

泥石流启动过程 PFC 数值模拟

胡明鉴, 汪 稔, 陈中学, 王志兵

(中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071)

摘 要: 泥石流松散碎屑物质具有散粒体的基本特征, 在暴雨激发下容易形成泥石流, 整个过程具有散粒体大变形的特征。颗粒流理论是基于离散单元法模拟圆形颗粒介质的运动及其相互作用, 在模拟颗粒相互作用和大变形问题研究方面具有显著的优越性。为分析泥石流松散碎屑物质启动形成泥石流的过程及其与土体含水率的关系, 采用二维颗粒流程序 (PFC2D) 分析降雨作用下松散碎屑物质启动形成泥石流的过程, 揭示崩滑堆积体在降雨作用下含水率超过临界值后质点运动速度和位移增加, 松散碎屑物质启动并加速而导致滑坡泥石流连锁式破坏的过程和机制。

关 键 词: 泥石流; 松散碎屑物; 颗粒流; 临界含水率; 启动

中图分类号: TV 144; O 241

文献标识码: A

Initiation process simulation of debris deposit based on particle flow code

HU Ming-jian, WANG Ren, CHEN Zhong-xue, WANG Zhi-bing

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering,

Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: The mud-rock loosening deposit which has the basic character of granular mixtures is easily turning into debris flow if inspired by rainstorm. Based on the discrete element method and its superiority on round particles moving and mutually affecting and big distortion question research. In order to analyze the relationship between the moisture content and the process of loosening deposit forming in the mud-rock flow, this thesis simulated the process of loosening deposit turning into debris flow under condition of rainfall by using the two-dimensional particle flow code software-PFC2D. Result showed that the particle would start moving and accelerating then caused the displacement increasing, induced the chain destroy process and mechanism of landslide and debris flow when the water content surpassing the critical moisture content.

Key words: debris flow; loosening deposit; particle flow code; critical water content; initiation

1 前 言

泥石流是山区沟谷中, 由暴雨、冰雪融水、地震等激发, 含有大量泥沙、石块等的松散土体与水混合的特殊洪流, 是介于崩塌、滑坡等块体运动和高含沙水流运动之间的一系列流动过程, 是各种自然和人为因素综合作用的产物, 因给人民生活造成深重灾难而引起人们的广泛关注^[1]。其暴发必需具备松散碎屑物质、陡峭的地形和高强度集中暴雨 3 个条件。松散堆积物主要是来源于各种坡积物、残积物、洪积物和人工弃渣以及老泥石流堆积物等, 以崩塌、散落、坠落和溜滑等方式进入沟道或堆积于谷坡坡麓, 成为泥石流的主要储供物源,

极易在降雨的激发下形成泥石流, 该过程中最重要的环节是松散碎屑物质的启动过程。王士革^[2]研究山坡型泥石流的形成条件及特征, 指出在大暴雨的激发下, 凹型坡面内的土体饱水后突然起动, 沿着基岩表面向下快速运动, 崩滑体起动后立即转化为泥石流, 最后泥砂停积在坡脚, 形成倒石堆状的堆积体或直接进入支沟转化为沟谷泥石流。崔鹏^[3-4]和戴初福^[5]、Iverson^[6-7]等开展了滑坡向泥石流的转化的试验和机制研究, 为松散碎屑物质启动形成泥石流研究奠定了基础。

形成泥石流的松散碎屑物质多为砾石、砂砾、粉细砂和黏性土等混合而成的砾石土, 具有散粒体的基本性质。PFC^{2D} 是通过离散单元方法来模拟圆

形颗粒介质的运动及其相互作用的二维颗粒流程序, 在模拟颗粒间的相互作用问题、大变形问题等方面具有显著的优越性^[8]。为分析松散碎屑物质在降雨作用下启动形成泥石流的过程, 本文在降雨引发松散碎屑物质含水率改变以致力学行为变化的室内试验基础上, 以适合模拟松散碎屑物质大变形的颗粒流理论和颗粒流数值模拟程序 (PFC—particle flow code), 通过泥石流松散碎屑物质的颗粒流数值模拟, 分析其启动形成泥石流的过程及其与土体含水率的关系, 探索泥石流崩滑堆积松散碎屑物质启动形成泥石流的过程和机制。

