

基于 MatDEM 的易贡滑坡铲刮效应研究

杨畅¹, 赵建军¹, 王寿宇², 赖琪毅¹, 李鹏飞³

1. 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室(成都理工大学), 成都 610059

2. 水电水利规划设计总院, 北京 100120; 3. 中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司, 贵阳 550081

[摘要] 以易贡滑坡—碎屑流为背景, 针对滑坡—碎屑流形成过程复杂、铲刮作用机制难以分析等问题, 基于 MatDEM 离散元软件, 研究铲刮作用对易贡滑坡形成的影响。通过获取的高程数据, 根据真实的地形地貌, 利用 MatDEM 软件 1:1 构建易贡滑坡三维地质模型, 并通过内置功能训练参数, 实现了宏微观参数的转化。将易贡滑坡分为局部铲刮和全过程铲刮 2 种情况, 设立对照组进行分别讨论, 研究坡的不同区域发生铲刮和全过程发生铲刮对易贡滑坡形成的影响, 取得以下认识: 局部区域发生铲刮时, 崩滑体对基层物质有抬升隆起作用, 基层物质获得巨大动能, 速度瞬间增大; 在坡中下部发生铲刮, 会增大滑体的速度, 在坡前缘发生铲刮, 会推挤着前缘物质向前运动称之为“犁耕”效应; 滑坡发生铲刮作用, 会显著增加滑体的速度, 促进滑坡—碎屑流的形成, 造成更大的危害。研究结果为滑坡—碎屑流的形成分析提供参考。

[关键词] 易贡滑坡; 铲刮效应; MatDEM; 数值模拟

[分类号] P642.22

[文献标志码] A

MatDEM-based investigation of shovel-scraping effect on Yigong landslide

YANG Chang¹, ZHAO Jianjun¹, WANG Shouyu², LAI Qiyi¹, LI Pengfei³

1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2. China Renewable Energy Engineering Institute, Beijing 100120, China;

3. Guiyang Engineering Corporation Limited, Guiyang 550081, China

Abstract: In this study, we examine the influence of scouring action on the formation and debris flow of the Yigong landslide by using the discrete element software MatDEM. We consider the complex process of formation of debris flow due to the landslide and the difficulty of analyzing the mechanism of the scouring action. We used data on elevation to construct a three-dimensional geological model of the Yigong landslide in MatDEM at a scale of 1:1 according to the topography of the area. We used the built-in function for the

[收稿日期] 2023-07-24。

[基金项目] 中国电建集团科技项目(DJ-ZDXM-2020-3, DJ-ZDXM-2019-3)。

[第一作者] 杨畅(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 工程地质及岩土工程, E-mail: 2268175075@qq.com。

[通信作者] 赵建军(1980—), 男, 教授, 博士, 研究方向: 工程地质及岩土工程, E-mail: j. j. zhao@qq.com。

[引用格式] 杨畅, 赵建军, 王寿宇, 等, 2024. 基于 MatDEM 的易贡滑坡铲刮效应研究 [J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 51(3): 477-488.

Yang C, Zhao J J, Wang S Y, et al., 2024. MatDEM-based investigation of shovel-scraping effect on Yigong landslide[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 51(3): 477-488.

training parameters in the software to determine the relevant macroscopic and microscopic parameters. We then divided the Yigong landslide into two cases, local scraping and full-scale scraping, and set-up a control group to separately investigate the effects of their occurrence in different areas of the slope on the formation of the Yigong landslide. The results showed that when scraping occurred in the local area, the slide of the avalanche had a lifting and an uplifting effect on the base material, which gained a large amount of kinetic energy that instantaneously increased its velocity. When scraping occurred in the lower part of the slope, the velocity of the slide increased, while the material at its leading edge was pushed forward when scraping occurred at this point. This is called the "ploughing" effect. When scraping occurred on the landslide, the velocity of the slide increased significantly, and this in turn promoted the formation of debris flows and led to greater damage. The results of this study provide a reference for analyzing the formation of debris flows due to landslides.

Key words: Yigong landslide; shovel-scraping effect; MatDEM; numerical simulation

2000年4月9日,西藏自治区波密县易贡乡扎木弄沟发生了巨大的山体崩塌,经过运动堆积,形成巨大的滑坡—碎屑流,堵塞了雅鲁藏布江,形成了堰塞湖。

正确认识滑坡的形成和发展,是预防此类事故和减少经济损失最有效的办法。高速远程滑坡,往往会演化为滑坡—碎屑流,铲刮效应在其运动演化过程中,起到了至关重要的作用(Crosta, 2001; 黄润秋, 2007; 殷跃平, 2008; Dufresne et al., 2016)。Gauer and Issler(2004)对铲刮效应的机制进行分类,分别是冲蚀、磨损、流态化和犁耕。Savage and Hutter(1991)研究出了一维浅水波流动的质量和动量守恒方程。后续学者在此基础上完善,提出了用于铲刮效应的模型。Hungri(1995)等提出的 DAN 模型,通过不同的本构模型来近似模拟基层物质对滑体运动特征的影响;江琪熙(2020)、张远娇(2013)分别用 SPH 和 DAN-3D 对铲刮效应形成过程、易贡滑坡进行模拟,探讨土体力学参数的改变对铲刮区平均深度、滑体堆积体积、滑动历时的影响;He et al.(2015)基于热孔隙方法,研究滑坡底部摩擦热和剪切带的演化特征。滑坡—碎屑流的铲刮作用具有突发性和复杂性,同时受到监测技术手段的限制,很难针对某一因素进行确切的分析。因此,运用数值模拟进行研究是一种很好的办法。

离散元法用于模拟岩土体大变形具有极大的优势(王泳嘉和邢纪波,1995),因此本文使用矩阵离散元软件 MatDEM 来进行数值模拟研究。该软件使用 GPU 矩阵计算法,显著提高计算效率,同时能实现材料单元的自动训练赋值,能更好地

模拟真实情况。大量学者通过 MatDEM 实现了岩土体大变形的模拟。秦岩等(2018)基于 MatDEM 模拟了砂土侧限压缩试验;王飞等(2023)基于 MatDEM 对黄泥扁滑坡进行支护设计;梁立唯等(2019)基于 MatDEM 模拟了滚刀破岩的过程;朱晨光等(2019)基于 MatDEM 分析了高速远程滑坡温度分布规律和滑带生热特征;栗晓松等(2021)基于 MatDEM 还原了烟家沟滑坡启动发生的全过程。

运用 MatDEM 进行岩土体的模拟取得了一系列的成果,验证了 MatDEM 用于岩土体模拟具有可靠性和准确性,但将其运用与滑坡的铲刮效应分析还相对较少。本文采用 MatDEM 软件,对易贡滑坡进行运动过程模拟,依据获取的易贡滑坡高程信息,等比例还原真实的地形地貌,将易贡滑坡分为局部铲刮和全过程铲刮 2 种情况,设立对照组进行分别讨论,研究坡的不同区域发生铲刮和全过程发生铲刮对易贡滑坡形成的影响;设立 4 种工况进行计算分析,研究其在不同区域发生铲刮作用,对滑坡形成的影响。

1 研究区概况

滑坡发生地在易贡藏布河北岸的扎木弄沟,中心点地理坐标为 $30^{\circ}12'11''N, 94^{\circ}58'03''E$ 。易贡滑坡位于西藏自治区东南部,地处于易贡藏布的中下游地区,区内平均海拔在 4 200 m 以上,地势走向呈东高西低。

