

# 基于 FLAC<sup>3D</sup> 的饱和-非饱和渗流场初始化方法

冯文凯, 吴卓林, 林布雷, 朱权威, 周玉龙

(成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都 610059)

**摘要:** 建立与真实状态相近的初始渗流场是正确分析边坡降雨入渗的重要前提。鉴于目前 FLAC<sup>3D</sup> 中的饱和-非饱和渗流场初始化方法寥寥无几, 提出并详细介绍了饱和-非饱和渗流场初始化的设置方法。根据 5 种分布形式的基质吸力, 按照其基质吸力线性分布和非线性分布规律提出了 2 种对应的初始化方法: 对于线性分布的基质吸力运用 MIDAS 建模和 FLAC<sup>3D</sup> 内置 FISH 语言进行渗流场初始化设置; 对于非线性分布的基质吸力, 用函数来表示其复杂几何形态的地下水水位具有一定的难度, 不适合大面积推广应用, 将地下水水位简化成一平面后, 可利用 FISH 语言编程进行渗流场初始化设置。通过与常规渗流场初始化方法的计算结果对比, 初始渗流场对边坡降雨入渗最终计算结果有较大影响, 初始渗流场与真实状态越相近, 其计算精度越高。

**关键词:** FLAC<sup>3D</sup>; 渗流场; 初始化; 饱和-非饱和; 基质吸力

中图分类号: TU45 文献标志码: A

文章编号: 1001-5485(2020)07-0109-06

## A Method of Initializing FLAC<sup>3D</sup> Saturated-unsaturated Seepage Field

FENG Wen-kai, WU Zhuo-lin, LIN Bu-lei, ZHU Quan-wei, ZHOU Yu-long

(State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection,  
Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

**Abstract:** The establishment of initial seepage field close to the real state is an important prerequisite for the correct analysis of slope rainfall infiltration. In view that methods of initializing saturated-unsaturated seepage field in FLAC<sup>3D</sup> are rarely reported, in this paper we put forward and introduce in detail the setup method of initializing saturated-unsaturated seepage field. According to the five distribution forms of matric suction, two initialization methods are proposed corresponding to the linear and non-linear distribution laws of matric suction. For the linear distribution of matric suction, MIDAS modeling and FLAC<sup>3D</sup> built-in FISH language are employed to initialize the seepage field. For non-linear distribution, since it is difficult to represent the complex geometry of groundwater level surface by using function, the groundwater level is simplified into a plane for the initial setting of seepage field by using FISH programming language. Comparison with conventional initialization method demonstrated that the initial seepage field has a great influence on the final calculation result of slope rainfall infiltration. When the initial seepage field is closer to the real state, the calculation accuracy is higher.

**Key words:** FLAC<sup>3D</sup>; seepage field; initialization; saturated-unsaturated; matric suction

### 1 研究背景

近年来, 数值模拟成为分析边坡降雨入渗过程的重要手段之一, 许多学者采用自编软件或各种商

业软件对边坡降雨入渗饱和-非饱和渗流过程进行了研究。岩土工程领域分析软件 FLAC<sup>3D</sup> 虽然在非饱和渗流分析中存在很大的局限性, 即 FLAC<sup>3D</sup> 只能进行饱和和渗流计算, 但通过内置 FISH 语言可以在 FLAC<sup>3D</sup> 中实现非饱和渗流计算。

收稿日期: 2019-03-08; 修回日期: 2019-05-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(41572291); 四川省青年科技创新研究团队专项计划项目(2017TD0018); 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室团队项目(SKLG2016Z001)

(作者简介: 冯文凯(1974-), 男, 河南新乡人, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事区域稳定与岩体稳定以及地质灾害防治方面的研究和教学工作。E-mail: fengwenkai@cdut.cn)

与真实状态相近的初始渗流场是正确分析边坡降雨入渗的重要前提。目前,对于 FLAC<sup>3D</sup> 中渗流场的初始化,前人提供了多种设置方法,彭龙斌等<sup>[1]</sup>提出用 FLAC<sup>3D</sup> 内置命令 ini pp 建立孔压分布,但此方法只适用于简单且规则的模型,复杂模型所建立的孔压分布与实际情况有较大出入。陈育民等<sup>[2]</sup>通过 ANSYS 建模结合 FISH 语言可生成复杂空间几何形态的地下水水位面,但是此方法默认地下水水位以上区域孔隙水压力为 0,不能进行非饱和渗流计算。史可等<sup>[3]</sup>利用地区年平均降雨强度作为入渗边界条件施加在坡表上进行渗流计算,并设置流体抗拉强度(设置流体抗拉强度后边坡内部才能产生负孔隙水压力)此方法虽建立了基质吸力,但与实际分布情况差距较大。

