

文章编号: 1008-2786-(2018)4-589-09
DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000355

基于物质点法的新磨村滑坡动力特性分析

谢艳芳^{1,2}, 李新坡^{2,3*}, 赵曙熙^{1,2}, 刘洋^{1,2}, 徐骏⁴

(1. 中国科学院大学, 北京 101499; 2. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041;
3. 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室, 成都 610041; 4. 中国中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031;)

摘 要: 2017 年 6 月 24 日, 四川省茂县叠溪镇新磨村突发特大滑坡碎屑流灾害, 造成大量人员伤亡及房屋损坏, 针对该滑坡特征及成因机制, 相关学者已经取得一定研究成果, 然对其动力学过程与特征的认知还相对缺乏。为解决这一问题, 本文引入兼具欧拉算法和拉格朗日算法优势, 适用于大变形及长距运动模拟计算的物质点法进行模拟分析。通过分析滑坡全程位移时程曲线、速度时程曲线和等效塑性应变变化特征, 揭示其动力演化过程。现场调查与模拟结果表明, 崩滑体启动后呈整体运移, 与下方坡体碰撞解体, 转化为碎屑流, 不同时刻同一位置的坡体形态、质点等效塑性应变发展趋势以及能量时程变化曲线均进一步反映碎屑流碰撞破碎和刮铲侵蚀的过程。数值模拟计算与 Scheidegger 提出的理论计算方法获得的碎屑流速度特征吻合, 可以在一定程度上反映滑坡的致灾能力。模拟结果综合反映了滑坡启动及动力演化过程。

关键词: 碎屑流; 动力特性; 物质点法; 新磨村滑坡

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

引言

2017 年 6 月 24 日突发于四川茂县的新磨村滑坡, 给当地人民造成了严重的生命财产损失。灾后应急调查发现此次滑坡为降雨软化板岩夹层, 崩滑体启动后与下方坡体碰撞, 解体破碎, 在运动过程中刮铲侵蚀下部坡体, 携裹坡面物质形成高速碎屑流^[1]。已有调查工作基于 UAV 拍摄和 InSAR 图像等手段开展^[2-5], 从理论角度对滑坡的动力特性进行分析。为清晰了解滑坡的动力特性, 有研究通过数值模拟手段开展以突破现场调查的局限性, 包括深度平均连续介质力学法和 MacCormack-TVD 有限

差分算法^[6]、离散元法 (PFC、MatDEM) 和连续介质法 (Massflow、MassMov2D)^[7] 等, 此前离散元法^[8] 和非连续变形分析方法^[9] 等均被运用于模拟此类具有高位、高速、远程等特点的滑坡的运动过程。其中深度平均法不能体现出在深度上滑坡碎屑流的运动差异, 而离散元所采用的拉格朗日算法与有限差分、连续介质所采用的欧拉算法均具有一定的局限性, 传统欧拉算法易出现非线性对流项产生的数值求解困难, 而传统拉格朗日算法则常见网格畸变导致数值求解精度下降, 均难以准确反映滑坡的运动过程。为了解决在模拟大变形滑坡中的数值求解问题, 本文采用一种任意拉格朗日-欧拉方法——物质点法 (Material Point Method) 来模拟分析新磨村滑坡碎屑

收稿日期 (Received date): 2017-11-27; **改回日期** (Accepted date): 2018-06-04

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金 (41472293, 41672356); 中国科学院成都山地所“一三五”方向性项目 (No. SDS-135-1704)。
[National Natural Science Foundation of China (41472293, 41672356); ‘One Three Five’ Directional Project of Institute of Mountain Hazard and Environment, Chinese Academy of Sciences (No. SDS-135-1704).]

作者简介 (Biography): 谢艳芳 (1993-), 女, 四川德阳人, 硕士研究生, 主要研究方向: 滑坡碎屑流动力特性。[XIE Yanfang (1993-), female, born in DeYang, Sichuan province, M. Sc. candidate, research on kinematic characteristics of debris flow] E-mail: 171070521@qq.com

*** 通讯作者** (Corresponding author): 李新坡 (1978-), 男, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 主要研究方向: 滑坡、高边坡工程防治技术, 岩土数值模拟。[LI Xinpo (1978-), male, Ph. D. associate professor, specialized in landslide, high slope engineering technology, numerical simulation] E-mail: lixinpo@imde.ac.cn

流的动力全过程,探讨新磨村滑坡动力特性。

在滑坡灾害区域,对于滑前的危险性评价和滑后的营救阶段,利用数值方法分析滑坡运动过程以及危险区域分布意义重大。Sulsky^[10]最初将物质点法运用于模拟固体力学问题,此后 Andersen^[11]采用在物质点法基础上扩展得到的广义插值物质点法 (Generalized Interpolation Material Point method, GIMP) 模拟了滑坡的动态演化过程,但是仅以简化边坡模型进行模拟试验。Li 等^[12]基于物质点法模拟了真实滑坡碎屑流案例的运动过程以及对建构筑物的冲击破坏作用。从已有研究成果来看,物质点法模拟大变形滑坡优势显著,但将其运用于分析真实地形条件下崩滑体破碎解体及碎屑流刮铲侵蚀效应等动力特性的研究还较缺乏。