易贡滑坡所在的扎木弄沟区域内山势陡峭,岩体破裂特征明显,风化严重。前缘最低处位于易贡藏布河谷,高程约 2 200 m,后缘高程为 3 800~

5 520 m 之间,前后缘高差达 3 320 m。区内海拔平均 4 000 m 以上,V 形深切河谷发育,峡谷区域斜坡坡度约 40°~60°;河谷纵横交错,呈高山剥蚀地貌特征,同时也发育冰斗、角峰和冰碛垄等冰川地貌,地貌垂直分带明显;陡峭的地势,极大的高差,加上构造作用的影响为山体的危岩创造了极佳的地形条件(王保生等,2000)。

2 滑坡基本特征及变形机制

2.1 滑坡概况

发生于 2000 年的易贡滑坡是一种高速碎屑流运动,坡体上部约 $3 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的崩塌体从海拔 5 000 m 处滑落,裹挟着冰雪混合物撞击着山谷两侧向沟口处流动,崩塌体转化为碎屑物质,形成滑坡—碎屑流。大量的碎屑物质阻塞了易贡藏布,最终形成规模巨大的堰塞湖。

根据现有研究分析和易贡滑坡运动堆积的特点,将滑坡分为滑源区、铲刮区和堆积区。其中滑

源区 I 的高程介于 4 100~5 520 m,铲刮区 II 高程介于 2 800~4 100 m 之间。堆积区 III 高程介于 2 200~2 800 m 之间,剖面图见图 1。

(1)滑源区 I。滑源区域处于扎木弄沟后部,高程介于 4 100~5 520 m,受两组优势长大结构面切割,加上极端的区域环境,使得岩体破碎,发生崩滑。

(2)铲刮区 II。铲刮区高程介于 2 800~4 100 m,殷跃平(2000)将其归于滑坡崩塌区;刘铮等(2020)将其分为抛散区和铲刮区。铲刮作用分为向下对土体的侵蚀作用和向前推挤土体,在坡体的不同位置,其产生的效果不同。为探究铲刮作用对易贡滑坡的影响,本文根据前人研究的成果和易贡滑坡实际运动情况将铲刮区分为铲刮区 II-1 和 II-2,研究不同区域发生铲刮对易贡滑坡的影响。

(3)堆积区 III。该区域与易贡藏布相连,大量碎屑物质堆积阻塞了易贡藏布,形成规模巨大的堰塞湖。

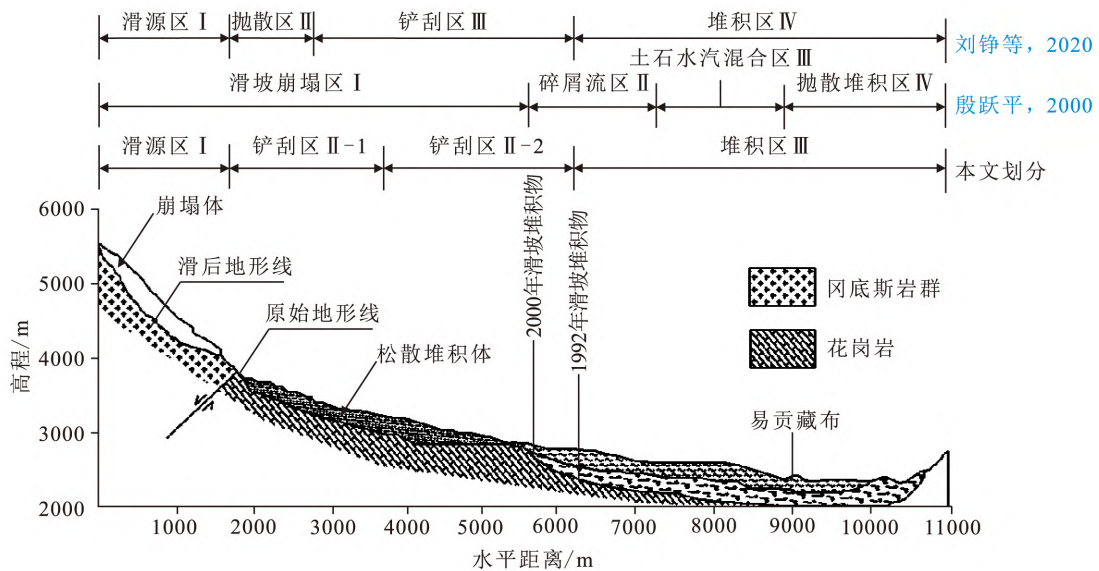


图 1 易贡滑坡纵剖面图
Fig. 1 Profile of Yigong landslide

2.2 坡体结构

易贡滑坡是发生在中国境内的比较罕见和典型的高速远程滑坡。其崩塌区受易—帕断裂和扎木弄沟断裂的复合控制,花岗岩岩体内断裂结构面极其发育,特别是 2 组相向倾斜的 NEE 向 (N58°E/SE∠32°和 N48°E/NW∠59°) 长大裂隙结构面,把花岗岩体切割成交线倾向山外的巨大楔形岩体。又因当地高差巨大,地形陡峭,这就为

崩塌的发育提供了良好的地形条件。

崩塌发生前一年,陆陆续续有小规模崩落发生(曹建磊,2016),表明崩塌部位山体的稳定性在逐渐降低。滑坡发生的四月份,气温上升,坡顶大量积雪开始融化,这是导致易贡滑坡发生的直接诱因。大量的雪雨水渗入到岩体的裂隙结构面内,对结构面内物质起到了软化的效果,同时它的高孔压作用,使得岩体发生崩塌失稳。

2.3 崩塌—碎屑流—堰塞

2000 年 4 月 9 日,扎木弄沟源区发生山体崩滑,滑塌体对沟内沉积许久的碎屑物质进行铲刮作用,短时间内,沟内的碎石等物质携带着巨大动能沿着沟谷快速向下运动,随即转化发生解体,形成规模巨大的超高速碎屑流,最终堆积在易贡藏布江,形成体积约 $3 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的天然坝体,造成易贡藏布江堵塞,演化为堰塞湖,造成巨大的经济损失。

3 基于 MatDEM 对易贡滑坡铲刮效应进行分析

离散元法 (DEM) 是由 Cundall and Strack (1979) 首次提出,主要是用于研究颗粒状物质的运动及相互作用。随着近年来离散元理论的发展和计算机技术快速进步,离散元法在多种领域得到广泛应用。

MatDEM 矩阵离散元法采用 GPU 矩阵计算方法以及三维接触算法,使离散元软件的单元数目和计算效率得到了巨大的提高;同时,能实现离散元模型的材料训练赋值,能更好地模拟真实岩土体的物理力学参数(刘春等,2020)。因此,本文选择矩阵离散元法 MatDEM 对易贡滑坡运动开展数值模拟。

3.1 参数选取

颗粒单元的力学性质会因为发生胶结而发生改变,通过内置的材料训练功能,能最大程度上符合天然状态下的岩土体参数。MatDEM 离散元模型的宏微观参数存在解析解,线弹性接触模型的 5 个微观力学参数法向刚度 (K_n)、切向刚度

