

基于物质点法的远程滑坡碎屑流运动过程模拟及特征分析

吴凤元,秦鹏飞,李鑫超,赵子豪

(沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 研究远程滑坡碎屑流运动过程以及运动过程中速度、滑动距离、动能变化,为滑坡碎屑流灾害的预防和治理提供参考。方法 基于物质点法,以塔合曼和乱石包两个远程滑坡碎屑流工程实例为背景,对两个滑坡碎屑流的运动过程进行数值模拟;并对塔合曼滑坡碎屑流运动过程中水平、垂直方向运动速度分布,内摩擦角对运动过程的影响,以及乱石包滑坡碎屑流铲刮效应对堆积形态、动能变化的影响进行分析。结果 两个滑坡碎屑流最终堆积形态模拟结果与实测结果吻合良好,验证了数值模拟结果的有效性;塔合曼滑坡碎屑流随着内摩擦角从 18° 增加到 33° ,动能峰值降低71.4%,最终势能增加54.4%,滑坡碎屑流的能量耗散减小47.8%;在乱石包滑坡碎屑流实例的模拟中,速度云图呈现了滑体速度场的层状分布特征。结论 内摩擦角对滑坡碎屑流的动力过程影响十分显著;乱石包滑坡碎屑流的滑体在高速滑移阶段存在强烈的内部剪切作用,并且铲刮效应对滑坡碎屑流的运动起到了一定的阻碍作用。

关键词 滑坡碎屑流;运动过程;物质点法;数值模拟

中图分类号 TU42;P642.22

文献标志码 A

引用格式:吴凤元,秦鹏飞,李鑫超,等.基于物质点法的远程滑坡碎屑流运动过程模拟及特征分析[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2024,40(1):86-95.(WU Fengyuan, QIN Pengfei, LI Xinchao, et al. Process simulation and characteristics analysis of long run-out debris flow movement based on material point method[J]. Journal of Shenyang jianzhu university(natural science),2024,40(1):86-95.)

Process Simulation and Characteristics Analysis of Long Run-out Debris Flow Movement Based on Material Point Method

WU Fengyuan, QIN Pengfei, LI Xinchao, ZHAO Zihao

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

收稿日期:2022-10-04

基金项目:国家自然科学基金项目(42202319,52008268);中国博士后科学基金项目(2019M651211);辽宁省教育厅基本科研项目(LJKMZ20220944);沈阳建筑大学科研创新培育计划项目(CXPY2017016)

作者简介:吴凤元(1989—),男,博士,主要从事工程地质灾害等方面研究。

Abstract: The purpose is to study the process of long run-out debris flow movement, as well as the changes in velocity, sliding distance, and kinetic energy during the movement, in order to provide reference for the prevention and treatment of debris flow disasters. Based on the material point method, numerical simulation analysis was conducted on the movement process of two long run-out debris flow engineering examples, Taheman and Luanshibao, using them as background. The horizontal and vertical velocity distribution during the Taheman debris flow movement process, the influence of internal friction angle on the movement process, and the impact of the entrainment effect of Luanshibao debris flow on the accumulation form and kinetic energy changes were analyzed and discussed. The simulation results of the final accumulation form of two debris flows are in good agreement with the measured results, verifying the correctness and effectiveness of the numerical simulation results. As the internal friction increases from 18° to 33° , the peak kinetic energy of the Taheman debris flow decreases by 71.4%, and the final potential energy increases by 54.4%. The energy dissipation of the debris flow decreases by 47.8%. In the simulation of Luanshibao debris flow, the velocity distribution shows the laminar distribution of the velocity field. The internal friction angle has a significant impact on the dynamic process of the debris flow. The sliding mass of Luanshibao debris flow has a strong internal shear effect in the high-speed sliding stage, and the entrainment effect has played a certain role in blocking the movement of the debris flow.

Key words: debris flow; movement process; material point method; numerical simulation

滑坡碎屑流作为自然灾害之一,无论在世界上,还是在我国历史上,由于其速度快、运行距离远和冲击力强等特点,给人类社会都造成了巨大的灾害。目前,关于滑坡碎屑流的研究以模型试验和数值模拟计算为主,模型试验能够再现滑坡碎屑流从静止到破坏的整个过程。A. Mangeney 等^[1]、S. K. Bryant 等^[2]、睦静^[3]、周月等^[4]分别进行了碎屑流滑槽或流通槽试验,研究了滑坡碎屑流动力过程及冲击性能。王国章等^[5]采用滑坡动力分析软件对典型滑坡碎屑流案例进行反演模拟,再现滑坡碎屑流运动过程及分析其动力特性。Z. Dai 等^[6]利用三维光滑粒子动力学法研究分析了汶川地震引起的王家岩、唐家山和东河口三处位置的滑坡碎屑流动力学过程。Y. Bi 等^[7]、张睿骁等^[8]分别采用离散元法研究了挡板对岩崩流动和冲击的影响和不同坡脚角度和挡板高度对冲击力、最大水平运动距离的影响。刘伦杰等^[9]利用修改后的非连续变形分析方法进行模拟,发现滑床摩擦弱化是导致大光包滑坡高速远程运动特征的重要原因。

物质点法(Material Point Method, MPM)

