

DOI: 10.11779/CJGE201504012

基于 ABAQUS 的三维边坡降雨入渗模块的开发及其应用

李 宁^{1, 2}, 许建聪²

(1. 上海理工大学环境与建筑学院, 上海 200093; 2. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘 要: 为了克服 ABAQUS 在进行降雨入渗模拟方面的局限性, 采用 Python 语言对 ABAQUS 软件的降雨入渗边界进行二次开发, 将降雨边界作为不定边界, 采用迭代算法对降雨入渗边界进行处理, 开发出基于 ABAQUS 软件的降雨入渗模块。该模块克服了 ABAQUS 软件中只能模拟降雨全部入渗, 入渗率保持不变的单一情况, 完善了 ABAQUS 软件的降雨入渗分析功能。通过与土柱入渗试验进行比较, 证明开发出的降雨入渗模块是稳定可靠的。在此基础上, 采用该模块研究了抗滑桩边坡的降雨入渗过程, 结果表明: 抗滑桩虽然可以有效的提高边坡的稳定性, 但是, 在降雨条件下, 抗滑桩的存在减小了排水有效断面, 使坡体后缘汇集而来的地下水得不到及时排泄, 这又会对边坡稳定性产生不利影响。因此在多雨地区进行抗滑桩设计应充分考虑降雨所带来的不利影响, 综合评价抗滑桩的加固效果。借助于 ABAQUS 的强大功能, 该模块可以为以后进行更复杂的降雨相关问题的研究提供一个良好的研究平台。

关键词: 抗滑桩; 边坡; 饱和-非饱和渗流; 降雨入渗; ABAQUS

中图分类号: TU44

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2015)04-0667-08

作者简介: 李 宁(1982-), 男, 博士, 讲师, 主要从事岩土工程、地下结构工程等方面的研究工作。E-mail: lining0017@163.com。

Development and application of three-dimensional rainfall infiltration module based on ABAQUS

LI Ning^{1, 2}, XU Jian-cong²

(1. School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In order to overcome the limitation of ABAQUS in simulating rainfall infiltration, Python language is used to modify the rainfall infiltration boundary in ABAQUS, the rainfall boundary is considered as an uncertain boundary and is solved by iterative algorithm, and then a rainfall module is developed. This module overcomes the unchanged infiltration rate which is adopted in ABAQUS, thus the ABAQUS's function in rainfall infiltration analysis is improved. Compared with the column infiltration tests, the validity of this module is confirmed. On this basis, the rainfall infiltration process of anti-slide pile slope is studied. The results show that the anti-slide pile can improve slope stability, however, under rainfall conditions, the anti-slide pile will reduce the effective drainage section, the underground water from trailing of the slope cannot discharge in time, and this will have adverse effect on the slope stability. So, for pluvial regions, the adverse effect of rainfall should be considered in anti-slide pile design. With the aid of the powerful features of ABAQUS, the proposed module may provide a good research platform for more complicated rainfall problems in the future.

Key words: anti-slide pile; slope; saturated-unsaturated seepage; rainfall infiltration; ABAQUS

0 引 言

斜坡失稳产生的滑坡已成为与地震和火山相并列的全球性三大地质灾害之一, 其危害已成为仅次于地震的第二大自然灾害^[1]。大量的滑坡实例表明, 降雨尤其是暴雨是触发滑坡的主要诱因; 长期以来, 国内外学者通过自编程序或商用程序对边坡降雨入渗进行

了广泛的研究, 并在此基础上进一步对边坡的稳定性进行了研究^[2-6]。以往对降雨边坡的研究多集中于二维, 将边坡作为平面应变问题来计算, 而实际边坡具有三维特性^[7-8], 尤其是对于支挡物加固的边坡, 比如

基金项目: 国家自然科学基金项目(40872179)