(K_s)、断裂位移 (X_b)、初始抗剪力 (F_{s0})、摩擦系数 (μ_p),可通过下式中的杨氏模量 (E)、泊松比 (ν)、抗压强度 (C_u)、抗拉强度 (T_u)、内摩擦系数 (μ_i) 和单元直径 (d) 得到:

$$K_n = \frac{\sqrt{2}Ed}{4(1-2\nu)} \quad (1)$$

$$K_s = \frac{\sqrt{2}(1-5\nu)Ed}{4(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (2)$$

$$X_b = \frac{3K_n + K_s}{6\sqrt{2}(K_n + K_s)} \cdot T_u d^2 \quad (3)$$

$$F_{s0} = \frac{1-\sqrt{2}\mu_p}{6} \cdot C_u d^2 \quad (4)$$

$$\mu_p = \frac{-2\sqrt{2} + \sqrt{2}I}{2+2I}, I = [(1+\mu_i^2)^{1/2} + \mu_i]^2 \quad (5)$$

根据资料(陈铎增,2016)此次模拟采用的宏观参数见表 1。

表 1 宏观参数

Table 1		Macroscopic parameters			
	杨氏模量/ MPa	泊松 比	抗拉强度/ MPa	抗压强度/ MPa	内摩擦 系数
碎屑物	15.00	0.35	0.08	1.00	38.00
滑体	30.20	0.17	13.20	89.70	0.42

将宏观参数,输入 MatDEM 进行自动训练后得到颗粒间的微观参数赋予崩塌体,进行下一步的模拟计算。

3.2 模型建立

根据获取的高程数据,经过 ArcGIS 软件处理后,导入 MatDEM 软件进行模型建立及后处理分析。此次数值模拟采用真实数据 1:1 还原易贡滑坡,构建三维地形模型(图 2)。

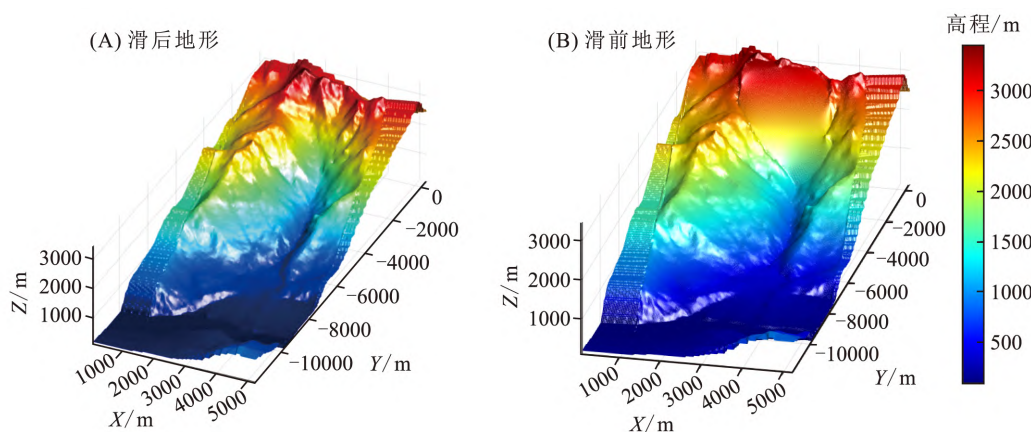


图 2 滑坡地质高程模型

Fig. 2 Model of geological elevation of the landslide

根据滑坡地质高程模型,将滑坡进行分区(图 3),将易贡滑坡分为局部铲刮和全过程铲刮 2 种情况,设立对照组进行分别讨论,研究铲刮效应对易贡滑坡的影响。

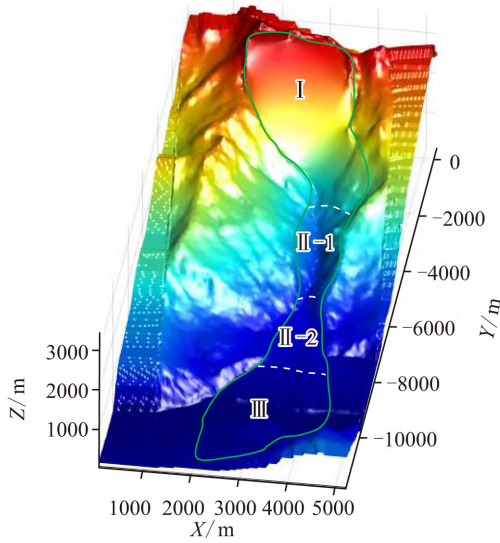


图 3 滑坡分区

Fig. 3 Landslide zone

I 滑源区; II 铲刮区; III 堆积区

在滑源区和铲刮区域分别设立 3 个监测点,具体如图 4 所示。滑源区、铲刮区域 II-1 和 II-2 分别设立监测点。记录所设监测点的速度、位移、能量等重要信息,分析易贡滑坡的铲刮运动规律。

3.3 计算工况及结果分析

易贡滑坡运动过程可见图 5,观察到危岩体解体后沿着扎木弄沟进行运动,高速运动的崩滑体沿途对扎木弄沟沟谷两侧进行铲刮,最终堵塞

雅鲁藏布,形成堰塞湖。模拟结果与前人实际调查勘测堆积真实情况一致(任金卫等,2001)表明模拟具有可靠性,符合实际运动情况(图 6)。

为研究铲刮作用对滑体运动堆积的影响,分别讨论在滑床不同区域发生铲刮和在整个运动过程发生铲刮对滑坡运动的影响,设立对照组进行对比研究分析。

3.3.1 局部区域铲刮

将铲刮区域分为 II-1 和 II-2,在区域内对堆积体进行单独赋值,每次单独滑动。在 2 次单独赋值运动中,运动情况相似:滑源区物质在重力的作用下,沿着扎木弄沟运动,在运移至铲刮区域时对铲刮区进行铲刮,裹挟着铲刮区颗粒继续运动,直至停止。根据运动情况,在滑源区和铲刮区设立监测点,得到了滑体速度、位移和能量的变化(图 7)。

在区域 II-1 发生铲刮,监测点①,②的速度变化情况如图 7-A 所示;速度曲线整体呈先增大后减小趋势,监测点①速度最大为 64 m/s,监测点②速度最大为 23 m/s。监测点①速度整体呈先增大后减小,局部呈现波动,在 $t=25$ s 时速度曲线急剧下降,随后达到峰值;在曲线末端,速度曲线呈现剧烈波动。监测点②在 $t=25$ s 时开始增大,随后到达峰值速度,整体变化趋势和监测点①一致。从速度的变化可以看出,滑源区物质在 $t=25$ s 时到达铲刮区域 II-1,监测点①速度曲线突然下降,监测点②瞬间获得较大的初始速度;滑源区的碎屑物质高速运动,使得铲刮区物质发生剪切液化,减小了滑动界面的摩擦系数,动能转化效率提高,曲线上表现为碎屑物质速度达到最