是 D. Sulsky 等^[10]提出的一种基于质点的无网格方法,其基本思想是利用耦合的拉格朗日质点和欧拉背景网格来解决与历史相关的内部状态变量问题,避免网格畸变。S. G. Bardenhagen 等^[11]将拉格朗日乘法法和库仑摩擦引入到物质点法来模拟碎屑材料的运动特性。Y. Yuan 等^[12]提出了土力学大变形问题中的摩擦接触算法,物质点法非常适合模拟相关材料的大变形,在滑坡模拟的过程中得到了广泛应用。S. Andersen 等^[13]提出了基于广义插值物质点法的滑坡动态演化数值模型,并在简化的边坡场景上确定了滑坡触发判据条件。F. Zabala 等^[14]利用物质点法再现了三个真实案例,模拟结果与实际情况高度吻合,进一步验证了物质点法在岩土工程大变形问题中的可靠性。张巍等^[15]利用物质点法研究高速远程滑坡的动力过程,并对其应用进行了探讨。谢艳芳等^[16]基于物质点法对新磨村滑坡碎屑流运动过程进行分析,模拟结果反映了滑坡碎屑流启动及动力演化过程。徐小蓉等^[17]以红石岩碎屑流灾害为工程背景,基于三维物质点法探究大变形下的碎屑流态转变及运动规律。

滑坡碎屑流是以碎屑材料为主,物质点法更适合于模拟这种碎屑材料的大变形运动。同时,物质点法计算采用的是宏观力学参数,相关计算参数更容易获取。因此,笔者基于物质点法,采用自编计算程序对两个典型远程滑坡碎屑流工程实例开展数值模拟研究;在验证数值模拟结果有效性的基础上,研究滑坡碎屑流运动速度、内摩擦角对滑坡碎屑流动力过程的影响以及滑坡碎屑流铲刮效应对滑坡碎屑流运动过程的影响,研究结果可为远程滑坡碎屑流灾害的预防和治理提供借鉴。

1 物质点法理论模型

物质点法采用拉格朗日质点与欧拉网格相结合的方法对连续介质进行描述。更新拉格朗日格式的控制方程为

$$\sigma_{ij} + \rho b_i = \rho \ddot{u}_i. \quad (1)$$

$$\sigma^{\nabla} = \sigma^{\nabla}(\dot{\epsilon}_{ij}, \sigma_{ij}). \quad (2)$$

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}). \quad (3)$$

式中: σ_{ij} 为应力张量; ρ 为密度; b_i 为作用于物体单位质量上的力; \ddot{u}_i 为加速度; σ^{∇} 为焦曼应力率张量; ϵ_{ij} 为应变张量; u_i 为位移。

边界条件为 $\sigma_{ij}n_j = \bar{t}_i$,其中 n_j 为面力的外法向单位向量, \bar{t}_i 为面力。

为了方便对方程进行求解,根据式(1)和边界条件得到动量方程的弱形式:

$$\int_{\Omega} \delta u_i \rho \ddot{u}_i dV + \int_{\Omega} \delta u_{i,j} \rho \sigma_{ij}^s dV -$$

$$\int_{\Omega} \delta u_i \rho b_i dV - \int_{\Gamma_f} \delta u_i \bar{t}_i^s \rho dA = 0. \quad (4)$$

式中: δu_i 为虚位移; σ_{ij}^s 为比应力; $\sigma_{ij}^s = \sigma_{ij}/\rho$; \bar{t}_i^s 为比面力; $\bar{t}_i^s = \bar{t}_i/\rho$; Ω 为现时构形所占据的空间区域; Γ_f 为面力边界。

通过对式(4)物质点离散得到求和形式的动量方程:

$$\sum_{p=1}^{n_p} m_p \ddot{u}_{ip} \delta u_{ip} + \sum_{p=1}^{n_p} m_p \sigma_{ijp}^s \delta u_{i,j} - \sum_{p=1}^{n_p} m_p b_{ip} \delta u_{ip} - \sum_{p=1}^{n_p} m_p \bar{t}_{ip}^s h^{-1} \delta u_{ip} = 0. \quad (5)$$

式中: h 为假想的边界厚度,引入该厚度是为了将式(4)左侧最后一项中的边界积分转换为体积分。

笔者将采用 MUSL 求解格式进行求解^[18],其中在物质点应力更新时,本构模型采用 Drucker-Prager 模型来进行计算。

2 塔合曼滑坡碎屑流动力过程模拟

2.1 工程概况

塔合曼滑坡碎屑流位于塔合曼乡境内,距离中巴公路约 10 km。滑坡碎屑流呈条形分布,其主要成分为古生代长英质片麻岩。塔合曼滑坡碎屑流水平运动距离约为 5 430 m,垂直落差约为 1 510 m,平面投影面积约为 6.15 km²,体积约为 1.1 × 10⁸ m³。影响滑坡碎屑流的主要断层为慕士塔格正断层。塔合曼滑坡碎屑流的剖面如图 1 所示^[18]。

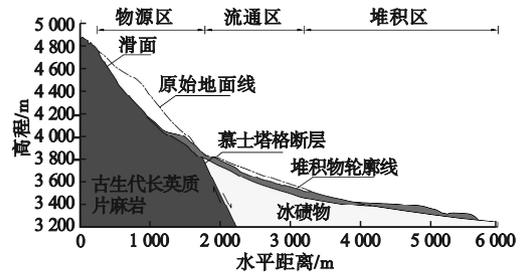


图1 塔合曼滑坡碎屑流的剖面

Fig. 1 Section of the Taheman debris flow

塔合曼滑坡碎屑流物源区后缘陡壁倾斜,倾斜程度较大,平均坡度约为 60°;流通区发育一个大型的堆积平台和两个大型的侧缘堤;堆积区由四个大型的弧形脊构成。

2.2 物质点法模型

滑坡碎屑流的初始物质点模型如图 2 所示。背景格网的总长度 X 为 6 000 m,高度 Y 为 2 000 m,背景格网的单位尺寸为 30 m × 30 m。建立的物质点模型共包含了 14 803 个物质点,其中每个网格都有 4 个物质点。该物质点模型由滑坡碎屑流及滑床组成。由于滑床的组成成分和岩体结构与滑体有较大

