

地震滑坡运动过程的离散元模拟分析

廖小帆

(四川电力设计咨询有限责任公司, 四川 成都 610061)

摘要:地震滑坡灾害具有范围广、滑动速度快和突发性强等特点,往往造成重大的财产损失和人员伤亡。我国西南地区位于地震重灾区,地质灾害频发。文章以处于龙门山断裂带的某地震滑坡为例,利用 PFC 颗粒程序模拟地震滑坡的运动过程,对滑坡体在滑动前后的位置和滑坡体的运动范围进行分析,得出滑坡体的岩性对滑坡的运动范围和运动方式影响很大,且滑坡体中的颗粒在滑动中是自由运动。

关键词:地震滑坡;颗粒程序;离散元;运动

中图分类号:U216

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2014)S2-143-3

地震是诱发滑坡灾害的主要因素之一,大型地震可诱发数万处滑坡,给人民的生命财产带来巨大的威胁。我国西南地区地质灾害频发,且滑坡灾害尤为严重。地震滑坡属于动力滑坡,它既可能在地震发生的同时产生,也可能在震后相当长一段时间内发生。地震滑坡与普通滑坡相比,具有规模大和远程高速等特点,而且其隐蔽性和突发性很强,所以研究地震滑坡的运动过程非常复杂。近年来,国内外一些学者针对地震滑坡的特征进行了大量的研究。Iverson 等^[1-2]以历史上发生的多次大型滑坡为统计样本,通过现场调查和 GIS 先进技术对地震滑坡相关参数进行了收集与整理,运用数理统计的方法寻找大型滑坡的体积、运动高差与滑动距离的关系。Davies, T. R. H^[3]构建拉格朗日运动方程的连续性模型,适合多种滑体沿不同路径运动,基底为流态化层底模型,用来进行地质灾害评估和滑坡、泥石流和雪崩等防护措施。殷跃平^[4]假定滑坡的运动形式是连续可变的,建立了预测高速远程滑坡的块体运动模型。本文以西南地区某地震滑坡为研究对象,采用离散元的方法建立地震滑坡的运动模型,分析地震滑坡的滑动特点。

1 某地震滑坡基本概念

某地震滑坡位于龙门山断裂带,滑坡启动于约 1 700 m 高程的山坡,由强风化的远古花岗岩闪长岩构

成,高差 180~200 m,宽度 350~400 m,厚度约 150 m。该滑坡位于龙门山主中央断裂带上,是带状震源的南段,滑坡体受到强烈的地震作用而滑动破碎,经历多次撞击和转向,形成长约 3.5 km,高差 680 m 的运动径迹。强烈的地震使位于高位的滑坡体发生快速滑动,快速滑动带来的相互碰撞使岩体碎裂,长时间持续的地震作用诱发碎石产生滑动,地震结束后碎石滑动停止,堆积于沟道中。

2 PFC 离散元程序简介

PFC 的全称是 Particle Flow Code,即颗粒程序^[5],以下简称 PFC,是由美国 Itasca 公司开发的一款计算软件,主要用于研究散粒体或可简化为散粒体的系统的分析。目前有二维(PFC2D)和三维(PFC3D)两种,该软件属于离散元(DEM)范畴。与连续介质力学方法不同,PFC 试图从微观结构角度研究介质的力学特性和行为。简单地说,介质的基本构成为颗粒(particle),可以增加、也可以不增加“水泥”粘结,介质的宏观力学特性如本构关系决定于颗粒和粘结的几何和力学特性。形象地说,这与国内 20 世纪 80 年代岩石力学界比较流行的实验室“地质力学模型”试验很相似,该试验往往是用砂(颗粒)和石膏(粘结剂)混合,按照相似理论来模拟岩体的力学特性。

PFC 中的颗粒为刚性颗粒,但在力学关系上允

许重叠,以模拟颗粒之间的接触力。颗粒之间的力学关系非常简单,即牛顿第二定律。颗粒之间的接触破坏可以为剪切和张开两种形式,当介质中颗粒间的接触关系发生变化时,介质的宏观力学特性可以经历从峰前线性到峰后非线性的转化,即介质内颗粒接触状态的变化决定了介质的本构关系。因此,在 PFC 计算中不需要给材料定理宏观本构关系和对应的参数,这些传统的力学特性和参数通过程序自动获得,而定义它们的是颗粒和水泥的几何和力学参数,如颗粒级配、刚度、摩擦力、粘结介质强度等微力学参数。目前,PFC 应用的领域主要有土木工程、矿业工程、材料工程、食品工程、制药工程及农业等。

