

文章编号: 1008-2786-(2013)6-710-06

# 降雨作用下崩岗形成细观机理模拟

熊传祥<sup>1</sup> 王 涛<sup>1</sup> 鲁晓兵<sup>2</sup>

(1. 福州大学 环境与资源学院 福建 福州 350108; 2. 中国科学院力学研究所 北京 100190)

**摘 要:** 崩岗是我国南方地区一种特殊水土流失现象。利用颗粒流 PFC<sup>3D</sup> 软件,结合流体力学数值模拟有限体积法,通过三轴实验与数值试验结果对比,获得与宏观参数相匹配的细观参数,建立崩岗坡体模型。通过模拟不同降雨强度,再现崩岗坡体渐进性破坏过程。崩岗的形成历经裂隙发生、发展直至崩滑面贯通,最后崩岗产生。在高强度降雨条件下崩岗具有分块、分级特点。与此同时,对崩岗形成过程中岩土体渗透系数、孔隙水压力与坡面渗流量等变化发展规律也进行了研究。渗透系数总趋势随着时间的推移先增大,到达峰值后减小;而渗流量却表现为增加,当降雨强度大时,还表现为跳跃式增长。孔隙水压力在低降雨强度下,增长后随后稳定;在高降雨强度下,波动较大。研究结果与实际较为吻合,表明采用颗粒流研究崩岗的形成机理是可行的。

**关键词:** 崩岗; 降雨; 颗粒流; 细观数值模拟

**中图分类号:** P642.21 X141

**文献标志码:** A

崩岗侵蚀作为一种严重的水土流失类型,在我国南方地区,特别是花岗岩低山丘陵区分布十分广泛。崩岗造成土壤生产力降低,淤塞江河水库,破坏不可再生的土壤资源,危害重大。近年来,崩岗形成机理,引起了学者的广泛关注。阮伏水<sup>[1]</sup>、牛德奎<sup>[2]</sup>、丁光敏<sup>[3]</sup>、王彦华<sup>[4]</sup>、林敬兰<sup>[5]</sup>等认为重力结合水力侵蚀是崩岗形成的主要原因。许多学者还从地貌、岩土层分布与特征进行了深入的探讨。研究表明,崩岗形成机理研究及演化特征主要是由重力侵蚀、水力侵蚀与风化膨胀提供动力,岩性特征是控制崩岗形成的内因;而气候等则是崩岗形成的外因。

颗粒流法是一种新颖的数值计算方法,用于模拟松散介质大变形问题具有极大的优势。采用该方法,无需假定材料本构关系,无需满足变形协调条件,无需假定滑裂面,直接从细观上定义颗粒之间的接触关系,交替应用力-位移定律和牛顿运动定律,计算边坡内部土颗粒求得稳定状态的自然调整过程,通过可视化直接描述崩岗坡体滑裂面的几何形状和位置、裂缝的开展及崩塌形成的整个过程。

近年来,颗粒流法在山地灾害研究中广泛应用。郑智能等<sup>[6]</sup>基于颗粒流理论,运用 PFC<sup>2D</sup> 软件模拟出各种形状落石沿着边坡自由落体、滚动等运动形式。周健等<sup>[7]</sup>利用离散元软件 PFC<sup>2D</sup> 对黏性土坡和砂性土坡变形破坏进行模拟。董金玉等<sup>[8]</sup>基于三峡库区软硬互层高切边坡分布较广,利用离散元软件对此边坡的崩塌破坏过程进行数值模拟,研究发现其破坏过程表现为泥岩剥落-岩腔-砂岩裂隙张开-危岩体弯曲-倾倒崩塌-堆积。以上研究成果深化了山地灾害机理的研究。

崩岗坡体是由一系列细小的土颗粒组成的,考虑到其结构的复杂性,采用连续介质力学无法直观地判断坡体内部裂隙发育情况及破坏过程中渗透系数变化、孔隙水压力等的变化。本文针对上述问题,采用颗粒离散元对崩岗的力学特性进行了研究,对崩岗发生、发展进行了细观方面的机理研究。通过求解平均 Navier-Stokes 方程计算流体动力学模拟崩岗发育的过程。由于风化膨胀力的研究还处于不充分的状态,研究过程没有涉及该方面的内容。

收稿日期(Received date): 2013-01-23; 改回日期(Accepted): 2013-04-15。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金(41002127)。[Project(41002127) supported by National natural Science Foundation of China.]