差异,除表层可能与滑坡碎屑流发生相互作用外,其他部分基本未发生改变。因此,为简化计算,假定滑床为一整体。

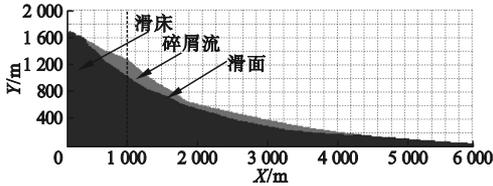


图 2 塔合曼滑坡碎屑流初始物质点模型

Fig. 2 Initial MPM model of the Taheman debris flow

对于物质点法模拟滑坡碎屑流计算参数的确定,采用工程类比及试算相结合的方法。但由于滑坡碎屑流呈破碎松散状,块体间只产生接触碰撞,故不考虑块体间的粘结作用,只考虑块体间的摩擦作用。因此,物质点法模拟滑坡碎屑流的计算参数黏聚力设置为 0,滑体密度为 $2\ 000\ \text{kg}/\text{m}^3$,弹性模量为 $10\ \text{MPa}$,泊松比为 0.3,内摩擦角 φ 为 18° 。

对于内摩擦角数值的确定,需在合理取

值范围内进行大量反演,发现 $\varphi = 18^\circ$ 时的计算结果最符合实际情况。当 $\varphi = 18^\circ$ 时,塔合曼滑坡碎屑流模拟的最终堆积形态与滑坡碎屑流实测最终堆积形态轮廓线对比情况如图 3 所示。

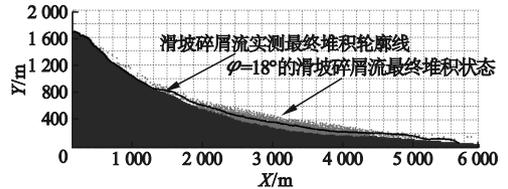


图 3 塔合曼滑坡碎屑流模拟结果与实测结果对比

Fig. 3 Comparison between simulation and measured results of the Taheman debris flow

2.3 塔合曼滑坡碎屑流运动过程

通过计算模拟得到滑坡碎屑流的滑动时间约为 $110\ \text{s}$ 。利用 $\varphi = 18^\circ$ 的模拟结果分析滑坡碎屑流的运动过程。塔合曼滑坡碎屑流在几个关键时刻的速度分布如图 4 所示。