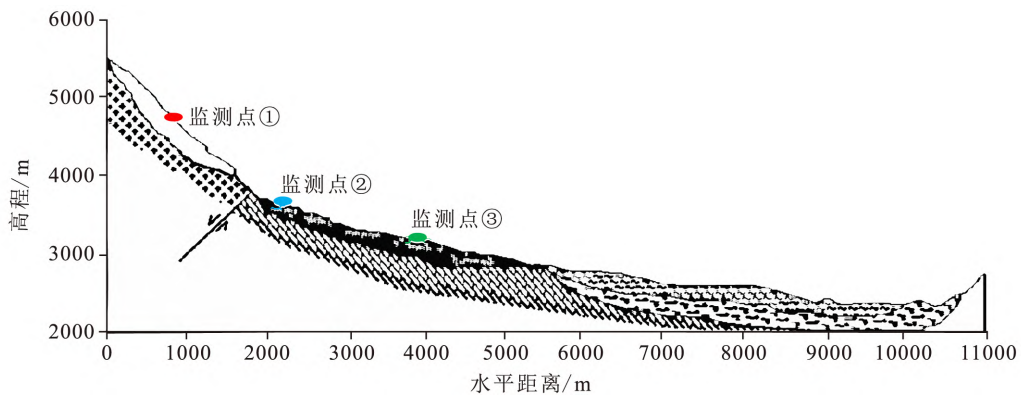


图 4 模型监测点设置

Fig. 4 Monitoring points of the model

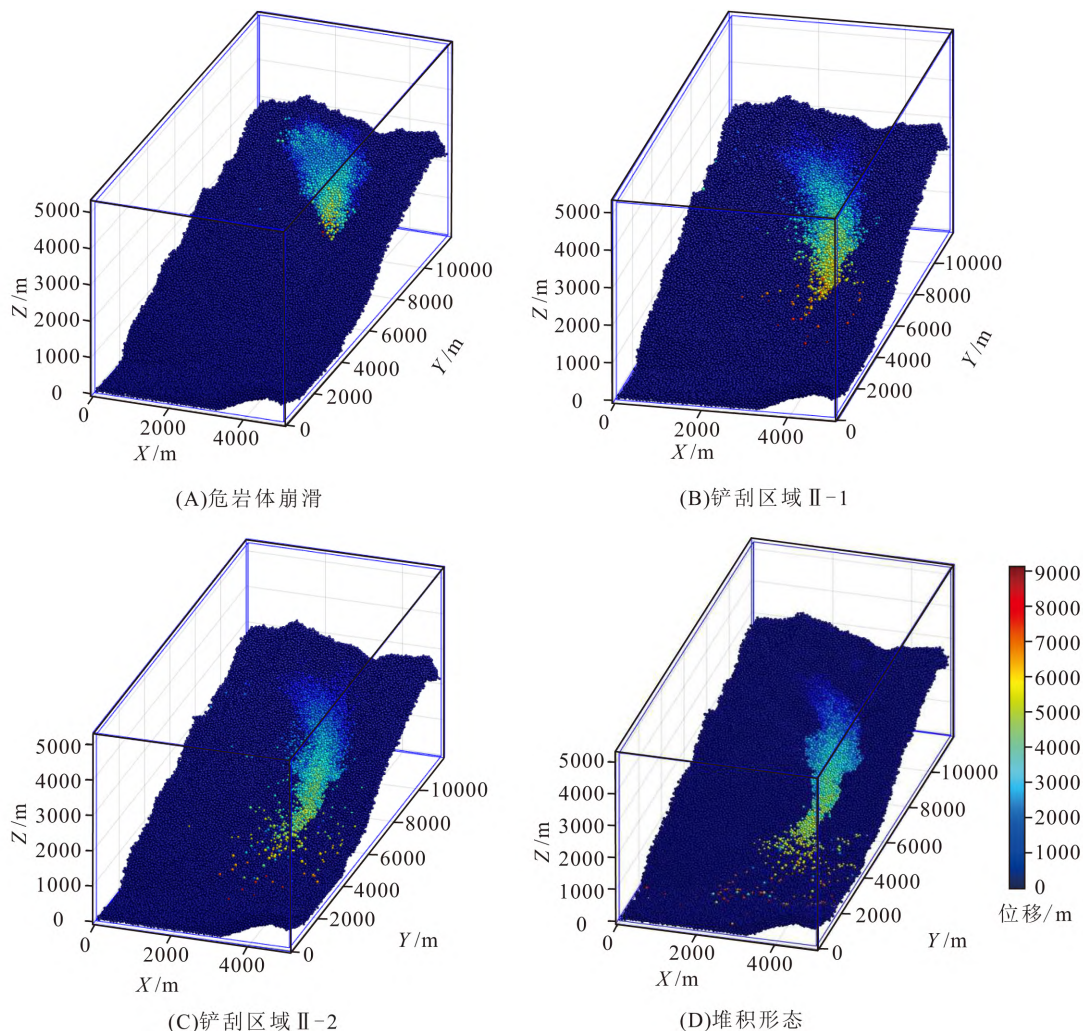


图 5 滑坡运动堆积过程

Fig. 5 Accumulated landslide movement

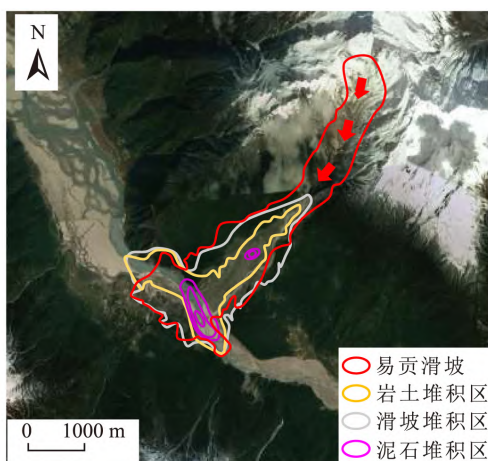


图 6 易贡崩塌滑坡体堆积形态

Fig. 6 Pattern of accumulation of the Egon landslide

大值,裹挟着铲刮区的物质向着坡脚运动;由于将基底物质设为刚体,碎屑物质到达坡脚时,颗粒间

的碰撞使得速度曲线呈现波动状态。

在区域 II-2 发生铲刮,监测点①,②的速度变化情况如图 7-B 所示。监测点①在 $t=50\text{ s}$ 时到达峰值速度 70 m/s ,监测点②峰值速度为 9 m/s 。速度曲线显示,碎屑物质在 $t=120\text{ s}$ 运移至铲刮区域 II-2,监测点②速度骤增,随后与碎屑物质运动,随后速度急剧降低,在 10 s 内速度降至 0 m/s ,直至停止。碎屑物质运移至铲刮区域时,由于摩擦消耗大量动能,且所具有的势能较小,因此在短时间内,碎屑物质降为 0 m/s ,产生急停现象。

整体上看,在不同区域发生铲刮存在以下 2 种区别。在区域 II-1 发生铲刮,碎屑物质会在短时间内达到速度峰值,但峰值速度比在区域 II-2 要小。高速运动的碎屑物质在上部铲刮时,对铲刮区进行剪切,导致铲刮区物质发生液化,减少了

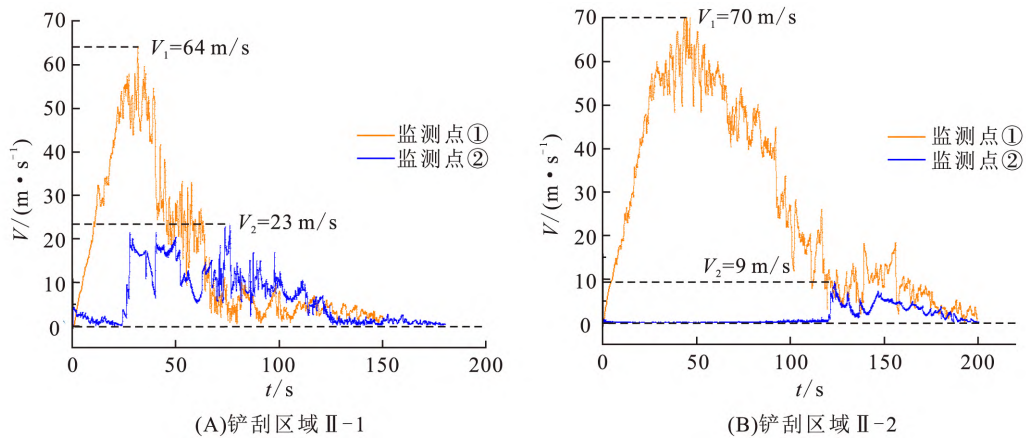


图 7 运动过程速度的变化

Fig. 7 Variation in the speed of the landslide during its motion

滑动界面的摩擦系数,促使动势转化效率提高,进而能更快达到峰值速度,但上部发生铲刮使得颗粒间摩擦加剧,动能大量转化为热能,使得峰值速度比在滑坡下部发生铲刮要小;在滑坡下部发生铲刮,使得仅存不多的动能损耗加剧,在短时间内动能衰减为 0,发生急停现象。