作者简介(Biography): 熊传祥(1967-),男,湖北公安人,博士,副教授,主要从事土力学与地质工程教学和科研工作。[Xiong Chuanxiang, male, born in Gonggan, Hubei province, Ph.D., associate professor, major in soil mechanics and geological engineering.] E-mail: xiongchxa@yahoo.com.cn

## 1 模型细观参数

离散元模型输入的是土体的细观参数,但目前试验手段无法直接获得材料的细观参数,要得到能正确反应宏观参数相对应的细观参数,首要的任务就是建立细观参数与宏观参数之间的关系。PFC<sup>3D</sup>模型采用粒径在一定的范围之内的圆形颗粒球体,通过调整各个力学性质参数,使模型的颗粒集合体反映出与真实情形下相同的土工颗粒,并在此基础上分析调整各不同参数对模拟结果的影响,通过对室内三轴试验的应力应变曲线进行拟合,最终获得与实际试样相适应的细观参数。

试验所采用的土样取自福建省安溪县龙门镇洋坑村某一典型的崩岗的残积砂土层,取土深度为3 m左右。室内试验采用重塑土样进行试验,试样为圆柱形,直径为61.8 mm,高度为125 mm,在围压为200 kPa状态下进行三轴试验,得到轴向应变 $\varepsilon$ 和偏应力 $q = \sigma_1 - \sigma_3$ ,绘出应力应变曲线。同时建立颗粒流的三轴试验模型,模拟其应力-应变关系曲线。考虑模拟对象的宏观尺度及计算机容量与计算速度,PFC<sup>3D</sup>模型相对三轴模型高、径比进行了同比例的放大,颗粒粒径也不同于实际粒径,即PFC<sup>3D</sup>模型为圆柱形,其直径为2.5 m,高度为5 m,颗粒粒径范围为0.08~0.16 m,粒径采用均匀分布,计算模型采用接触粘结模型,模拟过程中通过颗粒流内置的FISH语言伺服控制颗粒所处的应力状态,取围压为200 kPa进行数值三轴模拟试验,模型见图1。经过反复地调整PFC<sup>3D</sup>模型的输入参数,最终所得的拟合曲线如图2所示。

由上图的拟合结果,模型可获得一组能够符合实际的细观参数,其中颗粒间接触粘结的法向粘结力为5 kN,切向粘结力为5 kN,其他相应的颗粒

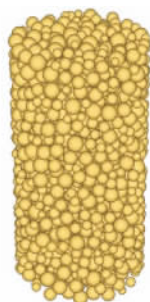


图1 PFC<sup>3D</sup>三轴试验模型图

Fig. 1 The model of triaxial test with PFC<sup>3D</sup>

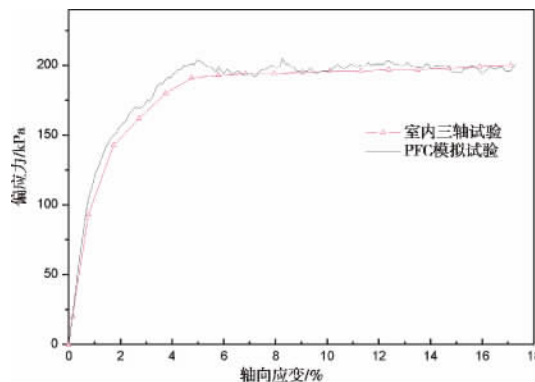


图2 PFC<sup>3D</sup>试验结果与室内测试曲线对比图

Fig. 2 Comparison between PFC<sup>3D</sup> model and lab test result

材料细观参数如表1所示。

表1 固体材料细观参数

Table 1 Mesoscopic parameters of solid materials

孔隙率	颗粒初始 摩擦系数	颗粒密度 /(kg/m <sup>3</sup> )	法向刚度 /(N/m)	切向刚度 /(N/m)
0.45	0.3	2 650	$1.0 \times 10^7$	$1.0 \times 10^7$

