

发育软弱结构面土坡破坏细观机理研究

郑泽松¹,熊传祥¹,王 涛²

(1.福州大学 环境与资源学院,福建 福州 350116;

2.中化地质矿山总局福建地质勘查院,福建 福州 350013)

摘 要: 利用颗粒离散元软件 PFC^{3D},通过三轴实验与数值实验结果对比,得到与宏观参数相对应的细观参数,选取两组顺倾结构面,建立边坡模型,分析坡体破坏的细观机理。模拟结果表明,坡体的破坏往往会追踪软弱面,沿最危险滑动面发生移动;边坡颗粒沿最危险面朝坡底移动,坡体内部应力重新分布,两个方向的应力都沿临空面方向有偏移;速度矢量在原坡肩位置附近最大,其愈往坡体内部速度愈小;当多组软弱面坡体内部微裂缝数量足够多时,会形成连续贯通的滑移面,造成边坡的滑移。数值模拟的结果与实际较为吻合,表明采用颗粒离散元法研究发育软弱结构面土坡的破坏机理是可行的。

关键词: 结构面土坡;颗粒离散元;破坏机理;细观模拟

中图分类号: TU432

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2019)01-0092-05

Meso-mechanical Failure Mechanism of Soil Slope with Weak Structural Planes

ZHENG Zesong¹, XIONG Chuanxiang¹, WANG Tao²

(1. College of Environment and Resources, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350116, China;

2. Fujian Geological Exploration Institute, Sinochem General Bureau of Geology and Mineral Resources, Fuzhou, Fujian 350013, China)

Abstract: In this paper, by using the particle discrete element software PFC^{3D}, and based on the comparison of the results of the triaxial experiment and the numerical experiment, the mesoscopic parameters corresponding to the macroscopic parameters are obtained, and two sets of the inclined structure planes were determined to establish the numerical slope model to analyze the meso-mechanical failure of soil slope. The simulation results show that the failure of the slope tends to track the weak surface and move along the most dangerous sliding surface. The slope particles move along the most dangerous surface toward the bottom of the slope, the internal stress of the slope is redistributed and the stresses in both directions are offset along the direction of the free surface, the velocity vector is the largest near the original shoulder position of the slope and the inside more, the smaller. When the number of micro-cracks in slope with weak structural planes is enough, a continuous slip surface will be formed and the slope slip. The results of numerical simulation are in good agreement with the actual ones, which indicates that it is feasible to study the failure mechanism of soil slopes with weak structural planes by particle discrete element method.

Keywords: soil slope with weak structural plane; particle discrete element method; failure mechanism; meso-mechanical numerical simulation

边坡稳定性一直是岩土界关心的问题,由于环境地质条件的差异,导致其破坏过程和影响因素复杂多变,坡体的变形、失稳从本质上是坡体为了自身达到平衡状态的自我调整过程。目前对节理软弱面

的研究多集中在岩质边坡,如李馨馨等^[1]、潘皓等^[2]、Jiang 等^[3]、杜光勤等^[4]、Su 等^[5]、曾海艳等^[6]对多节理岩质边坡稳定性进行了模拟分析。但对土坡中裂隙软弱面研究的较少,因此本文选取福建安

溪县深厚的花岗岩残积土为研究对象,分析发育多组软弱面土坡的破坏机理。

离散单元法是一种模拟非连续介质大变形的数值模拟方法,目前广泛应用于岩石力学、土力学等领域的数值模拟。目前,ITASCA 公司的颗粒流模拟软件 PFC^{3D}是基于离散元理论的优秀商业软件之一,其原理是将非连续介质集合体离散成独立的颗粒单元,反复运用牛顿第二定律更新各颗粒的运动状态,并结合力-位移定律,建立每个颗粒的运动方程,通过循环运算,采用显式中心差分法求解方程^[7]。该方法只需定义颗粒的接触关系即可,跳过了给土体定义本构模型的复杂步骤,便于模型的建立。利用离散元理论,苗晨曦等^[8]、任刚等^[9]、李晓锋等^[10]、黄玉祥等^[11]、史旦达等^[12]、朱德福等^[13]分别研究了土工格栅材料的复合性能、结构面岩质高边坡失稳预测、类节理岩石直剪试验力学特性、深松土壤扰动行为、饱和砂土自由场地地震液化特性以及破碎岩体压实特性,结果均与试验较为符合,验证了其在数值分析方面所具有的优越性。由于土是特定的自然地质环境中形成的松散堆积物,基于离散元理论的 PFC^{3D}通过考虑土体材料本身的不连续性,从细观角度对土坡破坏的整个过程进行模拟。