使用 FLAC<sup>3D</sup> 进行饱和-非饱和渗流分析的热度逐渐增加,但对于 FLAC<sup>3D</sup> 饱和-非饱和渗流场初始化方法研究却少之又少。针对于此,提出基于 MIDAS 建模技术与 FLAC<sup>3D</sup> 内置 FISH 语言相结合的方法,对复杂三维模型饱和-非饱和渗流场进行初始化。

## 2 非饱和渗流在 FLAC<sup>3D</sup> 中的实现

对于非饱和土,1980 年, Van Genuchten 提出了土体中体积含水率与负压的四参数( $\rho, \alpha, n', m'$ ) 关系方程<sup>[4]</sup>,即

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + \left(\frac{\rho}{\alpha}\right)^{n'}\right]^{m'}} \quad (1)$$

式中:  $\theta$  为体积含水率;  $\theta_r$  为残余体积含水率;  $\theta_s$  为饱和体积含水率;  $\rho$  为负孔隙水压力;  $\alpha, n', m'$  为拟合参数。由于体积含水率与饱和度  $s$  公式为  $\theta = ns$ ,  $n$  为土体空隙体积与土体总体积的比值,将其代入式(1)化简后可得饱和度与基质吸力的关系式<sup>[5]</sup>,即

$$s = s_r + \frac{1 - s_r}{\left[1 + \left(\frac{\rho}{\alpha}\right)^{n'}\right]^{m'}} \quad (2)$$

式中:  $s$  为饱和度;  $s_r$  为残余饱和度,对于一般土体, GEO-Slope 软件采用默认值  $\alpha = 100, n' = 2, m' = 1$ ; 对岩体  $\alpha$  值可取  $10, n' = 2, m' = 1$ 。

利用 FLAC<sup>3D</sup> 对于均质各向同性材料进行渗流计算时,其渗流方程需满足达西定律,方程形式如下<sup>[6]</sup>,即

$$q_i = -k_{ij} k_r(s) [p - \rho_f x_j g_j]_{,i} \quad (3)$$

式中:  $q_i$  为单位流量向量;  $p$  为孔隙水压力;  $k_{ij}$  为介

质的饱和渗透系数张量;  $k_r(s)$  为相对渗透系数,  $k_r(s) = s^2(3-2s)$ ;  $\rho_f$  为流体密度;  $x_j$  为笛卡尔坐标分量;  $g_j$  为重力加速度分量。

在非饱和渗流计算中,非饱和区单元的渗透系数  $k$  等于单元的饱和渗透系数乘以相对渗透系数:

$$k = k_{sat} k_r(s) = k_{sat} s^2(3-2s) \quad (4)$$

式中  $k_{sat}$  为单元的饱和渗透系数。

利用 FLAC<sup>3D</sup> 进行渗流分析时, FLAC<sup>3D</sup> 内置命令默认整个模型的节点饱和度只能为 1 或 0。从功能上看, FLAC<sup>3D</sup> 只能进行饱和渗流计算,但是通过其内置的 FISH 语言可以在 FLAC<sup>3D</sup> 中描述基质吸力与节点饱和度的关系,即式(2)与式(4),并在渗流计算步中加以调用,便可实现非饱和渗流分析。这里鉴于篇幅原因故不详细介绍,具体实现方法见参考文献[5]。

## 3 饱和-非饱和渗流场的初始化

对于边坡而言,非饱和区域基质吸力的存在将影响土体的渗透系数,从而影响雨水在非饱和区域的入渗能力。Zhu 等<sup>[7]</sup>指出在一个降雨周期内,坡体内的基质吸力和暂态孔隙水压力会随着降雨过程和时间呈现不同的变化趋势,最终导致渗流场的分布极其复杂。由于边坡的降雨入渗是建立在初始状态上的瞬态入渗过程<sup>[8]</sup>,那么建立与真实状态相近的初始渗流场,对于饱和-非饱和渗流分析则显得尤为重要。吴俊杰等<sup>[9]</sup>对初始状态下基质吸力  $p_c$  沿高度  $d$  的分布作出了如图 1 所示的 5 种假设。

