

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2021.04-05

基于 PFC^{3D} 的鱼鳅坡滑坡运动过程分析

张家勇, 邹银先, 杨大山

(贵州省地质环境监测院, 贵州 贵阳 550001)

摘要:以贵州省开阳县鱼鳅坡滑坡为研究对象,采用颗粒流离散元(PFC^{3D})对其破坏运动过程进行数值模拟。采用 Ball-Wall 建模方法建立滑坡模型,对滑坡不同关键部位颗粒进行位移、速度监测,阐明其破坏运动特征。结果表明,降雨为鱼鳅坡滑坡的直接诱发因素。该滑坡在破坏初始阶段以蠕滑变形为主,随着变形量的增加,滑坡体不断挤压坡脚,滑坡岩土体到达应力平衡极限,坡脚产生剪切破坏,并向上牵引发展,滑坡发生整体滑动,斜坡变形破坏模式为蠕滑-拉裂,按照力学条件为牵引式破坏。滑坡滑动最高时速 12.4 m/s,最大滑移 80 m,滑动阶段持续 50 s。研究成果可为对该类滑坡影响范围预测,以及工程措施的制定具有一定的参考意义。

关键词:滑坡;运动过程;颗粒流;数值模拟

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2021)04-0033-07

Analysis of Yuqiupo landslide motion process based on PFC^{3D}

ZHANG Jiayong, ZOU Yinxian, YANG Dashan

(Guizhou Geological Environment Monitoring Institute, Guiyang, Guizhou 550001, China)

Abstract: A case study of the Yuqiupo landslide in Kaiyang County, Guizhou Province, the particle flow discrete element (PFC^{3D}) was used to simulate the failure process of the landslide. The landslide model was built through the Ball-Wall method, and the characteristics of their destructive movement was described through the monitoring of the displacement and velocity of the particles at different key parts of the landslide. The results show that the rainfall is the direct inducing factor of the Yuqiupo landslide. In the initial stage of failure, the landslide is mainly creep deformation. The landslide continuously squeezes the slope toe with the increase of the deformation. The landslide rock-soil mass reaches the stress equilibrium limit, leading to shear failure at the slope foot, and the landslide happens with upward traction development, the failure mode is creep-crack, and it is traction failure according to the mechanical conditions. The maximum sliding speed of the landslide is 12.4 m/s, the maximum sliding slip is 80 m, and the sliding stage lasts for 50 s. The results have a good applicability to simulate the process of landslide destruction, which can provide a reference for engineering construction.

Keywords: landslide; motion process; grain flow; the numerical simulation

0 引言

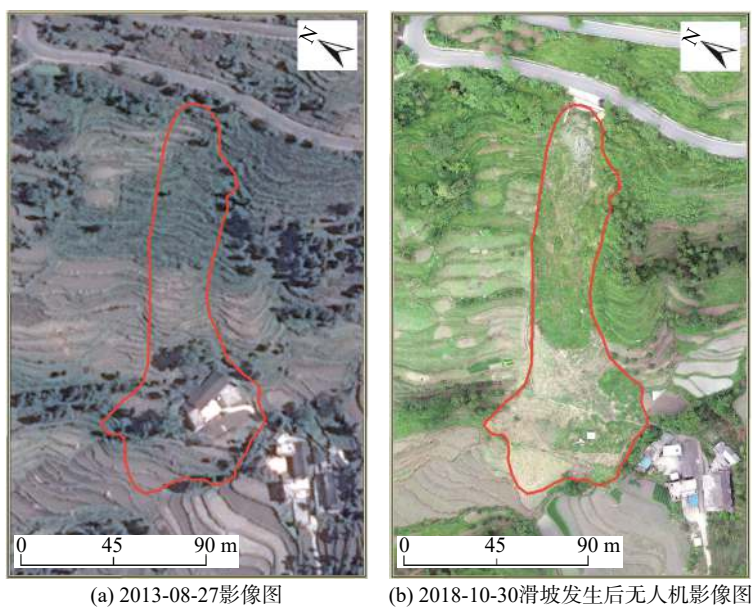
贵州省地处西南腹地,是无平原支撑的省份,地形切割剧烈,地质环境脆弱,地质灾害频发^[1-3]。2016 年 5 月 23 日,贵州省开阳县龙岗镇大石板村鱼鳅坡组突发滑坡灾害,造成下方 1 户居民 2 人死亡,5 间房屋毁坏,10 余亩耕地损毁,直接经济损失 90 万元(图 1)。鱼

