

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2017.02.02

基于离散元的矿渣泥石流运动过程研究

林玫玲^{1,2}, 简文彬^{1,2,3}, 胡海瑞^{1,2}, 黄俊宝⁴

(1. 福州大学环境与资源学院, 福建 福州 350108; 2. 福州大学岩土工程与工程地质研究所, 福建 福州 350108; 3. 福建省地质灾害重点实验室, 福建 福州 350002; 4. 福建省地质环境监测中心, 福建 福州 350002)

摘要: 矿渣具有散粒体的基本特征, 在降雨作用下可以启动形成泥石流。为了解矿渣堆积物质启动形成泥石流的过程与降雨强度的关系, 利用 PFC^{2D} 颗粒流软件对该矿渣泥石流进行不同雨强工况下的数值仿真, 探究矿渣堆积体演化为泥石流的形态变化, 揭示矿渣堆积体作为泥石流物源在降雨作用下颗粒位移和速度的变化规律, 总结该矿渣型泥石流启动到暴发过程中颗粒内部力学特征。研究成果对进一步认识矿渣泥石流的启动机制、运移规律以及泥石流防治具有理论及实际意义。

关键词: 矿渣型泥石流; 颗粒流; 启动; 降雨强度; 力学特征

中图分类号: P642.23

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2017)02-0010-05

The movement process of slag debris flow based on the discrete element method

LIN Meiling^{1,2}, JIAN Wenbin^{1,2,3}, HU Hairui^{1,2}, HUANG Junbao⁴

(1. College of Environment and Resources, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China;
2. Institute of Geotechnical and Geological Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China;
3. Fujian Provincial Key Laboratory of Geological Hazards, Fuzhou, Fujian 350002, China;
4. Geological Environment Monitoring Center of Fujian Provincial, Fuzhou, Fujian 350002, China)

Abstract: Slag shows certain characteristics of granular mixtures, and it turn into debris flow under the effect of rainfall. In order to explore the relationship between the process of slag accumulation body forming into the slag debris flow and the rainfall intensity, simulate the process under various working condition by using the two-dimensional particle flow code software-PFC^{2D}. Through the investigation, it comes to the rule of the slag accumulation in morphologic and the change in position as well as the velocity of the slag particle, and the conclusion about internal mechanical characteristics change between the process of slag debris flow outbreak is also proposed. The research results would make sense to the further understanding of the initiation mechanism in slag debris flow.

Keywords: slag debris flow; grain flows code; initiation; rainfall intensity; mechanical characteristics

0 引言

泥石流经常造成灾难性的灾害, 经常给当地

生态环境、经济发展、人们生活生产造成严重的影响^[1-2]。自然泥石流是一种携带有大量泥砂、石块의 短暂时急水流, 夹带的固体物质含量有时超

收稿日期: 2016-07-13; 修订日期: 2016-09-21

第一作者: 林玫玲(1991-), 女, 硕士研究生, 研究方向为边坡工程、地灾防灾减灾等。E-mail:1024479207@qq.com

通讯作者: 简文彬(1963-), 男, 教授, 博士, 主要从事岩土工程与工程地质教学与科研。E-mail:jwb@fzu.edu.cn

过水量,多发于山区,是介于挟砂水流和滑坡之间的土石、水、气混合流或颗粒剪切流。而矿渣泥石流指的是构成泥石流的松散固体物 90% 以上来源于采矿过程中排放的废石渣^[3],又被称为人为泥石流。

矿渣泥石流早在 20 世纪 70 年代就有发生。其中以 1970 年四川盐井沟铁矿泥石流、1994 年陕西潼关金矿区泥石流带来的惨痛代价令人倍感矿渣型泥石流的威胁巨大^[4-6]。国内外学者对泥石流的研究已经不在少数^[7-11],但针对矿渣型泥石流,特别是矿渣型泥石流的启动机制、力学特性等方面研究还较少。因此对这种有别于自然泥石流,在矿区形成的特殊泥石流问题进行研究有利于进一步认识矿渣型泥石流的启动机制。本文以福建地区某矿渣型泥石流为工程背景,开展矿渣型泥石流的启动机制、运移规律研究,具有实际的指导意义。

1 研究区矿渣泥石流地质模型

以福建地区某矿渣泥石流沟为工程地质原型,研究区属于多山丘陵地貌。流域发育一条主沟和多条小支沟,主沟长约 2.1 km,汇水面积 2.9 km²,流域形态近似树枝状,西低东高,流域内最高海拔约 663 m,最低海拔约 518 m,相对高差约 145 m,其遥感全貌图见图 1。