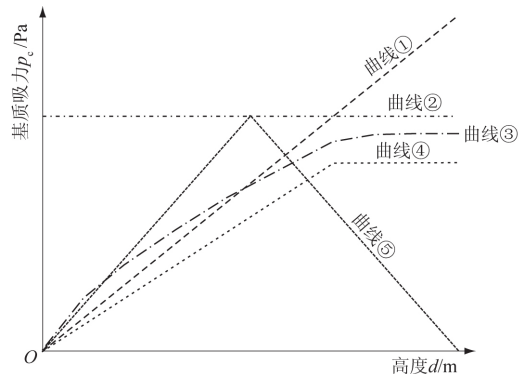


图 1 基质吸力分布假设

Fig.1 Assumptions of matrix suction distribution

如图 1 所示。假设曲线①:  $p_c = qd$ , 为基质吸力随着高度的增加呈线性增加。假设曲线②:  $p_c = p_k$ , 即基质吸力为一定值。假设曲线③:  $p_c = qd^a (d \leq (p_k/q)^{1/a})$ ;  $p_c = p_k (d > (p_k/q)^{1/a})$ , 基质吸力沿高度呈幂指数函数增加。假设曲线④:  $p_c = qd (d \leq p_k/q)$ ;  $p_c = p_k (d > p_k/q)$  即基质吸力先随着高度的增

加呈线性增加,当高度到达一定程度后基质吸力为一定值。假设曲线⑤:  $p_c = q_1 d (d \leq d_0)$ ;  $p_c = q_2 d (d > d_0)$ ,即基质吸力先随着高度的增加呈线性增加,当高度到达一定程度后随高度增加呈线性降低。在上述各式中  $d$  为地下水水面以上的竖向高度,  $d_0$  为基质吸力最大时距地下水水位的竖向高度,  $p_c$  为基质吸力,  $p_k, q, q_1, q_2, \rho$  均为无量纲常数。

从图 1 可以看出,曲线①、②、④、⑤基质吸力为线性变化,曲线③基质吸力为非线性变化,由于基质吸力变化形式的不同,其渗流场初始化方法也将不一样。将基质吸力沿高度分布作出的 5 种假设分为 2 类,第 1 类渗流场初始化方法针对假设①、②、④、⑤,第 2 类渗流场初始化方法针对假设③。

### 3.1 第一类渗流场初始化方法

针对基质吸力线性变化假设①、②、④、⑤的渗流场初始化方法具体实现步骤如下:

(1) 在 MIDAS 中建立复杂三维模型时(具体建模步骤见文献[10]),需建立 2 个曲面,曲面 1 为模型的真实起伏地形面,曲面 2 为地下水水位面,在执行面切割体实体命令时,曲面 2 在空间中要同时位于 2 个位置,第 1 个位置为  $d=0$  处,第 2 个位置只需要在曲面一的上方,即真实起伏地形上方即可,最终实体被切割成 3 块区域,然后执行 MIDAS 分组命令,将所得模型的 3 块区域分别分为 1, 2, 3 组(如图 2 所示),其中 2, 3 组为实际模型组,1 组为辅助功能组,1 组在完成特定功能后将被删除。

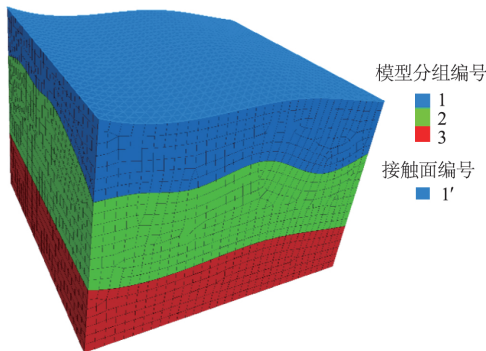


图 2 复杂三维模型

Fig.2 Diagram of the model

(2) 将 MIDAS 建立的模型导入 FLAC<sup>3D</sup> 中,按照陈育明等<sup>[2]</sup>的方法在模型上表面建立接触面(图 1)并自接触面 1 向下建立孔隙水压力场,此时接触面 1 以下所有区域将自动生成孔隙水压力场(如图 3 所示)。