收稿日期: 2014-07-23

抗滑桩边坡, 由于抗滑桩的存在, 该问题不能简化为平面应变问题, 而只能采用三维分析。ABAQUS 软件具有良好的三维分析功能, 且提供了饱和-非饱和和计算功能, 近年来, 被越来越多的科研人员用以降雨边坡的研究工作: 徐晗等采用 ABAQUS 软件进行降雨入渗下非饱和土边坡渗流场与应力场耦合的数值模拟, 得到了非饱和土边坡变形与应力的变化规律^[9]; 崔亮等基于 ABAQUS 软件对降雨条件下土坡稳定性进行了数值模拟^[10]。但采用 ABAQUS 进行计算时, 只能将降雨边界作为流量边界来处理, 这在降雨强度小于土体饱和渗透系数时是合适的; 但当降雨强度大于饱和渗透系数时, 初始时刻降雨强度小于土壤入渗能力, 坡面为流量边界条件, 当降雨持续一段时间以后, 降雨强度将大于土壤入渗能力, 此时坡面将出现积水或径流, 坡面变为水头边界条件^[11-12], ABAQUS 提供的降雨边界并不能反映这种降雨边界的动态变化过程。因此, 章正等在文献[13]中指出: “ABAQUS 在模拟边坡降雨入渗问题时, 对于从本质上反映降雨入渗过程与行为的降雨入渗边界条件还未有较为科学、全面的处理方法, 所模拟的情况还很单一, 即地表径流不会发生, 降雨将全部入渗, 水的入渗率保持不变的情况, 回避了降雨入渗的复杂性。所以, 目前 ABAQUS 在边坡降雨入渗模拟方面的应用有一定的局限性”。

为了克服 ABAQUS 在进行降雨入渗模拟方面的局限性, 更加有效的利用 ABAQUS 软件进行降雨边坡的研究工作, 本文采用 Python 语言对 ABAQUS 软件的降雨入渗边界进行二次开发, 将降雨边界作为不定边界, 采用迭代算法对降雨入渗边界进行处理, 开发出基于 ABAQUS 软件的三维降雨入渗模块。该模块可以根据降雨强度与土壤入渗能力之间的关系, 即时改变降雨边界条件, 从而准确的反映降雨过程中降雨边界的动态变化过程, 同时还可用以三维边坡的降雨入渗分析, 使分析能够更加贴近实际情况。然后, 通过与陈学东^[14]的土柱降雨入渗试验成果进行比较, 对本文二次开发的可行性进行了验证。在此基础上, 采用开发的三维降雨入渗模块, 对抗滑桩边坡的入渗规律进行了研究, 该研究成果可以为多雨地区抗滑桩边坡的排水设施的布设提供依据, 同时开发的边坡降雨入渗模块也可以为研究更加复杂的边坡系统的降雨入渗规律提供一条可行的途径。

1 降雨入渗边界的处理

人们通常根据降雨强度与土体饱和渗透系数及土体入渗能力之间的关系, 将降雨入渗分为 3 种不同情

况^[15]:

情况 A: 降雨强度小于土体饱和渗透系数 ($p < k_s$)。这种情况下雨水将全部入渗, 不会出现径流。这种情况对应于图 1 中的 A 线。

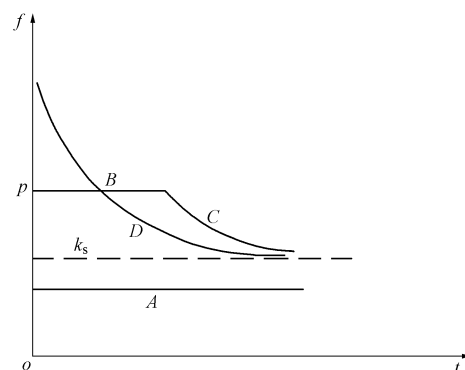


图 1 降雨条件下不同入渗情况

Fig. 1 Different infiltration conditions under rainfall

情况 B: 降雨强度大于土体饱和渗透系数而小于土体入渗能力 ($k_s < p \leq f_p$)。在这个阶段, 雨水将全部入渗, 未出现径流。图 1 中 BC 线中的线 B 对应于该阶段。

情况 C: 降雨强度大于土体饱和渗透系数且大于土体入渗能力 ($k_s < f_p \leq p$)。在这个阶段, 由于降雨强度超出了土体入渗能力, 所以将产生径流。图 1 中 BC 线中的线 C 对应于该阶段, 其中线 D 则代表了土体入渗能力曲线。

从图 1 可以看出, 降雨入渗的过程十分复杂, 入渗边界条件是根据降雨强度与土体入渗能力的相对关系来确定的, 而土体入渗能力又随着降雨时间而不断发生变化, 因此入渗边界条件事先很难精确确定。