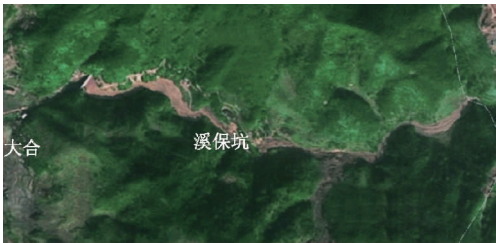


图 1 矿渣型泥石流全貌图 (来源于网络)
Fig.1 General view of the slag debris flow
(Comes from the Internet)

研究区的水系呈树枝状分布,最后汇集到该泥石流沟,且该地雨季较长,年降水量在 1 491 ~ 1 809 mm 之间,具备引发泥石流灾害的降雨条件。雨季 24 h 降雨量可达 130 mm,属于“大暴雨”,这将是泥石流形成的主要引发因素,集中的降水产生洪水强烈冲蚀矿渣堆积物及侵蚀沟槽,增加沟内的松散堆积物。泥石流研究区在空间上分为物源区,流通区和堆积区(图 2)。

其中物源区分布有多个矿点,矿山开挖留下的矿渣直接原地堆积或者往沟谷里堆填。矿渣以铁矿为



图 2 矿渣型泥石流空间分区示意图
Fig.2 Partition map of the slag debris flow

主,物质松散,空隙大,这为泥石流的形成提供了充足的物源,其矿渣堆积体见图 3,这些堆积层在暴雨形成的地表径流冲刷下将随洪流一起被带走而成为泥石流物质来源。



图 3 矿渣堆积体
Fig.3 The accumulation of slag

2 矿渣泥石流数学模型

根据地质模型所建立的大合泥石流沟数学模型的尺寸为:长 2 100 m、高 145 m。按照相似原理和量纲分析原理,对地质原型进行适当比例放缩,先以“墙”命令生成矿渣堆积体表面,综合考虑计算效率、物理模型的颗粒级配和相似程度以及粒径分布^[12],将最小粒径放大 1.5 倍以减少颗粒和计算工作量,提高计算效率,最终随机生成 4 179 个粒径范围 0.05 ~ 0.50 m 且没有重叠的不规则排列颗粒组,用以模拟矿渣堆积体内部无序的颗粒结构。沟底以墙单元表示,并通过设定颗粒间摩擦系数以及与墙体的摩擦系数变化范围为 0.1 ~ 0.5,以此模拟颗粒间以及与墙体之间的结合强弱程度,具体数学模型见图 4。

根据现场含水率试验仪测试结果以及室内测试,得到 3 组计算参数(表 1),用以模拟矿渣在三种降雨强度作用下的形态变化并以此为依据分析泥石流的启动过程和机制。

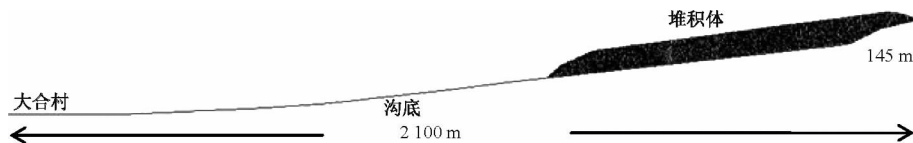


图 4 数学模型

Fig. 4 The mathematical model

表 1 矿渣基本力学参数

Table 1 The basic mechanical parameters of slag

雨强级别	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	内摩擦角/($^{\circ}$)	粘聚力/kPa
中小雨	2.2	15	18
大雨	2.0	13	16
暴雨	1.8	8	12

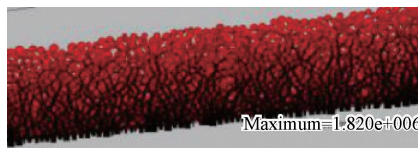


图 7 暴雨工况初始应力图

Fig. 7 Initial stress diagram under rainstorm

3 运动过程模拟及其启动机理分析

3.1 计算方案

首先设置堆积体的孔隙率及颗粒半径的大小范围来生成颗粒,主要根据现场调查所得的实际颗粒大小范围来定义主要颗粒的粒径范围。由于模型形状不规则,故采用膨胀法生成颗粒,颗粒在重力加速度作用下在墙上完成初步堆积过程,再经一定时步循环后完成松散堆积体的整个堆积过程,堆积完成的坡面形态见图 3。计算颗粒在自重作用下达到平衡状态时,松散堆积体的初始应力场见图 5~图 7。黑色线代表颗粒间的压应力,线越粗,代表压应力越大,最大应力集中于堆积体底部,雨强越大,颗粒间含水量越大,应力越小,这些都与实际相况基本一致。