(3) 提取实际地下水水位面处任意一点孔隙水压力的大小,即 2 组与 3 组的接触面位置,此时假定此点距离模型表面竖向距离为  $h_d$ ,那么孔隙水压力大小则为  $p_d = \rho g h_d$  ( $p_d$  可以通过提取地下水水位面孔压值获取),将模型中所有节点的孔隙水压力均减去

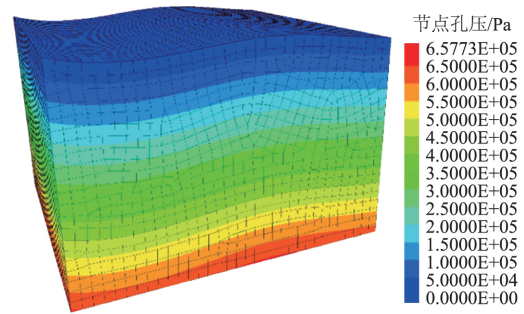


图 3 孔隙水压力场

Fig.3 Pore water pressure field

$p_d$  并将 1 组删除。此时在地下水水位面以上区域则建立了随高度  $d$  增加基质吸力增大的孔压分布(如图 4 所示),此时基质吸力的大小分布为  $p_j = Lg(h - h_d)$ ,  $L$  为流体密度,  $g$  为重力加速度,  $h$  为非饱和区域中任意一点距离 1 组与 2 组的接触面位置的垂直竖向距离,将其进行简化后可得  $p_j = q_d d$ ,式中  $q_d$  为  $\rho g$ ,  $d$  为  $h - h_d$  (即为非饱和区域中任意一点至地下水水位的垂直竖向距离的负值)。

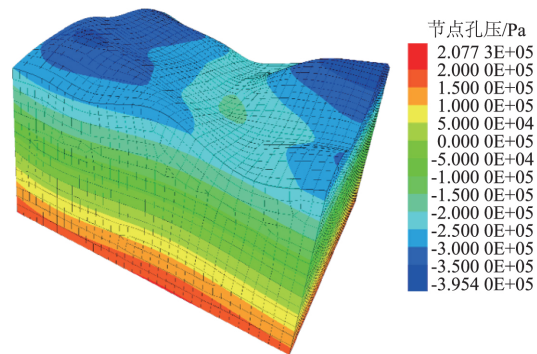


图 4 生成基质吸力(1 组被删除)

Fig.4 Generating matric suction (with the first group deleted)

(4) 以假设④为例,在假设④中非饱和区域中基质吸力的大小为  $p_c = qd$ ,故需对所建立的基质吸力进行修正,此时  $p_d/p_c = q_d/q = T$ ,  $T$  为一常数(这里取  $T=2$ ),故首先将  $g_p - p_p < 0$  ( $g_p$  为节点孔压值,  $p_p$  为地下水水位面的孔压值)的区域均除以  $T$ (如图 5(a) 所示),之后对于模型中  $g_p - p_p < p_k$  的区域强制更正为  $p_k$ (这里取值  $p_k = 100$  kPa),这样便建立了符合假设④的初始渗流场(如图 5(b) 所示)。

(5) 利用 free 命令释放所有节点,让节点的孔隙水压力能够自由变化。

虽然以上步骤以假设④为例,但该方法同样适用于假设①、②、⑤,对于假设①而言,只需要在步骤(4)中将  $g_p - p_p < 0$  的区域除以常数  $T$  便可。对于假设②而言,仅需要在步骤(3)中将  $g_p - p_p < 0$  的区域均强制为  $p_k$  即可。对于假设⑤而言,结合步骤(1)和步骤(2)需另在  $d = p_k/q$  处建立接触面,然