1 研究区软弱面描述

安溪县地层以中生界侏罗系火山岩分布最广,其中以燕山期形成的各类花岗岩为主,出露面积约 998 km²,约占全县总面积的 1/3^[14]。这为发育疏松、深厚的基岩风化壳提供了良好的物质基础,由于花岗岩原岩中存在大量原生和构造结构面,这些结构面相互切割穿透,随着花岗岩风化成土,花岗岩残积土内部也残存了部分花岗岩的结构和构造特征,使花岗岩风化壳中存在大量的软弱结构面,并且在风化过程中还将产生次生节理和卸荷裂隙等软弱面。由于这些结构面的存在,使花岗岩残积土风化剧烈,且往往是地下水富集区,导致岩土力学性质变差^[15],相应地,坡体的破坏往往会追踪这些软弱面。若忽略这些结构面影响是不切合实际的,因此,本文根据花岗岩残积土中结构面特点,分析花岗岩残积土中存在软弱结构面时边坡的破坏机理。

某公路段穿过深厚的花岗岩残积土层,地层以残积砂土层为主,底部为碎块状强风化。经现场调查发现,软弱面产状主要存在 4 个明显的优势面,即 238°∠79°、115°∠74°、323°∠23°、338°∠47°的优势面。随着人工开挖边坡,其内部发育的软弱结构面暴露于地表,不良地质结构面组合对边坡稳定性有直接影响,尤其是顺倾的软弱面,因此本文将对此开挖边坡进行仿真模拟,研究软弱结构面对土坡破坏机理造成的影响。

2 建立计算模型

2.1 边坡模型尺寸的选取

本文参照福建省安溪县某一典型开挖边坡,为简化数值模拟工作,本文模型材料选用单一的花岗岩残积砂土层作为研究对象,模型概化后,取单位宽度进行分析。模拟区域长 15 m,高 13 m,其中坡高为 10 m,坡顶宽度为 8 m,坡底宽度为 11 m,坡率为 1:0.33,具体尺寸如图 1 所示。

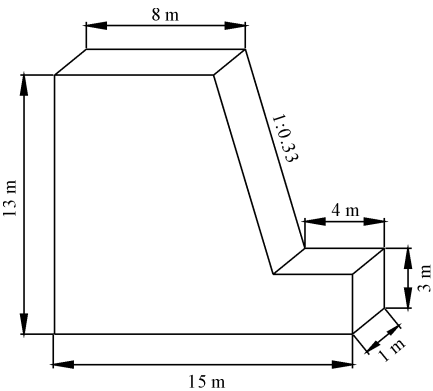


图 1 边坡模型尺寸示意图

2.2 细观参数的选取

PFC^{3D}模拟要求数值模型的力学特性与实际材料相符,而对于颗粒大小并不要求与实际一致,且若颗粒大小取用与实际土颗粒大小一致,计算量将极其浩大,由于本论文主要是讨论多组裂隙发育情况下边坡的破坏机理,而非具体量值,因此模拟所用颗粒大小取自数值三轴试验,其物理力学性质与地基土相符合。通过建立 PFC^{3D}数值三轴试验模型,并与室内三轴试验应力应变曲线拟合,最终获得花岗岩残积土的细观参数,具体见表 1。

表 1 残积砂土的细观参数

颗粒半径 /m	孔隙率	颗粒初始 摩擦系数	颗粒密度 /(kg·m ⁻³)	法向刚度 /(N·m ⁻¹)	切向刚度 /(N·m ⁻¹)	法向黏结 力/N	切向黏结 力/N
0.12~0.16	0.40	0.30	2720	1.0×10 ⁷	1.0×10 ⁷	6.0×10 ³	4.0×10 ³