在区域 II-1 发生铲刮,监测点速度变化见图 8。监测点①整体向 Z 轴负向运动,峰值速度为 34 m/s;监测点② Z 方向速度曲线呈波动状,峰值速度为 14 m/s。Z 方向速度曲线整体向 Z 负轴运动符合客观规律,局部的波动是因为颗粒间的碰撞,使得速度曲线发生起伏;在区域 II-2 发生铲刮,监测点①变化趋势与在区域 II-1 一

致,速度在 $t=50$ s 左右达到峰值,为 38 m/s;监测点②在 120 s 左右开始运动,速度曲线局部起伏,整体沿着 Z 轴负向运动。

2 个区域发生铲刮,监测点①和监测点②变化趋势一致。在区域 II-1 发生铲刮,滑源区碎屑物质和铲刮区物质接触后,Z 轴速度达到峰值的时间比在区域 II-2 发生铲刮更早,因为铲刮区剪切液化,摩擦力减小,动势转化的效率更高;但由于摩擦消耗势能,铲刮区域 II-1 的峰值速度相对较小;在与铲刮区物质接触后,铲刮区物质瞬间获得巨大动能,受到颗粒间的碰撞,产生较大的反方向加速度,在曲线上表现为向 Z 轴正向运动。

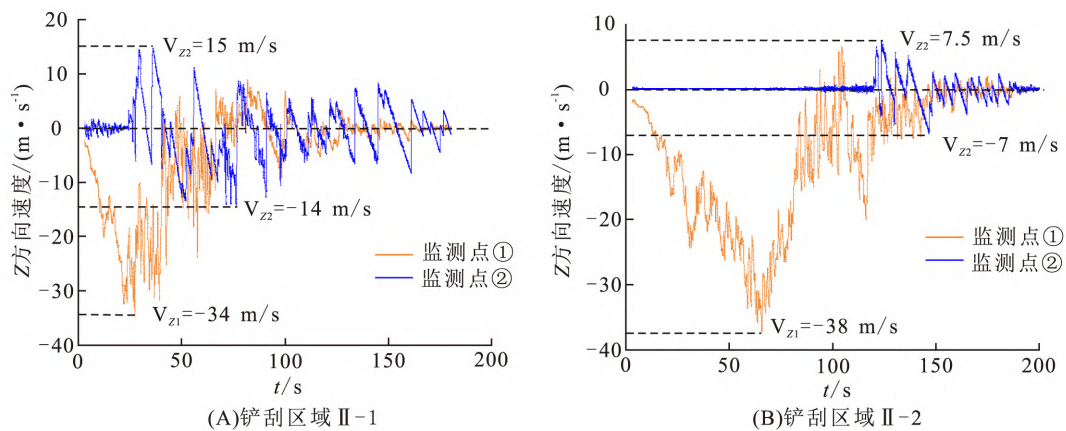


图 8 运动过程 Z 方向速度的变化

Fig. 8 Variations in velocity along the Z-axis during motion

图 9-A 展示了监测点在 Z 方向的运动情况。监测点①整体呈下降的趋势,在 $t=25$ s 时,下降趋势变缓,局部有小范围突起,直至静止;监测点

②在 $t=25$ s 时开始运动,整体呈下降趋势,刚开始运动时向着 Z 轴正向运动,曲线呈波浪状;图 9-B 展示了监测点在 Z 方向的运动情况。监测

点①整体呈下降趋势,局部有小范围波动;监测点②位置曲线在 $t = 120\text{ s}$ 开始有小范围起伏,在 $120 \sim 150\text{ s}$, 沿着 Z 轴正向运动, 随后静止。

从曲线的变化可以看出, 在不同区域铲刮有以下两点不同。①在上部区域发生铲刮, 监测点② Z 方向位置的变化幅度更大, 因为此时碎屑物质所具有的动能更大, 对铲刮区的物质进行冲击、

铲刮, 致使铲刮区物质向着 Z 轴正向运动, 铲刮区物质被碎屑流物质裹挟着一起运动; ②在下部区域进行铲刮, 此时碎屑物质动能减小, 致使铲刮区物质的变化幅度相对较小, 从 Z 方向位置曲线来看, 铲刮区物质被推挤着向前运动, 造成基层隆起, 称为“犁耕”作用, 从现场调查可以看出, 符合客观事实。

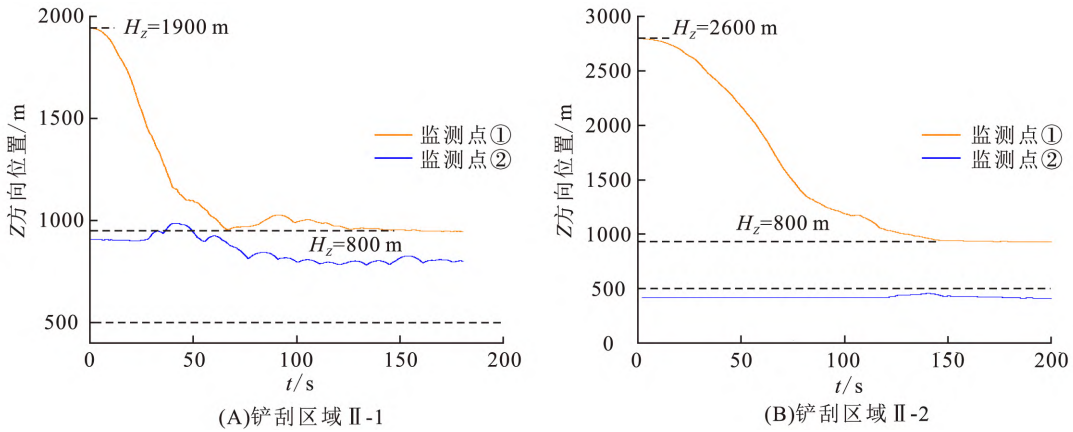


图 9 运动过程 Z 方向位置的变化

Fig. 9 Change in position along the Z -axis during motion

运动过程中, 能量的变化如图 10。重力势能的减小量变化曲线代表着所有运动颗粒重力势能减小量的总和, 在曲线上表现为动能达到峰值前, 势能变化曲线呈“下凹”, 随着一部分颗粒到达平面停止运动, 重力势能减小速率变慢; 在整个运动的过程中, 重力势能的减小量转变为系统其他能量的增加量, 随着动能减小为 0, 系统重新回到静止的状态, 此时热能达到最大值; 在此过程中系统