## 2 建立计算模型

崩岗的侵蚀过程主要是通过崩壁的崩塌作用来完成,崩壁一般较为陡峭。本文把崩壁假设为直立面。在建模过程中,如果按实际砂土颗粒尺寸进行模拟,得到的颗粒数量太多,一般计算机速度和容量还无法满足计算要求。由于主要研究是崩岗形成的破坏机制,而不是具体量的大小,在模拟过程中对颗粒的尺寸进行了放大。

### 2.1 崩岗坡体的初始形态

由于崩岗坡体都发生在近地表,构造应力与重力作用相比影响较小,因而建模过程中模型的初始地应力仅考虑重力作用,不考虑构造应力的影响。模型首先生成8道墙,组合成坡顶长度为10 m、高度为10 m、宽度为1 m的直立边坡边界(图3)。为了提高运算速率,模型墙选用无限墙。然后在该区域内随机生成颗粒,粒径范围为0.12~0.16 m,共生成7 569个颗粒,控制孔隙率为0.4,形成压实的颗粒集合,模型采用接触粘结计算模型,先进行9 000时步的运算,使其在自重和颗粒间的摩擦下达到稳定状态,此时颗粒的平均不平衡力与平均接触力的比值<0.1%,平均不平衡力已收敛,坡体处于初始稳定状态。为了便于观察坡体变形,用两种不

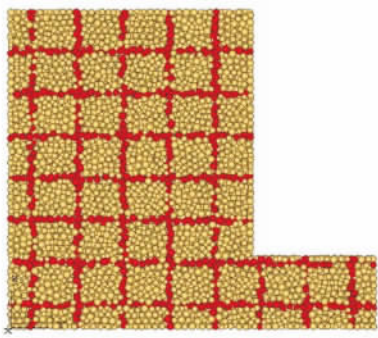


图3 崩岗的颗粒流模型

Fig. 3 The model of slope disintegration by PFC<sup>3D</sup>

同颜色颗粒把模型分隔成网格状,崩岗模型如图3所示。

## 2.2 模拟方案

降雨是崩岗发育的主要诱导因素,其主要作用是坡面径流冲刷和雨水渗透。雨水入渗使坡体含水量增大,容重相应增加,孔隙水压力变大,使非饱和区的饱和度逐渐增大,基质吸力降低,导致抗剪强度减低;而渗流时常与滑动面倾向方向一致,增加崩塌体的切向下滑力,从而影响到崩岗坡体的稳定性。

为了模拟在降雨作用下崩岗的破坏形式,PFC<sup>3D</sup>提供了在笛卡尔坐标下求解不可压缩流体的连续方程和 Navier – Stokes 方程,用来模拟土体孔隙中流体的运动。由于 PFC<sup>3D</sup>数值软件中不能直接施加雨量的大小,需要通过在边界条件上施加压力来转换,用压力来表示降雨的大小,降雨愈大,所施加的压力就愈大,产生的水力梯度也就愈大,即分别用压力  $p$  为 1 kPa、4 kPa 和 8 kPa 来代表不同大、小雨对坡体的影响。

模型中共设置了 450 个流体单元,每个单元的尺寸均为  $0.5 \text{ m} \times 0.67 \text{ m} \times 0.67 \text{ m}$ ,这样使每个流体单元只包含了一定数量的土颗粒,易于获取单元水压力和流体的速度。崩岗坡体左侧和底面设置为不透水边界,坡顶为雨水入渗边界,右侧坡面为雨水排水面。模型在试样顶面施加一非零水压  $p$ ,试样右侧的压力为 0,这样形成了一压力水头差,其渗流方向由上向左。并把其他墙面设置为滑动边界。模型中流体参数见表 2。

