

文章编号:1673-9469(2022)04-0092-08

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2022.04.013

基于 PFC-Geostudio 耦合的边坡降雨变形破坏研究

朱志男^{1,2},李慧亭¹,陈羽¹,刘太辉¹,成昊凌¹

(1. 中国建筑第八工程局有限公司,甘肃兰州 730030;2. 西安交通大学 人居环境与建筑工程学院,陕西西安 710049)

摘要: 为研究降雨条件下边坡的变形破坏情况,建立典型边坡模型,通过有限元软件 Geostudio 进行渗流分析,将不同降雨强度下的边坡土体的含水量情况导入至颗粒流方法中,根据颗粒位置修改其重度、及接触参数,并对渗流区域施加渗流力,当降雨强度大于边坡入渗速度时,增加考虑坡面径流对颗粒的拖曳作用,分析了不同降雨强度下边坡变形情况以及滑坡破坏过程。研究表明,发生降雨时,边坡变形主要为沉降,最大变形产生在坡顶位置;当降雨强度较大时,坡脚颗粒会由于冲刷作用发生滑动,并诱发后部边坡土体发生渐进式牵引式滑坡。

关键词: PFC-Geostudio;降雨入渗;边坡稳定性;数值模拟

中图分类号: TU352.11

文献标识码: A

Study on Deformation and Failure of Slope Under Rainfall Condition Based on PFC-Geostudio Coupling Method

ZHU Zhinan^{1,2}, LI Huiting¹, CHEN Yu¹, LIU Taihui¹, CHEN Haoling¹

(1. China Construction Eighth Engineering Division Co., Ltd., Lanzhou, Gansu 730030, China; 2. School of Human Settlement and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shanxi 710049, China)

Abstract: In order to study the deformation and failure of the slope under rainfall conditions, a typical slope model was established, and the seepage analysis was carried out through the finite element software Geostudio. The water content of the slope soil under different rainfall intensities was imported into the particle flow method. The weight and contact parameters of the particles are modified according to the position of the particles, and seepage force is applied to the seepage area. When the rainfall intensity is greater than the maximum infiltration capacity of the slope, the dragging effect of the slope runoff on the particles is added. The deformation of the slope and the failure process of the landslide under different rainfall intensities are analyzed. The results show that when rainfall occurs, the slope deformation is mainly caused by settlement, and the maximum deformation occurs at the top of the slope; When the rainfall intensity is large, the particles at the toe of the slope will slide due to the scouring effect, and the soil mass of the rear slope will be induced to produce a progressive traction landslide.

Key words: PFC-Geostudio; rainfall infiltration; slope stability; numerical simulation

滑坡灾害对人类的生命财产安全造成了极大的威胁,根据国内外的滑坡记录,许多滑坡都是由降雨导致^[1]。2011年“9.16”特大暴雨诱发了四川省南江县数以千计的群发性缓倾角浅层土质滑坡^[2],2013年7月,在持续二十多天的降雨作用下,陕西省延安市全市有7594处发生滑塌,造成了42人遇难,经济损失达66.15亿元^[3,4]。可见,

研究降雨诱发滑坡的机理、分析边坡滑坡过程对提出边坡防灾减灾的对策具有重要意义。

目前国内外学者对降雨诱发滑坡做了大量的研究,研究方法主要为理论分析、室内试验与数值模拟^[5],由于数值模拟成本低、效果显著的特点被广泛应用^[6]。许方领等通过有限元软件 ABAQUS 软件分析了降雨入渗后的渗流场及位移和安全系

收稿日期:2022-04-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51568044);中建八局科技研发项目(2020-3-13)

作者简介:朱志男(1983-),男,山东兖州人,硕士研究生,高级工程师,主要从事建筑施工方面的研究。

数的变化规律^[7],王磊等利用有限元软件 Geostudio 软件分析了降雨条件下坡体含水率和孔压响应情况,并探讨了裂缝对陡坡稳定性的影响^[8]。通过有限元方法模拟渗流比较简单高效,但有限元方法难以考虑大变形,无法反映滑坡过程中裂隙的延伸过程,可以通过颗粒流方法来分析边坡的滑坡过程,近年来众多学者开始利用颗粒离散元的方法来研究边坡的稳定性,汪华安通过强度折减的方法借助颗粒流数值模拟研究了烟墩岭边坡在降雨工况下的变形破坏模式^[9],张家勇以贵州省开阳县鱼鳅坡滑坡为研究对象,通过 PFC3D 分析了滑坡的破坏过程^[10];吴谦通过 PFC3D 对黄土边坡降雨冲刷过程进行了流固耦合模拟,研究了降雨过程中边坡遭受侵蚀程度及水流侵蚀能力的分布规律^[11];但颗粒流方法缺乏有效的本构模型来反应饱和-非饱和应力应变关系,现有的 PFC-CFD 耦合方法计算效率较低,且流体网格形状较为规则单调,难以应用于工程实际。

为解决有限元方法无法计算大变形以及颗粒流方法中流体-颗粒耦合计算较为复杂的问题,本文将有限元与离散元相结合,提出了一种 PFC-Geostudio 耦合的方法,将有限元软件 Geostudio 的渗流计算结果导入到颗粒离散元方法中,通过等效方法来研究边坡在降雨条件下的变形情况以及滑坡过程。

1 PFC-Geostudio 边坡降雨模拟方法

降雨对边坡土体有三个方面的影响:(1)土体由天然状态转化为饱和/非饱和状态,重度增加,增大了下滑力;(2)土体强度参数减小,如摩擦角、内聚力等,增大滑坡风险;(3)土体内发生渗流,土颗粒受到渗流力的作用,当降雨强度较大时,坡表还会发生径流,对土颗粒产生拖曳力作用^[12]。因此,可通过 Geostudio 来计算渗流场,然后将渗流计算的结果导入至 PFC 方法中,根据颗粒所在位置的含水率,改变其重度与接触参数,实现降雨导致土体重度和强度参数的变化模拟;对渗流区域施加渗流力,当降雨强度较大时,额外考虑拖曳力,以实现降雨对土体的力学作用的模拟;通过以上方法即可在颗粒流中等效实现降雨效果,随后可进行边坡变形与滑坡分析,具体流程可见图 1。