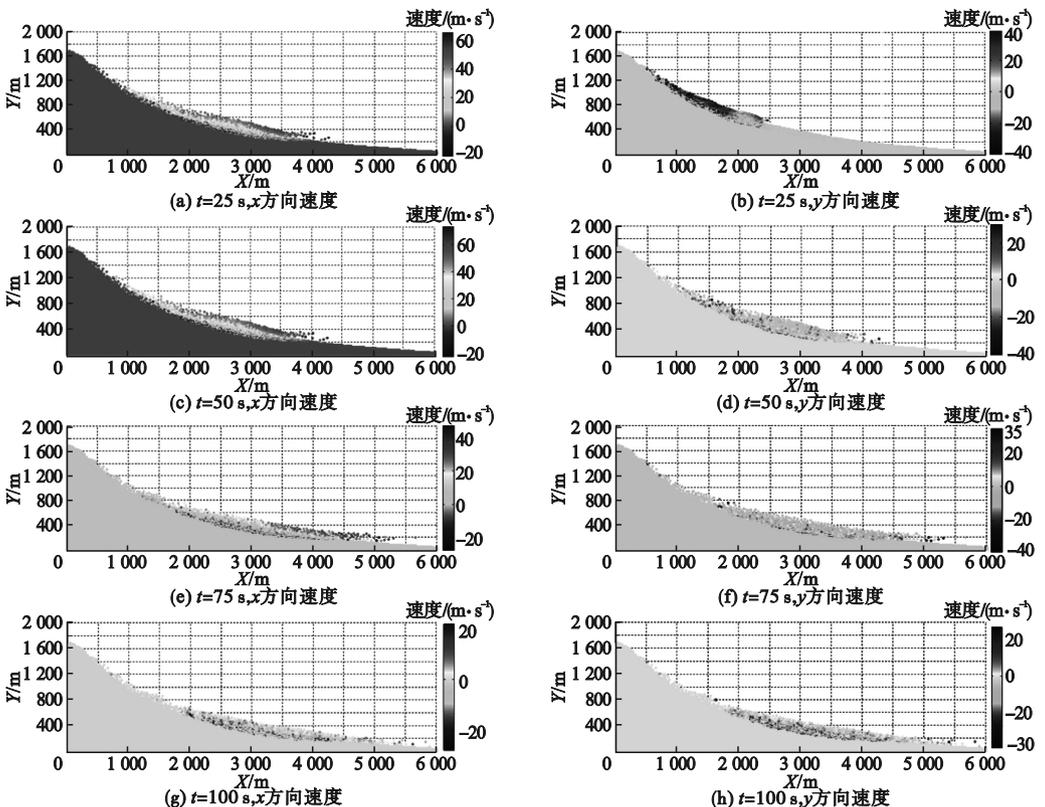


图 4 塔合曼滑坡碎屑流速度云图

Fig. 4 Velocity magnitudes of the Taheman debris flow

在 $t = 25$ s 时,滑坡碎屑流已经开始滑动。滑坡碎屑流中上部的碎屑处于的地势比较陡峭,在重力作用下起始运动就比较剧烈,而滑坡碎屑流下部的碎屑处于的地势比较平缓,因此起始还未获得较大的速度。从滑坡碎屑流中上部的碎屑观察,也可以看到碎屑是从滑坡碎屑流外围首先开始移动的,并且滑坡碎屑流中上部已经滑动的碎屑从前到后逐渐增大,最大值为 59.61 m/s,表明滑坡碎屑流处于水平方向的加速状态。垂直速度从低处向高处逐渐递增,说明滑坡碎屑流有向下运动的趋势。

在 $t = 50$ s 时,滑坡碎屑流的水平滑动距离增大,垂直高度减小。滑坡碎屑流整体速度都获得了明显的增加,并且滑坡碎屑流的整体沿滑面滑动。对于水平速度,此时滑坡碎屑流外围碎屑仍具有较大速度,并且 $t = 25$ s 时的滑坡碎屑流中上部的碎屑已经有部分碎屑覆盖了滑坡碎屑流下部的碎屑,进而一起向前运动。滑坡碎屑流整体的水平速度从 $t = 25$ s 到 $t = 50$ s 获得显著的增大,最大速度达到 73.43 m/s。垂直速度相对较大且分布均匀,这表明滑坡碎屑流继续向下移动。

在 $t = 75$ s 时,滑坡碎屑流的水平滑动距离继续增大,并且水平方向的长度明显变长,垂直方向的高度持续减小。滑坡碎屑流的水平速度明显低于 $t = 50$ s 时的水平速度,最大速度减小为 46.87 m/s,说明滑坡碎屑流此时开始减速,但滑坡碎屑流仍在向前运动,并且其前端的滑坡碎屑流速度仍然是最大的。垂直速度远远小于 $t = 50$ s 时的速度。垂直变形趋于稳定。

在 $t = 100$ s 时,滑坡碎屑流继续滑动一段距离,其最大水平速度继续减小。具有较大水平速度的碎屑的范围已经很小。滑坡碎屑流的垂直速度开始接近 0。

2.4 内摩擦角对塔合曼滑坡碎屑流动力过程的影响

为了讨论内摩擦角对滑坡碎屑流动力过

程的影响,选取 6 组不同内摩擦角进行数值模拟。提取不同内摩擦角的塔合曼滑坡碎屑流最终堆积形态剖面轮廓,将获得的不同内摩擦角的模拟结果进行比较,如图 5 所示。不同内摩擦角的滑坡碎屑流最远滑动距离对比如表 1。可以从图 5 和表 1 中塔合曼滑坡碎屑流的堆积轮廓和前端的滑动距离上可以观察到一定的差异。

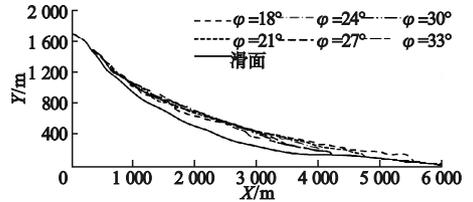


图 5 不同内摩擦角的塔合曼滑坡碎屑流的模拟结果对比

Fig. 5 Simulation results of the Taheman debris flow with different internal friction

表 1 塔合曼滑坡碎屑流最远滑动距离对比

Table 1 The maximum sliding distance of the Taheman debris flow

内摩擦角/(°)	最远滑动距离/m
18	5 648
21	4 718
24	4 223
27	4 223
30	4 223
33	4 223

当内摩擦角小于 24° 时,随着内摩擦角的减小,滑坡碎屑流前端的最终滑动距离均增大。而当内摩擦角大于 24° 时,滑坡碎屑流前端的最终滑动距离随着内摩擦角的减小而保持不变,但滑坡碎屑流的轮廓发生了变化,说明滑坡碎屑流后端碎屑最先开始崩塌,并且依次对其后的碎屑进行覆盖,并裹挟在一起向前运动,也就是说滑坡碎屑流后端碎屑的重力势能是滑坡碎屑流最重要的起始能量来源,即滑坡碎屑流前端的碎屑的运动恰恰需要滑坡碎屑流后端碎屑给予能量,而滑坡碎屑流在内摩擦角较大的情况下,滑坡碎

屑流后端碎屑受到碎屑间的摩擦对其运动产生更大的阻碍,因此滑坡碎屑流后端碎屑还未全覆盖滑坡碎屑流前端其就发生了停止。

滑坡碎屑流能量的变化可以帮助判断滑坡的破坏能力,可为滑坡碎屑流危险性分区方面的分析研究提供参考。塔合曼滑坡碎屑流在不同内摩擦角作用下的动能随时间的变化如图6所示。

不同内摩擦角下滑坡碎屑流动能变化过程可分为两个阶段,即动能增加阶段和动能减小阶段。不同内摩擦角下,滑坡碎屑流动能开始随着时间的增加而增加,当增加到动能峰值后开始减小,直至滑坡碎屑流停止。随着内摩擦角从 18° 增加到 33° ,动能峰值降低71.4%,从 4.58×10^{11} J减小到 1.31×10^{11} J。因此,内摩擦角对动能影响非常显著,滑坡碎屑流的动能变化时间随着内摩擦