2.3 软弱面的生成及属性设置

在 PFC^{3D}中,通过 JSET 命令来设置岩土体内部的软弱结构面,能够很好地模拟颗粒组间的滑移和分离^[16]。但只有在颗粒间存在法向接触力的情况下,才能够设置节理面接触,因此,节理面需在模型颗粒生成并达到平衡后才能执行。JSET 命令可以单独生成一条或者一组软弱结构面,通过配合 Dip 和 Origin 关键词,能够在指定位置生成软弱结构面,其中 Dip 是指结构面的倾角,Origin 是指软弱面所经过的某一点的坐标。最后,采用 PROPERTY 命令赋予节理面属性。根据崩岗坡体内部软弱结构面的胶结和充填情况,将其细观参数设置为坡体颗粒连接强度的二分之一,软弱结构面的细观参数见表 2。

表 2 软弱结构面细观参数

软弱结构面 倾角/(°)	软弱面摩 擦系数	法向黏结 力/N	切向黏结 力/N
20/45	0.15	3.0×10^3	2.0×10^3

2.4 建立边坡模型

本文 PFC^{3D}建立的坡体模型由两个长方体和一个三棱柱组成,且各自在 x 、 y 、 z 方向的尺寸分别为 $1\text{ m} \times 15\text{ m} \times 3\text{ m}$ 、 $1\text{ m} \times 8\text{ m} \times 10\text{ m}$ 和 $1\text{ m} \times 3\text{ m} \times 10\text{ m}$ 。

模型由 8 道墙面限制外边界,其中在 3 个区域内不重叠、随机生成的颗粒粒径范围在 $0.12\text{ m} \sim 0.16\text{ m}$,生成颗粒总数为 7 047,模型孔隙率为 0.40。生成颗粒时,先生成 $1/2$ 粒径的颗粒,然后再将粒径扩大 2 倍,以使前后生成的颗粒不发生重叠。模型采用接触粘结,首先进行先期土体自重平衡计算,运行计算 9 000 时步,使颗粒平均不平衡力与平均接触力的之比小于 0.1%,即可认为坡体模型达到初

始稳定^[17],方能进行后续计算。由于顺倾软弱面对坡体的稳定性影响更大,选取两组顺倾结构面进行分析。此时通过 JSET 命令对模型进行软弱结构面设置,两组结构面倾角分别为 20° 、 45° ,间距均取 1.5 m,具体模型见图 2。

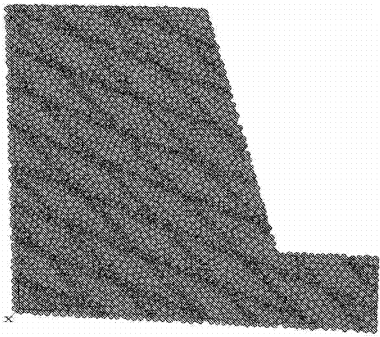


图 2 多组软弱结构面 PFC^{3D}模型示意图

3 模拟结果分析

3.1 坡体破坏形态分析

用深色网格将模型划分成不同区域,以便于坡体破坏形态观测(见图 3)。模型计算到 10 000 时步时,坡顶在 $y = 4\text{ m}$ 处附近沿着节理面出现一条张裂缝,坡体在坡脚处附近沿节理面出现微小的隆起,坡体内部颗粒沿着软弱面有微小错动,坡肩有少量的沉降变形(见图 3(a))。计算到 20 000 时步时,坡体沿着最危险滑动面发生滑移,滑塌体表明有少量颗粒发生剥落,坡底受到挤压,产生向上的隆起现象(见图 3(b))。计算到 30 000 时步时,坡体变形量增大,滑动面后缘与软弱面重合,坡底颗粒向上隆起量增大(见图 3(c))。计算到 40 000 时步时,滑塌体内部结构较为破碎,堆积于坡底(见图 3(d))。