本文介绍了新磨村滑坡概况和物质点法数值模拟方法,基于物质点法对新磨村滑坡动力过程进行模拟,重点对滑坡运动过程中的碰撞破碎、刮铲侵蚀和速度变化等现象进行了分析,探讨此类滑坡的动力特性。本文的研究为高位滑坡碎屑流远程运动致灾机理的认识、定量风险分析和防治提供了基础。

1 新磨村滑坡

新磨村滑坡位于四川省茂县叠溪镇新磨村,处

于岷江一级支流松坪沟左岸,山体坡顶高程约 3400 m,坡脚高程约 2200 m,坡前缘中心点坐标为东经 103°39′03.4″、北纬 32°04′09.4″。滑坡所处区域位于青藏高原向四川盆地过渡地带,该区域是我国大陆内部最为显著的大陆梯度带^[13],区域内地貌以高山峡谷为主,河流深切。原始斜坡上陡下缓,上段为基岩坡体,滑源区坡度约 50°,下段为老滑坡堆积体,坡度 35°~45°。滑坡所处区域同时为地震活跃带,介于龙门山和四川西北部三角断块之间^[14],受往期地震影响,顶部山体已出现破裂松散,此次在降雨的诱发下,突发约 $2.87 \times 10^6 \text{ m}^3$ 山体顺层滑动。

滑坡历时约 100 s^[15],其中主滑坡仅 60 s 左右^[16],根据滑坡运动过程,可以对其分区如图 1 所示,a 为滑源区,长 440 m,宽 350 m,面积约 $1.545 \times 10^5 \text{ m}^2$ 。b 为碎屑流区,长 1210 m,宽 367 m,面积约 $4.44 \times 10^5 \text{ m}^2$,滑坡运动结束后,碎屑流区仍残留约 $4 \times 10^6 \text{ m}^3$ 滑坡-碎屑流堆积体。堆积区包含老滑坡推动区 c_1 和抛洒堆积区 c_2 两部分,总面积约 $7.2 \times 10^5 \text{ m}^2$ 。在滑坡两侧还有两个比较大的不稳定变形区 d_1 和 d_2 。滑坡区域内出露基岩为三叠系中统杂谷脑组变质石英砂岩夹板岩,相对境内其他岩组,属于较坚硬或坚硬岩组^[17]。上覆第四纪沉积物主要是崩坡积堆积块碎石土 (Q_4^{del}),由岩块、砾石和 1933 年叠溪地震诱发的古滑坡堆积体等组成。

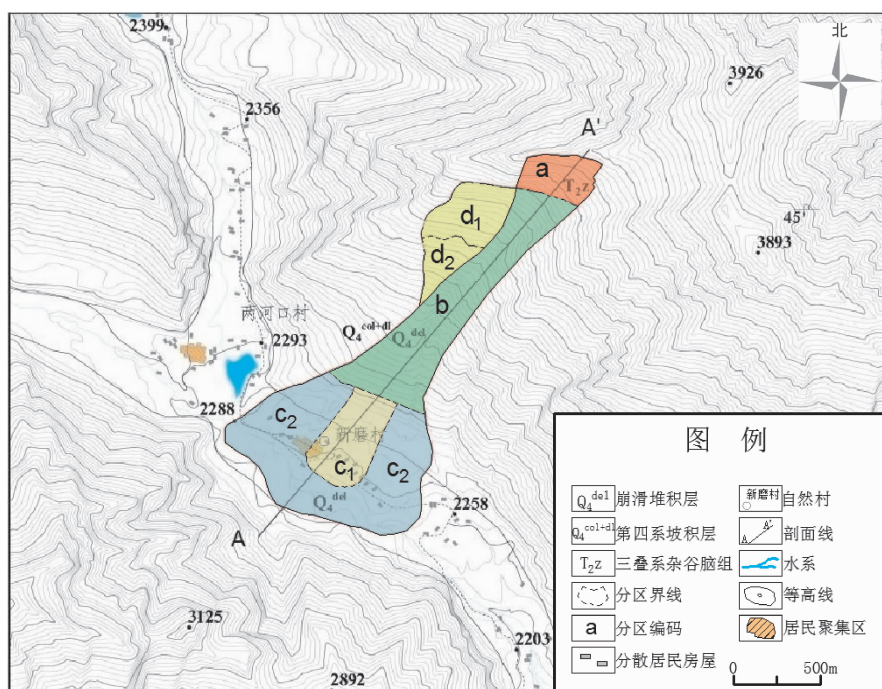


图 1 新磨村滑坡地形图

Fig. 1 Geomorphology of Xinmo landslide

2 物质点法

物质点法^[18]是目前尚在发展的一种新型粒子型数值方法,充分运用欧拉和拉格朗日算法的优势,将连续体划分为一系列离散的质点时采用拉格朗日描述,在背景网格上计算时采用欧拉描述^[19]。如图 2 所示,由某种材料组成的物质区域 Ω 可以离散为一系列物质点,同时设置包括整个计算区域的背景计算网格。令 x_{ip} , m_p 与 v_{ip} 分别表示物质点 p 的位置坐标、质量和速度,则构成了对此物体的拉格朗日描述。由于物质点的质量保持不变,则质量守恒自然满足。与大多数基于离散颗粒的计算方法不同,物质点法的动量方程计算在背景网格上进行。计算开始时,首先把物质点携带的质量、动量、位置等信息映射到背景网格上,然后采用控制方程对节点的动量进行计算和更新,

$$\dot{P}_{il} = f_{il}^{ext} + f_{il}^{int} \tag{1}$$

其中

$$f_{il}^{ext} = \sum_p m_p N_{lp} b_{ip} \tag{2}$$

$$f_{il}^{int} = - \sum N_{lp,j} \sigma_{ijp} \frac{m_p}{\rho_p} \tag{3}$$

分别为节点外力和节点内力的计算公式。采用蛙跳中心差分计算格式,下一时间步的节点动量可以计算为

$$p_{il}^{n+1/2} = p_{il}^{n-1/2} + (f_{il}^{n,ext} + f_{il}^{n,int}) \Delta t \tag{4}$$