1.1 Geostudio 渗流计算

有限元软件 Geostudio 内置的 SEEP/W 模块,

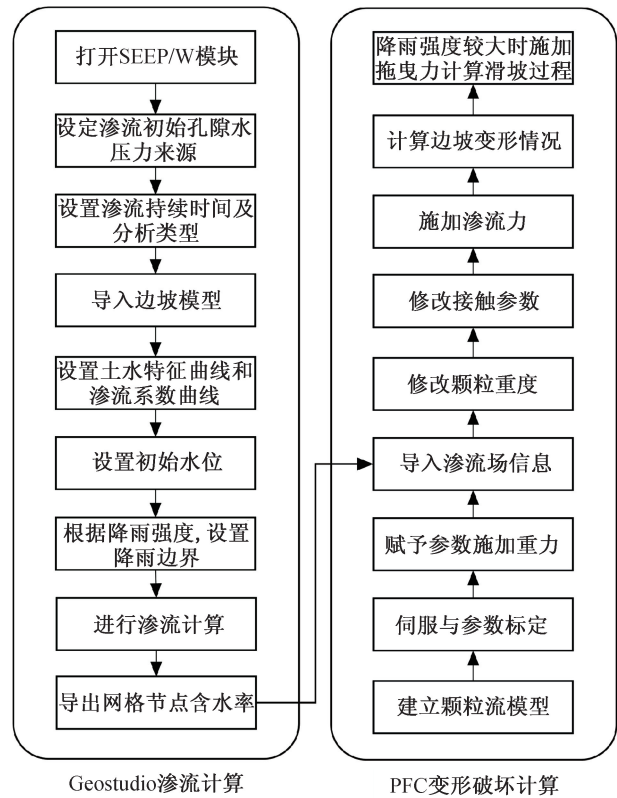


图 1 Geostudio 渗流计算模型图

Fig. 1 Geostudio-PFC calculation method

通过非饱和土力学计算方法,可以快速模拟边坡在降雨条件下渗流场变化情况,并得到边坡内浸润线分布以及各点的含水量。为研究在降雨条件下边坡内的渗流场,建立如图 2 所示的有限元模型,模型长度为 50 m,高度为 20 m,单元网格长度设置为 0.3 m,整个边坡模型划分为 8 676 个单元,8 879 个节点,将模型的上边界设置为降雨边界,两侧及底部设置为零流量边界,渗流计算中所使用的参数如表 1 所示。

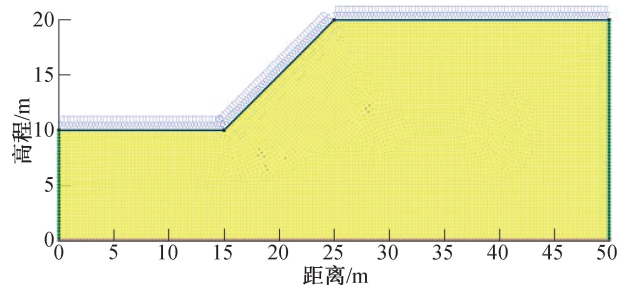


图 2 Geostudio 渗流计算模型图

Fig. 2 Geostudio seepage calculation model diagram

根据气象部门对降雨强度的划分,降雨通常可分为小雨、中雨、大雨、暴雨、大暴雨和特大暴雨六个等级,为研究在降雨条件下边坡的渗流场情况,设定降雨强度为 30 mm/24 h(大雨),原始水

表 1 Geostudio 中的模型参数
Tab. 1 Model parameters in Geostudio

土体类型	模型材料	饱和土水含量	最大吸力/kPa	饱和渗透系数/(m·s ⁻¹)	残余水含量
粘土	饱和/不饱和	0.4	1 000	1.2×10 ⁻⁶	0.12

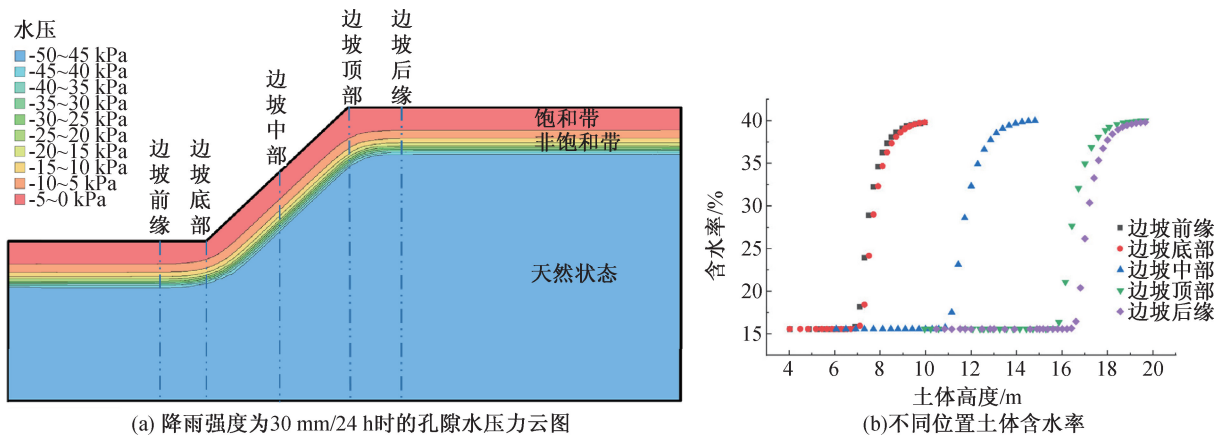


图 3 降雨影响下边坡渗流场情况

Fig. 3 Slope seepage field under the influence of rainfall

位为地下 30 m,连续 48 h 降雨后,边坡渗流场如图 3(a)所示,可见沿雨水入渗方向,形成了一定厚度的饱和带,继续向下为非饱和带,最下侧土体为天然状态,未受雨水入渗影响,提取边坡前缘、边坡底部、边坡中部、边坡顶部、边坡后缘五个位置沿入渗方向的各点的含水率,形成图 3(b)所示曲线图,可见对于图 2 所示的均质土体边坡,降雨入渗规律与土体的所在位置无关,仅与其所在深度相关,土体含水率最大的区域出现在饱和带,最大含水率为 40%,饱和带的宽度约为 1.6 m,在非饱和带,土体含水率沿入渗方向持续减小,非饱和带的厚度约为 1.8 m,含水率最小为 15.5%。