角的增大而增大。图7呈现了塔合曼滑坡碎屑流在不同内摩擦角作用下的势能、能量耗散随时间的变化。

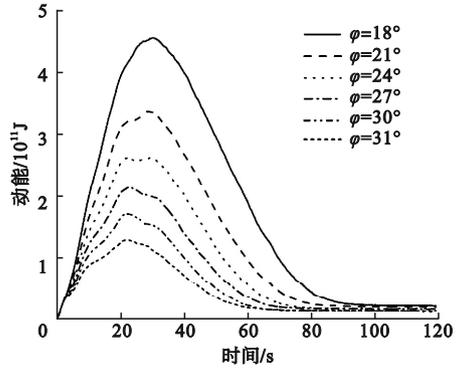
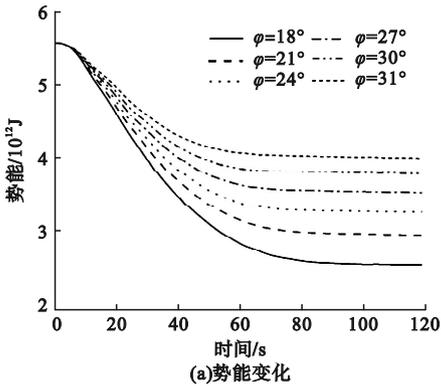
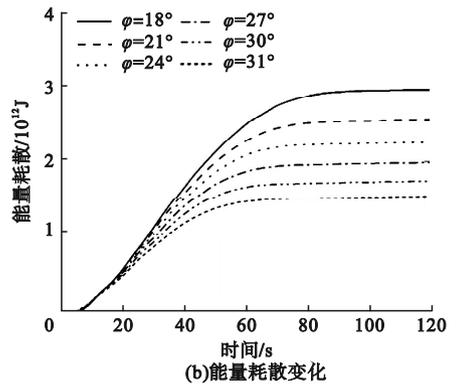


图6 不同内摩擦角下塔合曼滑坡碎屑流动能变化

Fig. 6 Variation of the kinetic energy when the Taheman debris flow under different internal friction angles



(a)势能变化



(b)能量耗散变化

图7 塔合曼滑坡碎屑流势能、能量耗散变化

Fig. 7 Variation of the potential energy and energy dissipation when the Taheman debris flow

由图7(a)可见,不同内摩擦角下滑坡碎屑流的势能都是随着时间的增加逐渐减小。随着内摩擦角从 18° 增加到 33° ,滑坡碎屑流的最终势能增加54.4%,从 2.63×10^{12} J增加到 4.06×10^{12} J,说明内摩擦角影响碎屑向下的运动。图7(b)呈现的恰恰与势能随时间变化的相反,即不同内摩擦角下滑坡碎屑流的能量耗散都是随着时间的增加逐渐增加,随着内摩擦角的增大,滑坡碎屑流的能量耗散减小47.8%,从 2.95×10^{12} J减小到 $1.54 \times$

10^{12} J。综上,可以发现内摩擦角越小,滑坡碎屑流运动得越远,势能的变化量越大,说明更多的势能转化为动能和被消耗。

3 乱石包滑坡碎屑流动力过程模拟

3.1 工程概况

乱石包滑坡碎屑流位于四川省理塘县禾尼村,其垂直高差820 m(4 930 ~ 4 110 m),最大水平运动距离3 880 m。物源区位于理

塘—德巫断层的上盘,岩性为三叠系黑云母花岗岩闪长岩,在强烈的构造活动与长期风化作用下较为破碎。断层下盘主要由第四纪冲积物组成。滑坡碎屑流后壁粗糙陡峭,坡度约 50° ,呈圈椅状。基于详细的现场调查将该滑坡碎屑流分为物源区、铲刮流通区和堆积区。图8为乱石包滑坡碎屑流剖面图^[20]。

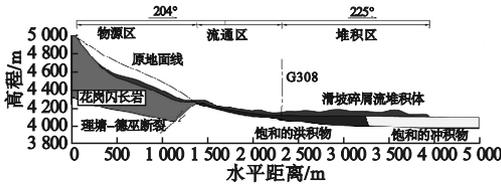


图8 乱石包滑坡碎屑流剖面图

Fig. 8 Section of the Luanshibao debris flow

物源区底部为一低洼平台,平台南东侧发育一个断陷湖。根据滑坡碎屑流两侧地层推断流通区在滑坡发生之前为山前冲洪积扇,其物质组成为风化的花岗岩粗砂。物源区的滑坡体运动到流通区,对其进行强烈的刮铲。堆积区主要分布在G318国道南西向的毛垭坝盆地内,主要由风化的花岗岩粗砂组成,浅表层夹杂着少量的角砾状花岗岩块。

3.2 物质点法模型

根据乱石包滑坡碎屑流剖面图建立了初始物质点模型。背景网格总长4000 m,高度1200 m,如图9所示。每个背景网格设置4个物质点,大小为 $20\text{ m} \times 20\text{ m}$ 。物质点总数为12141个。该物质点模型由滑坡碎屑流及滑床组成。在图9中,浅色和深色区域分别代表了滑面以上的滑坡碎屑流和滑面以下的滑床。