更新后的节点动量用于计算物质点的位置和速度等物理量:

$$x_{ip}^{n+1} = x_{ip}^n + \Delta t \sum_l \frac{p_{il}^{n+1/2}}{m_l} N_{lp}^n \tag{5}$$

$$v_{ip}^{n+1/2} = v_{ip}^{n-1/2} + \Delta t \sum_l \frac{f_{il}^n}{m_l} N_{lp}^n \tag{6}$$

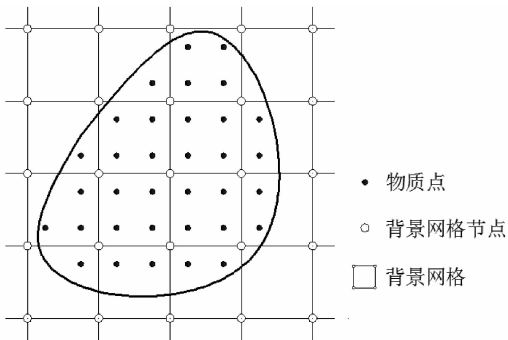


图 2 物质点法的物质离散
Fig. 2 Material discrete in Material Point Method

对更新后的运动状态,最后要调用材料的本构模型和强度准则对颗粒的应力极限计算。本构计算在物质点上执行,通过背景网格计算得到的速度场可得到应变率和旋率张量,并用于计算材料的应力场。最后,变形后的计算网格被丢弃,在下一步计算开始时建立新的背景网格,从而避免网格发生畸变。计算中对岩土体采用了 Drucker-Prager 材料模型和非关联的流动法则。

3 滑坡动力过程模拟

3.1 物质点法数值模拟

本文基于物质点法,采用二维模型对新磨村滑坡进行数值模拟分析,主要目的是了解滑坡撞击破碎、刮铲侵蚀和速度变化等动力特征。三维模型可以更好地模拟滑坡的侧向扩散和边界效应,但三维计算需要的计算时间长,将在今后的研究中开展。数值模拟选取图 3 所示剖面 A-A' 作为二维模型建模的剖面。

首先对滑坡体及滑床结构进行概化、离散化,建模参考的二维剖面所代表的坡体总体积守恒,现场调查获得的滑体碎屑粒径大小不一,为保证模拟计算精度,质点体积的设定主要参考现场岩土碎屑块体大小,取质点体积为 2 m×2 m×2 m,则滑坡滑体物质共设置 8418 个物质点,滑面及滑床表面共设置 2816 个物质点。岩土体的物理力学参数选取如表 1 所列,表中滑源体、松散滑体所列分别为滑坡启动前崩滑体以及启动后解体破碎的松散体物理力学参数,滑坡运动过程中滑体物质作松散体考虑;侵蚀体所列为滑坡运动过程中被刮铲侵蚀的坡体物质物理力学参数;岩床所列为基岩物理力学参数。

表 1 新磨村滑坡滑体及岩床物理力学参数

Tab. 1 Physico-其他 mechanical parameters of slide mass and slide bed

组成 部分	内摩擦角 /°	粘聚力 /MPa	重度 /(kN/m ³)	杨氏模量 /Mpa	泊松比
滑源体	35.0	0.2	26.0	1000.0	0.2
松散滑体	20.0	0.04	25.0	100.0	0.3
侵蚀体	25.0	0.05	24.0	100.0	0.2
岩床	48.0	2.0	26.0	2000.0	0.2

3.2 数值模拟结果分析

3.2.1 整体运动过程分析

数值计算模拟历时 100 s,计算显示滑坡-碎屑

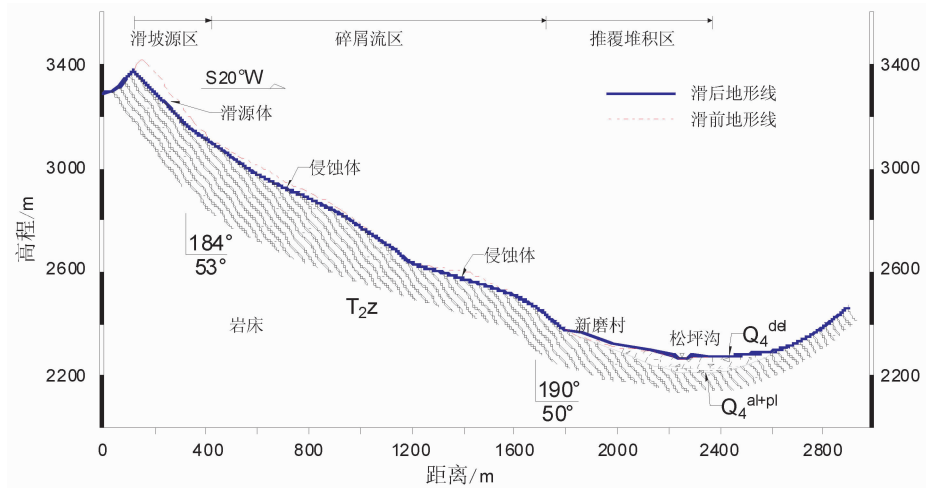


图3 新磨村滑坡剖面图(剖面 A-A')