1.2 PFC-Geostudio 耦合方法

为实现 PFC-Geostudio 的耦合,可在 PFC 中建立相同尺度的模型,将 Geostudio 中的计算结果,即每个位置的含水率情况导入;在颗粒流模型中,根据各个颗粒的位置,修改其重度,若颗粒处于饱和区域,则颗粒的重度应取饱和重度,颗粒的接触参数也需按照饱和参数进行折减,根据文献[13]的统计结果,饱和参数可按照天然参数的 15%折减,若颗粒处于非饱和区域,颗粒的重度应根据其所在位置的含水率进行折减,其接触参数也应进行相应的折减,具体可见下式:

$$\gamma_2 = \gamma_3 + (\gamma_1 - \gamma_3) \frac{\omega_1 - \omega}{\omega_1 - \omega_3} \quad (1)$$

$$f_2 = f_1 + 0.15f_3 \frac{\omega_1 - \omega}{\omega_1 - \omega_3} \quad (2)$$

式中: γ_1 —饱和区内颗粒重度, N/m³; γ_2 —非饱和区颗粒重度, N/m³; γ_3 —天然区域颗粒重度, N/m³; ω —颗粒所在位置的含水率,可从 Geostudio 中的计算结果获取; ω_1 —饱和含水率; ω_3 —天然含水率; f_1 —饱和区颗粒的接触参数(此处以摩擦系数为例); f_3 —天然区域颗粒的接触参数。

除改变颗粒重度与接触参数外,在饱和区域由于雨水入渗,颗粒还会受到渗流力的作用,颗粒所受到的渗流力可简化等效为^[14-16]:

$$J = \gamma_f i V \quad (3)$$

式中: J —渗流力, N; 方向为沿雨水入渗方向; γ_f —流体重度, N/m³; i —流体的水力梯度, V —流体体积, m³。

当降雨强度较大,超过土体的入渗能力,则在边坡表面会发生径流。在水的冲刷作用下,坡表土体会受到冲刷作用,则土颗粒会受到拖曳力的作用,其方向为沿雨水冲刷方向,其大小为:

$$f_{\text{drag}} = f_0 \varepsilon^{-x} \quad (4)$$

式中: f_0 —单个颗粒所受的拖曳力, N; ε —颗粒所在流体单元的孔隙率, ε^{-x} 为考虑局部孔隙度的经验系数。这个修正项可以使拖曳力同时适用于孔隙度较高和孔隙度较低的系统,而且流体的雷诺数也可以大幅度取值。单个圆形颗粒所受流体拖曳力为^[17]:

$$f_0 = \frac{1}{2} C_d \rho_f \pi r^2 |v - u| (v - u) \quad (5)$$

式中: C_d —拖曳力系数; ρ_f —流体密度, kg/m³; r

为颗粒半径, m ; u —颗粒速度矢量, m/s ; v —流体速度矢量, m/s ; 不同位置的坡面径流速度各不相同, 当水沿坡面流下时, 由于重力的作用, 水流的速度从坡顶到坡底持续增加, 在边坡底部水流速度达到最大, 当水流到达坡底时, 由于土颗粒的阻碍, 水在坡底流动时, 其速度又会持续减小。

如图4所示, 位于坡面的颗粒A处的径流速度大小与方向为:

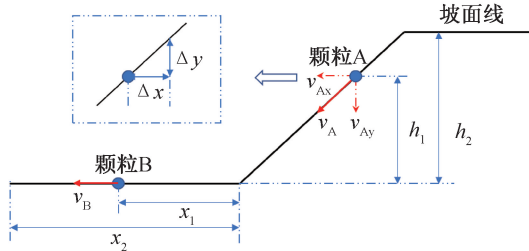


图4 不同位置坡面径流速度示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the velocity of slope runoff at different positions

$$v_A = v_{\max} \frac{h_2 - h_1}{h_2} \quad (6)$$

$$v_{Ax} = v_A \frac{\Delta x}{\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}} \quad (7)$$

$$v_{Ay} = v_A \frac{\Delta y}{\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}} \quad (8)$$

式中: v_A —颗粒A处的径流速度, m/s ; v_{\max} —坡表径流的最大冲刷速度, m/s ; 如图4所示, h_1 —颗粒A距坡底的高度, m ; h_2 —坡顶距坡底的高度, m ; v_{Ax} —颗粒A处径流速度沿 x 方向的分量, m/s ; v_{Ay} —颗粒A处径流速度沿 y 方向的分量, m/s ; Δx —水平方向的单位增量; Δy —水平方向增量为 Δx 时坡面线的高程增量。

位于坡底的颗粒B处的径流速度大小为:

$$v_B = v_{\max} \frac{(x_2 - x_1)}{x_2} \quad (9)$$

式中: v_B —颗粒B处的径流速度, 方向为沿径流的冲刷方向, m/s ; x_1 —颗粒B距坡底的水平距离, m ; x_2 —坡底的长度, m 。

式(5)中, 拖曳力系数 C_d 为:

$$C_d = \left(0.63 + \frac{4.8}{\sqrt{Re_p}} \right) \quad (10)$$

式(5)中, 经验系数 χ 采用下式进行计算:

$$\chi = 3.7 - 0.65 \exp\left(-\frac{(1.5 - \lg Re_p)^2}{2}\right) \quad (11)$$

式(10)与式(11)中, Re_p 表示颗粒雷诺数, 并

采用下式进行计算:

$$Re_p = \frac{2\rho_f r |v - u|}{\mu} \quad (12)$$

式中, μ —流体动力粘度, $N \cdot s/m^2$ 。

2 模型建立与实现方法

2.1 颗粒流模型建立及参数标定

在颗粒流方法中, 首先导入边坡的边界生成墙体, 然后在边界内生成完整的细观颗粒体系。当按照真实土颗粒的粒径生成模型时, 会导致颗粒数量过多, 严重影响计算效率, 但如果颗粒粒径取值过大, 生成颗粒太少, 模型的精度也会受到影响, 因此建立颗粒流模型时, 选择一个合适的粒径范围至关重要, 根据孙其诚^[18]的研究, 当模型的特征长度比值 $L/R \geq 50$ 时, 颗粒粒径对材料的力学性质影响较小, 因此选取颗粒粒径为 $0.04 \sim 0.08 m$, 共生成颗粒 83 771 个, 由于通过初始命令生成的模型比很不均匀, 会出现部分区域颗粒之间空隙较大、部分区域颗粒之间应力集中的现象^[19], 因此需要运用伺服机制让模型变的更加均匀, 伺服后的模型及其力链分布情况如图5所示。