鳅坡滑坡为堆积层失稳,是贵州省内典型突发性灾害类型之一。贵州及我国西部山区常见堆积体,在自然、人为因素影响下,容易诱发滑坡地质灾害,给人民的生命财产安全造成了严重的威胁。黄润秋^[4]通过大量的研究表明:查清滑坡变形破坏的地质力学模式是滑坡地质灾害防治的基础所在。

收稿日期: 2021-04-27; 修订日期: 2020-07-22

基金项目: 贵州省提升地质灾害监测预警科技能力行动方案项目(GZMC-ZG201910003)

第一作者: 张家勇(1981-),男,贵州开阳人,硕士,高级工程师,主研领域为地学大数据分析应用与可视化研究。E-mail: 75766880@qq.com



(a) 2013-08-27影像图

(b) 2018-10-30滑坡发生后无人机影像图

图 1 滑坡发生前后影像图

Fig. 1 Image before and after landslide

当前,针对滑坡机理分析主要是借助地质力学方法开展定性分析,判断破坏模式。近年来,随着计算机技术的发展,数值模拟方法在滑坡领域得到了广泛应用。目前的数值模拟方法中,主要包括确定性分析和非确定性分析两类方法,而确定性分析又可分为连续介质分析、非连续介质分析方法以及近年来李世海等^[5]提出的基于连续介质力学的离散元方法(CDEM)。其中连续介质数值分析方法有有限单元法、边界元法、有限差分法等,非连续介质分析方法有块体离散元法、颗粒离散元法、关键块体理论、不连续变形分析(DDA法)等。CDEM方法将有限元与离散元进行耦合,在块体内部进行有限元计算,在块体边界进行离散元计算,通过块体内部及块体边界的断裂,不仅可以模拟材料在连续状态下及非连续状态下的变形、运动特性,更可以实现材料由连续体到非连续体的渐进破坏过程。

离散单元法,它的基本思想是把滑体介质看作由一系列离散的、独立运动的单元所组成。20世纪90年代以后,离散单元法发展十分迅速,基于不规则形状块体单元,如UDEC、3DEC等软件,以及基于球形和圆盘形散体单元的软件,如PFC、MatDEM等,得到了不断的完善,使其在许多的领域都得到了广泛的应用。颗粒流法(PFC)作为离散单元法的一种,通过圆形离散单元(Ball)来模拟颗粒介质的运动及其相互作用,克服了传统连续介质力学的宏观连续性假设,能真实直观地模拟滑坡的失稳破坏过程^[6]。目前一些学者逐步将其应用于滑坡破坏运动分析之中。吴剑^[7]采用PFC对滑带剪

切过程进行了模拟研究,张龙等^[8]、施凤^[9]、李冬冬^[10]、王峻才^[11]采用PFC^{3D}对多个高速远程滑坡的运动过程进行了模拟,深入讨论了位移、速度、堆积形态等方面的因素。杜永彬^[12]、王宇等^[13]、胡江春等^[14]通过采用PFC^{2D}对滑坡形成演化过程进行模拟,得到了良好的效果。赵洲等^[15]、陈达等^[16]、闫晓娟等^[17]、汪华安等^[18]采用PFC^{2D}对堆积层滑坡形成演化过程进行模拟,并对堆积层滑坡的机理进行了总结^[19-21]。

因此,本文利用颗粒流程序PFC^{3D}模拟研究鱼鳅坡滑坡的破坏运动过程,选用Ball-Wall建模方法,引入颗粒流(PFC^{3D})程序中平行黏结模型,进行滑坡模型的建立,对滑坡不同关键部位颗粒进行位移、速度监测,模拟分析鱼鳅坡滑坡破坏运动过程。研究成果可为对该类滑坡影响范围预测,以及工程措施的制定具有一定的参考意义。