关于降雨入渗边界的处理很多学者都提出了各自的解决方法: 高润德等将入渗边界作为流量已知边界, 直接将降雨强度作为边界入渗率^[16]; 吴宏伟假定 70% 的入渗量作为土体的入渗率^[17]; 李兆平等根据降雨强度与饱和渗透系数的关系来确定入渗率^[18], 当降雨强度小于土体饱和渗透系数时, 降雨全部入渗, 入渗边界为流量已知边界, 当地表的渗透系数等于土体的饱和渗透系数时, 入渗边界转换为水头已知边界。朱伟等^[21]结合陈学东^[14]的降雨入渗试验, 指出实际入渗边界是在流量边界与水头边界间不断变化, 在数值模拟时应以积水点的出现为判断标准, 对降雨入渗边界进行转换。

为了更准确的模拟降雨入渗边界, 本文将降雨入渗边界作为不定边界来处理:

(1) 未出现径流时 (对应于情况 A, B):

当坡面未出现径流时, 降雨入渗边界可以作为流

量边界来处理:

$$\left[k_{ij}^s k_r(h) \frac{\partial h}{\partial x_j} + k_{i3}^s k_r(h) \right] n_i \Big|_r = p \quad (1)$$

式中 k_{ij}^s 为饱和渗透系数张量; k_r 为相对渗透系数, 在非饱和区可以通过非饱和土渗透曲线确定; x_j 为坐标; h 为压力水头; n_i 为坡面的外法线方向向量; p 为坡面上的降雨强度, 以流入坡体为正。

此时降雨强度小于土体入渗能力, 雨水将全部入渗, 因此降雨边界上各点的压力水头应满足:

$$h \leq 0 \quad (2)$$

(2) 出现径流时 (对应于情况 C):

当坡面出现径流时, 可以将降雨边界条件作为水头边界处理, 考虑到坡面倾斜, 坡面上的积水能迅速流走, 因此坡面压力水头可取为 0, 即

$$h = 0 \quad (3)$$

此时降雨强度大于土体入渗能力, 雨水未能全部入渗, 因此降雨边界上的流量应满足:

$$\left[k_{ij}^s k_r(h) \frac{\partial h}{\partial x_j} + k_{i3}^s k_r(h) \right] n_i \Big|_r < p \quad (4)$$

从式 (1) ~ (4) 可以看出, 降雨入渗边界为不定边界, 在每一个计算时步开始时无法精确确定, 因此需要采用迭代算法对其进行求解。其中式 (1) 可以作为未出现径流时的定解条件, 而式 (2) 则作为相应的校核条件; 式 (3) 可以作为出现径流时的定解条件, 而式 (4) 则作为相应的校核条件。

2 基于 ABAQUS 的降雨入渗模块的开发

从第 1 节中给出的降雨入渗不定边界条件可以看出, 定解条件式 (1) 可以通过 ABAQUS 软件提供的流量边界来实现; 定解条件式 (3) 可以通过 ABAQUS 软件提供的水压边界来实现; 校核条件式 (2) 可以根据水压计算结果进行直接判断。而只有校核条件式 (4) 不能进行直接判断, 因此需要将该式转化为边界上的等效结点流量形式, 以便在 ABAQUS 中编程实现。

饱和 - 非饱和和渗流连续方程为^[19]

$$[c(h) + \beta S_s] \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[k_{ij}^s k_r(h) \frac{\partial h}{\partial x_j} + k_{i3}^s k_r(h) \right], \quad (5)$$

式中, β 是一个为了区分饱和区与非饱和区而引入的一个变量, 当处于饱和区时 $\beta = 1$, 当处于非饱和区时 $\beta = 0$ 。 $c(h) = \frac{\partial \theta}{\partial h}$ 为非饱和区的等效体积含水率, 在饱和区该值为 0。其他符号同前, 在此不再赘述。

为了推导便利, 将校核条件式 (4) 改写成如下形式:

$$\left[k_{ij}^s k_r(h) \frac{\partial h}{\partial x_j} + k_{i3}^s k_r(h) \right] n_i \Big|_r = q < p \quad (6)$$

式中, q 为坡面有径流时的实际入渗率, 其值小于降雨强度。

下面以一个边界单元为例, 推导该单元的等效结点流量; 设单元的形函数为 $N_m(x_i)$, 则单元内任意一点的压力水头 h 可以表示成如下形式:

$$h = N_m(x_i) h_m(t) \quad i = 1, 2, 3 \quad (7)$$

式中, h_m 为单元结点的压力水头。

利用加权余量法来进行推导, 将式 (7) 代入饱和-非饱和控制方程 (5), 可得其余量为

$$R = [c(h) + \beta S_s] \frac{\partial (N_m h_m)}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left[k_{ij}^s k_r(h) \frac{\partial (N_m h_m)}{\partial x_j} + k_{i3}^s k_r(h) \right] \quad (8)$$