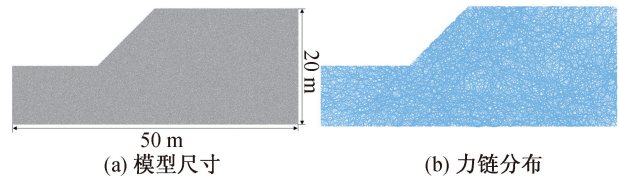


图5 颗粒流初始模型

Fig. 5 Initial model of particle flow

在颗粒流方法中, 通过颗粒 (ball) 来模拟材料颗粒, 通过接触 (contact) 来模拟颗粒之间的相互作用, 通过赋予颗粒不同的细观参数来模拟颗粒之间不同的力学性质, 因此选择合适的接触模型以及对接触赋予合适的参数至关重要^[20]。

当采用线性接触模型, 颗粒间的接触处于粘结状态时, 接触模型是线弹性的, 直到受力状态超出强度极限以及粘结被破坏才会使界面处于非粘结状态, 在非粘结状态下, 线性接触模型处于线弹性和摩擦状态, 当剪切力超出库伦极限时就会发生滑动, 该粘结模型能很好的模拟土体应力应变特性及其破坏特性, 因此颗粒间的接触采用线性接触模型。

由于赋予颗粒的细观参数与材料的宏观参数之间的关系并不是一一对应的, 因此为确保颗粒流模型细观参数的合理性, 需要进行参数标定, 即

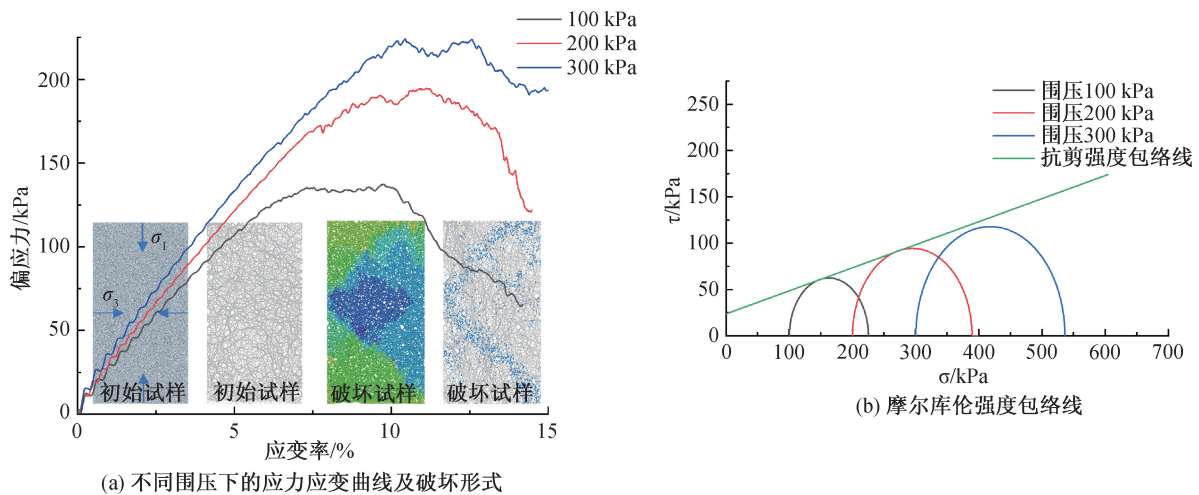


图6 参数标定图示

Fig. 6 Parameter calibration diagram

表2 颗粒流模型细观力学参数

Tab. 2 The meso-mechanical parameters of the calculation model

接触模型	密度 $/(kg \cdot m^{-3})$	阻尼	孔隙率	粘结模量/Pa	法向切向 刚度比	接触 黏结强度/Pa	接触粘结张 拉强度/Pa	摩擦系数
线性接触模型	2 500	0.4	0.17	8.45×10^7	3.0	2.55×10^5	6.15×10^5	0.3

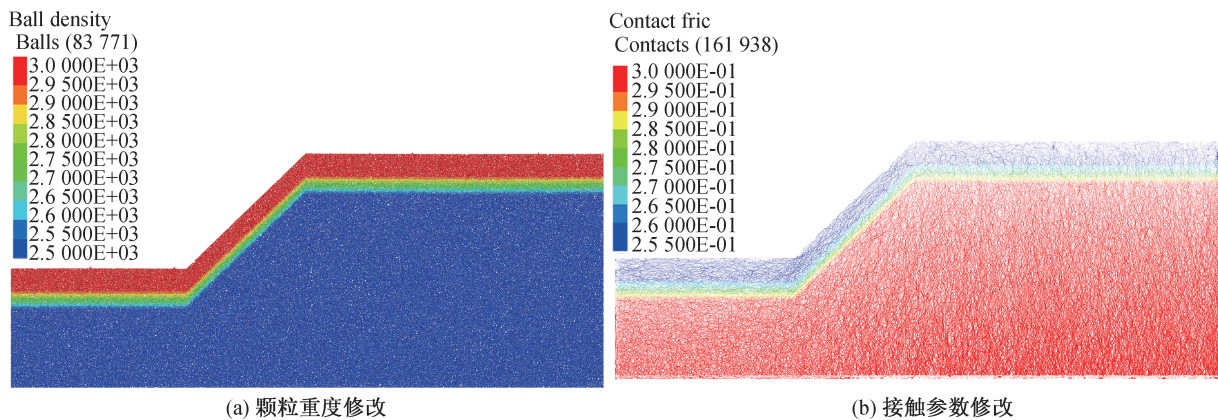


图7 颗粒流方法中降雨施加方法

Fig. 7 Rainfall application method in particle flow method

不断调试模型的细观参数,直到模型的宏观响应与我们所需的模型宏观参数相接近时,参数标定方才结束。构建如图6(a)所示的岩土试样,试样的孔隙率和粒径取值与边坡模型取值相同,粒径取0.04~0.08 m,孔隙率取0.17。对建立的岩土试样模型进行伺服,使试样模型应力分布均匀,随后赋予接触参数,对岩土试样进行不同围压下的双轴压缩试验,提取模型的应力应变曲线(图6(a)),绘制莫尔应力圆,如图6(b)所示,即可得试样的宏观参数,不断调整接触的细观参数,使得试样的宏观参数为 $c=23 \text{ kPa}$, $\varphi=14^\circ$,边坡模型的细观参数最终取值如表2所示。