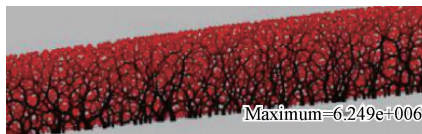


图 5 小-中雨工况初始应力图

Fig. 5 Initial stress diagram under low-medium rain

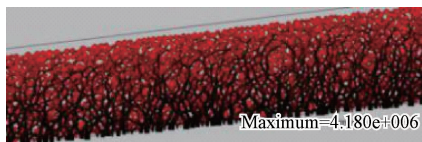


图 6 大雨工况初始应力图

Fig. 6 Initial stress diagram under heavy rain

在力和力矩平衡作用下,矿渣堆积体坡体形态随雨强的变化发生不同程度的变化,在坡面不同位置设置速度和位移监测球(图 8)。分析各工况下的坡面形态和颗粒运动速度随雨强的变化,揭示降

雨作用下矿渣堆积体启动形成泥石流的过程和机制。



图 8 监测球位置分布图

Fig. 8 Map of the monitored ball location

编号 1~3 三个小球进行计算模型中球的垂向速度大小(图 9),平均不平衡力和平均接触力(图 10),为避免赘述,只展示大雨工况下的监测图。可见经过迭代运算后,平均不平衡力与接触应力的比值随着迭代计算的运行逐渐趋于 0,运动速度也逐渐趋于 0,表明该体系最终达到了力平衡状态,泥石流堆积体的初始应力场已形成,堆积体逐渐达到稳定状态,泥石流沟谷具有了稳定的坡面形态。

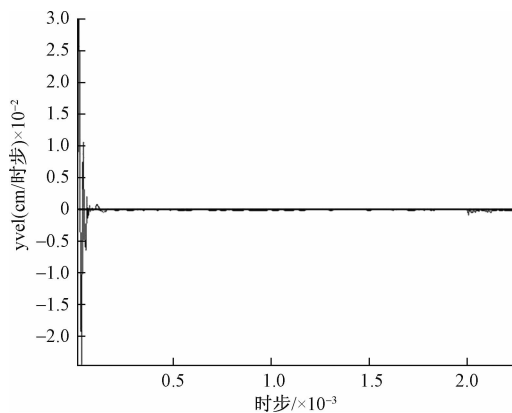


图 9 2号球垂向速度监测图

Fig. 9 Y-velocity history of ball 2

3.2 计算结果

经过数值模拟,不同降雨强度下的堆积体形态、监测点位置的变化见图 11~图 12,图中所示 1 号点球号

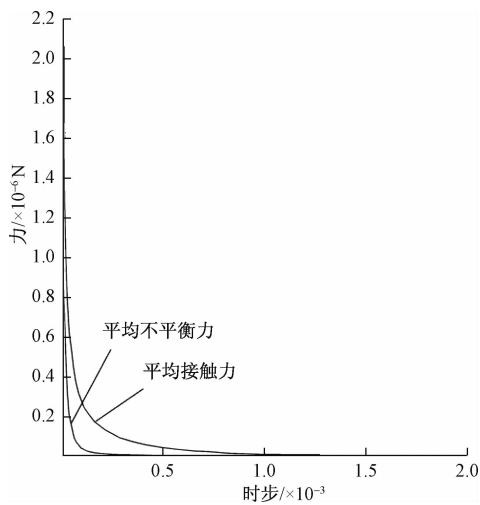


图 10 平均不平衡力和平均接触力监测图

Fig. 10 Mean unbalanced force and contact force at equilibrium

为 433,2 号点球号 835,3 号点球号 1 437。并将 6 000 时步和 12 000 时步下的三个监测点速度变化值列表见表 2。从图 11 和图 12 可以看出,堆积体在中小雨工况下运行 6 000 时步以及 12 000 时步并无明显变化;在大雨工况下堆积体产生下滑,堆积体变薄;在暴雨工况下,堆积体变薄更加明显,当运行 12 000 时步时,堆积体形态变形迅速发展,已有部分颗粒距离沟口很近,监测点运移距离也相对大雨工况下要来的远,说明颗粒运移速度有了较大程度的提高,与监测点速度监测值变化较为相符。本程序设置每时步间隔 5 s,因此当 6 000 时步和 12 000 时步对应的实际物理时间分别是 8.3 h 和 16.7 h,表示当暴雨降雨时间持续 8.3 h 泥石流将启动,当降雨时间持续达到 16.7 h 以上,泥石流将全面暴发。