Fig. 3 Geological profile of Xinmo landslide (section A-A')

流运动至 60 s 左右开始趋于停止,与四川地震台网所记录的滑坡持续时间^[15]相吻合,模拟结果显示滑坡-碎屑流运动最大水平距离约为 2600 m,最大竖直距离约为 1250 m,与遥感影像和现场勘查结果相吻合。图 4 给出了 0~60 s 每隔 20 s 的滑坡的运动图像,其中图 4(a)为滑坡的初始构型。云图所示为各质点水平方向的位移。

3.2.2 动力特性分析

本文在模拟中采用接触算法实现软弱层在滑坡运动过程中的作用,在滑体物质与滑床之间设置较低的摩擦系数,模拟软化板岩夹层的物理力学性能。滑坡启动后 2 s 时刻,质点的等效塑性应变值如图 5

所示,可以观察到滑源体启动后沿软弱面呈整体滑动。

滑体物质在运动过程中表现出碰撞破碎特征:滑体物质之间的相互碰撞一直存在^[20],岩土体破碎伴随着能量的消耗。岩体剪出后沿 SWW 方向滑动,撞击下部坡体迅速破碎,并携裹大量下方坡体上的第四系崩坡积块碎石土,形成碎屑流高速向下运移。在滑坡整个运动历程中,比较显著的碰撞发生在 25~30 s 时刻,碎屑流向下滑移到地势较平坦处,与坡体发生碰撞,导致坡体破碎,部分物质抛出,图 6 所示为 30 s 时刻碰撞部位质点的速度云图,滑体物质抛出现象显著,最高速度达 80 m/s。

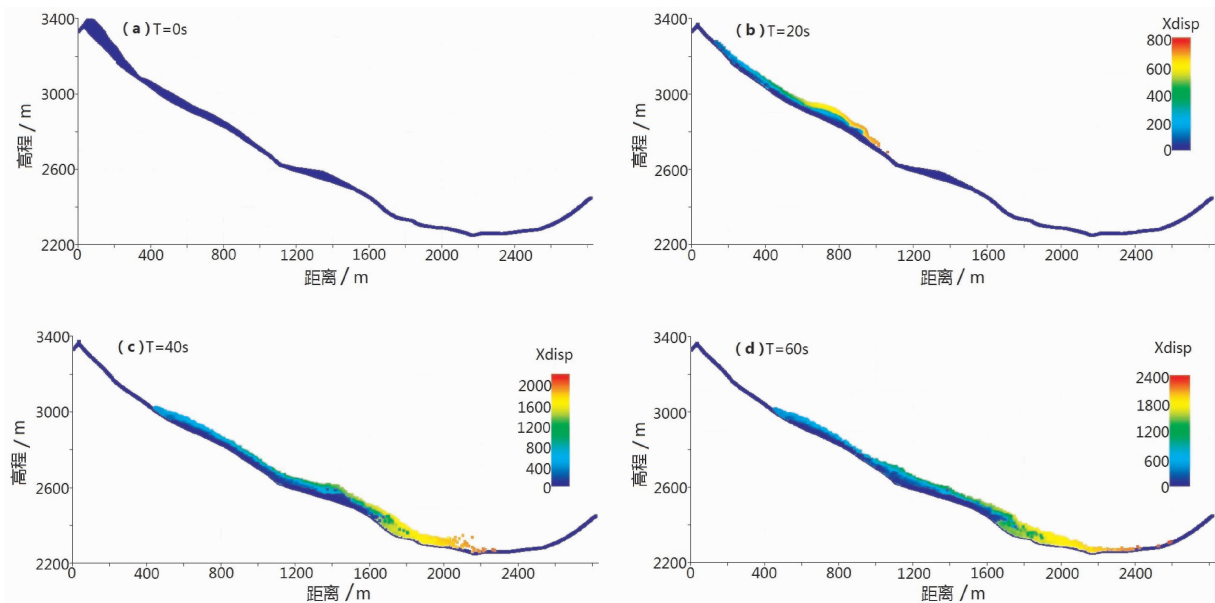


图4 基于物质点法获取的 0~60 s 滑坡运动过程

Fig. 4 Evolution of the landslide in time from initiation to static state by MPM simulation(m)