## 3 模拟结果分析

### 3.1 崩岗坡体渗流特征

#### 3.1.1 渗透系数变化特征

崩岗坡体从变形发展到破坏,是一个复杂的动态力学过程,随着崩岗坡体的变形,应力发生调整,由于其内部裂隙面逐渐张开增大,土体的渗透性发生改变,流体运动处于非达西渗流状态。为了获得坡脚渗透系数的变化,模型中采用 Kozeny – Carman (KC) 方程估算崩岗坡体的渗透系数,它是多孔介质渗流领域最著名的半经验公式,其表达式为

$$k = c \frac{\bar{d}^2 n^3}{(1 - n)^2}$$

式中  $c$  取 0.003,  $\bar{d}$  是颗粒的平均直径。

坡脚处的渗透系数变化曲线如图 4 所示,由于渗透系数是由孔隙率推导出来的,两者之间的曲线变化规律具有一致性。即渗透系数总趋势随着时间的推移先增大,到达峰值后减小。压力越大时,渗透系数就越先达到峰值,由于渗透系数越大,坡体受到的渗透力也越大,使崩岗坡体容易发生破坏。

表2 数值模拟流场参数

Table 2 Parameters for seepage simulation

流体密度 $/(\text{kg}/\text{m}^3)$	黏滞系数 $/(\text{Pa} \cdot \text{s})$	流体单元尺寸 $/(\text{m} \times \text{m} \times \text{m})$	CFD 计算 时步/s	重力加速 度 $/(\text{m}/\text{s}^2)$
1 000	$1.0 \times 10^{-3}$	$0.5 \times 0.67 \times 0.67$	$5.0 \times 10^{-4}$	9.8

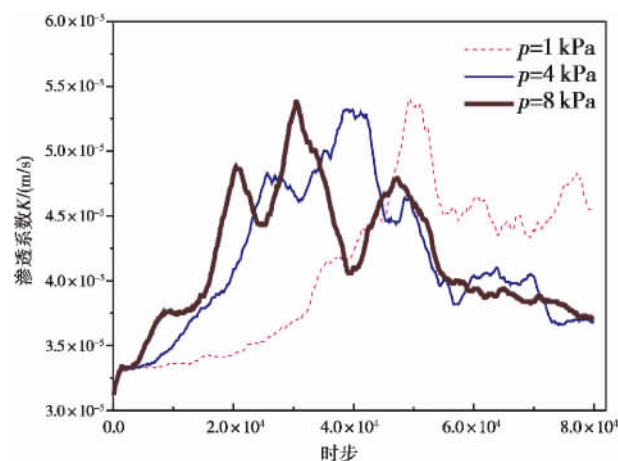


图4 渗透系数随时步的变化过程

Fig. 4 Variation of permeability with time step

#### 3.1.2 孔压特征

当开始进行流固耦合计算时,先运行模型 100 时步后,通过自编 FISH 语言,将每个流体单元的坐标和超孔隙水压力导出,借助 surfer 绘图软件,绘出坡体内的超孔隙水压力分布。图 5 分别为压力为 1 kPa、4 kPa 和 8 kPa 初始孔压分布特征。从图上可以看出,在不同降雨强度作用下,坡体初始孔压分布

形态基本一致,一般在坡顶左侧超孔隙水压力最大,而在坡脚附近超孔隙水压力为最小,坡体中部介于两者之间。超孔隙水压力在坡肩附近水力梯度变化最大,愈远离坡肩水力梯度愈小。

图6为坡脚处不同压力下超孔隙水压力与计算时步增长模式图,在坡脚处,当压力为 $p=1$  kPa时,超孔隙水压力开始时为负值;随着时步的增加,超孔隙水压力快速增大,随后基本上稳定在一个值上,孔隙水压力较为稳定。而当压力为 $p=4$  kPa和 $p=8$  kPa时,超静孔隙水压力都为正值,且波动较大,出现了两次峰值,随后都下降的规律。