同理, 将式 (7) 代入式 (6) 中, 即可得到边界上的余量 \bar{R} :

$$\bar{R} = \left[k_{ij}^s k_r(h) \frac{\partial (N_m h_m)}{\partial x_j} + k_{i3}^s k_r(h) \right] n_i - q \Big|_r \quad (9)$$

选取权函数 $W(x_i)$ 等于试函数 $N_n(x_i)$, 然后将式 (8) 两端同乘以 $W(x_i)$, 并在整个单元区域进行积分可得

$$\begin{aligned} \iiint_{\Omega_e} W(x_i) R d\Omega &= \iiint_{\Omega_e} N_n [c(h) + \beta S_s] \frac{\partial (N_m h_m)}{\partial t} d\Omega - \\ &\iiint_{\Omega_e} N_n \frac{\partial}{\partial x_i} \left[k_{ij}^s k_r(h) \frac{\partial (N_m h_m)}{\partial x_j} \right] d\Omega - \\ &\iiint_{\Omega_e} N_n \frac{\partial}{\partial x_i} [k_{i3}^s k_r(h)] d\Omega \quad (10) \end{aligned}$$

根据高斯定理, 式 (10) 可进一步表示为

$$\begin{aligned} \iiint_{\Omega_e} W(x_i) R d\Omega &= \iiint_{\Omega_e} N_n N_m [c(h) + \beta S_s] \frac{\partial h_m}{\partial t} d\Omega + \\ &\iiint_{\Omega_e} \frac{\partial N_n}{\partial x_i} k_{ij}^s k_r(h) \frac{\partial N_m}{\partial x_j} h_m d\Omega + \iiint_{\Omega_e} \frac{\partial N_n}{\partial x_i} k_{i3}^s k_r(h) d\Omega - \\ &\iint_r N_n \left[k_{ij}^s k_r(h) \frac{\partial (N_m h_m)}{\partial x_j} + k_{i3}^s k_r(h) \right] n_i dS \quad (11) \end{aligned}$$

选取权函数 $\bar{W}(x_i)$ 等于 $N_n(x_i)$, 然后将式 (9) 两端同乘以 $\bar{W}(x_i)$, 并对单元边界区域进行积分可得

$$\begin{aligned} \iint_r \bar{W}(x_i) \bar{R} dS &= \iint_r N_n \left[k_{ij}^s k_r(h) \frac{\partial (N_m h_m)}{\partial x_j} + k_{i3}^s k_r(h) \right] n_i dS - \\ &\iint_r q N_n dS \quad (12) \end{aligned}$$

根据 Galerkin 加权余量法, 可得

$$\iiint_{\Omega_e} \frac{\partial N_n}{\partial x_i} k_{ij}^s k_r(h) \frac{\partial N_m}{\partial x_j} h_m d\Omega + \iiint_{\Omega_e} N_n N_m [c(h) + \beta S_s] \frac{\partial h_m}{\partial t} d\Omega +$$

$$\iiint_{\Omega} \frac{\partial N_n}{\partial x_i} k_{i3} k_r(h) d\Omega - \iint_{\Gamma} q N_n dS = 0 \quad (13)$$

则式(13)可进一步写为

$$[K]\{h\} + [B]\left\{\frac{\partial h}{\partial t}\right\} + [F] = \iint_{\Gamma} q N_n dS \quad (14)$$

$$\text{式中 } [K] = \iiint_{\Omega} \frac{\partial N_n}{\partial x_i} k_{ij}^s k_r(h) \frac{\partial N_m}{\partial x_j} d\Omega, \quad [B] = \iiint_{\Omega} N_n N_m d\Omega$$

$$[C(h) + \beta S_s] d\Omega, \quad [F] = \iint_{\Gamma} \frac{\partial N_n}{\partial x_i} k_{i3} k_r(h) d\Omega$$

将式(14)两端对时间积分, 并采用隐式差分, 可得

$$[K]^{t+\Delta t} \{h\}^{t+\Delta t} \Delta t + [B]^{t+\Delta t} (h^{t+\Delta t} - h^t) + [F]^{t+\Delta t} \Delta t = \iint_{\Gamma} q N_n dS \quad (15)$$