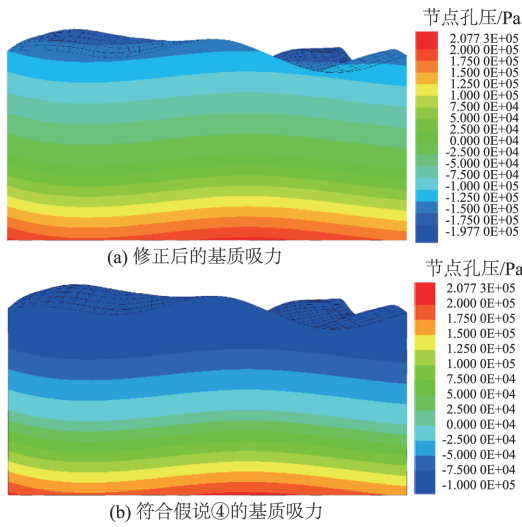


图 5 基质吸力  
Fig.5 Matrix suction

后在该接触面利用界面单元节点使用 water table 命令向上生成孔压场(以  $z$  为轴向,此时重力设置为 set grav 0 0 10,当然,这么设置的原因仅为获得反向的孔压场分布),然后将该部分区域孔压 gp-pp 减去该区域节点最大孔压便得到随高度  $d$  增加基质吸力减小的孔压场分布,通过步骤(4)中的代数转换便可得到符合假设⑤的基质吸力分布。图 6 为建立第 1 类初始渗流场 FISH 函数的程序框图。

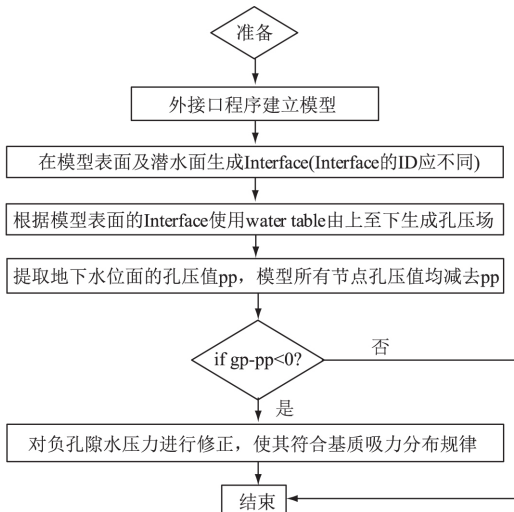


图 6 第 1 类初始渗流场程序框图  
Fig.6 Flowchart of establishing the first type of initial seepage field

当然,此方法并不局限于 MIDAS 建模,ANSYS、GOCAD、Rhinceros 建模均可实现。

3.2 第 2 类渗流场初始化方法

使用第 1 类渗流场初始化方法所获得的孔压场分布均为线性分布,而假设③中基质吸力的分布规律为非线性分布,故第 1 类渗流场初始化方法不适用于假设③。

对于假设③,只有通过 FISH 语言描述这种非线性分布的孔压,用函数来表示其复杂几何形态的地下水位面具有一定的难度,对操作者来说需具备较强的数学能力和编程能力,不适合大面积推广应用,故这里将地下水位面简化成一平面,那么平面的函数可以表示为

$$Ax + By + Cz + D = 0 \quad (5)$$

式中  $A, B, C, D$  均为常数。

模型中非饱和区域任意一节点  $(x, y, z)$  到该面的距离  $d$  则为:

$$d = \frac{|Ax + By + Cz + D|}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} \quad (6)$$

将式(6)代入假设⑤函数后,即可得到模型节点上孔隙水压力  $p_d$  的大小,即

$$p_d = q \left( \frac{|Ax + By + Cz + D|}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} \right)^a \quad (7)$$

用 gp\_xpos( p\_gp)、gp\_ypos( p\_gp)、gp\_zpos( p\_gp) 等命令获取模型非饱和区的节点坐标,然后将坐标代入式(7)中求得该节点孔隙水压力,取其负数后重新赋予给该节点,最终可获得符合假设③的基质吸力的分布规律,具体过程如下:

(1) 在 MIDAS 中生成复杂几何形态的地下水位面,根据实际情况将其简化成一平面(图 7),按照第 1 类渗流场初始化方法在模型中建立孔压分布场,此时真实地下水位面以上区域其节点孔隙水压力均  $< 0$  (即  $gp\_pp < 0$ ) (图 8)。