2 崩滑堆积体物理力学特征

堆积于坡面和泥石流沟谷的松散碎屑物质在降雨作用下, 由于雨水的湿润和入渗, 其含水率将会逐渐增加, 引起松散碎屑物强度的变化。根据泥石流松散碎屑物质级配试验 (见图 1) 可知, 松散碎屑物质为级配不连续、不均匀砾石土, 为满足试样尺寸和组构的要求, 室内强度试验之试样尺寸也需要满足一定的要求才能真实反映松散碎屑物质的组构及其强度在降雨作用下的变化。为此, 在现场测得的土体天然含水率 (5.3%) 和天然干密度 (1.90 g/cm^3) 基础上, 室内配制天然干密度、5 种不同含水率下的试样进行泥石流松散碎屑物质强度大型直剪试验。试验设备为中国科学院武汉岩土力学研究所自主知识产权的应变控制式大型现场室内两用直剪装置^[9-10]。剪切盒净空几何尺寸为: 长×宽×高 = $500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm} \times 410 \text{ mm}$, 上下剪切盒之间的最大开缝宽度为 10 mm , 可对最大粒径 $\leq 50 \text{ mm}$ 的试样进行剪切。试验结果其强度如图 2, 结果统计见表 1。

3 颗粒流模型及计算方案

3.1 颗粒流理论与模型

PFC 是一种离散单元法, 通过模拟圆形颗粒介质的运动及其相互作用来研究颗粒介质的运动及其特性, 解决复杂变形和大变形模式下的实际问题。既可直接模拟圆形颗粒的运动与相互作用问题, 也可以通过任一颗粒与其直接相邻的颗粒连接形成任意形状的组合体模拟块体结构问题。颗粒流程序把物理领域内真实的颗粒抽象为数学领域内的颗粒单元, 通过对试样颗粒单元几何性状、接触本构、边界条件以及若干应力平衡状态的设计和分析, 通过时步迭代, 使数值模拟试样的宏观力学特性逼近真实材料的力学相应特性以达到数值求解。颗粒间接触相对位移的计算不需要增量

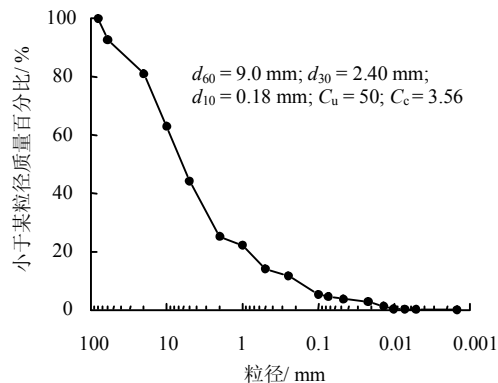


图 1 崩滑堆积体级配累积曲线

Fig.1 Mass percentage curve of the deposits

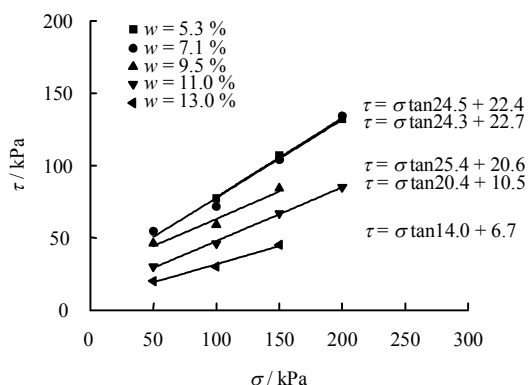


图 2 崩滑堆积体直剪试验强度包线

Fig.1 Strength envelopes of the deposits with different moisture contents

表 1 干密度 1.90 g/cm^3 , 不同含水率直剪试验结果
Table 1 Results of direct shear test with different moisture contents ($\rho_d = 1.90 \text{ g/cm}^3$)