1 滑坡概况

鱼鳅坡滑坡位于开阳县龙岗镇大石板村鱼鳅坡组。研究区属亚热带季风气候,冬季干冷少雨,夏季受季风影响,暖湿多雨。四季降雨分布不均,且降雨多集中在汛期4—9月,占全年降雨量的75.8%,滑坡发生前10天的累计降雨量达到了70 mm。滑坡所处区域属斜坡地貌,总体地势为东北高,西南低,相对高差约210 m,平均地形坡度25°,地形起伏变化较大。滑坡区地层岩性主要为第四系残坡积层(Q^{el+dl})含碎石黏土和寒武系下统金顶山组(∈_j)粉砂岩、泥岩。鱼鳅坡滑坡地处大

翁林背斜南东翼,靠近背斜核部,滑坡前缘靠近一条北西-南东向平移断层,左侧缘靠近一条北东-南西向的正断层。地下水分为碎屑岩裂隙水与松散层孔隙水,根据资料显示该区地下水主要富存在第四系松散堆积层中,其透水性及含水性较好。地下水以大气降水补给为主,地表水补给次之。

鱼鳅坡滑坡在平面上的投影大致呈上小下大的塔形状,滑坡在剖面上呈现出近似直线状,主滑方向 244°, 滑坡斜长约 140 m, 平均横宽约 60 m, 平均厚度约 4 m, 总体积约 40 000 m³(图 2)。滑坡土体为寒武系牛蹄塘-金顶山组地层风化形成的残坡积土, 碎石含量较少, 碎石粒径较小(图 3)。

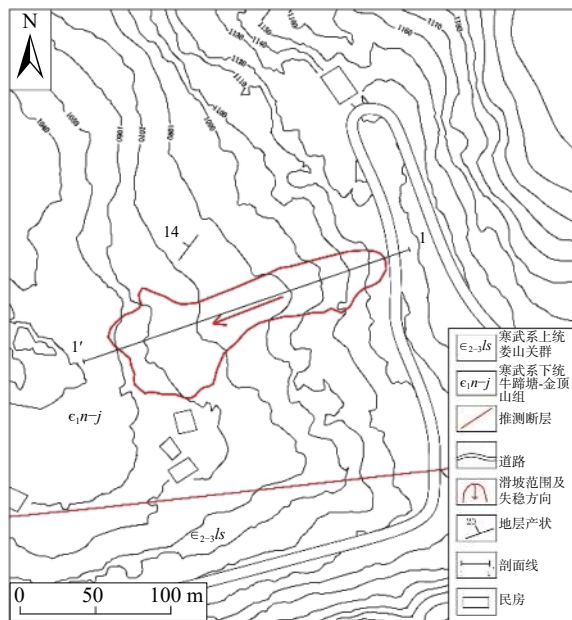


图 2 鱼鳅坡滑坡平面图

Fig. 2 Plan of Yuqiupo Landslide

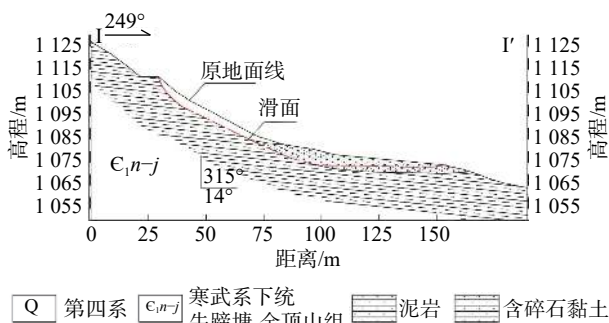


图 3 滑坡剖面图 (I-I')

Fig. 3 Section of landslide (I-I')

鱼鳅坡滑坡的变形破坏是其独特的内外因共同作用的结果, 坡体临空条件, 上部疏松下部致密的岩土体组合, 不良地表排水条件等为内因, 短期强降雨入渗为

外因。降雨为鱼鳅坡滑坡的直接诱发因素, 斜坡变形破坏模式为上部的土体沿基岩面先出现变形, 对下部滑体产生推挤作用, 直至坡脚产生剪切破坏, 并向上牵引发展, 导致整体滑动。

2 滑坡破坏过程数值模拟

2.1 计算模型的建立

本文根据滑前 1:1 万地形图、滑后无人机航测 DEM, 生成滑体和滑床的几何边界模型, 并导出为 PFC^{3D} 能识别的 STL 格式, 通过“Geometry import”命令导入 PFC 中作为两个“Geometry”。选择 Ball-Wall 模型建模, 其中滑床的“Geometry”作为 Wall 模型。然后通过有限步循环计算消除颗粒间的内力, 得到滑坡最终计算模型(图 4)。