2.2 颗粒流模拟中降雨实现方法

经参数标定后,对建立的初始边坡模型赋予参数,施加重力,运行至平衡,随后对所有颗粒的速度和位移清零,此时的模型即为天然状态下的边坡模型。设定降雨强度为30 mm/24 h,经Geostudio渗流计算,将各点的含水率导入颗粒流模型中,遍历所有颗粒,根据颗粒所在位置的含水率按照式(1)和式(2)修改颗粒的重度与接触参数,实现效果如图7所示。

当对饱和区域的颗粒施加渗流力时,首先应筛选出受渗流力影响的颗粒。遍历所有颗粒,由于饱和土的含水率为40%,当颗粒所在位置的含

水率大于 39%时,即可判定其属于饱和区,会受到渗流力的作用,即可按照式(3)对颗粒施加等效渗流力。当降雨强度大于土体的入渗能力时,坡表由于雨水冲刷,坡表颗粒会受到拖曳力的作用,因此在具体施加拖曳力时,首先需要判断降雨强度是否大于土体入渗能力,仅当降雨强度大于土体入渗能力时才调用拖曳力施加函数,在进行拖曳力的具体施加时,遍历所有颗粒,判定出坡表受径流影响的颗粒,如图 8(a)所示,由于拖曳力的方向为雨水径流方向,因此当颗粒位于坡底时,径流的方向为沿水平方向,颗粒位于坡面时,径流的方向为沿坡面方向,不同位置的径流速度的大小与方向可按照图 4 以及式(6)一(9)考虑,再通过 Fish 函数获取颗粒的粒径、速度、位置等信息,随后即可根据式(4)一(12)来施加拖曳力。当降雨强度为 100 mm/24 h 时,颗粒流方法中渗流力与拖曳力的施加效果如图 8(b)所示。

3 结果分析

3.1 大雨工况下边坡变形分析

为研究在降雨条件下边坡的变形情况,设定降雨强度为 30 mm/24 h,降雨持续时间为 48 h,经 Geostudio 渗流计算,计算结果如图 3(a)所示,将各个位置的含水率导入 PFC 中,通过 1.2 节所述的耦合方法来等效实现降雨效果。颗粒流边坡在降雨条件下的变形情况如图 9(a)所示,可见最大位移区域位于坡顶,最大位移为 8.3 cm,变形主要集中在坡顶饱和区域,土体位移方向如图 9(b)所示,可见位移方向主要为土体沉降,产生沉降的原因在于降雨导致土体容重增加以及土体强度参数的减弱,此外坡面土体由于左侧无土体支撑,因此会产生一定沿坡面滑动的趋势,若降雨强度持续增加,则降雨入渗深度会继续增大,同时饱和带与非饱和带的厚度也会持续增加,会导致坡面土体稳定性会进一步降低,有潜在滑坡的趋势。