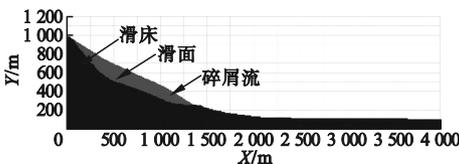


图9 乱石包滑坡碎屑流初始物质点模型

Fig. 9 Initial MPM model of the Luanshibao debris flow

采用物质点法在合理取值范围内进行大量反演分析,将黏聚力设置为0,通过不断地将物质点法模拟结果与滑坡碎屑流实测结果进行对比,确定此滑坡碎屑流的滑体密度为 2000 kg/m^3 ,弹性模量为10 MPa,泊松比为0.3,内摩擦角为 14° 。

乱石包滑坡碎屑流模拟结果如图10所示,最终堆积形态比较符合滑坡碎屑流实测的最终堆积形态。

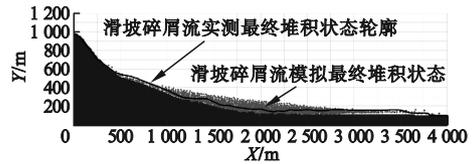


图10 乱石包滑坡碎屑流模拟结果与实测结果对比

Fig. 10 Simulation and measured results of the Luanshibao debris flow

3.3 乱石包滑坡碎屑流运动过程

通过对塔合曼滑坡碎屑流运动过程进行模拟分析,对于不发生铲刮作用的滑坡碎屑流的动力过程及内摩擦角对滑坡碎屑流的影响,得到了一些重要的结论。而乱石包滑坡碎屑流中的碎屑在经过流通区时,碎屑会对滑床的冲洪积扇进行铲刮。乱石包滑坡碎屑流的物质点模型总共历时115 s。

图11为乱石包滑坡碎屑流在水平和垂直方向的合速度分布情况。在25 s时,滑坡碎屑流的速度分布特征呈平行于底滑面的层状分布,越接近滑面的碎屑速度越小,而越接近滑坡碎屑流表层的碎屑速度较大,最大速度超过50 m/s。在50 s时,滑坡碎屑流速度分布仍呈层状分布,但此时滑坡碎屑流主体速度均已降至20~40 m/s,少数滑坡碎屑流表层悬浮的颗粒速度可达60 m/s。在75 s时,此时滑坡碎屑流大部分碎屑速度已经降到5 m/s以下,滑坡碎屑流最终的堆积形态已经显露。在75 s时,此时滑坡碎屑流内部速度分布差异已经很小,滑坡碎屑流主体的

运动已经接近停止。

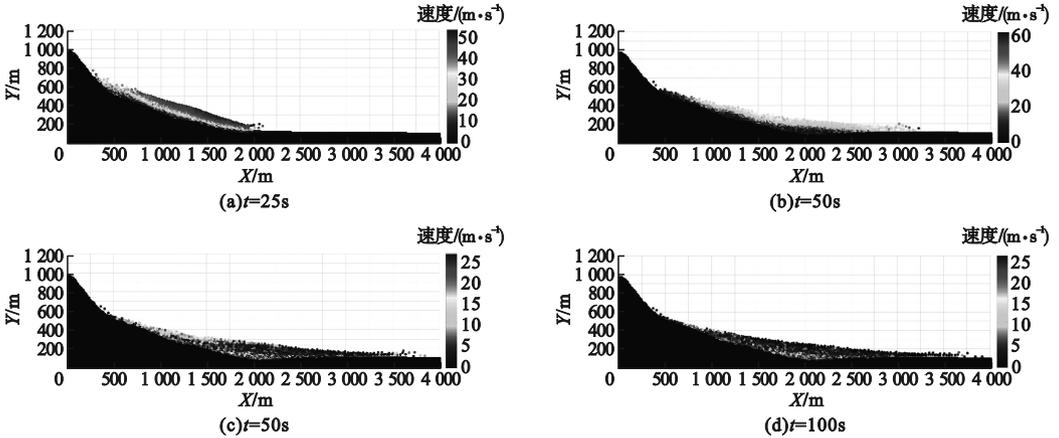


图 11 乱石包滑坡碎屑流几个关键时刻速度分布

Fig. 11 Velocity profiles of the Luanshibao debris flow at several critical moments

3.4 乱石包滑坡碎屑流铲刮效应

铲刮效应是滑坡碎屑流运动过程中的典型现象之一。乱石包滑坡碎屑流在经过流通区时,对洪积物层进行铲刮。采用物质点法分别对乱石包滑坡碎屑流和不考虑铲刮情况下的乱石包滑坡碎屑流进行数值模拟,并对其模拟结果进行对比分析。图 12 为乱石包滑坡碎屑流有铲刮和无铲刮情况下的最终堆积形态。

屑流堆积轮廓更加扁平。铲刮效应对滑坡碎屑流的最远滑动距离也产生了影响,滑坡碎屑流的最远距离从 4 113 m 减小到 3 915 m,说明铲刮对滑坡碎屑流的运动起到了一定的阻碍作用。为了进一步对滑坡碎屑流的铲刮效应进行分析,通过模拟软件得到乱石包滑坡碎屑流和无铲刮情况下乱石包滑坡碎屑流的动能变化,如图 14 所示。