### 3.1.3 坡面流量

模拟过程可得到整个崩岗坡体内的水流平均流速,通过右侧面流体单元计算试样侧面的排水流量,不同降雨条件下,流量随时间变化的趋势如图7所示。结果表明:在降雨较小的条件下( $p=1$  kPa),右侧排泄流量随着时步的增加,增加的较为平缓;但随着降雨量的加大,右侧坡面排泄流量随着时步的增加而逐渐增加,甚至出现了跳跃式变化( $p=8$  kPa)。在降雨条件扩大情况下( $p=4$  kPa  $p=8$  kPa),右侧坡面排泄流量在5 000步内增加梯度较大。不难看出,流量与水力梯度不呈线性关系,不符合达西定律,但符合实际情况。

花岗岩残积土、砂土状强风化花岗岩及碎裂状强风化花岗岩都具有崩解性(室内实验在静水条件下完成),在“紊流”作用下,其崩解速度更快,土体强度弱化更快。

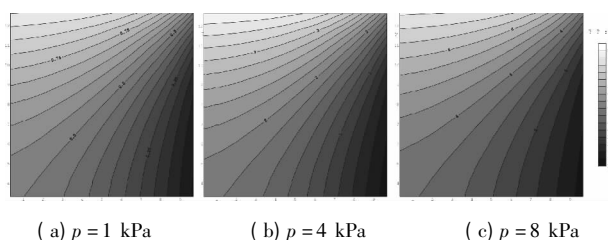


图5 崩岗坡体初始孔隙水压力等值线图(单位: kPa)

Fig. 5 Initial pore pressure isogram of slope disintegration( unit: kPa)

## 3.2 崩岗形成过程

当降雨强度为1 kPa时,崩岗坡体破坏形态如图8所示。当模型运行7 500时步时,坡体首先在距离坡肩约3 m处出现张裂缝,在其附近坡顶有微小的沉降,而在坡脚处附近土体有微小的隆起(图8(a));当模型运行15 000时步时,滑动面沿着张裂缝延伸至坡脚处并贯通,滑塌体在坡脚处附近大量

