

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2018.03.08

云南黄坪库区滑坡运动及其失稳模式的离散元模拟

蒋 权^{1,2}, 陈希良¹, 肖江剑¹, 邱向东³, 李攀峰³

(1. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所, 浙江 宁波 315201; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 四川 成都 610072)

摘要: 在蓄水库区, 伴随着水库蓄水及可能发生的暴雨天气, 往往容易触发库岸坡岩土体失稳, 这不仅影响工程建设的实施, 还对拦河大坝和周围人民群众的生命财产安全造成严重威胁。本文以溪洛渡水电站黄坪滑坡为例, 在野外现场调查的基础上, 分析了其滑动的成因和机制, 并利用离散元法对其三维滑动过程进行模拟, 深入分析了滑坡失稳后的运动状态及规律。结果表明: 滑坡体运动过程中, 其表面会发生较大变化, 且滑坡体会呈现出中间失稳体积较大, 两侧失稳体积较小的特征; 滑坡内部颗粒分布会发生改变, 存在大颗粒运动至滑坡体表面, 小颗粒运动到滑坡体底面的现象; 滑坡体颗粒的速度和压力在不同位置也会发生改变, 存在不同颗粒间速度相差很大, 滑坡体内压力分布不均匀的情况; 滑坡体颗粒的运动速度、运动距离表现出从后缘到前缘, 同一横剖面中表层至底层由大到小分布的规律。

关键词: 库区; 滑坡失稳; 离散元

中图分类号: TU473.1

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2018)03-0053-07

Discrete element numerical simulation and analysis of Yunnan Huangping Reservoir Areas landslide and its failure mode

JIANG Quan^{1,2}, CHEN Xiliang¹, XIAO Jiangjian¹, QIU Xiangdong³, LI Panfeng³

(1. Ningbo Institute of Material Technology and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Ningbo, Zhejiang 315201, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Chengdu Engineering Corporation Limited, Power Construction Corporation of China, Chengdu, Sichuan 610072, China)

Abstract: In reservoir areas, reservoir storage and potential heavy rain are often easy to trigger the base rock and soil slope instability, which not only affects the implementation of the construction, but also poses a serious threat to the dam and the surrounding people's life and property safety. Taking Xiluodu Hydropower Station Huang Ping Landslide as an example, on the basis of field investigation, this paper analyzes the causes and mechanism of the slide, and the 3D sliding process is simulated by discrete element method, the movement state and law of the landslide are analyzed deeply. The results show that the landslide surface will be changed greatly in the movement process, and the volum of unstable mass of the landslide in the middle is relatively larger while the volume on both sides is smaller; The particle distribution in the interior of the landslide will change. There is a phenomenon that large particles move to the surface of the landslide and the small particles move to the bottom of the landslide; the velocity and pressure of particles in landslide can be changed in different position. The velocity difference between some particles is large, and the pressure distribution in the landslide is uneven; from the trailing edge to the leading edge and from the surface to the

收稿日期: 2017-09-26; 修订日期: 2017-10-10

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)(2015AA016403)

第一作者: 蒋权(1989-), 男, 广西桂林人, 博士研究生, 主要从事机械工程及岩土工程方面的研究。E-mail: jiangquan@nimte.ac.cn

通讯作者: 陈希良(1965-), 男, 湖南岳阳人, 博士, 研究员, 主要从事计算力学、高频振动及计算机辅助工程方面的研究。E-mail: chenxl@nimte.ac.cn

bottom in the same cross section, the movement velocity and the distance of the particles of the landslide are distributed from large to small.

Keywords: reservoir area; landslide instability; discrete element method

0 引言

库区滑坡失稳破坏后,滑坡体入水激起巨浪而产生滑坡涌浪,若激起的涌浪足够强还可能会造成坝顶过水甚至冲毁水工建构筑物,堵塞河道、威胁船只航行及沿岸居民生命财产安全^[1]。特别是正在蓄水或蓄水不久的库区更容易发生此类地质灾害。一方面,水库的修建会不可避免地改变库区岸坡原有的自然地质条件,如库岸岩土边坡的物理性质,进而影响边坡的稳定。另一方面,库水会对库岸已存在的不稳定地质体和滑坡体、崩塌体产生浸润和托浮作用,其变化往往对库岸坡体的稳定性进一步造成影响,在受到暴雨、库水位突然变化等外界影响因素的作用下,一些处于不太稳定状态的库岸滑坡体就可能失稳^[2]。