颗粒流属于不连续介质力学的一种,这里的粒子并不直接与介质中是否存在颗粒状物质有关,只是用来描述介质特性的一种方式。比如 PFC 既可以用来描述具有颗粒物质的粗粒花岗岩一类的介质,也可以用来研究非晶质材料的特性。粒子间的接触方式和接触强度是最关键的一个环节,决定了粒子集合体即介质的基本力学特性以及具体的承受张剪压力和保持静力平衡的基本能力。粒子集合体的各种复杂力学特性,比如其非线性特征和破坏特征都是通过粒子间的基本状态体现出来的。粒子间的接触产生的破坏标志着粒子集合体由线性到非线性力学特征的开始。因此,在利用颗粒流方法求解有关问题时不需要定义介质的本构关系。

颗粒流方法在模拟过程中作了如下假设:

- 1) 颗粒单元为刚性体,本身不会破坏;
- 2) 接触发生在很小的范围内,即点接触;
- 3) 接触特性为柔性接触,接触处允许有一定的“重叠”量,且“重叠”量的大小与接触力大小有关,与颗粒大小相比,“重叠”量很小;
- 4) 接触处可以有粘结强度;
- 5) 所有的颗粒是圆形(PFC2D)或球体(PFC3D),也可以用到簇逻辑机理生成任意形状的超级颗粒。每一个簇单元由一系列颗粒重叠而成为边界可以变形的刚体。

3 基于 PFC 的地震滑坡运动过程的离散元模拟

3.1 PFC 颗粒流模型

根据现场地质调查和勘测所得的数据,建立某地震滑坡的离散元模型,用颗粒体模拟滑坡体,在整个变形区域内随机生成粒子构成滑坡体,滑坡体用“BALL”模拟,滑动面用“WALL”模拟。该区域的

滑坡体体积为 $72\ 636\ \text{m}^3$,超单元数目为 1 080 个,总颗粒数为 2 160 个。采用的颗粒半径范围从 2.6 m 到 4.1 m,服从高斯分布。选用模型的相对高差 3 430.75 m,水平运动距离为 1 182.77 m。该地震滑坡的运动范围初始模型如图 1 所示。

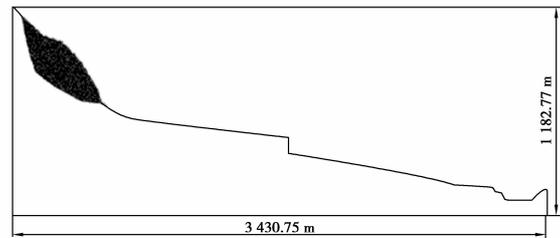


图 1 地震滑坡运动初始模型

3.2 计算参数

PFC 所有计算参数的选取通过室内模型试验与数值模拟的计算结果对比获得。PFC 模型再现了岩石材料的微观参数如单轴压缩强度、弹性模量和泊松比。对于粘结模型,两个圆形颗粒间的微观属性包括法向刚度和切向刚度、法向粘结和切向粘结,库仑摩擦系数必须通过室内模型试验得到。微观参数的选取通过两种试验方法获得,一种是试验室参数验证;另一种是通过现场数值反演。由于碎屑流粘聚力可以忽略不计,因此颗粒间只有摩擦力,宏观摩擦角可以由自然堆积休止坡角来代替。选取的计算参数如表 1 所示。

3.3 颗粒摩擦系数的选取

该地区由于地震的作用,基底堆积了大量松散碎屑物,且碎屑物之间粘结力很小,所以在颗粒流 PFC 模型中,可以忽略颗粒间的粘结力,只考虑摩擦力,碎屑流近似流体物质。为了分析地震滑坡的运动范围,选取了几组不同颗粒摩擦系数进行数值模拟,分别取 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5。在模型中分别输入不同的颗粒摩擦系数进行计算,可以得到滑坡运动距离和冲击力与颗粒摩擦系数的关系。

表 1 计算参数

法向接触刚度/GPa	0.86
切向接触刚度/GPa	0.86
平行法向刚度/MPa	0.80
平行切向刚度/MPa	0.80
平行半径比	0.80
颗粒最小半径/m	0.10
最大半径/最小半径	4.00

3.4 模拟结果分析

3.4.1 滑坡运动距离分析

在 PFC 颗粒流模型中,分别输入不同的颗粒摩擦系数,进行滑坡运动计算,可以得到不同摩擦系数条件下滑坡运动距离随时间的变化曲线,如图 2 所示。可以看出,颗粒摩擦系数越大,滑坡运动距离越短,运动范围也越小。随着时间的增长,滑坡运动范围不断扩大,当时间趋于某一值时,滑坡的运动范围不再迅速扩展,而趋于稳定。