将式(6)与式(15)相结合, 可得

$$[K]^{t+\Delta t} \{h\}^{t+\Delta t} \Delta t + [B]^{t+\Delta t} (h^{t+\Delta t} - h^t) + [F]^{t+\Delta t} \Delta t < \iint_{\Gamma} p N_n dS \quad (16)$$

式(16)的左边表示单元内部形成的等效结点流量, 右边表示降雨强度 p 形成的等效结点流量, 该式可通过每一时间步水压的计算结果编程进行判断。

为了后续描述方便, 设:

$$Q = [K]^{t+\Delta t} \{h\}^{t+\Delta t} \Delta t + [B]^{t+\Delta t} (h^{t+\Delta t} - h^t) + [F]^{t+\Delta t} \Delta t - \iint_{\Gamma} p N_n dS$$

则式(16)可进一步表示为

$$Q < 0 \quad (17)$$

以上公式推导是针对一个边界单元, 如果某一边界结点对应于多个边界单元, 则该结点的等效结点流量等于各边界单元在该点等效结点流量的叠加。

至此, 第1节中提出的降雨入渗边界的定解条件及校核条件都可以在 ABAQUS 软件中实现。然后采用 Python 语言对 ABAQUS 软件进行二次开发 (ABAQUS 中没有单独的孔压单元, 因此在开发时选用位移-孔压耦合单元, 然后通过约束所有的节点位移来模拟孔压单元^[20]), 其具体实施过程如下:

(1) 首先在初始时步, 将降雨入渗边界作为流量已知边界 (即降雨强度 p), 对于其他时步, 则以时步初的实际降雨入渗边界作为迭代的初始边界。然后采用 ABAQUS 进行计算, 求得相应的渗流场分布。

(2) 对于降雨入渗边界为流量边界的单元, 检查各单元入渗边界上结点的压力水头, 若 $h > 0$, 则将这些结点修改为水头边界条件, 反之则无需修改; 对于降雨入渗边界为水头边界的单元, 检查各单元入渗边界上结点的等效结点流量, 若 $Q > 0$ (Q 以流出坡体为负, 流入坡体为正), 则将其修改为流量边界条件

(即降雨强度 p), 反之则无需修改。

(3) 根据第(2)步中的边界条件, 再采用 ABAQUS 进行计算, 求得渗流场的分布。重复第(2)步, 直到前后两次计算的降雨入渗边界完全一致, 则结束迭代, 进行下一时间步的计算。

3 基于 ABAQUS 的降雨入渗模块的验证

陈学东^[14]通过自行设计的室内人工降雨土柱试验, 对降雨入渗量的变化过程进行了分析; 该试验也被朱伟等^[21]采用, 用于对非饱和土的降雨入渗规律进行研究。因此, 本文选取该试验作为算例, 利用第3节中开发出的基于 ABAQUS 的降雨入渗模块对土柱在降雨条件下的渗流情况进行分析, 然后与文献中的试验结果进行比较, 从而对第2节中二次开发的正确性进行验证。

3.1 计算模型及条件

试验土柱的直径为 15.2 cm, 高为 20 cm, 其有限元模型网格划分如图2所示; 整个土柱的初始含水率为 11.65%。土柱的侧面为不透水边界, 下表面为自由出渗边界, 上表面为降雨入渗边界, 施加的降雨强度为 0.82 mm/min, 持续 240 min。

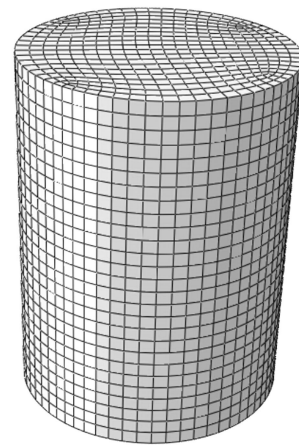


图2 土柱有限元网格

Fig. 2 Finite element mesh of soil column

3.2 土体水力学特性

非饱和土入渗分析中有两个重要的水力特性, 分别是表示含水率与吸力关系的土-水特征曲线 (SWCC) 和表示渗透系数与吸力关系的水力传导方程 (HFC)。本文根据文献[14]选用 van Genuchten 模型 (VG) 来描述非饱和土的这两个水力特性。

van Genuchten 关于土-水特征曲线的函数表达式为

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha|h|)^n]^m} & h < 0 \\ \theta_s & h \geq 0 \end{cases} \quad (18)$$