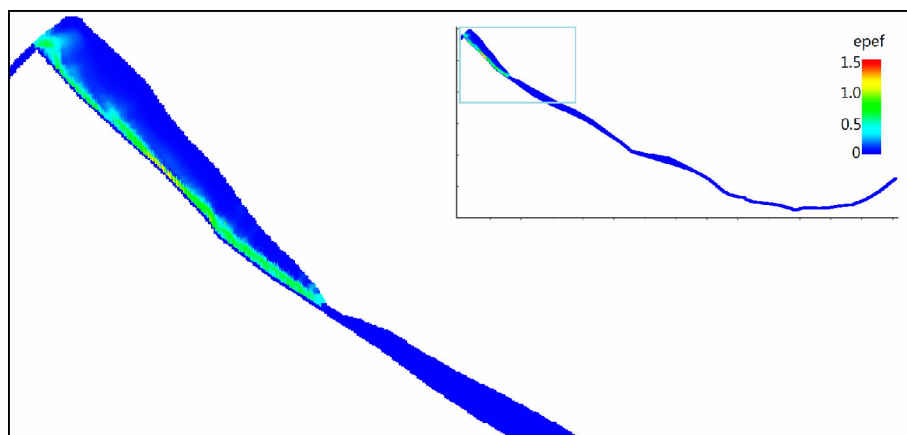


图5 计算得到的2 s时刻滑坡等效塑性应变图

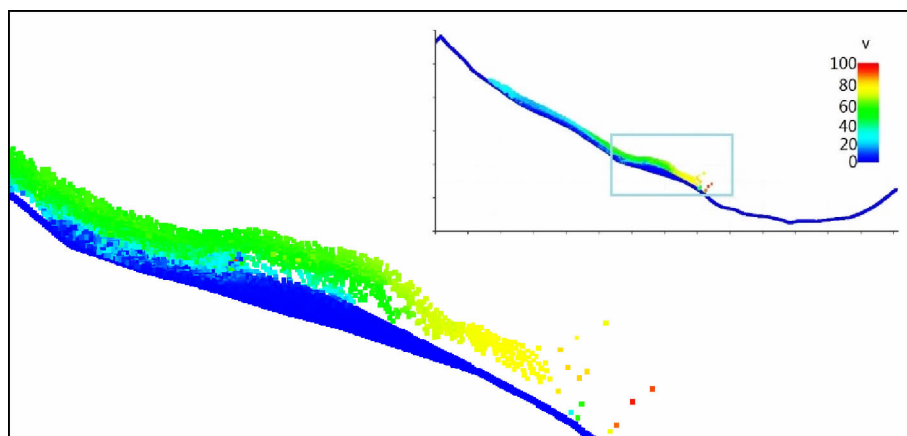
Fig.5 Computed effective plastic strain profiles of the landslide at time intervals at $t = 2.0s$ 

图6 滑坡30 s时刻的速度云图(m/s)

Fig.6 Computed velocity profile of the landslide at time intervals at $t = 30 s(m/s)$

滑坡-碎屑流在运动过程中表现出刮铲侵蚀特征:崩滑体失稳下滑后,撞击下部坡体,滑体破碎,向下运移过程中不断刮铲下部坡积块石土层,崩滑体携裹大量坡积物形成高速碎屑流,表现出刮铲侵蚀的特征,刮铲侵蚀过程中存在持续的撞击和摩擦。在质点运动过程中,某一质点受其他质点的挤压、碰撞等外力作用而产生变形(应变),当这种作用较小时,质点变形可能以弹性变形为主,当这种作用较强时,质点还可能出现塑性变形。一般认为,这种塑性变形达到一定程度后,才发生质点破坏或屈服(即质点失效)。质点等效塑性应变的发展可以反映滑坡在某一时刻的运动状况,如图7所示20 s时刻质点的等效塑性应变图示,滑坡-碎屑流对坡体的刮铲侵蚀作用十分强烈,其侵蚀表层坡体,在坡体表面形成一层贯通的应变破坏面,同时带动坡体物质向下运移,使坡体与滑床之间也形成潜在的应变破坏面。

通过对比滑坡某些部位滑前与滑动过程中的坡体形态,可以直观地观察到碎屑流的刮铲侵蚀作用,图8分别展示了高程2800 m附近0 s(a)和21 s(b)时刻的坡体形态对比图,以及高程2600 m附近0 s(c)和50 s(d)时刻的坡体形态对比图,滑来物质撞击下部坡体使其破碎,刮铲携裹坡体物质形成碎

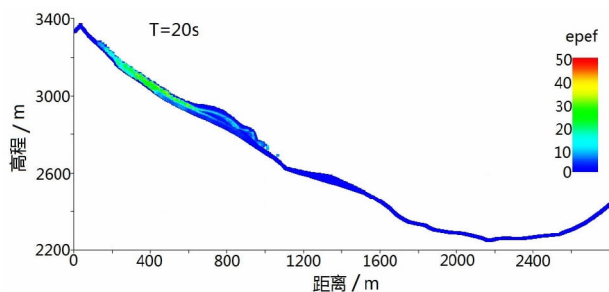


图7 20 s时刻质点等效塑性应变示意图

Fig.7 Computed equivalent plastic strain of material points at time intervals at 20 s