极端气候异常,工程扰动增强,地质条件复杂等,是地质灾害防治工作需要面对的严峻挑战^[3]。针对滑坡体失稳后滑坡体运动的问题,相关研究在许多国家的不同学科和领域都在开展。2002 年 1 月成立的国际滑坡协会及每 3 年举办一次的世界滑坡论坛更是大力推进了对滑坡运动的研究^[4-5]。在分析滑坡运动时,对不同滑坡体物理形态有不一样的方法。就小块且松散堆积的滑坡体而言,许多学者用离散单元法、非连续变形法、颗粒流等非连续介质数值方法对坡体滑动过程进行了模拟分析,并取得不少成果^[6-8]。但目前的一些工作通常有很多简化,如将滑坡体简化成简单的块体,或者只研究二维情况下的离散坡体滑动情况,这难以真实刻画三维复杂的滑坡体力学特性,距实际工程应用较远。

本文以溪洛渡水电站黄坪滑坡为例,结合现场地质调查,对滑坡特征进行了详细的介绍,并分析了滑动成因和机制;在不考虑空气与江水作用的情况下,利用离散元对三维离散滑坡体的滑坡失稳过程进行了模拟,并详细的分析了其各阶段的运动特征。

1 滑坡概况及成因机制分析

1.1 滑坡概况

2013 年 7 月 27 日下午,云南省昭通市永善县黄华镇黄坪村大石包附近发生滑坡。滑坡位于金沙江右岸永善县黄华镇老黄坪集镇上游约 1 km 大石包附近,即黄码公路桩号 K42+000~K42+200 m 段。滑塌范围:顺江方向长约 200 m,江水位高程 554 m 以上约 110 m,后缘至黄码公路附近高程约 660 m,部分区域高于路面 50 m 范围,滑体厚度 3~5 m,滑坡体积数十万立方米。滑坡区位于预测滑塌区范围内的上游部分,现场及断面示意分别见图 1、图 2。



图 1 黄坪滑坡全貌

Fig. 1 The panorama of the Huangping landslide

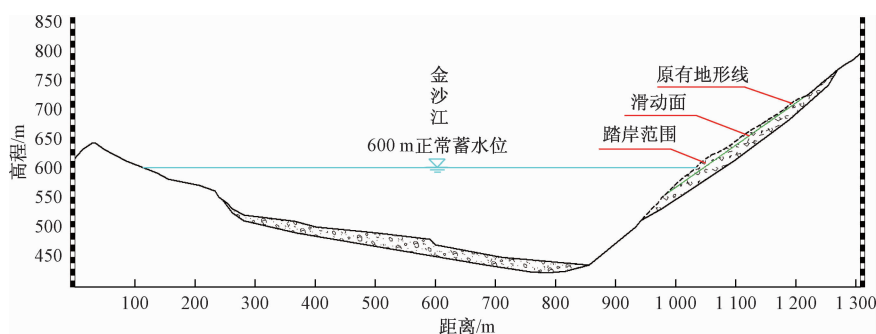


图 2 黄坪滑坡剖面示意图

Fig. 2 Cross section of the Huangping Landslide

该岸坡地形较陡,天然坡度在 $34^{\circ} \sim 38^{\circ}$ 。堆积体下部地层岩性为奥陶系上统与志留系 $O_3 + S(S)$ 灰色、深灰色、灰黄色砂岩、粉砂岩、泥岩、页岩、砂质页岩夹泥灰岩、泥质灰岩,岩性较软弱,产状 $N30^{\circ} \sim 45^{\circ}E/SE \angle 17^{\circ} \sim 20^{\circ}$;上部陡坡地形为阳新灰岩;堆积体为崩坡积与冲洪积形成的块碎石土层,块碎石粒径较小,一般为 $5 \sim 20$ cm,表部含量较高约 $40\% \sim 50\%$,下部含量较低约 $25\% \sim 35\%$,细粒部分主要由细粉砂与黏粒组成,在堆积体表层可见钙质胶结的硬壳。