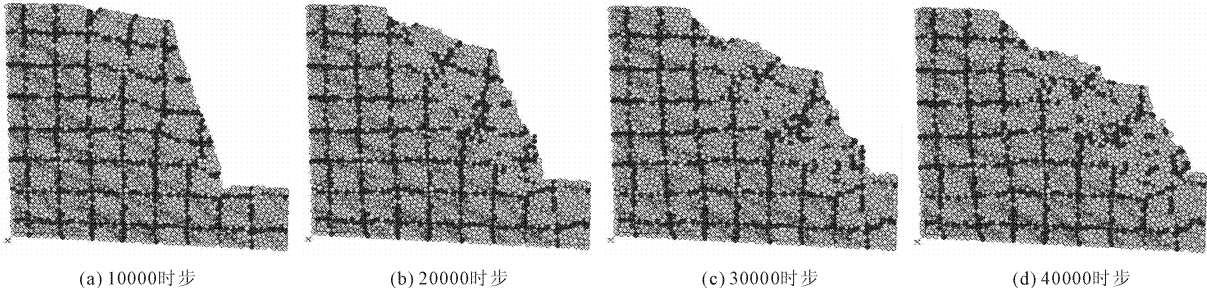


图 3 多组软弱结构面坡体破坏形态图

3.2 坡体应力分析

通常情况下,在分析连续体介质力学性质时,计算的是应力和应变,但在离散介质中却难以计算应变。离散介质是由一定数量的颗粒组成,其中各个

颗粒会发生平动和转动,从而极大地影响到整个颗粒集合体的力学性质,因而可对此颗粒集合体给出一个平均的应变^[18]的概念,即将岩土体视为由众多颗粒集合体所组成的材料,并在代表性部位设置测

量区,取测量平均值作为岩土体的应力和应变。PFC^{3D}在模型中可以设置测量圈,每个测量圈内包含一定数量的颗粒,可以记录不同情况下以及不同运算时步下测量圈内的孔隙率、应力和应变等变化规律。

为了获得初始强度条件下崩岗坡体的应力等值线图,可以在边坡内部设置足够多的测量圈(见图4),利用自编 FISH 程序,把测量圈的应力数据导出,通过 Surfer 绘图软件能将边坡的应力等值线画出。

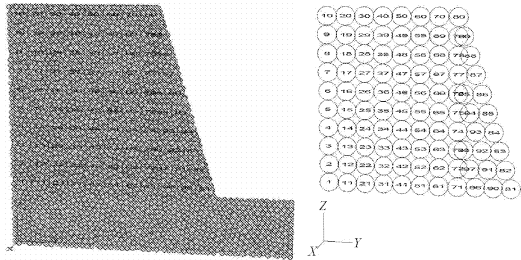


图 4 坡体内部测量圈设置图

由于边坡发生较大的变形破坏,颗粒沿最危险面朝坡底移动,坡体内部应力重新分布,两个方向的应力都沿临空面方向有偏移。在原坡肩部位附近颗粒发生滑移,此处测量圈内部没有颗粒存在,实际上应力数值为 0 kPa,但由于边坡应力是通过 Surfer 软件自动填充完成,因此与实际情况略有差异,但此附近颗粒应力等值线特别疏松。 y 方向最大压应力在坡底中部位置,数值为 65 kPa(见图 5)。 z 方向最大压应力在坡体左下角,数值为 170 kPa(见图 6)。结果基本符合实际边坡中水平与竖向应力的关系,即水平应力等于竖向应力乘以侧压力系数。

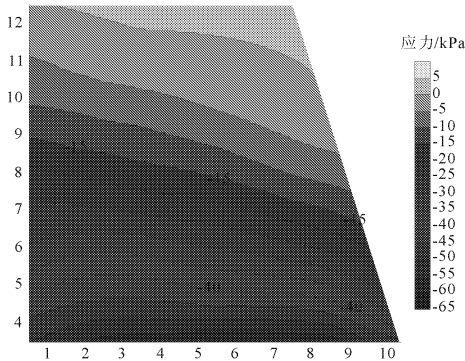


图 5 y 方向应力等值线

3.3 边坡位移分析

坡体位移等值线如图 7、图 8 所示, y 方向颗粒最大位移在滑塌体最前沿位置,数值范围在 3.85 m ~ 4.62 m 之间,位移等值线并不光滑,呈锯齿状,滑动面总体呈圆弧面。 z 方向颗粒最大位移在滑塌体中上部位置,即原坡肩附近,数值范围在 4.25 m ~