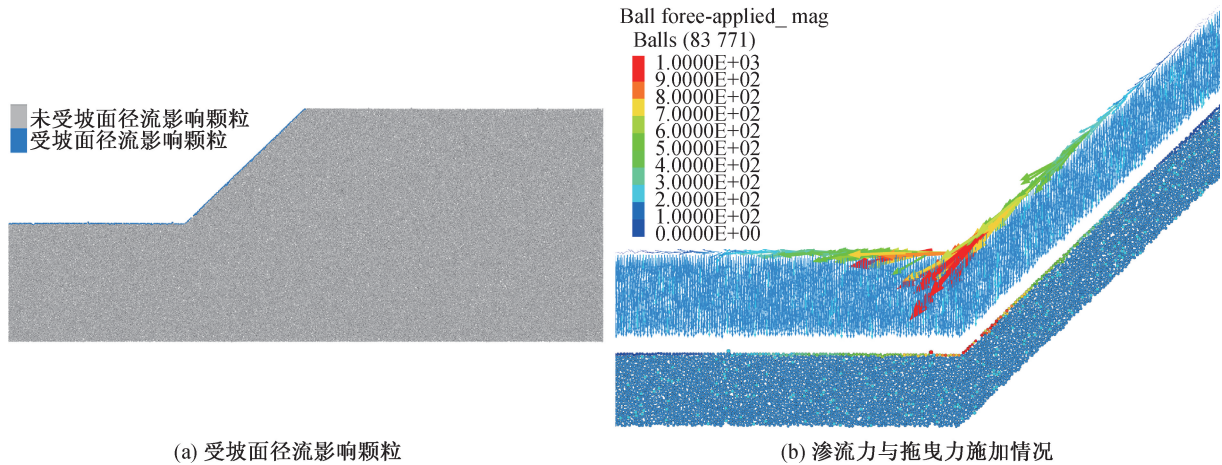


图 8 渗流力和拖曳力施加效果

Fig. 8 Effect of seepage force and drag force

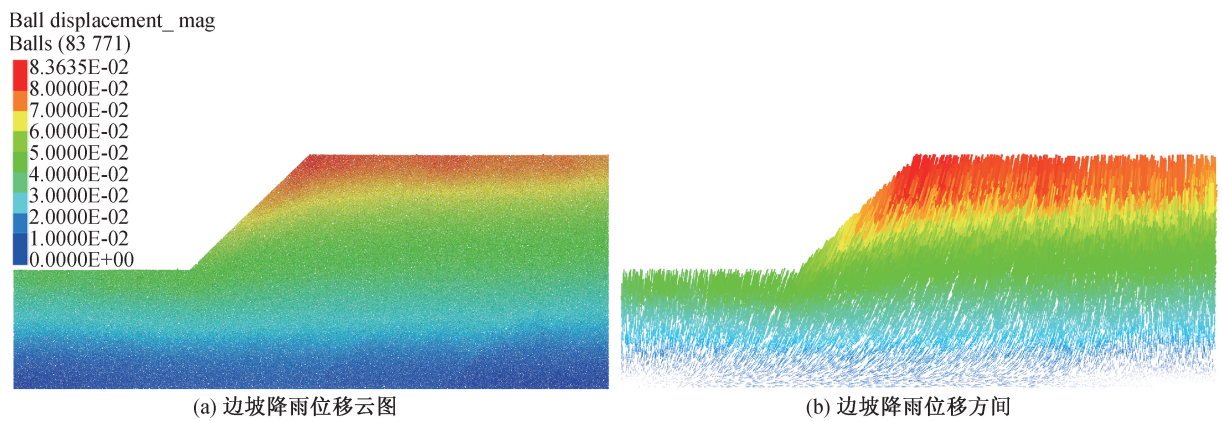


图 9 降雨条件下边坡变形情况

Fig. 9 Slope deformation under rainfall conditions

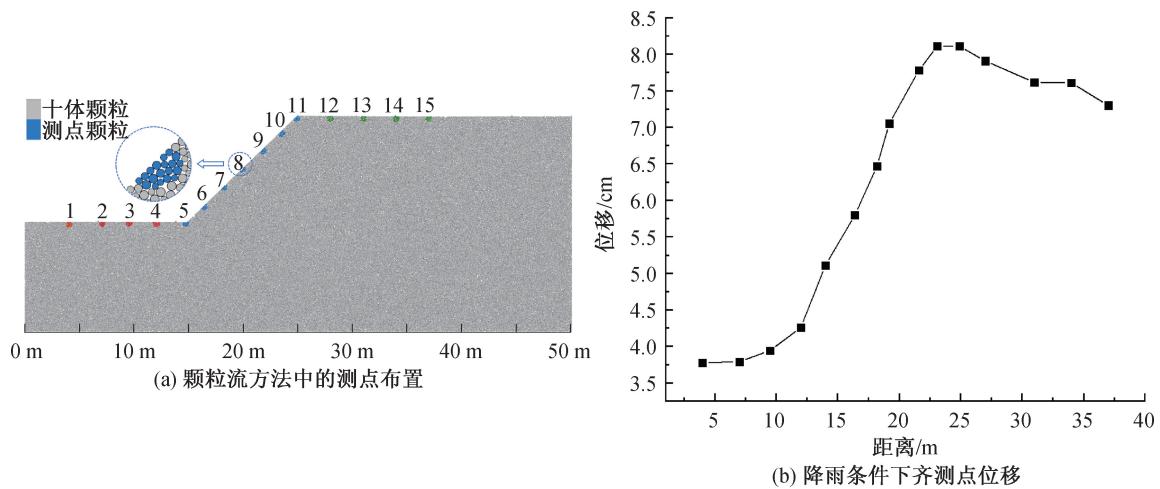


图 10 降雨条件下的测点位移

Fig. 10 Measuring points displacement under rainfall conditions

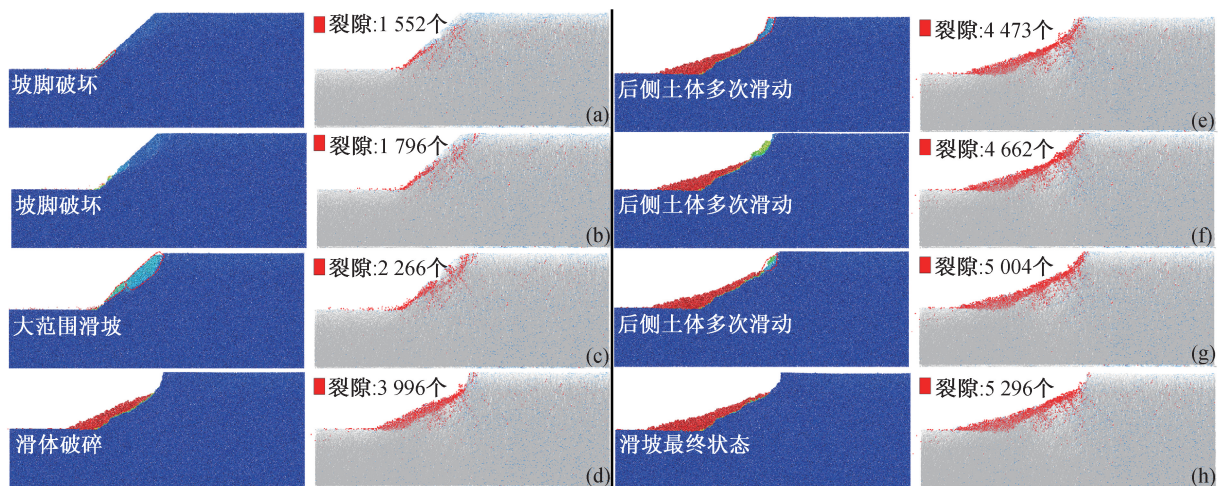


图 11 暴雨工况下边坡滑坡过程及裂隙延伸情况

Fig. 11 Landslide process and fissure extension of the slope under rainstorm conditions

在坡底、坡面、以及坡顶设置监测点,以进一步了解在计算过程中边坡不同位置土体的变形情况。由于单独监测一个颗粒随机性较强,可能会出现少数颗粒飞出模型边界的情况,因此选择数个颗粒作为一个测点,形成一个颗粒团,取其平均位移以反映测点所在位置土体的位移,可更准确的反映土体的变形情况,且当边坡发生失稳破坏时,测点颗粒可随之运动,依旧能反映测点所在区域边坡的变形情况,如图 10(a)所示,沿坡面共设置测点 15 个,每个测点半径为 0.3 m,平均每个测点包含颗粒 20 个。当降雨强度为 30 mm/24 h、降雨持续时间为 48 h 时,经 PFC-Geostudio 耦合计算后,提取各测点位移,形成如图 10(b)所示曲线图,可见沿水平方向,坡底和坡顶各测点位移变化不大,但坡顶位移整体大于坡底,坡面各测点的位移变化较大,各测点的位移随高程增加而增加,最