1.2 成因机制分析

据现场调查和已有的资料分析,黄坪滑坡形成的原因主要有以下两点:(1)坡体物质组成、结构、坡度等自然条件造成该处岸坡天然状态下稳定性较差。岸坡下部地层物质组成决定了其较软弱的岩性;该部位岸坡地形较陡,中间被一条较小的无水干沟切割成上、下游两部分,岸坡岩体结构完整性差;岸坡由于受长期的水流冲刷作用,为表层破碎岩体各类重力地质现象的产生提供了有利条件。(2)水库蓄水是黄坪滑坡的重要诱发因素,加速了该处库岸失稳。滑坡发生前水库已经开始蓄水,岸坡前缘坡脚处于蓄水位以下,由于水的软化弱化作用,前缘坡脚岩土体的强度被进一步降低,同时也导致其有效应力的减小。

根据滑坡概况及成因分析其滑动机制为:(1)库水位的快速上升,导致了中下部坡体的软化,抗剪强度降低;水位线抬升产生的浮托力还减小了岸坡前缘岩土体的有效应力导致抗滑能力降低。(2)在上部坡体的重压下,水下坡体发生突发式破坏,从而导致库水位上下坡体快速失稳,坠入库内。

2 离散元模拟及模型参数

2.1 离散元数值模拟方法

离散元法的基本原理是基于离散化的思想,对研究对象进行单元划分,离散化的各个单元之间相互独立。根据单元之间的相互作用和牛顿运动定律,采用动态松弛法和静态松弛法等迭代方法,对各单元进行循环迭代计算,得出每一个时间步长内各单元的受力及位移。其控制方程主要包括平动与转动两方面,具体形式如下:

$$m_i \frac{d\mathbf{u}_i}{dt} = \sum_{j=1}^{n_i^c} \mathbf{F}_{c,ij} + \mathbf{F}_{f,i} + \mathbf{F}_{g,i} \quad (1)$$

$$I_i \frac{d\mathbf{w}_i}{dt} = \sum_{j=1}^{n_i^c} \mathbf{M}_{c,ij} \quad (2)$$

式中:黑粗体代表矢量, m_i 和 I_i 分别表示 i 颗粒

的质量与惯性矩; t 表示时间; $\mathbf{u}_i$ 和 $\mathbf{w}_i$ 表示 i 颗粒的平动速度和转动速度; n_i^c 是与 i 颗粒接触的颗粒总数; $\mathbf{F}_{c,ij}$ 和 $\mathbf{M}_{c,ij}$ 是 j 颗粒或边界作用在 i 颗粒上的接触力及接触力矩; $\mathbf{F}_{f,i}$ 是流体作用于 i 颗粒上的力(如浮力等), $\mathbf{F}_{g,i}$ 是 i 颗粒所受重力。

2.2 数值模型

基于黄坪滑坡的实际数据,以黄坪滑坡为中心选取了 $1280 \text{ m} \times 200 \text{ m} \times 416 \text{ m}$ 模拟计算区域,即模型底部边界长 1280 m ,两侧边界高为 416 m ,沿江长 200 m 。基于滑坡剖面建立了黄坪滑坡所在区域的离散元计算模型,模型分为滑坡体、基岩滑床、滑坡边界三部分。为监测滑坡体随时间的变化,在滑坡体中心取截面 A,并在截面 A 上设置 11 个监测点:后缘和前缘各分布 1 个点,滑坡后部、中部以及前部按照不同深度在表层、中层、底层分别设置了监测点。由于模型较大,取右边关键局部示意图见图 3。

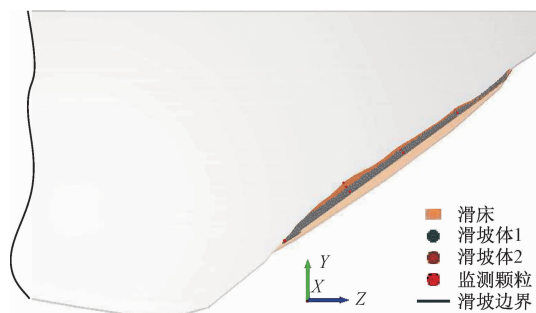


图3 黄坪滑坡离散元计算模型

Fig.3 Discrete element model of the Huangping Landslide

在离散元模拟中,滑体采用离散颗粒,滑床及滑坡边界采用同滑体一样参数的不考虑变形的刚体。对于土质滑坡和破碎岩石滑坡来说,要想得到和实际较为一致的模拟结果,可将滑坡运动看成颗粒流运动,也可将滑坡体等效为拟流体来进行数值模拟^[9]。本文用正态分布的不同大小圆球颗粒表征破碎岩土,并组成仿真中所需的滑坡体,滑坡体体积约为 $3.0 \times 10^5 \text{ m}^3$,组成滑坡体的颗粒总数近 4.0×10^5 颗。