图 4 滑坡数值计算模型

Fig. 4 Numerical calculation model of landslide

该滑坡模型长 230 m, 宽 170 m, 高 115 m, 颗粒最小半径 0.25 m, 最大半径 0.5 m, 颗粒总数为 2 447 个。

为了从整体和局部两方面共同把握滑体的运动特征, 此次模拟在滑坡前缘、滑坡中部、滑坡后缘共设置了 6 个监测点, 分别用于监控滑坡过程中滑体的速度、位移的变化(图 4)。

2.2 细观力学参数的确定

PFC 滑坡模拟参数主要包括本征参数和接触参数, 其中本征参数主要包括剪切模量、泊松比和密度, 可通过室内岩土体物理力学试验和工程类比确定, 颗粒单元间的接触参数主要通过以下两个途径获取^[12]: (1) 通过 PFC 进行参数标定确定物理力学参数。(2) 通过现场参数反演, 即对所需微观参数进行赋值使颗粒流的运动状态与实际状态基本一致, 可认为参数为合理值。本文主要选取第二种现场反演的方法确定颗粒单元的接触参数, 具体取值见表 1。

表 1 滑坡岩土体颗粒细观参数
Table 1 Mesoscopic parameters of rock and soil particles in landslide

细观参数	碎石土
颗粒密度/(kg·m ⁻³)	2 000
颗粒半径/m	0.25 ~ 0.5
法向接触刚度/MPa	28
切向接触刚度/MPa	28
摩擦系数	0.3
法向黏结刚度/(MPa·m ⁻¹)	10
切向黏结刚度/(MPa·m ⁻¹)	10
黏结抗拉强度/MPa	0.1
黏结抗剪强度/MPa	0.75

2.3 破坏过程模拟及分析

模拟计算到 1 s 时,坡体出现变形,边坡整体上位移较小,滑坡处于蠕滑变形阶段,见图 5(a)。3 s 时,坡体变形进一步增大,且坡体中后部颗粒的位移较中前部颗粒大,见图 5(b)。到达 5 s 时,滑坡前缘产生剪切破坏,坡脚颗粒开始剪出,见图 5(c)。7 s 时,滑坡滑动带已基

本贯通,在坡体压力作用下滑坡开始整体滑移,见图 5(d)。到达 8 s,滑坡整体的速度差进一步减小,滑坡处于整体加速阶段,见图 5(e)。到达 10 s 时,速度峰值 12.4 m/s,此时,近一半的滑体从滑源区滑出,见图 5(f)。到达 15 s 时,由于地形原因,前缘颗粒的速度逐渐减小,见图 5(g)。30 s 时,滑坡速度进一步减小,前缘的滑坡已基本停止运动,见图 5(h)。到 50 s 时,滑坡停止运动并堆积于坡脚平缓处,见图 5(i)。

综上可知,该滑坡在破坏初始阶段以蠕滑变形为主,随着变形量的增加,滑坡体不断挤压坡脚,滑坡岩土体到达应力平衡极限,坡脚产生剪切破坏,并向上牵引发展,滑坡发生整体滑动,整个滑坡历时 50 s,整体运动距离约为 80 m,滑坡运动距离较短。整个滑坡破坏模式表现为牵引式破坏。模拟结果与实际变形情况基本一致。