大位移出现在坡顶位置。

3.2 暴雨工况下边坡滑坡过程分析

为研究边坡在暴雨工况下的变形破坏情况,设定降雨强度为 100 mm/24 h,降雨持续时间为 48 h,此时由于降雨强度远大于土体的入渗速度,因此在坡面会产生径流,需额外考虑拖曳力对坡表颗粒的影响,在暴雨工况下,拖曳力的施加效果如图 8(b)所示,经 PFC-Geostudio 耦合计算,边坡的变形破坏过程如图 11 所示,边坡的滑动过程可划分为 3 个阶段。

第一阶段如图 11(a)~(b)所示,坡面颗粒由于雨水冲刷作用,在坡脚首先发生破坏,底部颗粒在拖曳力的作用下脱离边坡,沿坡面滑动至坡底,同时边坡内饱和区域形成大量裂隙,但并未滑动;

第二阶段如图 11(b)~(d)所示,由于坡脚颗

粒冲刷滑离边坡,导致上部土体失去支撑,首先在坡脚发生小范围滑坡,随后裂隙拓展延伸,从坡脚已滑动区域的顶部延伸至坡顶,形成大范围滑坡,在滑动过程中,滑体内部出现大量裂隙,滑体逐渐破碎为散体;

第三阶段如图 11(d)—(g) 所示,边坡后缘土体由于失去前侧土体的支撑,内部出现大量裂隙,在自重作用下失稳,出现了多次小规模滑动,边坡滑坡的最终状态如图 11(h) 所示,坡面土体大范围滑动,滑体破碎并堆积至坡底。

为确定在暴雨条件下坡面不同位置土体的滑坡时序,提取在滑坡起始阶段中测点 6、测点 8、测点 10 的速度信息,如图 12 所示,可见由于坡面径流冲刷作用的影响,位于坡脚的测点 6 速度最先增加,且速度较大,当坡脚颗粒滑动后,上部土体逐步变形,位于坡面中部的测点 8 的速度开始逐步增加,随后测点 10 的速度随之增加,但其速度小于测点 6,可见测点 8 附近土体先于测点 10 附近土体滑动,滑坡过程为明显的渐进式牵引式滑坡。

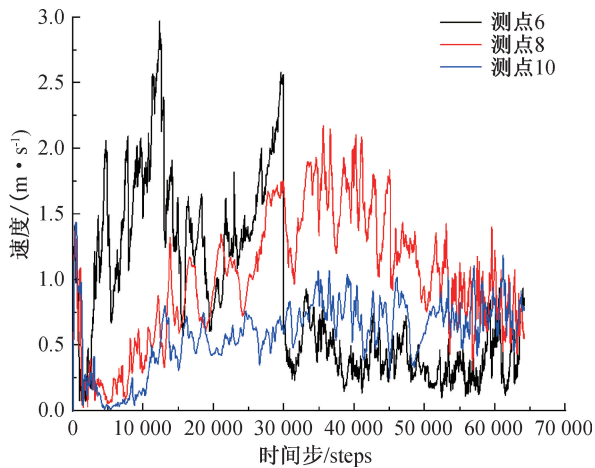


图 12 滑坡过程各测点位移

Fig. 12 Displacement of each measuring point during the landslide process

文献[21]搭建室内降雨滑坡框架模型,通过在模型顶部设置喷头来模拟降雨,试验中的滑坡过程如图 13(a)—(d) 所示,在降雨冲刷作用下表面土体流失,从坡脚处开始发生破坏,产生滑坡临空面,逐步诱发了大规模滑坡,并引发了数次小规模滑坡,滑坡过程为典型的牵引式滑坡,与上述采用耦合计算方法得到的滑坡过程(图 13(e)—(h))基本一致,可证实本方法的可行性。

4 结论

1) 采用 Geostudio 与 PFC 方法耦合计算降雨工况下边坡变形稳定问题,可同时克服有限元方法难以计算边坡大变形及离散元方法渗流计算效率较低的缺陷,通过该耦合方法可分析降雨工况下边坡表面沉降、坡面冲刷、土体崩塌等现象。

2) 对于单一介质均质边坡,降雨入渗规律与土体的所在位置无关,仅与其所在深度相关,沿降雨入渗方向,会形成一定厚度的饱和带和非饱和带。

3) 大雨工况下,边坡变形主要为土体沉降,变形最大区域位于边坡顶部;暴雨工况下,由于坡面径流的冲刷作用,坡脚处首先发生破坏,随后诱发了后部土体大范围滑动,发生渐进式牵引式滑坡。

参考文献:

[1] 朱文彬,刘宝琛. 降雨条件下土体滑坡的有限元数值分析[J]. 岩石力学与工程学报,2002(4):509-512.
 [2] 张群,许强,易靖松,等. 南江红层地区缓倾角浅层土质滑坡降雨入渗深度与成因机理研究[J]. 岩土工程学报,2016,38(8):1447-1455.
 [3] 张乘千. 延安市降雨与黄土滑坡相关性分析[D]. 西安:长安大学,2014.
 [4] 康尘云. 降雨诱发黄土滑坡全过程模型试验研究[D]. 西安:长安大学,2020.

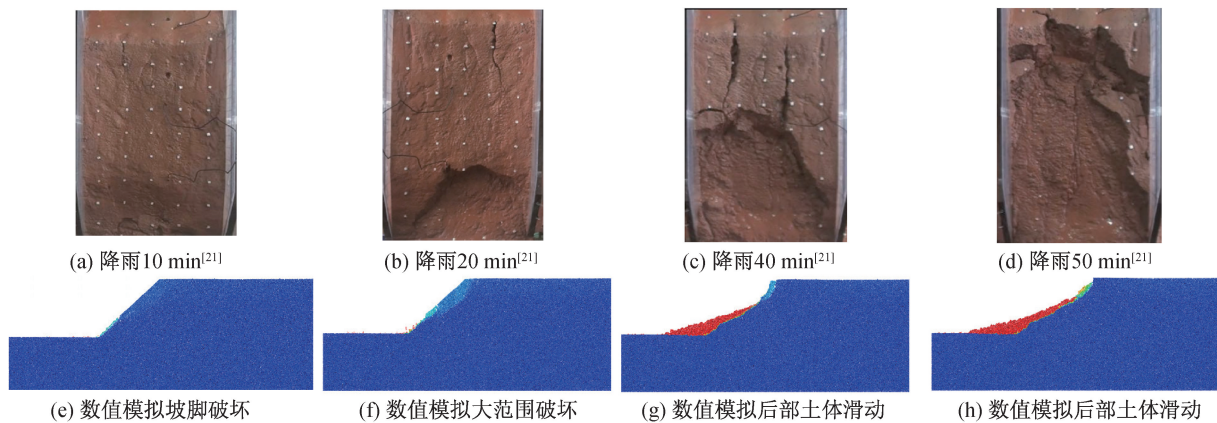


图 13 滑坡过程对比

Fig. 13 Comparison of landslide processes

(下转第 112 页)