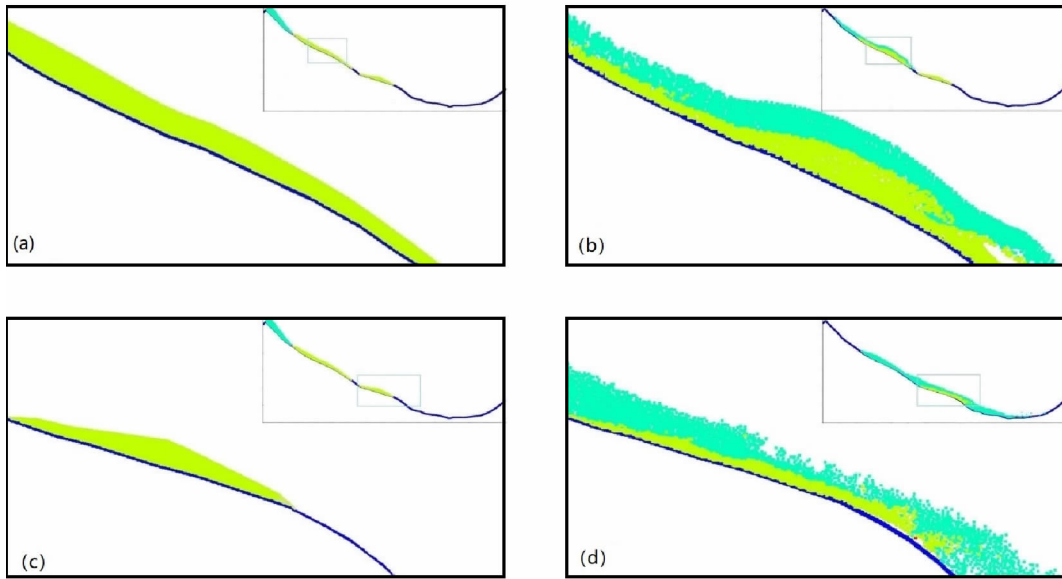


图8 滑坡运动过程中刮铲侵蚀现象图示(深绿色为滑来物质,浅绿色为原地被铲刮侵蚀物质)

Fig.8 Computed erosion effect in the sliding(Material in deep green eroded which in light green)

屑流共同下滑。

滑坡整个历程的能量变化也反映出碰撞破碎和刮铲侵蚀过程,如前文所提到的,25~30 s时刻,发生了一次显著的撞击,图9显示从25 s开始动能骤降,剧烈碰撞对能量的耗散作用显著。加上地势变缓,势能供给量减少,此后动能下降直至运动停止。滑动过程中每5 s总动能增量及势能供给增量的对比曲线(图10)则反映刮铲侵蚀耗能效应,滑坡运动的能量主要来源于高陡临空的地形条件所提供的势能,松坪沟河谷强烈下切,势能供给量巨大,然而从图10不难看出,滑坡启动之后,仅有不到三分之一的势能供给量转化为动能,说明绝大部分势能都在滑体物质撞击破碎和刮铲侵蚀过程中消耗殆尽。

从模拟后期的堆积形态来看,与现场实际状况存在差异。主要原因在于本文建立的是二维模型,

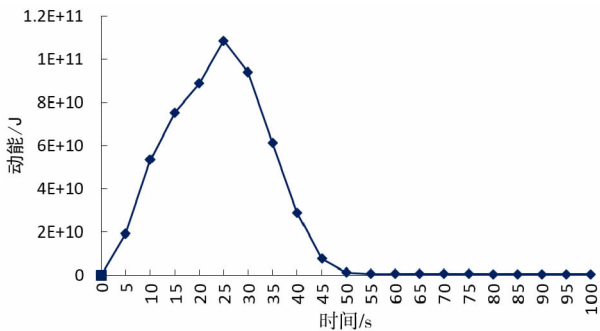


图9 模拟运动过程中质点总动能变化曲线

Fig.9 Time-history curve of total kinetic energy of material points

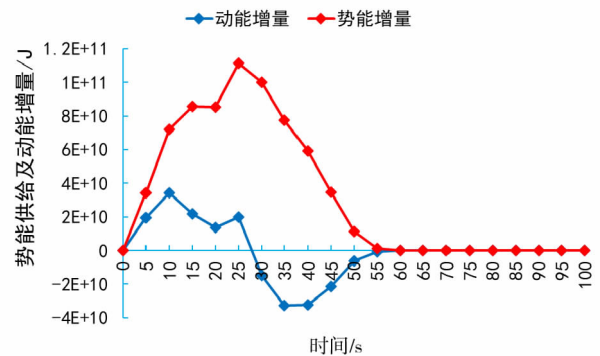


图10 模拟滑动过程中每5 s总动能增量及势能供给增量曲线

Fig.10 Time-history curves of incrementation of total kinetic energy and potential energy every 5 s

不能体现出部分地形变化处的堆积以及碎屑流的侧向抛洒堆积,这一差异可以在三维模拟中得到改善。

3.2.3 速度特征分析

对于体积达百万~千万立方米的滑坡,目前国际上较通行的计算滑坡运动到某一位置的速度和滑移距离的公式为^[21]:

$$v = \sqrt{2g(H - f \cdot L)} \quad (7)$$

式中, v :滑动速度; g :重力加速度; H :滑坡后缘顶点至滑程估算点的高差; L :滑坡后缘顶点至滑程估算点的水平距离; f :滑坡后缘顶点至滑坡运动最远点的连线的斜率,即等效摩擦系数。

表 2 新磨村滑坡滑动阶段各典型位置速度表
Tab. 2 Velocity of debris flow at some typical position

编号	位置	时刻/s	运动状态	$\Delta H/\text{m}$	$\Delta L/\text{m}$	$\alpha/(\text{^\circ})$	$v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	质点平均速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
1	剪出口	5	下滑	181.07	219.45	23	41.96	27.94
2	新磨村	31	下滑	1018.65	1741.66	23	74.86	74.24
3	松坪沟	38	下滑	1099.06	2140.30	23	61.11	59.85
4	滑程估算点	50	爬升	1082.05	2511.38	23	17.73	17.39

(注:仅选取速度最大的 20 个质点进行计算)