5.10 m 之间, z 方向位移等值线呈块状,具有明显的锯齿形,且比 y 方向位移等值线更明显。从图中可以推断出,坡体内大量软弱面对坡体的滑移变形有较大影响。

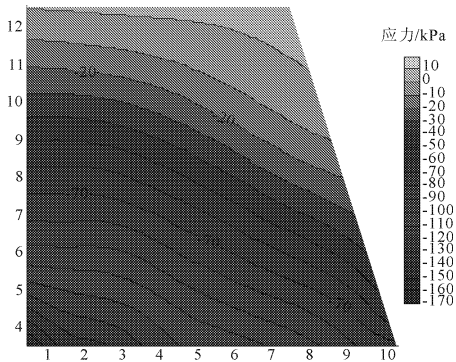


图 6 z 方向应力等值线

3.4 速度矢量分析

从坡体的颗粒的速度矢量图可以看出(见图 9),颗粒的最大速度为 0.641 9 m/s²,速度矢量在原坡肩位置附近最大,愈往坡体内部速度愈小。滑塌体主要速度矢量方向超坡底往下,当在滑动面附近速度矢量方向较杂乱,各个方向都有,这是由于滑动面附近颗粒由于颗粒发生滚动的原因。

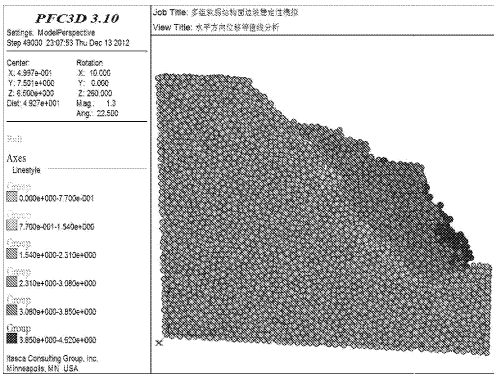


图 7 y 方向位移等值线图

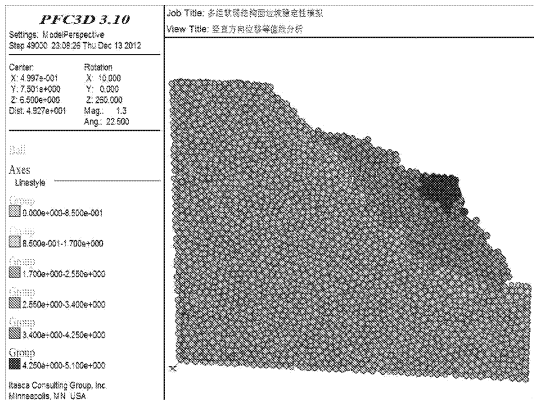


图 8 z 方向位移等值线图

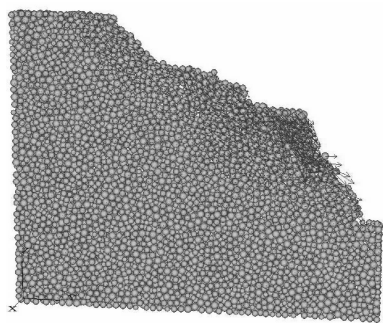


图 9 边坡速度矢量图

3.5 微裂缝发展情况分析

由于边坡计算为接触粘结模型,通过 FISH 语言编程,可以记录颗粒间的接触开裂情况,只要接触被破坏就判定为发生一个微裂缝,边坡内部微裂缝发展情况下:开始时,坡体内部微裂缝增加速率较快,曲线较为陡峭;随着边坡开始发生滑移,微裂缝发生增加速率逐渐趋于平缓。坡体内部一共有 32 987 个接触粘结,当模型运行 40 000 时步时,微裂缝发展数量为 6 847 个,可以看出坡体发生滑移后,粘结破坏数量占总数的 20.76%。