- plied Geophysics on a Soil Contaminated Site by Chromium of a Tannery in Motuca (SP) [J]. *Revista Brasileira de Geofísica*, 2016, 34(3):309-317.
- [9] 聂慧君, 祝晓彬, 吴吉春, 等. 高密度电阻率法在湖南某铬污染场地调查中的应用[J]. *勘察科学技术*, 2018, 220(6):50-54.
- [10] 邱波, 王斌战, 周世昌, 等. 高密度电法在垃圾填埋场渗滤液调查中的研究[J]. *资源环境与工程*, 2020, 34(S2):128-133+176.
- [11] HELENE L P, MOREIRA C A, BOVI R C. Identification of Leachate Infiltration and Its Flow Pathway in Landfill by Means of Electrical Resistivity Tomography [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2020, 192(4):1-10.
- [12] 邱小峰. 高密度电法在上海某地区环境污染调查中的应用[J]. *工程勘察*, 2021, 49(5):71-78.
- [13] 李方敏. 垃圾填埋场渗漏检测中高密度电阻率法的应用[J]. *科技创新与应用*, 2015(30):47.
- [14] 郑冰, 李柳德. 高密度电法不同装置的探测效果对比[J]. *工程地球物理学报*, 2015, 12(1):33-39.
- [15] 徐小兵, 程久龙, 韩承强, 等. 高密度电阻率法层析成像技术及其在水文地质中的应用[J]. *煤矿开采*, 2006, 11(5):21-22+54.
- [16] 肖宏跃, 雷宛, 雷行健. 高密度电阻率法中几种装置实测效果比较[J]. *工程勘察*, 2007(9):65-69.
- [17] 李金铭. 地电场与电法勘探[M]. 北京:地质出版社, 2005.
- [18] 周金, 程久龙, 温来福. 矿井瞬变电磁法反演方法研究进展与展望[J]. *煤矿安全*, 2017, 48(4):180-183+187.
- [19] 聂利超, 李术才, 刘斌, 等. 电阻率层析成像法探测滑坡面正演模拟与反演成像研究[J]. *岩土力学*, 2011, 32(9):2873-2879.

(责任编辑 周雪梅)

(上接第99页)

- [5] 孙吉书, 邱博超, 肖田. 降雨作用下路堤边坡水毁机理及影响因素分析[J]. *河北科技大学学报*, 2021, 42(4):415-423.
- [6] JIANG J, EHRET D, WEI X, et al. Numerical Simulation of Qiaotou Landslide Deformation Caused by Drawdown of the Three Gorges Reservoir, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2011, 62(2):411-419.
- [7] 许方领, 阮怀宁, 黄肖, 等. 考虑降雨入渗的非饱和土边坡流固耦合数值分析[J]. *河南科学*, 2019, 37(6):955-961.
- [8] 王磊, 李荣建, 刘军定, 等. 连续降雨下黄土陡坡开裂及稳定性评价[J]. *水利水运工程学报*, 2022(04):77-86.
- [9] 汪华安, 焦春茂, 陈晓. 基于颗粒流方法的滑坡机理数值分析[J]. *三峡大学学报:自然科学版*, 2020, 42(1):47-51.
- [10] 张家勇, 邹银先, 杨大山. 基于PFC3D的鱼鳅坡滑坡运动过程分析[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2021, 32(4):33-39.
- [11] 吴谦, 王常明, 宋朋燃, 等. 黄土陡坡降雨冲刷试验及其三维颗粒流流-固耦合模拟[J]. *岩土力学*, 2014, 35(4):977-985.
- [12] 周峙. 降雨-蒸发作用下皖江裂隙性粘土裂隙演化机制及边坡破坏机理[D]. 武汉:中国地质大学, 2021.
- [13] 司宪志, 宁宇, 石崇, 等. 基于连续-非连续方法的高填方边坡变形稳定性分析[J]. *河北工程大学学报:自然科学版*, 2021, 38(2):53-60.
- [14] 蒋中明, 龙芳, 熊小虎, 等. 边坡稳定性分析中的渗透力计算方法考证[J]. *岩土力学*, 2015, 36(9):2478-2486.
- [15] 陈闻潇, 石崇, 李汪洋, 等. 基于连续-非连续耦合方法的降雨滑坡数值模拟研究[J]. *河南科学*, 2020, 38(5):763-770.
- [16] 王乐荣, 石崇, 翟淑花, 等. 坡面泥石流启动机理的微观数值模拟研究[J]. *河南科学*, 2022, 40(3):419-426.
- [17] 石崇, 张强, 王盛年. 颗粒流(PFC5.0)数值模拟技术及应用[J]. *岩土力学*, 2018(S2):1.
- [18] 孙其诚, 王光谦. 颗粒物质力学导论[M]. 北京:科学出版社, 2009.
- [19] 陈晓, 石崇, 杨俊雄. 土石混合体边坡微观特征对滑面形成影响研究[J]. *工程地质学报*, 2020, 28(4):813-821.
- [20] 胡小荣, 蔡晓锋, 刘操. 饱和砂土的三剪弹塑性界面模型研究(三)—PFC3D数值试验验证[J]. *应用力学学报*, 2022, 39(2):324-335.
- [21] 苏燕, 邱俊炳, 兰斯梅, 等. 基于室内试验的降雨型滑坡机理研究[J]. *福州大学学报:自然科学版*, 2015, 43(1):118-122.

(责任编辑 周雪梅)