参数 Weibull 分布模型对甄子岩崩塌前后进行分析,崩塌后分维值 D 增加至 2.12,尺度参数 d_0 降低至 3.767 5,形状参数 β 增加至 1.436,说明甄子岩崩塌后岩块破碎明显,细粒岩块占比明显增长,粒径分布范围明显减小。

参考文献(References):

- [1] CROSTA G B, IMPOSIMATO S, RODDEMAN D. Numerical modeling of 2-D granular step collapse on erodible and nonerodible surface [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2009, 114(F3): F03020.
- [2] UTILI S, ZHAO T, HOULSBY G T. 3D DEM investigation of granular column collapse: evaluation of debris motion and its destructive power [J]. *Engineering Geology*, 2015, 186: 3–16.

- [3] ZHOU Y Y, SHI Z M, ZHANG Q Z, et al. 3D DEM investigation on the morphology and structure of landslide dams formed by dry granular flows [J]. *Engineering Geology*, 2019, 258: 105151.
- [4] HUANG B L, WANG J, ZHANG Q, et al. Energy conversion and deposition behaviour in gravitational collapse of granular columns [J]. *Journal of Mountain Science*, 2020, 17(1): 216–229.
- [5] 陈智强, 李渝生. 重庆市南川甄子岩危岩形成演化机制分析及防治措施探讨 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2004, 15(1): 78–81. [CHEN Zhiqiang, LI Yusheng. Analysis on formation and development mechanism and discussion on prevention measures for Zengziyan dangerous rock mass in Chongqing [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2004, 15(1): 78–81. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 贺凯. 塔柱状岩体崩塌机理研究 [D]. 西安: 长安大学, 2015. [HE Kai. Research on collapse mechanism of tower rock [D]. Xi'an: Changan University, 2015. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 贺凯, 殷跃平, 李滨, 等. 塔柱状岩体崩塌运动特征分析 [J]. *工程地质学报*, 2015, 23(1): 86–92. [HE Kai, YIN Yueping, LI Bin, et al. Video imaged based analysis of motion characteristic for tower rock collapse [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2015, 23(1): 86–92. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 贺凯, 殷跃平, 冯振, 等. 重庆南川甄子岩-二垭岩危岩带特征及其稳定性分析 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2015, 26(1): 16–22. [HE Kai, YIN Yueping, FENG Zhen, et al. Analysis of characteristics and stability for Zengziyan-Eryayan unstable rocks belt in Nanchuan County Chongqing [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2015, 26(1): 16–22. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 冯振, 陈云霞, 李滨, 等. 重庆南川甄子岩山体崩塌机制研究 [J]. *水文地质工程地质*, 2016, 43(1): 50–56. [FENG Zhen, CHEN Yunxia, LI Bin, et al. Failure mechanism on the Zengziyan collapse in Nanchuan of Chongqing [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2016, 43(1): 50–56. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 孙敬辉, 石豫川. 重庆甄子岩崩塌落石动力学特征及危险性分区 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2019, 30(3): 6–11. [SUN Jinghui, SHI Yuchuan. Dynamics and hazard zoning of collapse and rockfall in Zengziyan, Chongqing [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2019, 30(3): 6–11. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 任幼蓉, 陈鹏, 张军, 等. 重庆南川市甄子岩 W12# 危岩崩塌预警分析 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2005, 16(2): 28–31. [REN Yourong, CHEN Peng, ZHANG Jun, et al. Early-warning analysis on the rockfall for Zengziyan W12#

- dangerous rock mass in Nanchuan City of Chongqing [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2005, 16(2): 28–31. (in Chinese with English abstract)
- [12] 刘春, 范宣梅, 朱晨光, 等. 三维大规模滑坡离散元建模与模拟研究——以茂县新磨村滑坡为例 [J]. *工程地质学报*, 2019, 27(6): 1362–1370. [LIU Chun, FAN Xuanmei, ZHU Chenguang, et al. Discrete element modeling and simulation of 3-dimensional large-scale landslide-taking xinmocu landslide as an example [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2019, 27(6): 1362–1370. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 奚悦. 基于离散单元法的岩石颗粒破碎研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2016. [XI Yue. Study on the rock particle crushing using discrete element method [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2016. (in Chinese with English abstract)]
- [14] HOU T X, XU Q, ZHOU J W. Size distribution, morphology and fractal characteristics of brittle rock fragmentations by the impact loading effect [J]. *Acta Mechanica*, 2015, 226(11): 3623–3637.
- [15] TURCOTTE D L. Fractals and fragmentation [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1986, 91(B2): 1921.
- [16] 王健, 黄波林, 张全, 等. 碎裂化柱状危岩体崩塌-堆积特征概化模型研究 [J]. *水利水电技术*, 2020, 51(2): 136–143. [WANG Jian, HUANG Bolin, ZHANG Quan, et al. Study on generalized model of collapse-deposit characteristics of cataclastic and columnar dangerous rock mass [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2020, 51(2): 136–143. (in Chinese with English abstract)]
- [17] LUBE G, HUPPERT H E, SPARKS R S J, et al. Collapses of two-dimensional granular columns [J]. *Physical Review E, Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 2005, 72(4 Pt 1): 041301.
- [18] 郝明辉, 许强, 杨兴国, 等. 高速滑坡-碎屑流颗粒反序试验及其成因机制探讨 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(3): 472–479. [HAO Minghui, XU Qiang, YANG Xingguo, et al. Physical modeling tests on inverse grading of particles in high speed landslide debris [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(3): 472–479. (in Chinese with English abstract)]
- [19] KERMANI E, QIU T, LI T B. Simulation of collapse of granular columns using the discrete element method [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2015, 15(6): 4015004.
- [20] 陈小婷, 黄波林. FEM/DEM法在典型柱状危岩体破坏过程数值分析中的应用 [J]. *水文地质工程地质*, 2018, 45(4): 137–141. [CHEN Xiaoting, HUANG Bolin. Application of the FEM/DEM method to numerical analyses of the failure process of representative pillar-shape dangerous rockmass [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2018, 45(4): 137–141. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 纳曼·麦麦提, 米红林. 基于离散元的危岩群体崩塌影响因素分析 [J]. *人民长江*, 2021, 52(2): 99–104. [NAMAN·Maimaiti, MI Honglin. Numerical simulation on collapsing influence factors of perilous rock groups based on discrete element method [J]. *Yangtze River*, 2021, 52(2): 99–104. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 张家勇, 邹银先, 杨大山. 基于PFC^{3D}的鱼鳅坡滑坡运动过程分析 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2021, 32(4): 33–39. [ZHANG Jiayong, ZOU Yinxian, YANG Dashan. Analysis of Yuqiupo landslide motion process based on PFC^{3D} [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2021, 32(4): 33–39. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 陶志刚, 张海江, 尹利洁, 等. 基于FDEM的戒台寺古滑体开裂破坏过程数值模拟 [J]. *水文地质工程地质*, 2017, 44(3): 105–112. [TAO Zhigang, ZHANG Haijiang, YIN Lijie, et al. Numerical modeling of cracking for the Jietai temple ancient landslide with the combined finite-discrete element method [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2017, 44(3): 105–112. (in Chinese with English abstract)]