能量守恒。

在区域 II-1 发生铲刮, 产生的最大热能为 $4.8 \times 10^{16}\text{ J}$; 在区域 II-2 发生铲刮, 产生的最大热能为 $5.2 \times 10^{16}\text{ J}$, 表明在坡的中下部发生铲刮, 由于“推挤”着基底物质运动, 会产生更大的热能。区域 II-2 重力势能的减小量更大, 为 $5.2 \times 10^{16}\text{ J}$, 因此在区域 II-2 发生铲刮, 运动的距离更远, 下降的高度更大。

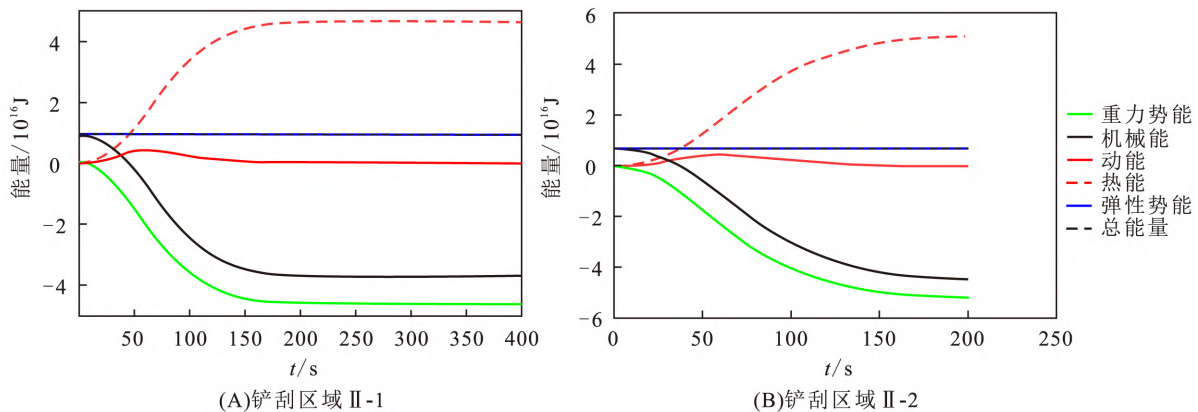


图 10 运动过程能量的变化

Fig. 10 Changes in energy during motion

3. 3. 2 全过程铲刮与不发生铲刮

设立 2 种不同条件进行模拟, 将整个铲刮区

域 II 进行赋值; 将铲刮区域设为刚体不参与运动变形, 对比分析整个过程铲刮对崩滑体运动的影

响。在全过程铲刮条件下设立 3 个监测点,分别位于滑源区 I、铲刮区域 II-1 和 II-2;不发生铲刮条件下仅在滑源区设立监测点,得到了滑体速度、位移和能量的变化。

全过程铲刮速度变化曲线(图 11)整体呈先增大后减小趋势,因为颗粒间的碰撞,导致速度曲线局部有波动,速度最大值可达 68 m/s。在 20 s 左右,滑源区物质对铲刮区域 II-1 进行铲刮作用;在 75 s 左右,滑源区物质对铲刮区域 II-2 进行铲刮作用,随后速度迅速减小,短时间内变为 0 m/s,停止运动。

不发生铲刮运动的情况下,滑源区物质速度

变化整体呈先增大后减小,因为颗粒间的碰撞,导致速度曲线局部有波动,速度最大值为 29 m/s。在 40 s 左右速度达到峰值,随后逐渐降低,在 100 s 左右,速度降至 0 m/s,停止运动。

从速度曲线的变化得出,在全过程发生铲刮的情况下,碎屑物质能更快到达峰值速度,且峰值速度比不发生铲刮更大;结合现场勘察情况,这是由于高速滑动的碎屑物质对铲刮区物质进行快速剪切,致使基层液化,滑动界面的摩擦力减小,重力势能更多的转化为了滑体的动能。同时运动到滑坡中下部对区域 II-2 进行铲刮,推着区域 II-2 的物质向前运动,速度急剧下降,短时间内停止运动。

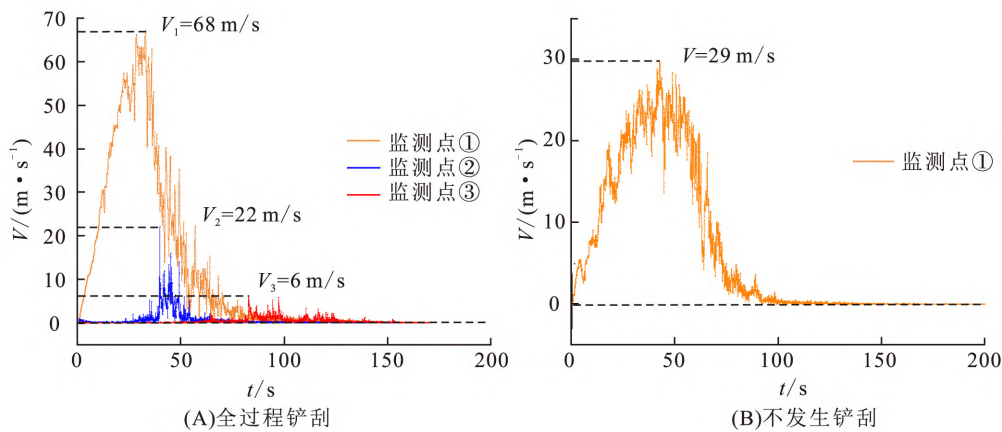


图 11 运动过程速度的变化
Fig. 11 Variation in speed during motion

全过程铲刮的情况下 Z 方向速度变化如图 12,滑源区物质整体下 Z 轴负向运动,曲线上表现为数值为负,整体呈先增大后减小,Z 方向速度最大值为 41 m/s。在 20 s 作用对区域 II-1 的

物质进行铲刮,致使速度急剧减小表现为负值增大。同时区域 II-1 的物质开始运动,随后到达区域 II-2,随之速度减小,逐步减为 0 m/s。由于颗粒间的碰撞,曲线局部有起伏;不发生铲刮的情况

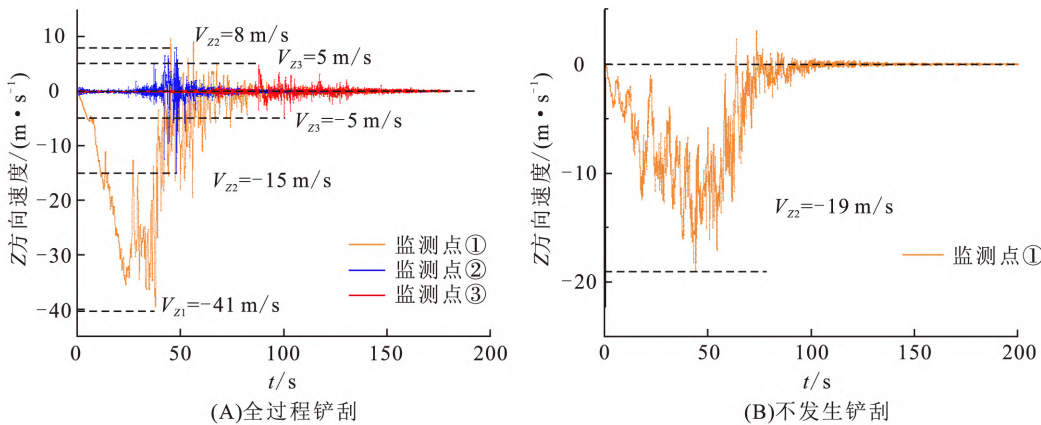


图 12 运动过程 Z 方向速度的变化
Fig. 12 Variation in velocity along the Z-axis during motion

下,速度呈先增大后减小趋势,整体沿 Z 轴负向运动,速度最大值为 18 m/s,在 100 s 左右速度降为 0 m/s,停止运动。

从 Z 方向速度曲线变化可以得出,全过程铲刮的情况,碎屑物质 Z 方向速度能达到更大的数值,动势转化的效率更大;在全过程铲刮的情况下下降速度更快且能在更短的时间达到静止状态,具有的危害更大。