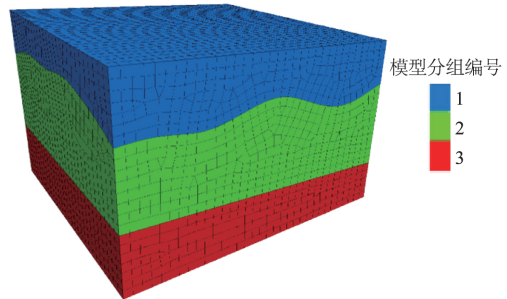


图 7 模型图

Fig.7 Model with simplified groundwater level

(2) FISH 语言中用 loop while 命令遍历模型节点,用 IF 命令识别出  $gp\_pp < 0$  的所有节点,然后用 gp\_xpos( p\_gp)、gp\_ypos( p\_gp)、gp\_zpos( p\_gp) 命令提取节点坐标,将坐标代入式(7)中(这里令  $q = 5, a = 0.8$ ),计算出来的孔隙水压力取其负数后重新再赋予给该节点,所有节点重新赋值后最终生成如图 9(a) 所示的孔压场。

(3) 对于负孔隙水压  $> -p_k$  (即  $gp\_pp > -p_k$ ) 的节点孔压强制更正为  $-p_k$  (这里  $p_k$  取值为 45 kPa),

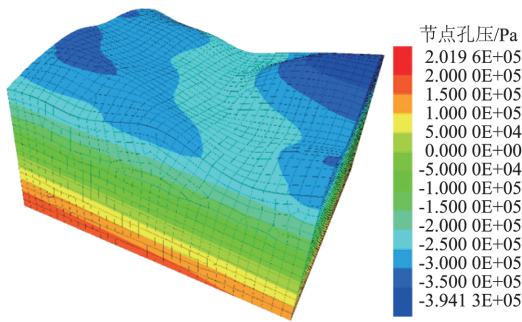
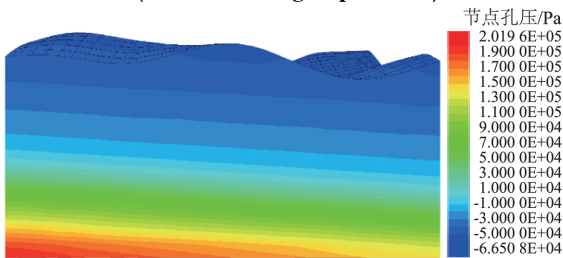
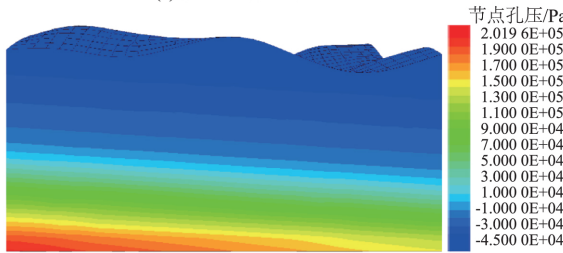


图 8 生成负孔隙水压力场(1组被删除)

Fig.8 Generating a negative pore water pressure field (with the first group deleted)



(a) 修正后的孔压场



(b) 符合假设⑤的孔压场

图 9 孔压场

Fig.9 Pore pressure field in line with the fifth hypothesis

这样便建立了符合假设③的初始渗流场(如图9(b)所示)。利用 free 命令释放所有节点,让节点的孔隙水压力能够自由变化。图 10 为建立第 2 类初始渗流场 FISH 函数的程序框图。