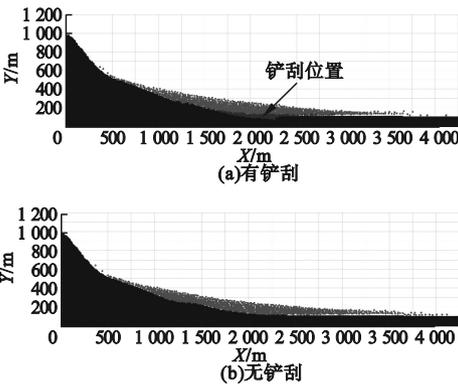


图 12 乱石包滑坡碎屑流有铲刮和无铲刮情况下的最终堆积形态

Fig. 12 Final accumulation shape of the Luanshibao debris flow and debris flow without scraping

图 13 为铲刮效应对乱石包滑坡碎屑流的最终堆积轮廓的影响。由图可知,滑坡碎屑流停止运动后,从滑坡碎屑流最终堆积形态可以发现,铲刮效应对滑坡碎屑流的最终堆积形态有一定的影响,无铲刮情况的滑坡碎

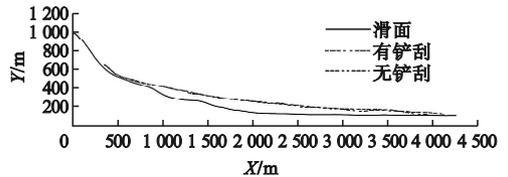


图 13 铲刮效应对乱石包滑坡碎屑流最终堆积轮廓的影响

Fig. 13 Scraping influence on the final accumulation profile of the Luanshibao debris flow

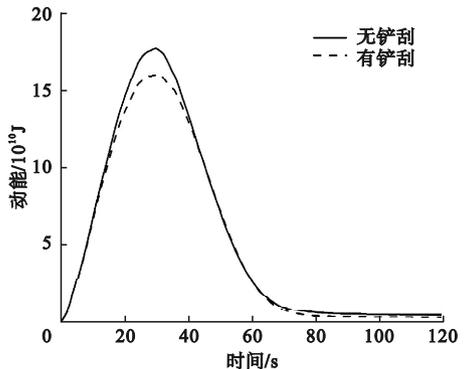


图 14 铲刮效应对乱石包滑坡碎屑流动能的影响
Fig. 14 Scraping influence on the kinetic energy of the Luanshibao debris flow

从图 14 可知,在 20 s 左右,乱石包滑坡碎屑流和无铲刮情况下乱石包滑坡碎屑流的动能出现差异,说明此时乱石包滑坡碎屑流刚运动到铲刮区,而铲刮效应立即对滑坡碎屑流的动能产生了影响。在 30 s 左右,乱石包滑坡碎屑流有铲刮和无铲刮情况下滑坡碎屑流均达到动能峰值,但铲刮将滑坡碎屑流的动能峰值降低 8%,从 1.785×10^{11} J 降低到 1.642×10^{11} J。说明铲刮效应明显削弱了滑坡碎屑流运动过程中的动能。

4 结 论

(1) 基于物质点法对两个典型滑坡碎屑流工程案例进行数值模拟,得到的滑坡碎屑流最终堆积结果与实测结果吻合良好,验证了物质点算法在模拟滑坡碎屑流动力过程的有效性。

(2) 在塔合曼滑坡碎屑流实例的模拟中,塔合曼滑坡碎屑流运动时间约为 110 s,其中 25 s 和 50 s 时处于加速阶段,75 s 和 100 s 时处于减速阶段。

(3) 当内摩擦角小于 24° 时,随着内摩擦角的减小,滑坡碎屑流的最远滑动距离增大;当内摩擦角大于 24° 时,滑面以上只有部分碎屑发生滑动,因此滑坡碎屑流最远运动距离不变,但滑坡碎屑流中运动的碎屑范围随着内摩擦角的减小而增大。随着内摩擦角从 18° 增加到 33° ,动能峰值降低 71.4%,最终势能增加 54.4%,滑坡碎屑流的能量耗散减小 47.8%,说明内摩擦角对塔合曼滑坡碎屑流的动力过程影响是十分显著的。

(4) 在乱石包滑坡碎屑流实例的模拟中,乱石包滑坡碎屑流运动时间约为 115 s;在 25 s 时,滑坡碎屑流处于初始滑移阶段;在 50 s 时,滑坡碎屑流处于快速滑移阶段;在 75 s 时,滑坡碎屑流处于缓慢滑移阶段;在 90 s 时,滑坡碎屑流处于停积阶段;速度云图呈现了滑体速度场的层状分布特征,并揭示滑体在高速滑移阶段存在强烈的内部剪

切作用。

(5) 铲刮效应对滑坡碎屑流的最终堆积形态和最远滑动距离都产生了影响,无铲刮情况的滑坡碎屑流堆积轮廓更加扁平,而且铲刮效应将滑坡碎屑流的最远滑动距离从 4 113 m 减小到 3 915 m,将滑坡碎屑流的动能峰值降低 8%,表明铲刮效应对滑坡碎屑流的运动起到了一定的阻碍作用。