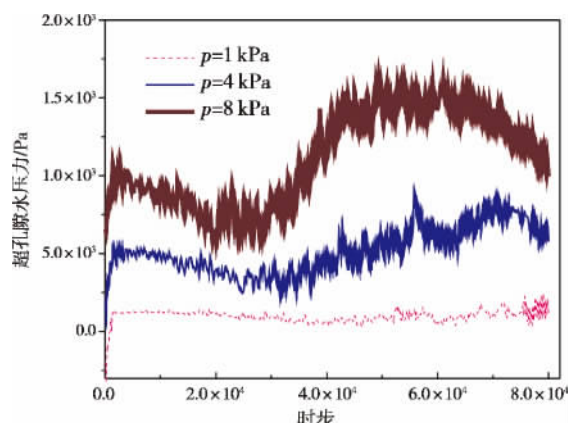


图6 超孔隙水压力随时步的变化曲线

Fig. 6 Variation of pore pressure with time step

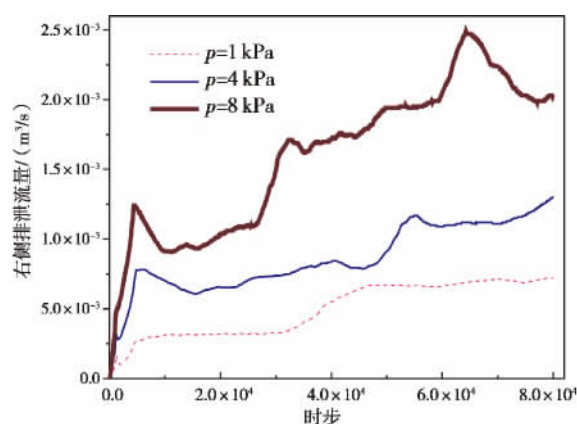


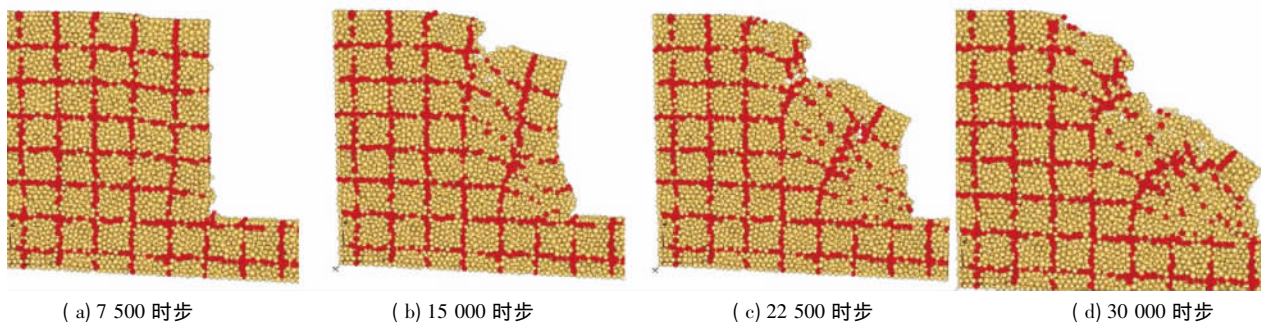
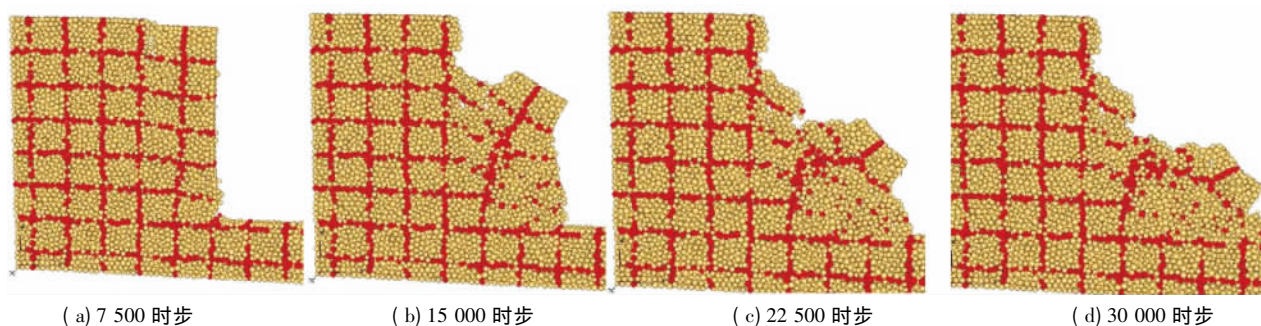
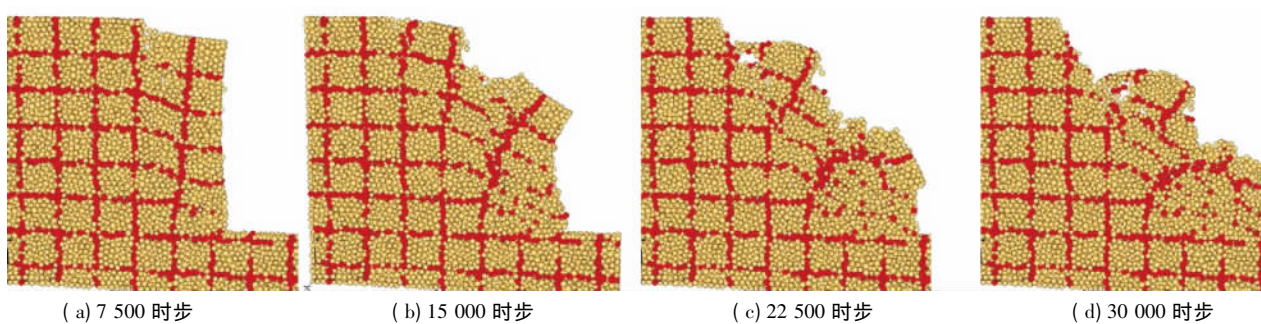
图7 侧面排泄流量随时步的变化曲线