2.4 运动特征分析

通过观察速度-时间曲线(图 6),整体上坡体各部分到达速度峰值的时刻基本一致,均在 10 s 到达峰值,

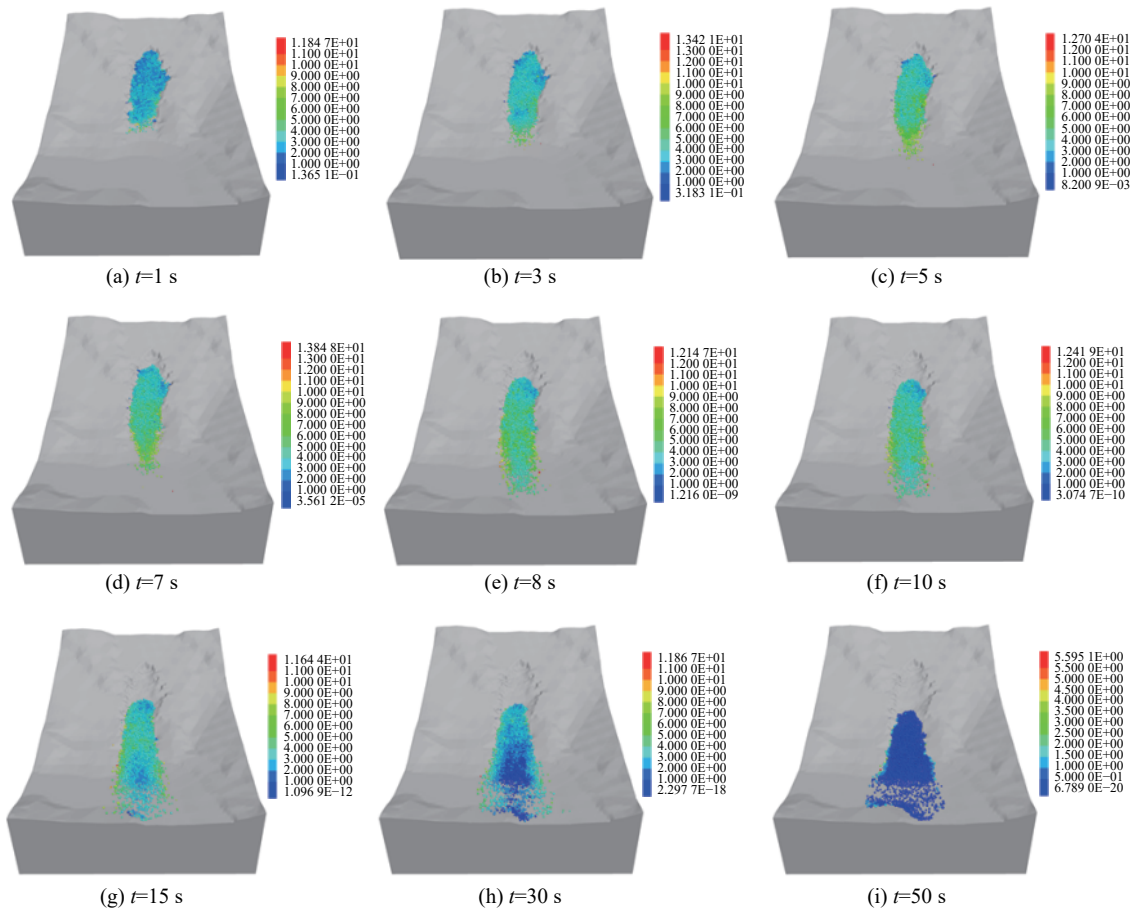


图 5 不同步速度云图 (单位: m)
Fig. 5 Velocity cloud map of different steps (unit: m)