离散元法的接触模型有多种,接触力的计算方法也各不相同,但是整体计算的原理都是相同的。本文中,颗粒间的接触力采用 Herz-Mindlin 无滑移接触模型求解^[10]。其中,模型中法向接触力的求解基于 Hertzian 接触理论,而切向接触力的求解基于 Mindlin-Deresiewicz 接触理论^[11]。

2.3 计算参数

计算中用到的滑坡体与滑床或滑坡边界的材料属性、相关接触属性及运行参数见表 1。

表 1 黄坪滑坡涌浪计算参数

Table 1 Calculation parameters of the Huangping Landslide

项目名	参数	值
滑坡体颗粒属性	泊松比	0.29 ^[12]
	弹性模量/MPa	5×10^4
	内摩擦角/(°)	21
	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	2 100
	体积/ m^3	3×10^5
滑床(滑坡边界)属性	泊松比	0.29
	弹性模量/MPa	5×10^4
	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	2 100
滑坡体-滑坡体	碰撞恢复系数	0.25
	滑动摩擦系数	0.38
	滚动摩擦系数	0.3
滑坡体-滑床(滑坡边界)	碰撞恢复系数	0.25
	滑动摩擦系数	0.38
	滚动摩擦系数	0.3
运行参数	时间步长/s	2×10^{-4}
	运行时间/s	70

3 滑坡运动模拟结果与分析

3.1 滑坡运动过程的整体特征

从滑坡体外部出发:首先,取滑坡体失稳后运动过程中典型时刻的滑坡体表面形态见图 4,可知滑坡体表面在运动过程中由凸形态逐渐转为凹形态。



图 4 不同时刻黄坪滑坡运动形态

Fig. 4 Movement states of landslide at different time

然后,从滑坡体上方俯视图向下看可见滑坡失稳后的运动过程中,滑坡体后缘边界线趋于凹形态(图 5)。

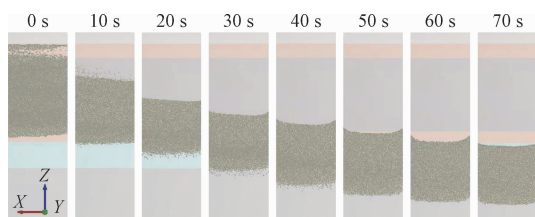


图 5 滑坡后缘边界运动

Fig. 5 Trailing edge movement of landslide

因此滑坡运动过程中,其表面形态会发生转变。而滑坡体后缘边界线趋于凹形态是由于失稳滑坡体两侧受到来自周围相邻未失稳滑体的支撑作用,滑坡体呈现出中间失稳体积较大,两侧失稳体积较小的特征。这与一般滑坡现场所表现出的形式一致。

在滑坡体失稳后的滑动过程中,整个滑坡体的平

均速度、最大速度及最小速度如图 6 所示。

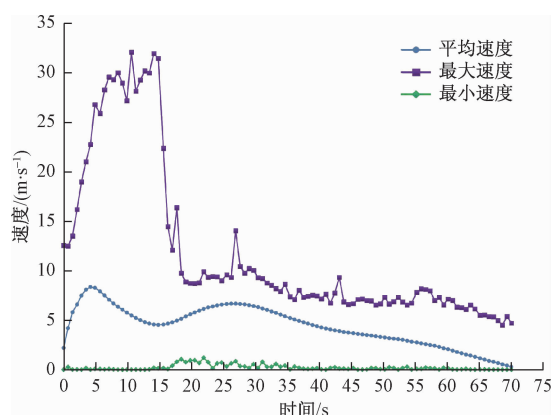


图 6 滑坡运动速度

Fig. 6 The velocity of landslide movement

从图 6 中平均速度曲线的趋势可知滑坡体运动的大致情况:0~5 s 为滑坡启动后滑坡体整体运动的加速阶段,其中加速较快的是后缘及后部受压力与阻力较小的滑坡体,这可从压力分布图 7 中看出;5~15 s,在中部前部凸形滑坡体颗粒阻力的作用下,滑坡体整体开始减速;15~25 s,在后缘及后部滑体冲击与不断堆积作用下,滑坡体整体再次缓慢加速,并开始滑向坡底;25 s 以后,滑坡体在前方坡底堆积的滑坡体颗粒阻力作用下开始缓慢减速运动,直到 70 s,滑坡体趋于稳定并停止运动。