Fig. 7 Variation of discharge flow rate at the lateral with time step

涌出,坡肩部分向下崩滑(图8(b));当模型运行22 500时步时,滑塌体变形量显著增大,此时,由于滑塌体的牵引作用,使后缘滑动面坡体发生朝向临空面的变形(图8(c));当模型运行30 000时步时,滑塌体沿着滑动面运动至坡底,此时滑塌体下部颗粒松散破碎,而顶部土体仍保持原有土体结构,且滑动面后缘土体也朝临空面发生滑移变形(图8(d))。

当降雨强度为4 kPa时,崩岗坡体破坏形态如图9所示。坡体首先在距离坡肩约3 m处出现张裂缝,而在坡脚处附近土体隆起明显,坡面有少量颗粒滚出(图9(a));边坡沿着张裂缝向下出现崩滑塌,两侧土体颗粒有明显拖曳现象,颗粒从坡脚处大量隆起(图9(b));崩塌体朝坡底继续下滑变形,但滑动面后缘没有继续坍塌,较为陡峭(图9(c));崩塌体最后逐渐稳定在坡底,整个崩塌体上部仍保持原有土体结构,而下部较为松散破碎(图9(d))。



图 8  $p = 1$  kPa 时崩岗坡体破坏形态图Fig. 8 Failure form of slope disintegration by  $p = 1$  kPa图 9  $p = 4$  kPa 时崩岗坡体破坏形态图Fig. 9 Failure form of slope disintegration by  $p = 4$  kPa图 10  $p = 8$  kPa 时崩岗坡体破坏形态图Fig. 10 Failure form of slope disintegration by  $p = 8$  kPa

当降雨强度为 8 kPa 时,崩岗坡体的破坏形态见图 10。坡体由于受降雨产生的渗流力的影响,首先在距坡肩约 3 m 处出现张裂缝,在坡脚处附近为产生剪出口,此时滑塌体沿着最软弱面发生较小相对错动(见图 9(a));由于坡体内所受的渗流力较大,在滑塌体沿着滑动面下滑过程中,由于卸荷和张拉的影响,使滑动面后缘坡体出现第二条张裂缝,距离第一条张裂缝约 3 m 处(图 10(b));第二条张裂缝逐渐扩大,并沿着此时的最软弱面出现滑动,滑塌体向坡体进一步滑动(图 10(c));由于重力和水力的双重作用,两个滑动面逐渐形成一个大滑动面,滑塌体堆积在坡底处(图 10(d))。

## 4 结论

崩岗的形成机理是一个十分复杂的问题,采用传统的有限元方法对多孔介质中考虑渗透破坏问题的研究存在一定的局限性,而采用基于散体介质理论的 PFC3D,从土体的细观特性方面,模拟了崩岗坡体受降雨影响的破坏过程,能得到较好的效果。利用颗粒流模拟崩岗坡体的变形破坏过程,不需要假定其滑动面的位置和形状,颗粒根据所受到的接触力自行调整位置,最终从抗剪强度最弱的面发生剪切崩塌破坏。

由于土体的宏观特性是其细观参数的外在表现,通过模拟室内试验可获得与宏观参数相匹配的细观参数。然后建立崩岗模型,模拟可得到崩岗坡体在不同降雨强度下,随时间推移其渗透系数、孔隙率和超孔隙水压力等是不断变化的,这是由于土颗粒在降雨产生的渗透力和其自身重力影响下骨架颗粒重新排列,使土体的细观产生动态变化,也侧面说明了水土的相互作用贯穿了崩岗发育的全过程。通过不同压力差作用,可分析不同降雨强度雨水入渗规律及渗透力对崩岗土体破坏的影响,验证了采用PFC3D研究崩岗发育机理的可行性和有效性。