参考文献

- [1] MANGENEY A, REOCHE O, HUNGR O, et al. Erosion and mobility in granular collapse over sloping beds [J]. *Journal of geophysical research: earth surface*, 2010, 115(F3): 1480 - 1493.
- [2] BRYANT S K, TAKE W A, BOWMAN E T. Observations of grain-scale interactions and simulation of dry granular flows in a large-scale flume [J]. *Canadian geotechnical journal*, 2015, 52(5): 638 - 655.
- [3] 眭静. 基于模型试验的碎屑流冲击力模型研究[D]. 绵阳:西南科技大学, 2019.
(SUI Jing. Study on the impact force model of granular flow based on the model experiment [D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2019.)
- [4] 周月, 廖海梅, 甘滨蕊, 等. 滑坡运动冲击破碎物理模型试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(4): 726 - 735.
(ZHOU Yue, LIAO Haimei, GAN Binrui, et al. Physical modeling test on impacting fragmentation during landslide moving [J]. *Chinese journal of rock mechanics and engineering*, 2020, 39(4): 726 - 735.)
- [5] 王国章, 李滨, 冯振, 等. 重庆武隆鸡冠岭岩质崩滑-碎屑流过程模拟[J]. *水文地质工程地质*, 2014, 41(5): 101 - 106.
(WANG Guozhang, LI Bin, FENG Zhen, et al. Simulation of the process of the Jiguanling rock avalanche in Wulong of Chongqing [J]. *Hydrogeology & engineering geology*, 2014, 41(5): 101 - 106.)
- [6] DAI Z, HUANG Y, CHENG H, et al. 3D numerical modeling using smoothed particle hydrodynamics of flow-like landslide propagation triggered by the 2008 Wenchuan

- earthquake [J]. *Engineering geology*, 2014, 180:21 – 33.
- [7] BI Y, DU Y, HE S, et al. Numerical analysis of effect of baffle configuration on impact force exerted from rock avalanches [J]. *Landslides*, 2018, 15(5): 1029 – 1043.
- [8] 张睿骁, 樊晓一, 姜元俊. 滑坡碎屑流冲击拦挡结构的离散元模拟[J]. *水文地质工程地质*, 2019, 46(1): 148 – 155.
(ZHANG Ruixiao, FAN Xiaoyi, JIANG Yuanjun. Discrete element simulation of the impact of landslide debris flow on resistive structures [J] *Hydrogeology & engineering geology*, 2019, 46(1): 148 – 155.)
- [9] 刘伦杰, 富海鹰, 张迎宾, 等. 考虑滑床摩擦弱化的大光包滑坡运动机制 DDA 数值模拟研究[J]. *工程地质学报*, 2020, 28(6): 1221 – 1232.
(LIU Lunjie, FU Haiying, ZHANG Yingbin, et al. DDA simulation of mobility of Daguangbao landslide with frictionally weakened sliding bed [J]. *Journal of engineering geology*, 2020, 28(6): 1221 – 1232.)
- [10] SULSKY D, CHEN Z, SCHREYER H L. A particle method for history-dependent materials [J]. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 1994, 118(1/2): 176 – 196.
- [11] BARDENHAGEN S G, BRACKBILL J U, SULSKY D. The material-point method for granular materials [J]. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 2000, 187(3/4): 529 – 541.
- [12] YUAN Y, BEUTH L, VERMEER P A. Frictional contact formulation for large deformation analyses in geomechanics [C]// *Proceedings of international workshop on geotechnics of soft soil*. Glasgow, United Kingdom: [s. n.], 2008: 107 – 116.
- [13] ANDERSEN S, ANDERSEN L. Modelling of landslides with the material-point method [J]. *Computational geosciences*, 2010, 14: 137 – 147.
- [14] ZABALA F, ALONSO E E. Progressive failure of Aznalcóllar dam using the material point method [J]. *Géotechnique*, 2011, 61(9): 795 – 808.
- [15] 张巍, 史卜涛, 施斌, 等. 土质滑坡运动全过程物质点法模拟及其应用[J]. *工程地质学报*, 2017, 25(3): 815 – 823.
(ZHANG Wei, SHI Butao, SHI Bin, et al. Material point method for run-out process simulation of soil landslides and application [J]. *Journal of engineering geology*, 2017, 25(3): 815 – 823.)
- [16] 谢艳芳, 李新坡, 赵曙熙, 等. 基于物质点法的新磨村滑坡动力特性分析[J]. *山地学报*, 2018, 36(4): 589 – 597.
(XIE Yanfang, LI Xinpo, ZHAO Shuxi, et al. MPM-based numerical analysis of the kinematic characteristics of Xinmo landslide in Maoxian county, Sichuan, China [J]. *Mountain research*, 2018, 36(4): 589 – 597.)
- [17] 徐小蓉. 颗粒介质流动过程的物质点法模拟及其工程应用[D]. 北京: 清华大学, 2018.
(XU Xiaorong. Study on the flow process of granular materials with the material point method simulations and its engineering applications [D]. Beijing: Tsinghua University, 2018.)
- [18] NAIRN J A. Material point method calculations with explicit cracks [J]. *Computer modeling in engineering and sciences*, 2003, 4(6): 649 – 664.
- [19] 王洁. 塔合曼高速远程滑坡堆积特征及运动学机理研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2020.
(WANG Jie. The geomorphological characteristics and kinematic mechanism of Tagarma rock avalanche [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020.)
- [20] 朱雨轩, 戴福初, 梁莲姬. 青藏高原典型液化型高速远程滑坡形成机制分析[J]. *工程科学与技术*, 2020, 52(6): 10 – 21.
(ZHU Yuxuan, DAI Fuchu, LIANG Lianji. Analysis on the formation mechanism of rapid and long runout landslides in liquefaction-type in Tibetan Plateau [J]. *Advanced engineering sciences*, 2020, 52(6): 10 – 21.)
- (责任编辑: 刘春光 英文审校: 范丽婷)