含水率/%	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa
5.3	24.6	22.4
7.1	24.3	22.7
9.5	25.4	20.6
11.0	20.4	10.5
13.0	14.0	6.7

位移而直接通过坐标来计算, 接触本构可用下列单元模拟: (1) 线性弹簧或 Hertz Mindlin 法则; (2) 滑动模型; (3) 点接触和平行接触两种连接类型, 后者可以抵抗弯矩。通过重力或移动墙 (即定义颗粒模型范围的边界) 来模拟加载过程, 墙可以用任意数量的线段或者面来定义, 墙与墙间可有任意连接方式, 墙也可以有任意的线速度或角速度^[8, 11-14]。因此, PFC 成为模拟固体力学和颗粒流问题的一种有效手段, 对散体物质的应力、应变问题的研究具有显著的优越性。本次数值模拟涉及接触黏结模型。接触黏接被设想为一对作用于颗粒接触点处的法向刚度与切向刚度为常数的弹簧或者胶水, 从而指定

法向抗拉与抗剪强度。接触黏接的存在排除了颗粒滑动的可能，即剪切接触力的大小不大于容许最大值。相反，剪切接触力通过剪切接触黏接强度来限定，接触黏接同样允许接触点处产生拉力。法向接触拉力的大小被限定在法向接触黏接强度范围内。接触黏接通过法向黏接强度和剪切黏接强度来定义，并用 `PROPERTY n_bond` 和 `PROPERTY s_bond` 命令指定。如果法向接触拉力的大小等于或者超过法向接触黏接强度，则黏接破裂，并且法向和剪切接触力置 0。如果剪切接触力的大小等于或者超过剪切接触黏接强度，则黏接破裂，但如果剪切力不超过摩擦极限，则接触力没有改变^[11]。

3.2 计算方案

先以“墙”命令生成崩滑堆积体堆积斜坡表面，综合考计算效率、物理模型的颗粒级配和相似程度以及粒径分布，将最小粒径放大 10 倍以减少颗粒和计算工作量，提高计算效率，最终生成 2 000 个粒径范围 0.05~0.25 m 且没有重叠的不规则排列颗粒组，用以模拟崩滑堆积体内部无序的颗粒结构。这些颗粒在重力加速度作用下下落到崩滑堆积坡面——“墙”上，在堆积体初始密度和强度下 6×10^6 次循环后完成崩滑堆积体的堆积过程，系统总不平衡力和堆积完成的坡面形态如图 3 和图 4，可见崩滑堆积体在堆积过程中，系统不平衡力逐渐减小并渐趋于零，表明堆积过程逐渐稳定，斜坡也具有稳定的坡面形态。根据相同干密度、不同含水率下的大型直剪试验结果，采用插值法得到 7 组计算参数（表 2），用以模拟降雨作用下土体密度增加，强度变化的 7 种计算工况。不同含水率下松散崩滑堆积体在力和力矩平衡作用下完成坡面再造；在坡面不同水平和竖直位置设置速度和位移观测球，分析各工况下的坡面形态和颗粒运动速度随含水率的变化，揭示降雨作用下崩滑堆积体启动形成泥石流的过程和机制。