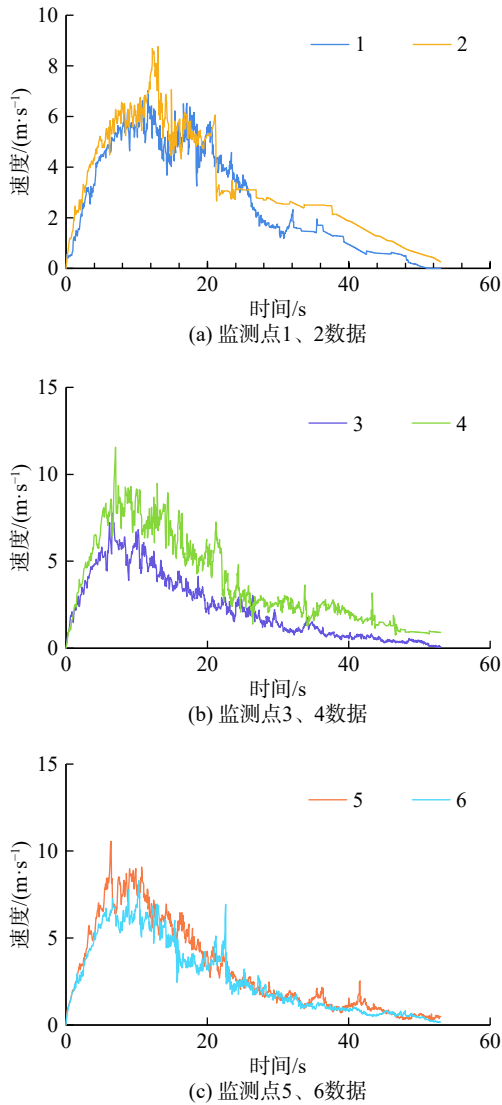


图6 速度时程曲线

Fig. 6 Time-history curve of velocity

各点速度峰值介于 5 ~ 11.6 m/s, 速度峰值最高颗粒是位于滑体前缘的 3 号颗粒, 峰值 11.6 m/s。速度峰值最低颗粒是位于滑体后缘的 6 号颗粒, 峰值约 7 m/s。6 个颗粒速度时程曲线整体上变化趋势基本一致。

通过观察位移-时间曲线(图 7), 监测颗粒均在 45 ~ 50 s 达到位移峰值。颗粒最大位移 94 m, 为滑体前缘 2 号颗粒; 最小位移 60 m, 为坡后缘 6 号颗粒。总的趋势是滑坡前部颗粒较后部颗粒位移大, 呈现出牵引式破坏特征。

通过观察平均速度时间曲线与平均位移时间曲线(图 8), 结果表明: 0 ~ 7 s 时平均速度呈近似线性增大, 约在 10 s 时达到速度峰值 7 m/s, 到达峰值后, 平均速度同样呈近似线性减小; 30 s 时以后降速更缓, 渐趋于稳定, 但仍有较小速度, 约 0.3 m/s; 到 50 s 后, 平均速度趋

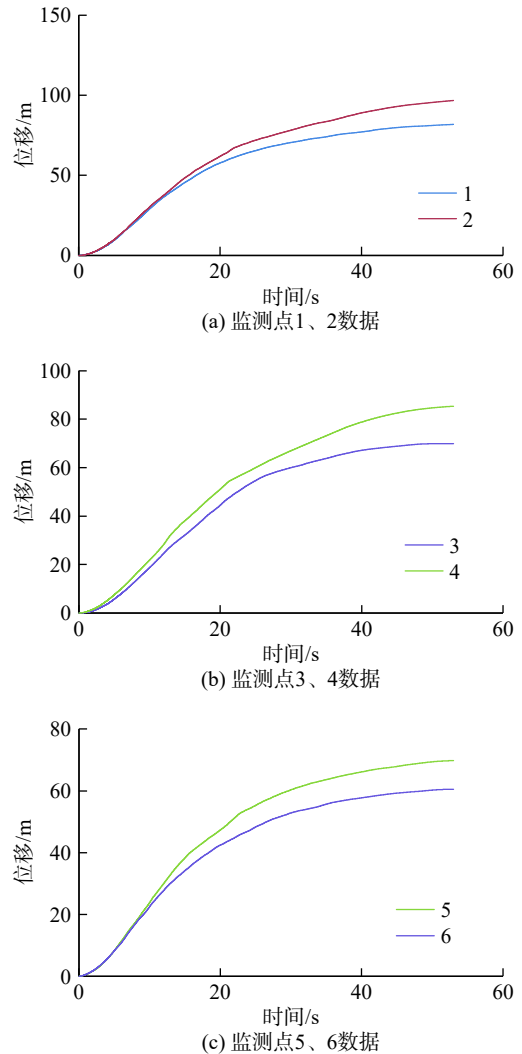


图7 位移时程曲线

Fig. 7 Displacement time-history curve

于 0。

平均位移时间曲线与平均速度时间曲线分析各阶段速度变化情况一致。0 ~ 7 s 平均位移呈逐渐增长, 斜率逐渐增大, 为加速阶段; 7 ~ 10 s 近似呈线性增大, 10 ~ 30 s 时步斜率逐渐减小, 为减速阶段; 50 s 后平均位移到达峰值 80 m。

3 结论

(1) 鱼鳅坡滑坡是在内外因共同作用下的结果, 滑体物质为碎石土, 物理力学性质差, 降雨为鱼鳅坡滑坡的直接诱发因素。

(2) PFC 数值模拟结果表明: 该滑坡在破坏初始阶段以蠕滑变形为主, 滑坡体不断挤压坡脚, 坡脚产生剪切破坏, 并向上牵引发展, 滑坡发生整体滑动。整个滑坡破坏模式表现为牵引式破坏。模拟结果与实际变形