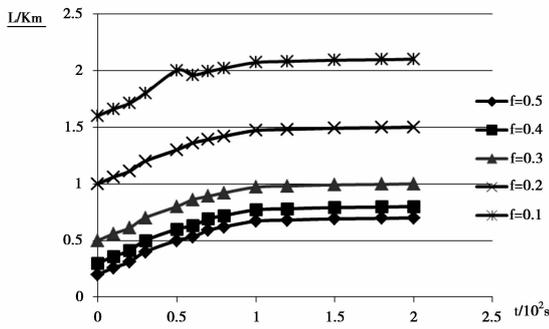


图 2 不同摩擦系数条件下滑坡运动距离随时间的变化图

3.4.2 滑坡体内部颗粒运动趋势分析

在滑坡体内部选取 10 个运动点,用基底摩擦系数为 0.3 的颗粒流模型检测这 10 个运动点的运动趋势。图 3(a)和图 3(b)分别为滑坡体滑动前和滑动后的位置。滑坡体滑动前,运动点 3 和运动点 4 的水平距离为 830.25 m,滑动后两个运动点的水平距离为 2 300.12 m;运动点 9 和运动点 10 的水平距离为 1 245.36 m,滑动后两个运动点的水平距离为 2 876.37 m;运动点 6 和运动点 7 的水平距离为 924.18 m,滑动后两个运动点的水平距离为 2 156.67 m。可以看出,滑坡体中运动点的位置在滑动后重新排列,偏离了原来的位置,滑坡体中各个点在滑动过程中属自由运动。滑坡前缘表面的颗粒在滑动过程中彼此超过并被覆盖,滑坡接近基底的滑块移动距离不会移动到表面。

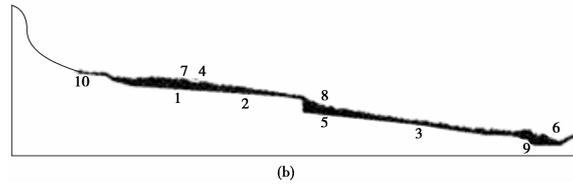
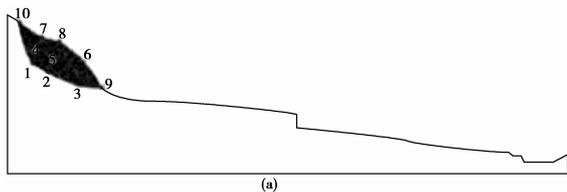


图 3 滑坡体中颗粒滑动前和滑动后的位置

4 结论

通过对某地震滑坡的运动过程进行离散元仿真模拟,用 PFC 颗粒流程序模拟滑坡体的运动过程,建立滑坡体在滑动前后的数值模型,可以得到以下结论。

- 1) 地震滑坡往往是瞬时发生的, PFC 颗粒流程序可以准确地模拟滑坡体的运动和堆积过程及滑坡体中颗粒位置的变化。
- 2) 颗粒摩擦系数对滑坡体的运动趋势和运动速度有一定的影响。颗粒摩擦系数越大,滑坡体的运动速度越慢,其运动范围也越小;而颗粒摩擦系数越小,滑坡体的运动速度越快,其运动范围也较大。所以,滑坡体的岩性对滑坡的运动速度和运动范围影响很大。
- 3) 滑坡体中各个点在滑动过程中是自由运动,其运动方式杂乱无章,位于不同位置的颗粒在滑动过程中可能重叠,滑坡体在滑动后,各个颗粒的排列方式发生了改变。
- 4) PFC 离散元方法可以预测地震滑坡运动范围,为地质灾害的发生提供预警,从而减少人民生命财产的损失。

参考文献:

[1] Iverson RM, Schilling SP, Vallance JW. Objective delineation of lahar— inundation zones[J]. Geological Society of America Bulletin, 1998, 110(8): 972-984.

[2] Iverson RM. The physics of debris flows[J]. Review of Geophysics, 1997, 35(3): 245-296.

[3] Davies T R H. Spreading of rock avalanche debris by mechanical fluidization[J]. Rock Mech, 1982, 15: 9-24.

[4] 殷跃平. 汶川八级地震滑坡高速远程特征分析 [J]. 工程地质学报, 2009, 17(2): 153-154.

[5] 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, 16(1): 35-38.