图 13-A 展示了监测点在 Z 方向的运动情况。监测点①整体呈下降的趋势,在 25 s 时,下降趋势变缓,这是由于对区域 II-1 发生铲刮,动能减小导致的;监测点②从 20 s 开始运动,整体

呈降低的趋势,由于颗粒间的碰撞,导致运动轨迹呈波浪起伏状。在 100 s 左右监测点③开始运动,被滑体物质“推挤”着往前运动,直至静止。图 13-B 展示不发生铲刮时,监测点①的运动情况,整体呈下降趋势。

从位置的变化情况得出,铲刮区域 II-1 由于受到颗粒间碰撞,先往 Z 轴正方向运动,随后高度开始下降,往坡脚运动,体现出被滑源区物质“裹挟”着往前运动;铲刮区域 II-2 在受到铲刮后,往 Z 轴正方向运动,随后在 Z 轴方向并没有明显下降,体现出被碎屑物质“推挤”着往前运动。

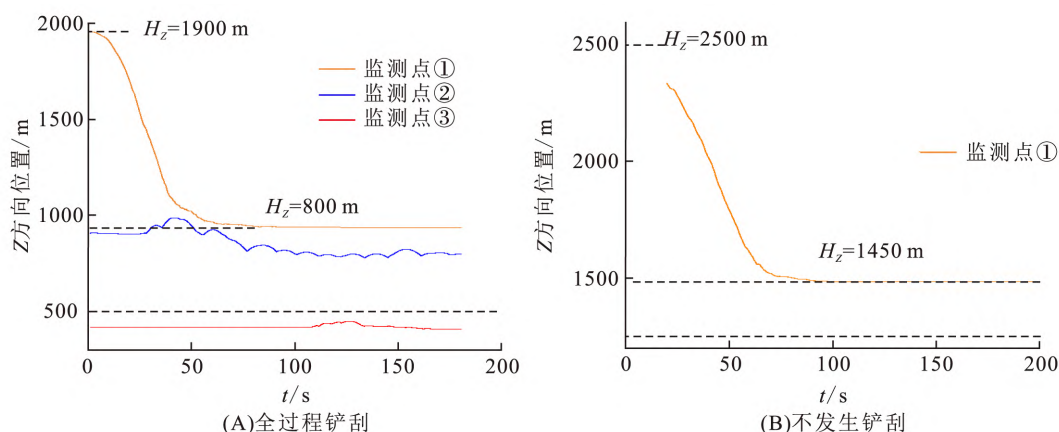


图 13 运动过程 Z 方向位置的变化
Fig. 13 Change in position along the Z-axis during motion

运动过程中,能量的变化如图 14。在整个运动过程中系统能量守恒,重力势能的减少量转变为热能和动能的增加,随着动能降至 0,系统热能达到最大值。重力势能的曲线表现为快速减少到

缓慢减少最后静止,动能和热能的变化与之对应。全过程铲刮能量的变化如图 14-A,重力势能减少约 5×10^{16} J,动能峰值为 0.8×10^{16} J,热能的增加约 4.9×10^{16} J;全过程不发生铲刮能量的变

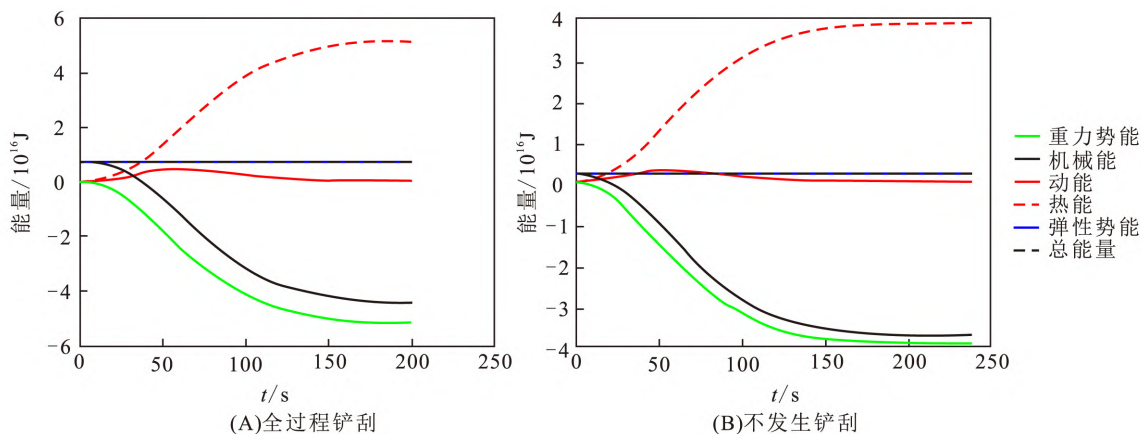


图 14 运动过程能量的变化
Fig. 14 Changes in energy during motion

化如图 14-B,重力势能减少约 3.9×10^{16} J,动能峰值为 0.2×10^{16} J,热能的增加约 3.8×10^{16} J;从数值上可得出与不发生铲刮的情况相比,全过程铲刮重力势能降低的更多、动能峰值更大、产生的热量更多。分析其原因,在发生铲刮时由于与基层物质发生铲刮,颗粒间碰撞摩擦产生大量热量,最终产生的热能更多;同时大量的热量产生,使得滑体与下部基层物质之间产生复杂的空气动力学作用,称作“气垫效应”(邢爱国等,2012),致使碎屑物质和基底间的摩擦力减小,动势能转化的更多,宏观表现为全过程铲刮运动的距离更远、运动的时间更短、峰值速度更大,造成的危害也越大。可以看出,铲刮作用对滑体的运动有着促进的作用,使滑体运动速度和规模更大,更容易造成巨大的危害。

4 结论

本文通过 MatDEM 模拟了易贡滑坡从启动到最终堆积。记录了整个过程中颗粒单元的速度、Z 方向速度、Z 方向位移和能量的变化,得出以下结论:

a. 滑体到达铲刮区域发生铲刮时,铲刮区的堆积体 Z 轴方向位置发生改变,瞬时向 Z 轴正方向运动,说明崩滑体对基层岩土体有抬升隆起的效果。

b. 在滑坡中部发生铲刮,崩滑体速度先减小后增大达到峰值,说明在滑坡中后部铲刮对滑坡的形成有促进作用;在滑坡前缘附近发生铲刮,崩滑体的速度急剧下降,且 Z 轴方向向上运动,推动着前缘物质向前运动,称之为“犁耕”现象。

c. 在滑坡中部发生铲刮,基层液化使得碎屑物质在更短的时间内动能达到峰值;在滑坡前缘铲刮,碎屑物质动能损失更大,在较短时间内停止运动。

d. 发生铲刮相较于不发生铲刮,其速度更快,具有更大的动能,最终导致更大的损失;铲刮作用能大大提高崩滑体的速度,促进滑坡的形成。

[参 考 文 献]

曹建磊,2016. 易贡高速远程滑坡超前冲击气浪三维数值模拟分析[D]. 成都:西南交通大学档案馆.
Cao J L, 2016. 3D Numerical Simulation of the Airblast Generated by Yigong Rock Avalanche[D]. Chengdu;

The Archive of Southwest Jiaotong University. (in Chinese)

陈锣增,2016. 易贡高速远程滑坡运动颗粒流数值分析[D]. 成都:西南交通大学档案馆.