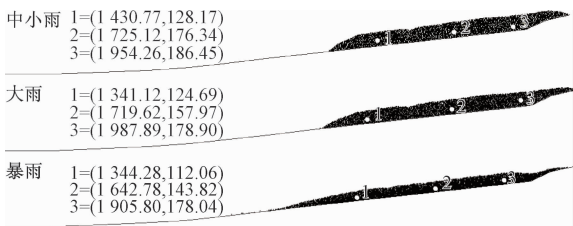


图 11 不同雨强下的堆积体形态及其监测点位置(6000 时步)

Fig. 11 Morphologic change of the slag accumulation and position changes of the monitored balls under different rainfall intensity (6000 steps)

堆积体监测点运动速度监测结果说明,泥石流物源区堆积体在中小雨之前,不同部位、不同高度的质点运动速度极小,堆积形态变化很小,可见小雨工况下基

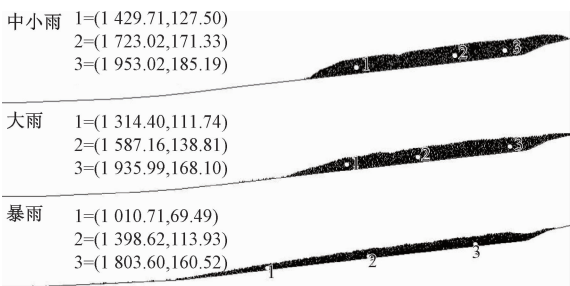


图 12 不同雨强下的堆积体形态及其监测点位置(12000 时步)

Fig. 12 Morphologic change of the slag accumulation and position changes of the monitored balls under different rainfall intensity (12000 steps)

本不会启动泥石流;而在降雨强度达到大雨级别之后,各质点运动速度有一定幅度提升,堆积形态有可视程度的变化;当降雨强度达到暴雨级别时,各质点运动速度迅速增加,堆积形态有十分明显的变化,几乎程流动状态。虽然在运移至坡度较缓的沟段速度有所回落,但随着降雨强度的提升越来越难回落到 0。

表 2 不同雨强下各监测点速度值

Table 2 Monitoring value of the velocity under different rainfall intensity

雨强	监测球号	时步 ($\times 10^3$)	最大速度 ($\text{cm}/\text{时步} \times 10^{-2}$)	最终速度 ($\text{cm}/\text{时步} \times 10^{-2}$)
中小雨	1	4	0.507	$\rightarrow 0$
		6	0.795	
		12	1.093	
	2	4	0.393	$\rightarrow 0$
		6	0.366	
		12	0.661	
	3	4	0.051	$\rightarrow 0$
		6	0.490	
		12	0.893	
大雨	1	4	1.293	$\rightarrow 0$
		6	1.068	
		12	0.971	
	2	4	1.497	$\rightarrow 0$
		6	1.003	
		12	1.078	
	3	4	1.612	$\rightarrow 0$
		6	1.341	
		12	0.875	
暴雨	1	4	6.812	11.210
		6	15.130	
		12	21.210	
	2	4	7.709	12.544
		6	16.660	
		12	22.009	
	3	4	8.211	11.678
		6	16.930	
		12	22.857	

3.3 结果分析

从平均接触力监测曲线图(图 13)来看,大雨工况下接触力先是缓慢增长,在 8 000 时步之后迅速增长而后渐小,截至该处是矿渣松散堆积体吸水的过程,矿渣逐渐达到饱和状态,在达到饱和之前接触力不断增大,饱和阶段接触力稍有下降,因为矿渣颗粒之间的孔隙被水充斥,颗粒与颗粒之间通过空隙水进行接触,因此接触力稍有下降。而在 12 000 时步之后接触力急剧下降,而且所用时步极短,这是因为泥石流已经启动,矿渣堆积体崩解离体,颗粒与颗粒之间接触甚少,因此平均接触力急剧下降。在这之后,堆积体在运移过程中又再次相遇,再次产生接触,由于该泥石流为粘性泥石流,因此在暴发之后颗粒运移还是呈整体流动为主,平均接触力渐趋稳定,大雨工况下稳定在 500 kN。