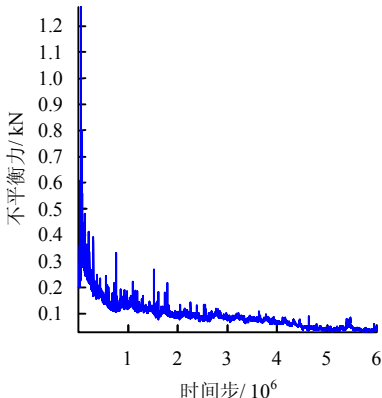


图 3 堆积过程的不平衡力
Fig.3 Mean unbalanced force of piling process

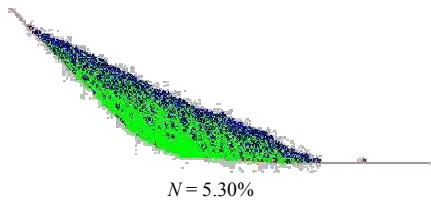


图 4 堆积完成时的计算模型及坡面形态
Fig.4 Calculation model and slope shape

表 2 数值模拟基本岩土参数
Table 2 Basic geotechnical parameters for numerical simulation

含水率 / %	重度 / (g/cm ³)	内摩擦角 / (°)	黏聚力 / kPa
5.3	2.001	24.6	22.4
7.1	2.035	24.3	22.7
9.5	2.081	25.4	20.6
10.5	2.100	22.1	15.2
11.0	2.109	20.4	10.5
13.0	2.147	14.0	6.7
15.0	2.185	7.5	1.8

4 坡面形态与启动机制分析

经过数值模拟，不同含水率下的坡面形态、监测点位置和监测点速度的变化见图 5~7。从图 5 可以看出，崩滑堆积体斜坡从堆积完成后至含水率 10.5% 时，坡面形态除局部的细微调整外，整体形态基本无变化。但当崩滑堆积体含水率略增加至 11.0% 时，坡面形态开始出现大的变化，斜坡顶端土体向下运动，斜坡中部因土体向下运动而凹陷；且随着含水率继续增加，崩滑堆积体位移加速增加，坡面变形迅速发展；至含水率 15.0% 时几乎流态化而不具有坡面形态。