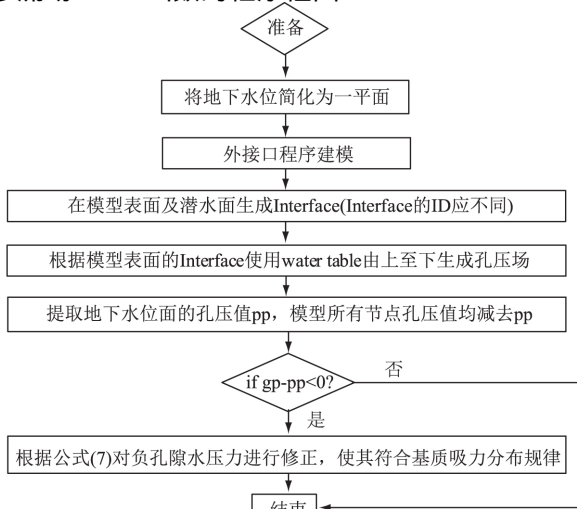


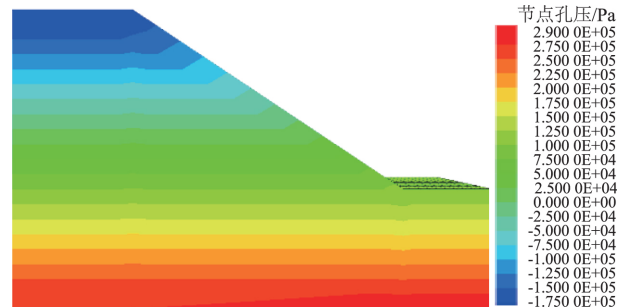
图 10 第 2 类初始渗流场程序框图

Fig.10 Flowchart of establishing the second type of initial seepage field

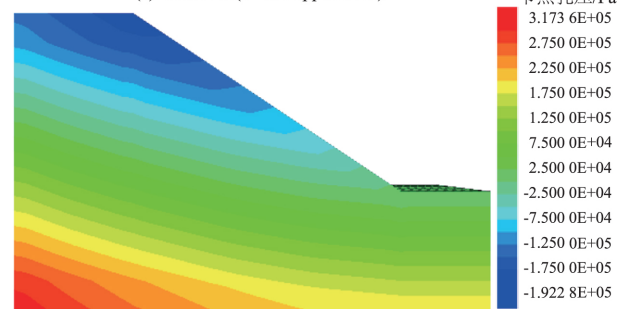
## 4 算例分析

选取某土质边坡进行渗流计算,图 11(a)及图 11(b)分别为 FLAC 中常规方法(采用 ini pp 初始化)建立的初始渗流场和采用本文中第 1 类方法建立的与真实状态相近的初始孔压场。设置降雨时长为 60 h,采用暂态分析方法进行降雨入渗的模拟。

图 12(a)和图 12(b)分别为常规方法和本文方法的计



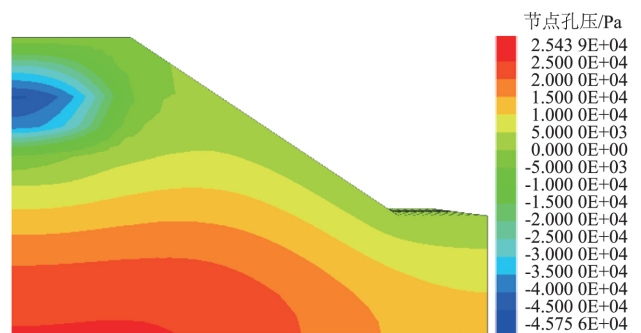
(a) 常规方法(采用ini pp初始化)



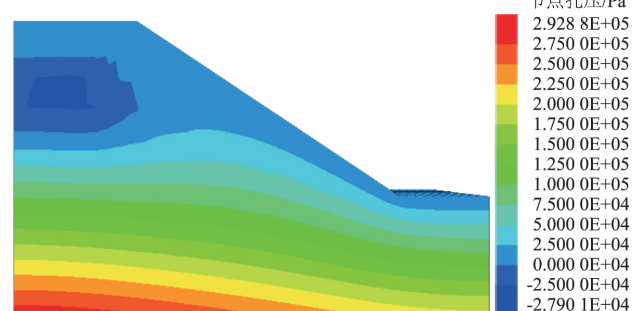
(b) 第1类方法

图 11 建立孔压场

Fig.11 Building pore pressure field



(a) 常规方法



(b) 第1类方法

图 12 降雨 60 h 后孔压场

Fig.12 Pore pressure field after rainfall for 60 hours

算结果 结果表明,初始渗流场对边坡降雨入渗最终计算结果有较大影响,图 12(b) 中边坡孔隙水压力规律与文献[11]更加符合,因此建立与真实状态相近的初始渗流场是正确分析边坡降雨入渗的重要前提。

## 5 结 论

(1) 提出了饱和-非饱和渗流场的初始化方法,进一步完善了 FLAC<sup>3D</sup> 的非饱和渗流分析功能。

(2) 对于线性分布的基质吸力,可以使用外接口程序建模和 FLAC<sup>3D</sup> 内置 FISH 语言来进行渗流场的初始化设置。

(3) 对于非线性分布的基质吸力,用函数来表示其复杂几何形态的地下水位面具有一定的难度,不适合大面积推广应用,而将地下水位面简化成一平面后,可利用 FISH 语言进行渗流场初始化设置。

### 参考文献:

- [1] 彭文斌. FLAC 3D 实用教程[M]. 北京:机械工业出版社,2008.
- [2] 陈育民,徐鼎平. FLAC\FLAC3D 基础与工程实例[M]. 北京:中国水利水电出版社,2013.
- [3] 史可. 中原镇集镇滑坡稳定性研究[D]. 西安:长安大学,2017.