从图 6 中最大速度曲线可以看到:在启动时刻,有局部滑坡体颗粒达到 12 m/s 的速度;在高速滑动阶段,有局部滑坡体颗粒达到 32 m/s 的最大速度;高速滑动阶段过后,滑坡体以似整体颗粒流形式流动,滑坡体颗粒的最大速度在缓慢减小。

从图 6 中最小速度曲线可看到,在滑坡启动、高速滑动及自稳堆积阶段,存在速度较小甚至没有运动的滑坡体颗粒;而在整体流动阶段,滑坡体颗粒几乎都在运动。

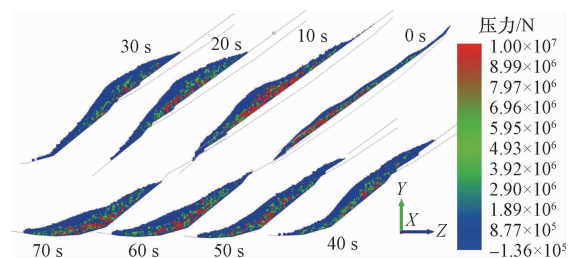


图 7 A 截面上的压力分布

Fig. 7 Compressive force distribution on cross section A

3.2 滑坡体内部运动特征

为深入的分析滑坡运动特征,取滑坡体内截面 A 的 8 个典型运动时刻来对滑坡体内部颗粒分布、速度分布及压力分布做出分析。

3.2.1 滑坡体内颗粒分布特征

如图8不同时刻截面A上不同大小滑坡体颗粒分布情况可知:在滑坡运动启动前或初始阶段,滑坡体1大颗粒(灰色)分布在滑坡体底面,滑坡体2小颗粒(橙色)分布在滑坡体表面。随着滑坡运动的进行,颗粒之间碰撞与振动加剧,部分小颗粒慢慢运动到大颗粒滑坡体1内部及底部,大颗粒运动至滑坡体表面,而小颗粒会运动到滑坡体下层。这说明,在滑坡体运动过程中产生了“巴西果效应”,小颗粒通过大颗粒间的缝隙逐渐往下层渗流并填充到大颗粒下部空穴中,而大的滑坡体颗粒则移动到上部并在一定程度上被阻止向下运动^[13]。

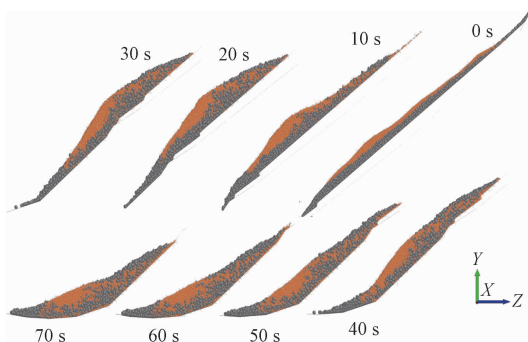


图8 A截面上颗粒分布

Fig.8 Particles distribution on cross section A

3.2.2 滑坡体速度分布特征

与将滑坡体看成刚体不同的是,离散滑坡体颗粒的速度在不同位置是不同的,且速度的变化是分阶段进行的。典型时刻截面A上滑坡体颗粒的速度分布见图9。

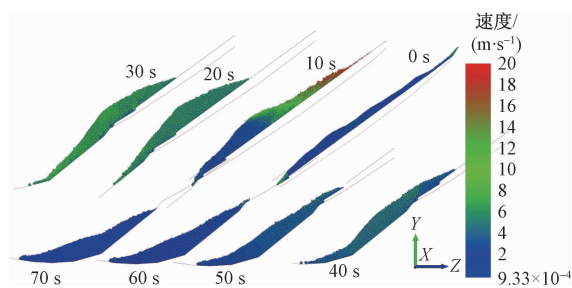


图9 A截面上的速度分布

Fig.9 Velocity distribution on cross section A

从图9中可看到滑坡运动启动-高速滑动-碰撞-滑至坡底-堆积自稳的典型阶段:0~20 s,滑坡运动启动后,以中后部为主的高速滑动区滑坡向中前部运动,并发生碰撞堆积;20~40 s,滑坡体在前面阶段的冲击与堆积重力作用下,开始以似整体颗粒流的形式滑向坡底;40~60 s,进一步滑向坡底的滑坡体颗粒发生碰撞堆积,并进行自稳过程;在70 s时完成自稳过程,滑坡