滑体运动到各典型位置时刻如表 2 所示,表中列出了根据公式和滑坡剖面图求得的滑体运动速度。通常位于碎屑流最前端的质点速度也最快,本文选取各个时刻速度最大的前 20 个质点求得质点平均速度,对比验证上述计算结果。

对比两种方法获得的结果,只在剪出口位置存在较大差异,滑体剪出后的运动阶段速度估计基本吻合。滑坡碎屑流的速度特征反映其到达不同位置的致灾能力,在风险评估中可发挥巨大作用。需要指出的是,上述公式并未考虑滑坡运动过程中的撞击、刮铲等作用,计算结果相较模拟结果必然偏大,所以这里只选取了速度最大的 20 个质点的平均速度来进行比较。

3.3 讨论

本文介绍了 2017 年 6 月 24 日突发于茂县新磨村的滑坡灾害,结合现场勘查和遥感影像资料所获得的滑坡区域工程地质特征、运动和堆积特征,基于物质点法选取剖面进行二维模拟,主要获得以下几点成果:

(1)物质点法模拟新磨村滑坡动力演化过程,数值计算历时 100 s,计算得到滑坡运动时间约 60 s,运动水平距离约 2600 m,竖直距离约 1250 m,与实际基本吻合。

(2)通过对比滑前和滑动过程中特定位置的坡体形态可以观察到滑坡碎屑流显著的碰撞破碎和刮铲侵蚀效应,质点等效塑性应变的发展趋势以及能量变化曲线中也得以相应的反映。高陡临空的地形条件所提供的绝大部分势能均在这两种作用下消耗殆尽,仅不到三分之一转化为动能。

(3)利用模拟结果所获得的碎屑流到达不同位置的速度,与 Scheidegger 提出的滑速计算公式所计算得到的速度基本一致,滑速变化一定程度上反映滑坡碎屑流到达不同位置的致灾能力。

通过物质点法二维模拟获得的新磨村滑坡动力特性与众多理论研究成果基本一致,体现出了滑坡

的滑动机制与动力特征,包括启动后沿软弱面整体滑动、与下部坡体碰撞破碎、刮铲侵蚀沿程坡体等现象。相较已有的数值模拟研究成果,MatDEM 和 PFC 能获得较为相似的模拟结果,后者对于运动距离和堆积范围的模拟更为准确;Massflow 模型计算结果从本质上讲与 MassMov2D 相似,这两种方法对堆积厚度的模拟更为准确。本文采用的物质点法将坡体划分为物质点,质点携带速度、应变等物理量,其优势在于便于观察各个部位滑体物质的运动特征,包括碰撞、侵蚀、堆积等,同时可以从能量变化的角度分析这一系列运动特征。但是物质点法难以在建模时设置山体内部既存节理裂隙,只能以改变岩体物理力学参数的方式考虑裂隙的影响,本文建立的二维模型亦不能体现出滑体碎屑流的侧向运动过程。对于上述提到的所有方法,离散元法把滑坡简化为一系列干燥颗粒流,连续介质法把滑坡简化为流动的流体,然而滑坡实际上是同时具备固体和流体的特性的,这一点都还有待改进。

4 结语与展望

高位滑坡突发性强,运动距离远,防治难度大。本文采用物质点法建立二维模型,重现了新磨村滑坡的运动过程,但是二维模型计算存在难以避免的误差,且未充分考虑现场实际自然条件。今后可采用物质点法建立三维模型,与实际契合度更高,同时考虑复杂自然因素的作用,耦合水或地震力以及结构物的相互作用。由于类似的高位远程滑坡监测和治理难度都较高,采用物质点法模拟计算,一方面可以对可能发生的灾害致灾程度和范围进行预测,及时采取防治措施或转移群众止损,一方面可以对已发生灾害进行动力过程重现,积累相关经验和规律,这些信息对于类似滑坡灾害的风险评估以及防治具有较大参考价值。

参考文献 (References)