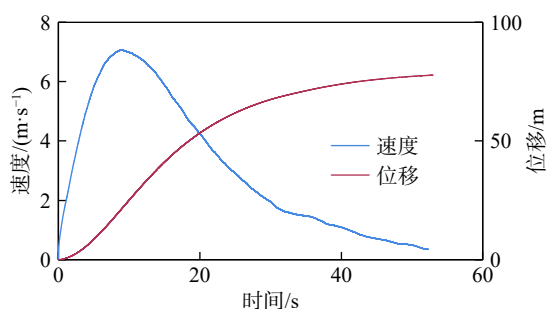


图 8 平均速度、位移时程曲线

Fig. 8 Average velocity and displacement time-history curves

情况基本一致。

(3) 该滑坡历时约 50 s, 0 ~ 10 s 为整体加速阶段, 滑坡最高时速 12.4 m/s, 11 ~ 50 s 为整体减速阶段。整体位移约 80 m, 滑坡前部位移要比后部位移大, 整体速度峰值介 7 ~ 12 m/s 之间, 速度和位移变化总趋势为初始高程越低, 达到的最大速度和位移越大。

(4) 通过数值模拟发现, PFC^{3D} 软件用于模拟堆积层滑坡运动过程以及形态具有较好的适用性, 对此类滑坡的预防和后期治理具有一定的参考价值。

参考文献 (References) :

- [1] 郭振春. 贵州地质灾害的主要类型和诱因及其预防建议 [J]. 贵州地质, 2003, 20(2): 103-105. [GUO Zhenchun. Major types of geological hazards and predisposition in Guizhou and its preventive suggestion [J]. Guizhou Geology, 2003, 20(2): 103-105. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 阳岳龙, 龙万学, 杨禹华, 等. 贵州省主要地质灾害危险度区划研究 [J]. 中国安全科学学报, 2008, 18(5): 5-10. [YANG Yuelong, LONG Wanxue, YANG Yuhua, et al. Study on risk region division of main geological hazards in Guizhou Province[J]. China Safety Science Journal (CSSJ) [J]. Chinese Journal of Safety Science, 2008, 18(5): 5-10. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 彭小平, 陈开圣, 王成华, 等. 贵州省公路地质灾害基本特征及危险性分区 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2009, 20(2): 46-51. [PENG Xiaoping, CHEN Kaisheng, WANG Chenghua, et al. Basic characteristics and risk zoning of highway geological hazard in Guizhou Province [J]. The Chinese Journal of Geological hazard and Control, 2009, 20(2): 46-51. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 黄润秋. 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, 2007, 26(3): 433-454. [HUANG Runqiu. Large scale landslides and their sliding mechanism in China since the 20th century [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(3): 433-454. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 李世海, 刘天萍, 刘晓宇. 论滑坡稳定性分析方法 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增刊 2): 3309-3324. [LI Shihai, LIU Tianping, LIU Xiaoyu. Analysis method for landslide stability [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(Sup2): 3309-3324. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 赵洲, 魏江波. 基于颗粒流方法的滑坡破坏机理与强度分析 [J]. 西安科技大学学报, 2018, 38(4): 611-619. [ZHAO Zhou, WEI Jiangbo. Failure mechanism and strength analysis of landslide based on particle flow method [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2018, 38(4): 611-619. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 吴剑. 滑带剪切过程的离散元模拟研究[D]. 武汉: 中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究所), 2007. [WU Jian. Dem element simulation of shearing process of sliding zone[D]. Wuhan: Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Wuhan Institute of Geotechnical Mechanics), 2007. (in Chinese)]
- [8] 张龙, 唐辉明, 熊承仁, 等. 鸡尾山高速远程滑坡运动过程 PFC^{3D} 模拟 [J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(增刊 1): 2601-2611. [ZHANG Long, TANG Huiming, XIONG Chengren, et al. Movement process simulation of high-speed long-distance Jiweishan landslide with PFC^{3D} [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(Sup1): 2601-2611. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 施凤根. 基于 PFC3D 的文家沟滑坡高速远程运动学特征研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2014. [SHI Fenggen. The study of rapid and long-runout characteristics of Wenjiagou landslide based on PFC3D[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2014. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 李冬冬. 文家沟滑坡碎屑流动力特性分析[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2016. [LI Dongdong. Dynamic characteristics analysis of the Wenjiagou rock avalanche[D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Hydropower, 2016. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 王峻才. 滑坡—碎屑流堆积分布规律及其运动过程研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2018. [WANG Chuancai. Study of deposit position and motion process of landslide-debris avalanches[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2018. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 杜永彬. 太公公路徐家寨滑坡运动的数值模拟 [J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2008, 27(6): 1099-1102. [DU Yongbin. Numerical simulation of the landslide movement