Chen L Z, 2016. Three-Dimensional Numerical Simulation of Yigong Rock Avalanche Using Particle Flow Code [D]. Chengdu; The Archive of Southwest Jiaotong University. (in Chinese)

黄润秋,2007. 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,26(3):433-454.

Huang R Q, 2007. Large-scale landslides and their sliding mechanisms in China since the 20th century[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 26(3):433-454. (in Chinese)

江琪熙,2000. 滑坡—碎屑流铲刮效应数值模拟研究[D]. 杭州:浙江大学档案馆.

Jiang Q X, 2000. Simulation of the Entrainment Effect of Landslide-Debris Flow Considering the Entrainment of Substrate Material[D]. Hangzhou; The Archive of Zhejiang University.

栗晓松,范文,曹琰波,等,2021. 基于 MatDEM 的烟家沟滑坡演化过程数值模拟分析[J]. 地质与资源,30(2):199-206.

Li X S, Fan W, Cao Y B, *et al.*, 2021. MatDEM-based numerical simulation analysis of Yanjiagou landslide evolution process[J]. Geology and Resources, 30(2):199-206. (in Chinese)

梁立唯,刘春,秦岩,等,2019. 基于 MatDEM 的盾构滚刀破岩离散元建模与数值模拟[J]. 隧道与地下工程灾害防治,1(3):116-122.

Liang L W, Liu C, Qin Y, *et al.*, 2019. Discrete element modeling and numerical simulation of rock breaking by hob based in MatDEM [J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 1(3):116-122. (in Chinese)

刘春,乐天呈,施斌,等,2020. 颗粒离散元法工程应用的三大问题探讨[J]. 岩石力学与工程学报,39(6):1142-1152.

Liu C, Le T C, Shi B, *et al.*, 2020. Discussion on three major problems of engineering application of the particle discrete element method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 39(6):1142-1152. (in Chinese)

刘铮,李滨,贺凯,等,2020. 地震作用下西藏易贡滑坡动力响应特征分析[J]. 地质力学学报,26(4):471-480.

Liu Z, Li B, He K, *et al.*, 2020. An analysis of dynamic re-

- sponse characteristics of the Yigong Landslide in Tibet under strong earthquake[J]. *Journal of Geomechanics*, 26(4): 471—480. (in Chinese)
- 秦岩, 刘春, 张晓宇, 等, 2018. 基于 MatDEM 的砂土侧限压缩试验离散元模拟研究[J]. *地质力学学报*, 24(5): 676—681.
- Qin Y, Liu C, Zhang X Y, *et al.*, 2018. Discrete element simulation of sand confined compression test based on MatDEM[J]. *Journal of Geomechanics*, 24(5): 676—681. (in Chinese)
- 任金卫, 单新建, 沈军, 等, 2001. 西藏易贡崩塌—滑坡—泥石流的地质地貌与运动学特征[J]. *地质论评*, 47(6): 642—647.
- Ren J W, Shan X J, Shen J, *et al.*, 2001. Geological characteristics and kinematics of the rock fall-landslide in Yigong, Southeastern Tibet[J]. *Geological Review*, 47(6): 642—647. (in Chinese)
- 王保生, 范相德, 刘伟, 等, 2020. 易贡巨型山体崩塌滑坡调查研究报告[R]. 拉萨: 西藏自治区国土资源厅.
- Wang B S, Fan X D, Liu W, *et al.*, 2000. Investigation and research report on the giant landslide in Yigong[R]. Lhasa: The Tibet Autonomous Region of Land and Resources. (in Chinese)
- 王飞, 徐楚, 黎伟, 2023. 基于 MatDEM 的黄泥扁滑坡支护效果分析[J]. *地质科技通报*, 42(5): 52—60.
- Wang F, Xu C, Li W, 2023. Supporting effect analysis of the Huangnibian landslide based on MatDEM[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 42(5): 52—60. (in Chinese)
- 王泳嘉, 邢纪波, 1995. 离散单元法同拉格朗日元法及其在岩土力学中的应用[J]. *岩土力学*, 16(2): 1—14.
- Wang Y J, Xing J B, 1995. Discrete element method and Lagrangian element method and their applications in geomechanics[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 16(2): 1—14. (in Chinese)
- 邢爱国, 殷跃平, 齐超, 等, 2012. 高速远程滑坡气垫效应的风洞模拟试验研究[J]. *上海交通大学学报*, 46(10): 1642—1646.
- Xing A G, Yin Y P, Qi C, *et al.*, 2012. Study on the wind tunnel testing of air cushion effect of high-speed and long-runout landslide[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2012, 46(10): 1642—1646. (in Chinese)
- 殷跃平, 2000. 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*, (4): 8—11.
- Yin Y P, 2000. Characteristics of giant landslides and disaster mitigation in Bomi Yigong landslide, Tibet Research[J]. *Hydrogeology Engineering Geology*, (4): 8—11. (in Chinese)
- 殷跃平, 2008. 汶川八级地震地质灾害研究[J]. *工程地质学报*, 16(4): 433—444.
- Yin Y P, 2008. Researches on the geo-hazards triggered by Wenchuan earthquake, Sichuan[J]. *Journal of Engineering Geology*, 16(4): 433—444. (in Chinese)
- 张远娇, 2013. 高山峡谷区典型高速远程滑坡—碎屑流动力特性模拟研究[D]. 上海: 上海交通大学档案馆.
- Zhang Y J, 2013. Study on Dynamic Characteristics of Typic Rock Avalanches on Canyon Area[D]. Shanghai: The Archive of Shanghai Jiao Tong University. (in Chinese)
- 朱晨光, 刘春, 许强, 等, 2019. 滑坡滑带摩擦热离散元数值模拟研究[J]. *工程地质学报*, 27(3): 651—658.
- Zhu C G, Liu C, Xu Q, *et al.*, 2019. Discrete element numerical simulation research on friction heat in sliding zone of the landslide[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2019, 27(3): 651—658. (in Chinese)
- Cundall P A, Strack O D L, 1979. A discrete numerical mode for granular assemblies [J]. *Géotechnique*, 29(1): 47—65.
- Crosta G B, 2001. Failure and flow development of a complex slide: The 1993 Sesa landslide[J]. *Engineering Geology*, 59(1): 173—199.
- Dufresne A, Bösmeier A, Prager C, 2016. Sedimentology of rock avalanche deposits—Case study and review[J]. *Earth-Science Reviews*, 163: 234—259.
- Gauer P, Issler D, 2004. Possible erosion mechanisms in snow avalanches[J]. *Annals of Glaciology*, 38(1): 384—392.
- Hungr O, 1995. A model for the runout analysis of rapid flow slides, debris flows, and avalanches[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 32(4): 610—623.
- He S M, Liu W, Wang J, 2015. Dynamic simulation of landslide based on thermo-poro-elastic approach[J]. *Computers & Geosciences*, 75: 24—32.
- Savage S B, Hutter K, 1991. The dynamics of avalanches of granular materials from initiation to runout. Part I: Analysis[J]. *Acta Mechanica*, 86(1): 201—233.

(责任编辑: 黄维婷)