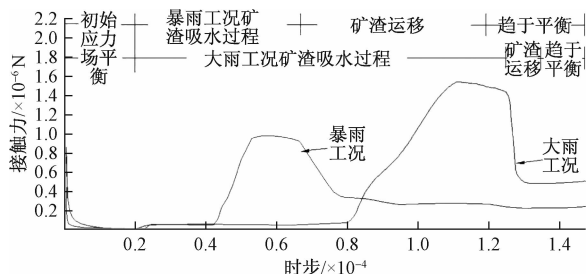


图 13 两种工况平均接触力监测曲线图

Fig. 13 Mean contact force history under two working condition

暴雨工况下平均接触力走势与大雨工况基本一致,但是数值大小有所区别。可以见得暴雨工况下矿渣堆积体吸水的过程更短,平均接触力峰值更小,这是因为暴雨虽然有着和大雨工况类似的过程,但是暴雨降雨量更大,雨水瞬间充斥矿渣空隙,甚至扩大空隙,使颗粒与颗粒之间接触不及大雨工况紧密,因此平均接触力峰值反而小于大雨工况。除此之外,该工况下矿渣吸水过程更短,矿渣运移的时间更长,平均接触力最终稳定值也更小,稳定在 300 kN。这是因为暴雨工况下降雨自带的动能更大,下落之后转移至矿渣堆积体颗粒,使其运移得更久远,因此最终停留堆积时颗粒所占据的空间也更大,平均接触力也就更小。

从同一工况的曲线图来说,两种工况下皆出现了平均接触力的增大,说明降雨打破了堆积体的初始平衡状态,每个颗粒的应力没有达到不平衡但都有向平衡发展的趋势,因此颗粒之间产生挤压,出现平均接触力不为 0。在挤压过程中,随着雨强的增加,颗粒在水流的润滑作用下产生运移,雨强越大,运移位移越大,颗粒散布空间也随之增大,因此暴雨工况的平均接触力的最终稳定值示较小。

以上说明当颗粒运移位移的增大速度较快,且平均接触力突破 0 往上激增并稳定于较小值时,此时质点已经启动,难以在力和力矩作用下坡面再造而停止。

4 结论

(1) 由于矿渣泥石流的物质来源主要是采矿、矿山建设的弃土、石、渣,介质具有松散、抗冲能力差、遇水易启动等特点,因此采用颗粒流研究可以获得其启动及力学机制。

(2) 通过颗粒流数值模拟研究得出:中小雨工况下降雨通过矿渣堆积体发生渗流,堆积体基本不会达到饱和条件,矿渣型泥石流基本不启动不暴发;大雨工况下,在短历时降雨作用下矿渣泥石流启动难度较大,而在降雨持时较长时,泥石流可能启动,启动瞬间矿渣堆积体崩散分离,之后迅速重聚难以大规模暴发;暴雨工况下,矿渣泥石流在强降雨作用下容易达到饱和而呈流动状态,堆积体内排水量不及降水量,易大规模暴发泥石流。

(3) 通过三种工况模拟结果对比分析可得矿渣泥石流启动受强降雨强度影响大:强降雨作用下易启动,过程短而促;而中强度降雨工况下雨水以入渗和渗流为主,启动过程长且艰;小强度降雨则基本不能启动泥石流。

(4) 对矿渣泥石流的颗粒流研究,有利于进一步揭示矿渣型泥石流的启动机理,为类似的工程实践提供防灾减灾依据。

参考文献:

- [1] Lin D G, Hsu S Y, Chang K T. Numerical simulations of flow motion and deposition characteristics of granular debris flows [J]. Natural Hazards, 2009, 50 (3): 623 - 650.
- [2] Liu K F, Li H C, Hsu Y C. Debris flow hazard assessment with numerical simulation [J]. Natural Hazards, 2009, 49(1): 137 - 161.
- [3] 徐友宁, 张江华, 陈华清, 等. 一种基于矿渣型泥石流形成机理的防治方法: CN, CN103233440A [P]. 2013.
XU Youning, ZHANG Jianghua, CHEN Huaqing, et al. A control method based on the forming mechanism of slag debris flow: CN, CN103233440A [P]. 2013.
- [4] 李德基. 四川冕宁盐井沟泥石流综合治理工程浅议 [J]. 山地学报, 1990, 8(1): 68 - 69.
LI Deji. Integrated control projects of debris flow at YanJing Gully, MianNing country, SiChuan Province [J]. Journal of Mountain Science, 1990, 8(1): 68 - 69.