体整体停止运动。值得注意的是,在20 s之后,滑坡体似整体颗粒流的形式滑向坡底,其整体性逐渐变好,速度分布也较为均匀。

3.2.3 滑坡体内压力分布特征

滑坡体内压力的分布是随着运动的变化而变化的。从图7 A截面上不同时刻压力分布图中可看到:0~20 s,滑坡运动启动时中后部滑坡体所受压力较小,在初始动能和势能作用下开始向中前部运动,并发生碰撞堆积,滑坡体内颗粒所受压力累积增大;20~40 s,中前部滑坡体在中后部滑坡体的冲击与挤压作用下滑向坡底,此时滑坡体内部压力开始释放减小;40~60 s,进一步滑向坡底的滑坡体颗粒发生碰撞堆积,随着颗粒逐步的聚集,滑坡体内颗粒所受压力再一次累积增大;到70 s时,滑坡体内部压力分布不再变化。另外,与连续性刚体不同的是,由于滑坡体颗粒具有离散性与不均匀性,滑坡体内压力的分布是不均匀的,且内部颗粒所受压力也不是在最厚重的地方就一定最大。

3.3 滑坡内部监测颗粒运动的速度与距离

为进一步分析滑坡体内部颗粒运动特征,对截面A上的11个典型监测点颗粒的运动进行了研究。值得注意的是,虽然在滑坡运动过程中监测颗粒的相对位置会发生改变,但还是能反映出一些滑坡体的运动特点。不同时刻典型监测颗粒的运动速度及运动距离分别见图10和图11。

从图10(a)、(b)、(c)、(d)中的曲线1~11可知,在0~5 s滑坡运动启动后的加速阶段,典型监测颗粒的加速度从后缘、后部、中部、前部到前缘,表层、中层至底层大致由大到小分布。这可从图7 A截面上的压力分布得到解释,初始阶段滑坡体后缘表层所受压力及阻力相对较小,其加速度也较大。因此滑坡体内同一横剖面不同深度的滑坡体颗粒,其运动速度大致表现出离表层越近速度越大的特点;在5 s之后,滑坡体内同一横剖面不同深度的滑坡体颗粒速度关系发生了变化,这是因为颗粒位置及受力情况都发生了改变,这也可从图8 A截面上的颗粒分布图和图7 A截面上的压力分布图得到解释。

从图10(a)中曲线1看到前缘颗粒速度在25~38 s的时候有较大不连续的波动,这说明它正经过不同曲率的滑坡边界运动至坡底。同样地,由图11曲线2~10可知:前部、中部滑坡体颗粒大约分别在25 s、30 s经过不同曲率的边界开始向坡底运动;后部、后缘滑坡体颗粒则在35 s、40 s经过滑床底部拐点运动至滑坡边界上。