- in Xujiashai in the highway from Taiyuan to Dalian [J] . Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science Edition), 2008, 27(6): 1099 – 1102. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 王宇,李晓,王声星,等.滑坡渐进破坏运动过程的颗粒流仿真模拟 [J] . 长江科学院院报, 2012, 29(12): 46 – 52. [WANG Yu, LI Xiao, WANG Shengxing, et al. PFC simulation of progressive failure process of landslide [J] . Journal of the Yangtze River Scientific Research Institute, 2012, 29(12): 46 – 52. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 胡江春,杨成林,徐晓晨,等.颗粒流法及其在库岸滑坡稳定分析中的应用 [J] . 中原工学院学报, 2016, 27(4): 61 – 64. [HU Jiangchun, YANG Chenglin, XU Xiaochen, et al. Particle flow method and its application in stability analysis of landslide on reservoir bank [J] . Journal of Zhongyuan University of Technology, 2016, 27(4): 61 – 64. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 赵洲,魏江波.基于颗粒流方法的堆积层滑坡运动过程模拟 [J] . 煤田地质与勘探, 2017, 45(6): 111 – 116. [ZHAO Zhou, WEI Jiangbo. Simulation on the movement process of accumulated layer landslide based on PFC2D [J] . Coal Geology & Exploration, 2017, 45(6): 111 – 116. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 陈达,薛喜成,魏江波.基于 PFC^{2D} 的刘洞滑坡破坏运动过程模拟 [J] . 煤田地质与勘探, 2018, 46(4): 115 – 121. [CHEN Da, XUE Xicheng, WEI Jiangbo. Simulation of failure process of Liujian landslide based on PFC^{2D} [J] . Coal Geology & Exploration, 2018, 46(4): 115 – 121. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 闫晓娟,赵洲.金泉寺滑坡破坏机理及冲击强度定量分析 [J] . 科学技术与工程, 2019, 19(22): 76 – 84. [YAN Xiaojuan, ZHAO Zhou. Deformation mechanism and impact intensity for the landslide in Jinquan temple, Mian County [J] . Science Technology and Engineering, 2019, 19(22): 76 – 84. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 汪华安,焦春茂,陈晓.基于颗粒流方法的滑坡机理数值分析 [J] . 三峡大学学报(自然科学版), 2020, 42(1): 47 – 51. [WANG Hua'an, JIAO Chunmao, CHEN Xiao. Numerical analysis of landslide mechanism based on PEC^{2D} [J] . Journal of China Three Gorges University (Natural Science Edition), 2020, 42(1): 47 – 51. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 郭延辉,杨溢,杨志全,等.国产 GB-InSAR 在特大型水库滑坡变形监测中的应用 [J] . 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(2): 66 – 72. [GUO Yanhui, YANG Yi, YANG Zhiquan, et al. Application of GB-InSAR in deformation monitoring of huge landslide in reservoir area [J] . The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(2): 66 – 72. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 易连兴.西南岩溶山区复合水动力场滑坡影响模式——以关岭县大寨滑坡为例 [J] . 水文地质工程地质, 2020, 47(4): 43 – 50. [YI Lianxing. Impact model of landslide with complex hydrodynamic field in karst mountain areas of southwest China: A case study of the Dazhai landslide in Guanling County [J] . Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(4): 43 – 50. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 高杨,贺凯,李壮,等.西南岩溶山区特大滑坡成灾类型及动力学分析 [J] . 水文地质工程地质, 2020, 47(4): 14 – 23. [GAO Yang, HE Kai, LI Zhuang, et al. An analysis of disaster types and dynamics of landslides in the southwest karst mountain areas [J] . Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(4): 14 – 23. (in Chinese with English abstract)]