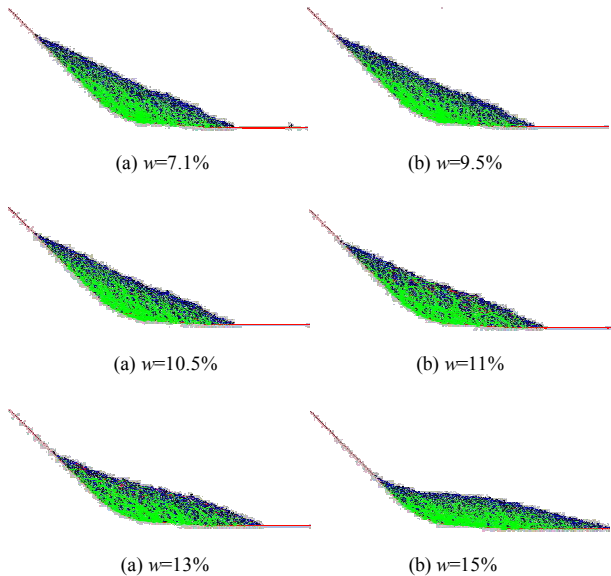


图 5 不同含水率下的坡面形态
Fig.5 Slope surface shapes with different moisture contents

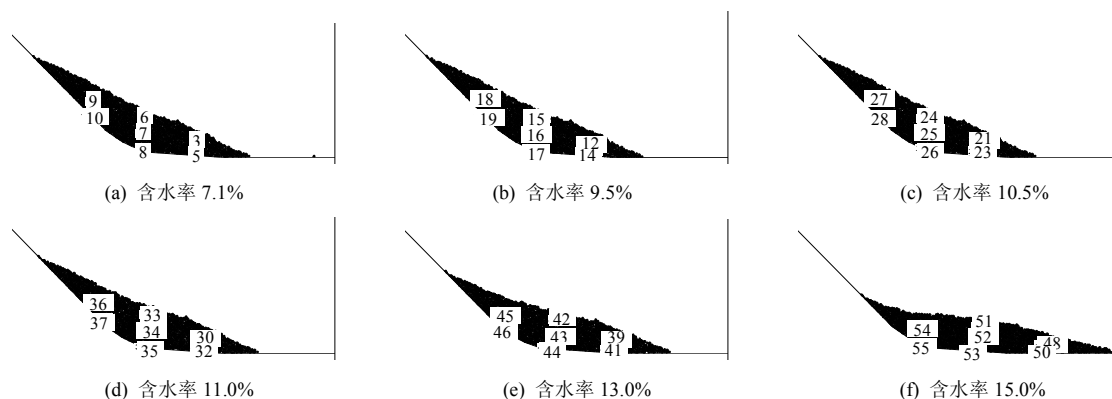


图 6 不同含水率下的位移和速度监测球的位置

Fig.6 Displacements and speed monitor ball positions with different water contents

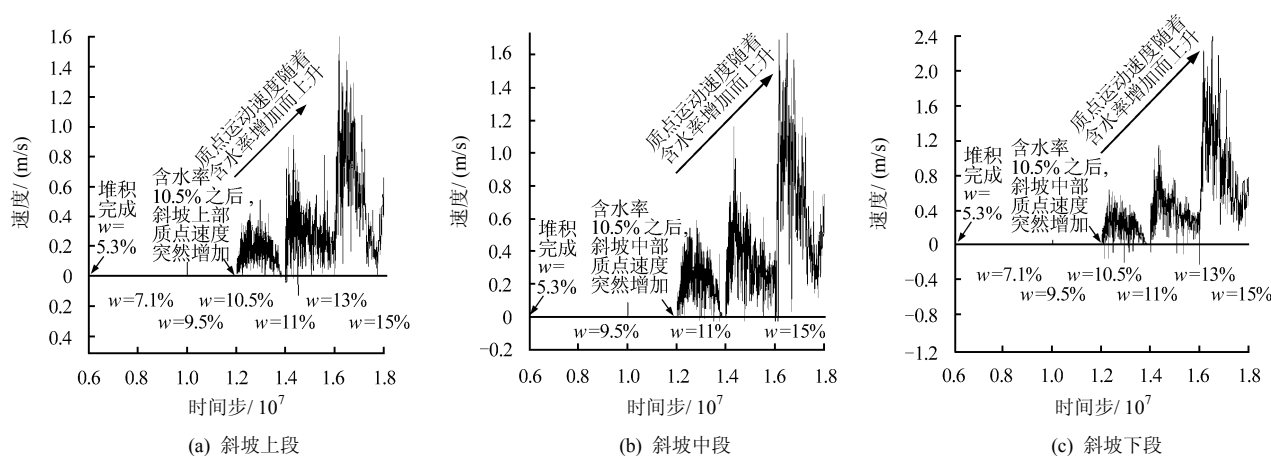


图 7 不同含水率下不同部位质点运动速度

Fig.7 Speeds of monitor ball with different water contents and locations

质点位移变化和运动速度监测结果(图 6~7)说明,崩滑堆积体斜坡在含水率 10.5%之前,不同部位、不同高度的质点运动速度极小,坡面形态变化很小;而在含水率达到并超过 11.0%之后,各质点的运动速度迅速增加,且含水率越大,质点运动速度越大。虽然经过一段时间后运动速度会缓慢的回落,但质点运动速度随着含水率的增加越来越难回落到 0,说明此时质点已经启动难以在力和力矩作用下坡面形态再造而停止,此时崩滑堆积体已经启动且速度持续增加,运动加剧,即崩滑堆积体泥石流已经形成^[15]。

5 结 语

基于 PFC^{2D} 在模拟松散体物质大变形方面的优势,通过泥石流崩滑堆积体降雨作用下形成泥石流的过程数值模拟,揭示崩滑堆积体在临界含水率(11.0%)之前,斜坡土体在力和力矩作用下通过细微的坡面形态再造过程维持斜坡稳定和坡面形态的相对固定;当含水率超过临界含水率之后,土体