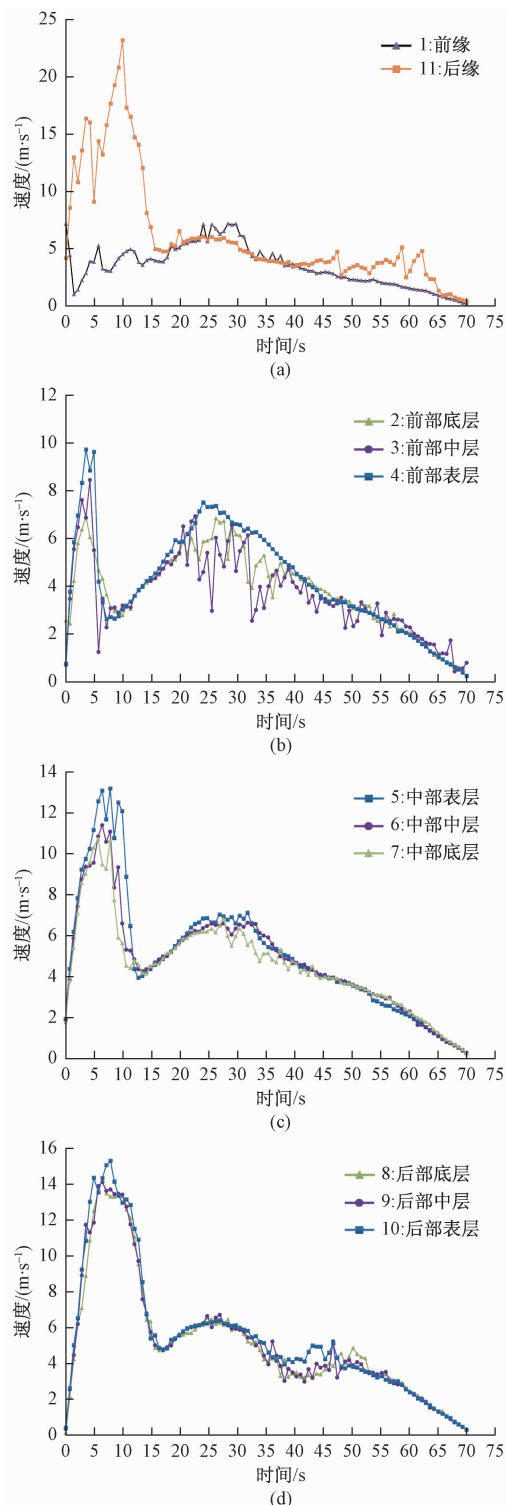


图 10 滑坡监测点速度

Fig. 10 Velocity of monitor particles of landslide

在图 10(b) 中,原来位于前部表层的颗粒 4 的速度在 55 s 后处在了原来位于前部中层的颗粒 3 下面;图 10(c) 中,原来位于中部表层的颗粒 5 的速度在 55 s 后处在了原来位于中部底层的颗粒 7 下面。这说明

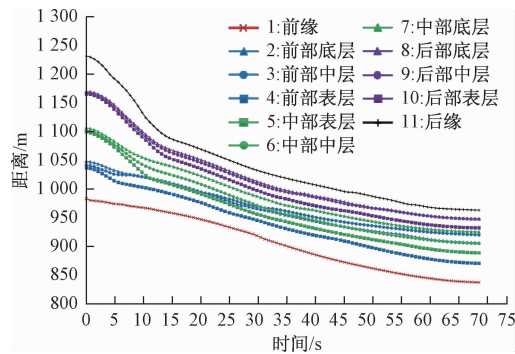


图 11 滑坡监测点中心运动距离

Fig. 11 Distance of monitor particles of landslide

滑坡体内部颗粒位置的确发生了很大的变化,滑坡体运动无法以完全的整体式颗粒流运动,这从图 8 滑坡体截面上颗粒的分布变化也可以说明。

整个滑坡运动过程中监测颗粒 1 ~ 11 的运动距离分别为:150.643 m、146.576 m、125.662 m、171.64 m、217.484 m、203.217 m、186.862 m、229.388 m、227.097 m、240.755 m、277.274 m。其中,后缘监测颗粒 11 的运动距离最大,即 277.274 m。从图 11 中的曲线 1 ~ 11 可知,在 0 ~ 5 s 滑坡启动后的加速阶段,监测颗粒的运动距离从滑坡后缘至前缘由大到小分布,从滑坡体同一横剖面的表层至底层由大到小分布,即随着滑坡体深度的增加,滑动距离逐渐减小;5 ~ 15 s,依旧符合运动距离从后缘到前缘,表层至底层由大到小分布的规律。但滑坡体内部颗粒位置已经发生了很大变化,从图中曲线 2、3 就可以看到,前部中层监测颗粒 3 相对于前部底层监测颗粒 2 运动到了滑坡体内更深的位置。

4 结论

本文总结了黄坪滑坡的基本特征,利用离散元方法对滑坡过程进行了模拟。通过由表及里,从整体到局部,深入细致的分析滑坡启动-高速滑动-碰撞-滑至坡底-堆积自稳运动过程中的主要特点后,得到了如下结论:

(1) 滑坡体表面在运动过程中会发生较大变化,且滑坡体会呈现出中间失稳体积较大,两侧失稳体积较小的特征。

(2) 在滑坡启动、高速滑动及自稳堆积阶段,滑坡体内存在速度较小甚至没有运动的滑坡体颗粒,当滑坡体处于整体流动阶段后,颗粒几乎都在运动。

(3) 与将滑坡体看成刚体不同的是,离散滑坡体运动中:滑坡内部颗粒分布会发生改变,存在大颗粒运动至滑坡体表面,小颗粒运动到滑坡体底面的现象;颗粒的速度和压力在不同位置也会发生改变,且存在不同颗