### 参考文献(References)

- [1] Ruan Fushui. Study on slump gully erosion and its control in fujian province[J]. Journal of Mountain Science 2003 21(6): 675-680 [阮伏水. 福建省崩岗侵蚀与治理模式探讨[J]. 山地学报, 2003, 21(6): 675-680]
- [2] Niu Dekui, Guo Xiaomin, Zuo Changqing, et al. Analysis of the distribution and environmental surroundings of collapsed hills land of red soil in south of china[J]. Acta Agricultrae Universitatis, 2000, 22(2): 204-208 [牛德奎, 郭晓敏, 左长清, 等. 我国南方红壤丘陵地区崩岗侵蚀的分布及其环境背景分析[J]. 江西农业大学学报, 2000, 22(2): 204-208]
- [3] Ding Guangmin. Causes and control patterns of collapse gully erosion in fujian province[J]. Bulletin of Soil and Water, 2001 21(5): 10-15 [丁光敏. 福建省崩岗侵蚀成因及治理模式研究[J]. 水土保持通报, 2001 21(5): 10-15]
- [4] Wang Yanhua, Xie Xiande, Wang Chunyun. Formation mechanism of calamities due to benggang processes of weathered granitic rocks[J]. Journal of Mountain Science, 2000, 18(6): 496-501 [王彦华, 谢先德, 王春云. 风化花岗岩崩岗灾害的成因机理[J]. 山地学报, 2000, 18(6): 496-501]
- [5] Lin Jinglan, Huang Yanhe. Review of study on formation mechanism of slope disintegration erosion and its problems[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2010, 17(2): 41-44 [林敬兰, 黄炎和. 崩岗侵蚀的成因机理研究与问题[J]. 水土保持研究, 2010, 17(2): 41-44]
- [6] Zheng Zhineng, Zhang Yongxing, Dong Qing, et al. Visual simulation of rock-fall of slope based on particle flow theory[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2008, 19(3): 46-49 [郑智能, 张永兴, 董强, 等. 边坡落石灾害的颗粒流模拟方法[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2008, 19(3): 46-49]
- [7] Zhou Jian, Wang Jiaquan, Zeng Yuan, et al. Simulation of slope stability analysis by particle flow code[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(1): 86-90 [周健, 王家全, 曾远, 等. 土坡稳定分析的颗粒流模拟[J]. 岩土力学, 2009, 30(1): 86-90]
- [8] Dong Jinyu, Yang Jihong, Wu Faquan, et al. Research on collapse of high cutting slope with horizontal soft-hard alternant strata in Three Gorges reservoir area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(1): 151-157 [董金玉, 杨继红, 伍法权, 等. 三峡库区软硬互层近水平地层高切坡崩塌研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(1): 151-157]

## Meso-mechanical Simulation of Slope Disintegration Erosion Under Rainfall

XIONG Chuanxiang<sup>1</sup>, WANG Tao<sup>1</sup>, LU Xiaobing<sup>2</sup>

(1. School of Environment and Resources, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;

2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract:** Slope disintegration is a special type of water and soil loss phenomenon in the south of China. Based on particle flow theory and finite volume method of fluid dynamics, the Meso-mechanical parameters obtained by comparing the PFC<sup>3D</sup> and that of triaxial test results, a numerical model of slope disintegration is set up. The gradual forming process of slope disintegration is simulated under different rain intensity. The results show the failure undergoes a process of fissure formed and developed until slope disintegration occurs. Under high rain intensity, it has the features of blocks and multi-grades. Meanwhile, the development of the permeability, pore pressure and seepage discharge in the slope are also discussed. Permeability increases with time passing until it arrives its maximum, then decreases; While the seepage discharge keeps increasing, especially sharply under heavy rain; The pore pressure under low rain intensity firstly increases, then is steady, but fluctuates under high rain intensity. The results of the research is similar to the site conditions, which proves the feasibility of particle flow theory in the study of mechanism of slope disintegration.

**Key words:** slope disintegration; rainfall; particle flow code (PFC<sup>3D</sup>); meso-mechanical numerical simulation