强度骤减使平衡态被打破,引发崩滑体运动速度和位移增加,崩滑堆积体启动并加速而导致滑坡泥石流连锁式破坏的过程和机制。

泥石流松散碎屑物质含水率超过临界含水率后可受降雨触发而形成泥石流,后期将依据该临界含水率对应的大致降雨量进行灾害预测预报研究。另外,数值模拟非自然级配且未进行流-固耦合分析,只是通过简化的参数替演进行颗粒流泥石流分析的尝试,下一步将对此开展深入的研究工作。

致谢: 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室尹小涛博士在本文颗粒流数值模拟方面给予大力的帮助,在此深表感谢。

参 考 文 献

- [1] 吴积善, 田连权, 康志成, 等. 泥石流及其综合治理[M]. 北京: 科学出版社, 1993.
- [2] 王士革. 山坡型泥石流的危害与防治[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1999, 10(3): 45—48

- WANG Shi-ge. Hazard of debris flow on slope and its control[J]. **The Chinese Journal of Geological Hazard and Control**, 1999, 10(3): 45—48.
- [3] CUI Peng. Studies on condition and mechanism of debris flow initiation by means of experiment[J]. **Chinese Science Bulletin**, 1992, 37(9): 759—763.
- [4] 崔鹏. 泥石流起动条件及机制的试验研究[J]. 科学通报, 1991, 21: 1650—1652.
- [5] DAI F C, LEE C F, WANG S J, et al. Stress-strain behavior of a loosely compacted volcanic derived soil and its significance to rainfall induced fill slope failures[J]. **Engineering Geology**, 1999, 53: 359—370.
- [6] IVERSON R M, MARK E, REID R G et al. Debris-flow mobilization from landslides[J]. **Annu. Rev. Earth Planet. Sci.**, 1997, 25: 85—138.
- [7] IVERSON R M, et al. Dynamic pore-pressure fluctuations in rapidly shearing granular materials[J]. **Science**, 246: 796—799.
- [8] Itasca Consulting Group, Inc. PFC(particle flow code), Version 3.0[M]. Minneapolis: ICG, 2004.
- [9] 闵弘, 刘小丽, 魏进兵, 等. 大型现场室内两用直剪仪研制(I): 结构设计[J]. 岩土力学, 2006, 27(1): 164—168.
- MIN Hong, LIU Xiao-li, WEI Jin-bing, et al. A new large direct shear apparatus for field and laboratory test(I): Configuration[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(1): 164—168.
- [10] 刘小丽, 罗锦添, 闵弘, 等. 现场室内两用大型直剪仪研制(II): 试验测试[J]. 岩土力学, 2006, 27(2): 336—340.
- LIU Xiao-li, LAW K T, MIN Hong, et al. A new large direct shear apparatus for field and laboratory test(II): Proof-testing[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(2): 336—340.
- [11] 尹小涛. 岩土材料工程性质数值模拟试验研究[博士学位论文D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2008.
- [12] 周健, 池永, 廖雄华. 颗粒流理论及其工程应用简介[J]. 岩土工程师, 2001, 13(4): 1—4.
- ZHOU Jian, CHI Yong, LIAO Xiong-hua. The theory of particle flow and the introduction of engineering application[J]. **Geotechnical Engineering**, 2001, 13(4): 1—4.
- [13] 周健, 池永, 池毓蔚, 等. 颗粒流理论及PFC2D程序[J]. 岩土力学, 2000, 21(3): 271—274.
- ZHOU Jian, CHI Yong, CHI Yu-wei, et al. The method of particle flow and PFC2D code[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2000, 21(3): 271—274.
- [14] 周健, 贾敏才. 土工细观模型试验与数值模拟[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [15] 胡明鉴. 泥石流崩滑堆积体自组织临界性及灾变机制[博士学位论文D]. 武汉: 中科院武汉岩土所, 2009.