粒间速度相差很大,滑坡体内压力分布不均匀的情况。

(4) 滑坡体颗粒的运动速度、运动距离表现出从后缘到前缘,同一横剖面中表层至底层由大到小分布的规律。

参考文献:

- [1] 赵兰浩,侯世超,毛佳. 库区滑坡涌浪数值模拟方法研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2016, 36(2): 79-86.
ZHAO Lanhao, HOU Shichao, MAO Jia. Review of numerical simulation of landslides and surges in reservoir districts [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36(2): 79-86.
- [2] 张夏冉,殷坤龙,李烨,等. 库水位下降和降雨对重庆万州下坪滑坡稳定性的影响[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2017, 28(2): 22-29.
ZHANG Xiaran, YIN Kunlong, LI Ye, et al. Influence of drawdown of reservoir water level and rainfall on Xiaping landslide stability [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2017, 28(2): 22-29.
- [3] 范宏喜. 我国地质灾害防灾减灾问题的几点思考——中国地质调查局殷跃平博士访谈[J]. 水文地质工程地质, 2009, 36(5): 142-145.
FAN Hongxi. Some considerations on disaster prevention and mitigation of geological disasters in China: Interview with Dr. Yin Yueping of China Geological Survey [J]. Hydrogeology & engineering geology, 2009, 36(5): 142-145.
- [4] Sassa K, Tsuchiya S, Ugai K, et al. Landslides: a review of achievements in the first 5 years (2004 ~ 2009) [J]. Landslides, 2009, 6(4): 275-286.
- [5] Kyoji Sassa, Satoshi Tsuchiya, Hiroshi Fukuoka, et al. Landslides: review of achievements in the second 5-year period (2009 ~ 2013) [J]. Landslides, 2015, 12(2): 213-223.
- [6] 曹琰波,戴福初,许冲,等. 唐家山滑坡变形运动机制的离散元模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2011(S1): 2878-2887.
CAO Yanbo, DAI Fuchu, XU Chong, et al. Discrete element simulation of deformation and movement mechanism for Tangjiashan Landslide [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, (S1): 2878-2887.
- [7] 赵能浩,易庆林. 泥儿湾滑坡失稳机制及破坏后运动规律研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2016, 36(6): 984-993.
ZHAO Nenghao, YI Qinglin. The research on instability mechanism and motion law after the Destruction of Nierwan Landslide [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2016; 36(6): 984-993.
- [8] 齐超,邢爱国,殷跃平,等. 东河口高速远程滑坡-碎屑流全程动力特性模拟[J]. 工程地质学报, 2012, 20(3): 334-339.
QI Chao, XING Aiguo, YIN Yueping, et al. Numerical simulation of dynamic behavior of Donghekou rockslide-debris avalanche [J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20(3): 334-339.
- [9] 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.
- [10] 苏东升,张庆河,孙建军,等. 基于CFD-DEM耦合方法的近床面水流泥沙运动模拟研究[J]. 水道港口, 2016, 37(3): 224-230.
SU Dongsheng, ZHANG Qinghe, SUN Jianjun, et al. Simulation of fluid-sediment particle motion near bed based on CFD-DEM coupling method [J]. Journal of Waterway and Harbor, 2016, 37(3): 224-230.
- [11] 孙其诚,王光谦. 颗粒流动力学及其离散模型评述[J]. 力学进展, 2008, 38(1): 87-100.
SUN Qicheng, WANG Guangqian. Review on granular flow dynamics and its discrete element method [J]. Advances in Mechanics, 2008, 38(1): 87-100.
- [12] 肖拥军,邓敏,杨昌才. 库岸复杂滑坡体形成机制的数值分析[J]. 自然灾害学报, 2015(2): 74-80.
XIAO Yongjun, DENG Min, YANG Changcai. Numerical analysis of formation mechanism of complex landslide on reservoir bank [J]. Journal of Natural Disasters, 2015(2): 74-80.
- [13] 赵永志,江茂强,郑津洋. 巴西果效应分离过程的计算颗粒力学模拟研究[J]. 物理学报, 2009, 58(3): 1812-1818.
ZHAO Yongzhi, JIANG Maoqiang, ZHENG Jinyang. Discrete element simulation of the segregation in Brazil nut problem [J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(3): 1812-1818.