通过统计微裂缝发展个数、观察微裂缝的发展变化,可以推测出,当微裂缝数量足够多时,在重力作用下,容易在边坡中逐渐形成连续贯通面,导致坡体发生滑移破坏。

4 结 论

本文借助颗粒离散元软件 PFC^{3D}的优势,建立多组软弱结构面边坡数值模型,从细观角度研究土坡的破坏机理,以下是本文获得的主要结论:

发育多组软弱面边坡的破坏往往会追踪软弱面,沿最危险滑动面发生移动;边坡颗粒沿最危险面朝坡底移动,坡体内部应力重新分布,且两个方向的应力都沿临空面方向有偏移;速度矢量在原坡肩位置附近最大,其愈往坡体内部速度愈小;当多组软弱面坡体内部微裂缝数量足够多时,会形成连续贯通的滑移面,造成边坡的滑移。

参考文献:

- [1] 李馨馨,徐 青,王书法.节理岩质边坡稳定性分析及其工程应用[J].武汉大学学报(工学版),2014,47(2): 171-176.
- [2] 潘 皓,张 鹏,李俊才.影响双向节理岩质边坡稳定性因素的灰色敏感性分析[J].南京工业大学学报(自

然科学版),2014,36(3):94-100.

- [3] Jiang M, Jiang T, Crosta G B, et al. Modeling failure of jointed rock slope with two main joint sets using a novel DEM bond contact model[J]. Engineering Geology, 2015,193:79-96.
- [4] 杜光勤,鲁志强,汤 华.两组节理控制下的公路岩质边坡稳定性分析及防控措施研究[J].应用力学学报,2016,33(1):150-155.
- [5] Su Q I N, Yunan L I, Pan L. Numerical analysis for stability and failure characteristic of intermittent jointed rock slope [J]. Low Temperature Architecture Technology, 2017, 12: 40.
- [6] 曾海艳,吴玉龙,张建海.基于 DEM-LEM 考虑裂隙扩展的岩质边坡稳定性分析[J].水利与建筑工程学报,2018,16(3):170-174.
- [7] 王宏宇,李 博,黄坤岭.颗粒流软件 PFC 及其在岩土工程中的应用[J].建筑工程技术与设计,2015(12): 142.
- [8] 苗晨曦,郑俊杰,崔明娟,等.三向土工格栅筋土界面及摩擦特性的离散元模拟[J].岩土力学,2014,35(S1): 423-430.
- [9] 任 刚,邢 民,荆艳会,等.受控于结构面的岩质高边坡失稳预测技术研究[J].水利与建筑工程学报,2015, 13(6):48-53.
- [10] 李晓峰,李海波,夏 祥,等.类节理岩石直剪试验力学特性的数值模拟研究[J].岩土力学,2016,37(2): 583-591.
- [11] 黄玉祥,杭程光,苑梦婵,等.深松土壤扰动行为的离散元仿真与试验[J].农业机械学报,2016,47(7):80-88.
- [12] 史旦达,王 飞.饱和砂土自由场地地震液化的离散元模拟[J].上海海事大学学报,2017,38(3):96-102.
- [13] 朱德福,屠世浩,袁 永,等.破碎岩体压实特性的三维离散元数值计算方法研究[J].岩土力学,2018,39(3):1047-1055.
- [14] 叶龙珍.福建省安溪县地质灾害发育特征及影响因素分析[J].地质灾害与环境保护,2011,22(2):46-49.
- [15] 陈 玮,简文彬,董岩松,等.软弱结构面对花岗岩残积土边坡稳定性影响[J].中国地质灾害与防治学报,2015,26(1):23-30.
- [16] Itasca Consulting Group, Inc. PFC3D user's manual[M]. Version 3.1. Minneapolis: Itasca Consulting Group, Inc, 2005.
- [17] 何 亮.山区公路路基与下边坡在车辆荷载作用下的动力响应分析[D].重庆:重庆大学,2013.
- [18] 刘 洋,周 健.离散介质中应变计算的非线性插值方法[J].岩土工程学报,2006,28(9):1129-1133.