(上接第 108 页)

### 参考文献:

- [1] 胡雪玲. 场地污染土勘察及分析评价研究[J]. 工程勘察, 2016, (8): 34-38.
- [2] 朱春鹏, 刘汉龙. 污染土的工程性质研究进展[J]. 岩土力学, 2007(3): 625-630.
- [3] 饶为国. 污染土的机理、检测及整治[J]. 建筑技术开发, 1999(1): 15-16.
- [4] 徐永利, 王雪莉. 宝鸡某场地污染土的分析评价[J]. 陕西地质, 1996(2): 99-104.
- [5] 朱春鹏, 刘汉龙, 沈扬. 酸碱污染土强度特性的室内试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(7): 1146-1152.
- [6] 姜福国. 酸污染地土处理的工程实践[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2007(7): 36-37.
- [7] 崔双超, 齐世明, 殷晓波, 等. 石油烃污染土壤生物修复工程实例[J]. 绿色科技, 2019(4): 83-87.
- [8] 赵良元, 林莉, 吴敏, 等. 五氯酚污染土壤及沉积物的生物修复技术及机制研究进展[J]. 长江科学院院报, 2015, 32(8): 15-21.

- [4] GENUCHTEN M T V. A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils1 [J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(5): 734-742.
- [5] 蒋中明, 熊小虎, 曾铃. 基于 FLAC<sup>3D</sup> 平台的边坡非饱和和降雨入渗分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(3): 855-861.
- [6] 郭震山, 赵建斌, 赵紫阳. 降雨入渗条件下抗滑桩加固边坡稳定性分析[J]. 土木工程与管理学报, 2017, 34(4): 48-52.
- [7] ZHU X, XU Q, TANG M, et al. Comparison of Two Optimized Machine Learning Models for Predicting Displacement of Rainfall-Induced Landslide: A Case Study in Sichuan Province, China [J]. Engineering Geology, 2017, 218: 213-222.
- [8] 谢强, 田大浪, 刘金辉, 等. 土质边坡的饱和-非饱和渗流分析及特殊应力修正[J]. 岩土力学, 2019, 30(3): 810-814.
- [9] 吴俊杰, 王成华, 李广信. 非饱和土基质吸力对边坡稳定的影响[J]. 岩土力学, 2004, 25(5): 732-736.
- [10] 王阳平, 崔颖辉. 基于 Midas/Gts 的 FLAC3D 的建模方法[J]. 北方工业大学学报, 2010, 22(3): 78-81.
- [11] 胡冉, 陈益峰, 周创兵. 降雨入渗过程中土质边坡的固-液-气三相耦合分析[J]. 中国科学: 技术科学, 2011, 41(11): 1469-1482.

(编辑: 刘运飞)

- [9] 谯文武, 刘宏伟, 张起勇. SH 加固酸碱污染黄土的抗压强度特性试验研究[J]. 桂林理工大学学报, 2017, 37(3): 422-428.
- [10] 刘汉龙, 朱春鹏. 酸碱污染土基本物理性质的室内测试研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(8): 83-85.
- [11] 王绪民, 陈善雄, 程昌炳. 酸性溶液浸泡下原状黄土物理力学特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(9): 1619-1626.
- [12] BURLAND J B. On the Compressibility and Shear Strength of Natural Clays [J]. Geotechnique, 1990, 40(3): 329-378.
- [13] 唐大雄, 刘佑荣, 张文姝, 等. 工程岩土学[M]. 北京: 地质出版社, 1999.
- [14] 方祥位, 欧益希. 浸湿对原状 Q<sub>2</sub> 黄土微观结构与力学性质的影响研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(增刊2): 111-117.

(编辑: 赵卫兵)