- [1] 温铭生, 陈红旗, 张鸣之, 等. 四川茂县“6·24”特大滑坡特征与成因机制分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2017(03): 1-7. [WEN Mingsheng, CHEN Hongqi, ZHANG Mingzhi, et al. Characteristics and formation mechanism analysis of the “6·24” catastrophic landslide of the June 24 of 2017, at Maoxian, Sichuan [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2017 (03): 1-7]
- [2] FAN X, XU Q, SCARINGI G, et al. Failure mechanism and kinematics of the deadly June 24th 2017 Xinmo landslide, Maoxian, Sichuan, China[J]. Landslides, 2017, **14** (6): 2129-2146
- [3] YIN Y, WANG W, ZHANG N, et al. The June 2017 Maoxian landslide: Geological disaster in an earthquake area after the Wenchuan Ms 8.0 earthquake[J]. Science China Technological Sciences, 2017, **60** (11): 1762-1766
- [4] FAN J R, ZHANG X Y, SU F H. Geometrical feature analysis and disaster assessment of the Xinmo landslide based on remote sensing data[J]. Journal of Mountain Science, 2017, **14** (9): 1677-1688
- [5] FAN X, XU Q, SCARINGI G. Brief communication: Post-seismic landslides, the tough lesson of a catastrophe[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2018, **18** (1): 397-403
- [6] OUYANG C J, ZHAO W, HE S M, et al. Numerical modeling and dynamic analysis of the 2017 Xinmo landslide in Maoxian County, China[J]. Journal of Mountain Science, 2017, **14** (9): 1701-1711
- [7] 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
- [8] TANG C L, HU J C, LIN M L, et al. The Tsaoiling landslide triggered by the Chi-Chi earthquake, Taiwan: insights from a discrete element simulation[J]. Engineering Geology, 2009, **106** (1): 1-19
- [9] BEYABANAKI S A R, BAGTZOGLOU A C, LIU L. Applying disk-based discontinuous deformation analysis (DDA) to simulate Donghekou landslide triggered by the Wenchuan earthquake[J]. Geomechanics and Geoengineering, 2016, **11** (3): 177-188
- [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): 179-196
- [11] ANDERSEN S, ANDERSEN L. Modelling of landslides with the material-point method[J]. Computational Geosciences, 2010, **14** (1): 137-147
- [12] LI X, WU Y, HE S, et al. Application of the material point method to simulate the post-failure runout processes of the Wangjiayan landslide[J]. Engineering Geology, 2016, **212**: 1-9
- [13] 刘凤山, 吴中海, 张岳桥, 等. 青藏高原东缘新构造与活动构造研究新进展及展望[J]. 地质通报, 2014(04): 403-418. [LIU Fengshan, WU Zhonghai, ZHANG Yueqiao, et al. New progress and prospects of neotectonics and active tectonics synthetical study on eastern edge Qinghai-Xizang plateau [J]. Geological Bulletin of China, 2014(04): 403-418]
- [14] QIU J, WANG X, HE S, et al. The catastrophic landslide in Maoxian County, Sichuan, SW China, on June 24, 2017 [J]. Natural Hazards, 2017, **89** (3): 1485-1493
- [15] SU L, HU K, ZHANG W, et al. Characteristics and triggering mechanism of Xinmo landslide on 24 June 2017 in Sichuan [J]. China. Journal of Mountain Science, 2017, **14** (9): 2
- [16] 许强, 李为乐, 董秀军. 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(11): 2612-2628. [XU Qiang, LI Weile, DONG Xiujun. The Xinmocun landslide on June 24, 2017 in Maoxian, Sichuan: characteristics and failure mechanism [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017(11): 2612-2628]
- [17] 祁生文, 许强, 刘春玲, 等. 汶川地震极重灾区地质背景及次生斜坡灾害空间发育规律[J]. 工程地质学报, 2009, (01): 39-49. [QI Shengwen, XU Qiang, LIU Chunling, et al. Slope instabilities in the severest disaster areas of 5.12 Wenchuan earthquake [J]. Journal of Engineering Geology, 2009, (01): 39-49]
- [18] 廉艳平, 张帆, 刘岩, 等. 物质点法的理论 and 应用[J]. 力学进展, 2013(02): 237-264. [LIAN Yanping, ZHANG Fan, LIU Yan, et al. Material point method and its applications [J]. Advances in Mechanics, 2013(02): 237-264]
- [19] BARDENHAGEN S, BRACKBILL J, SULSKY D. The material-point method for granular materials [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2000, **187** (3-4): 529-541
- [20] 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(04): 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 (04): 445-454]
- [21] SCHEIDEGGER A E. On the prediction of the reach and velocity of catastrophic landslides [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1973, **5** (4): 231-236

MPM-based Numerical Analysis of the Kinematic Characteristics of Xinmo landslide in Maoxian County, Sichuan, China

XIE Yanfang^{1,2}, LI Xinpo^{2,3 *}, ZHAO Shuxi^{1,2}, LIU Yang^{1,2}, XU Jun⁴

(1. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101499, China;

2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Science, Chengdu 610041, China;

3. Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Process, Chengdu 610041, China;

4. China Railway ErYuan Engineering Group CO. LTP, Chengdu 610031, China)

Abstract: On June 24, 2017, a tremendous debris flow disaster occurred in Xinmo village, Diexi town, Maoxian county, Sichuan province, China. Approximately $2.87 \times 10^6 \text{ m}^3$ rock mass collapsed and the debris buried Xinmo Village, causing a large number of casualties and damages to houses. On the issue of the characteristics and formation mechanism of the landslide, relevant scholars have obtained certain research results in their researches. However, scientific comprehension is relatively lacking about dynamic processes and characteristics of this landslide. This paper introduced two-dimensional material point method (MPM), which combines the advantages of Lagrangian and Eulerian algorithm, and is applicable to simulate mechanics with large deformation, to clarify this phenomenon. In the MPM simulation, the kinematic processes of the landslide were revealed through the analysis of time evolution of motion, velocity profile and contour of effective plastic strain. The overall duration time of motion and travelling distance were consistent with reality. Moreover, the results of simulation also suggested that rock mass moved as a whole at startup stage, and then translated into debris flow soon as the result of intense collision. In addition, the results can further reveal the process of debris flow collision and scraper erosion by comparing the slope morphology, the equivalent plastic strain development trend and the energy time history curve on the same position at different times. It showed that two-thirds of gravitational potential energy exhausted in the above processes, which revealed the energy dissipation capacity of collision and erosion. According to crushing collapse dilatancy and entrainment in travelling, the final volume of debris flow was far more than the initial rock mass. Furthermore, slide velocity obtained from numerical computation was basically consistent with the results calculated by the method of Scheidegger. It can be seen that the simulation results provide comprehensive information on the initiation and the dynamic evolution of the landslide.

Key words: debris flow; kinematic characteristics; material point method; Xinmo landslide