式中 θ 为体积含水率(%)； h 为压力水头(m) ($|h|$ 为 h 的绝对值)； θ_s 为饱和含水率(%)； θ_r 为残余含水率(%)； α 和 n 为曲线形状参数，且 $n>1$ ， α 的单位是 (m^{-1}) ； $m=1-1/n$ 。

相应的水力传导方程的函数表达式为

$$K(h)=\begin{cases} K_s \frac{\{1-(\alpha|h|)^{n-1}[1+(\alpha|h|)^n]^m\}^2}{[1+(\alpha|h|)^n]^{m/2}} & h<0 \\ K_s & h\geq 0 \end{cases}。$$

(19)

式中 K 为渗透系数(m/s)； K_s 为饱和渗透系数(m/s)。

模型参数按文献[14]选取，具体见表1。

表1 土体材料的VG模型参数

Table1 Parameters of soil for VG model

θ_r	θ_s	$\alpha/(1\cdot\text{m}^{-1})$	n	$k_s/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$
0.012	0.438	0.35	1.38	1.51×10^{-4}

3.3 计算结果与试验结果的比较

图3给出了入渗率随降雨时间的变化图，其中点值为试验得到的土柱入渗率，而线值为采用开发的降雨入渗模块计算得到的土柱上表面的入渗率。根据计算结果可以看出，当降雨强度大于土柱饱和渗透系数时，在入渗初期，土柱的入渗能力大于降雨强度，实际的入渗率为降雨强度。随着雨水入渗到土柱内，土柱的入渗能力下降，在积水点以后土柱的入渗能力开始小于降雨强度，部分雨水形成地表径流。当整个土柱含水率达到饱和时，入渗率即为土柱的饱和渗透系数。这与试验得到的土柱降雨入渗规律是完全一致的，两者仅在数值上有一些差异，计算积水点的出现要早于试验结果，而计算饱和点的出现要晚于试验结果，但总体来看，计算结果与试验结果基本上是吻合的，能够完整的反映整个降雨入渗过程。因此，本文基于ABAQUS的降雨入渗模块的开发是可行的，可以进行降雨入渗的分析。

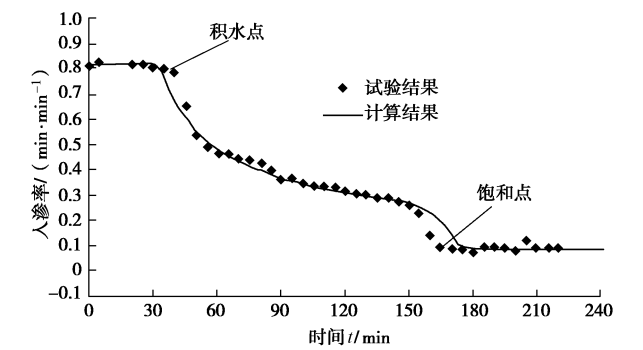


图3 入渗率随降雨时间变化图

Fig. 3 Variation of infiltration rate with different rainfall time
如果直接采用 ABAQUS 中提供的降雨边界进行

土柱入渗模拟，由于 ABAQUS 将降雨边界作为流量边界，因此在施加恒定的降雨强度 0.82 mm/min 后，不论降雨持续多久，土柱上表面的入渗率均为 0.82 mm/min，但从试验结果可以看出，土柱的入渗率是随降雨时间不断变化的，并不是一个恒定值。由此可以看出，本文开发的降雨入渗模块进一步拓宽了 ABAQUS 的应用范围，可以更好的模拟实际降雨入渗情况。

4 抗滑桩边坡的降雨入渗分析

抗滑桩是滑坡灾害治理中应用较多的一种加固技术，本节选取一抗滑桩土坡为例，采用开发的降雨入渗模块对抗滑桩边坡在降雨条件下的入渗规律进行研究。

4.1 计算模型

抗滑桩边坡模型如图4所示，边坡坡度为1：1.5，坡高为10 m，地基深度为10 m；抗滑桩距坡脚的水平距离为7.5 m，方桩的边长为1 m，桩长为10 m，桩间距 $S=2$ m。由于抗滑桩的存在，不能简化为平面应变问题，这里利用对称性，建立单桩取半（计算模型宽度为 $0.5S$ ，桩取半桩）的有限元计算模型进行三维数值计算^[22]，有限元网格如图5所示。

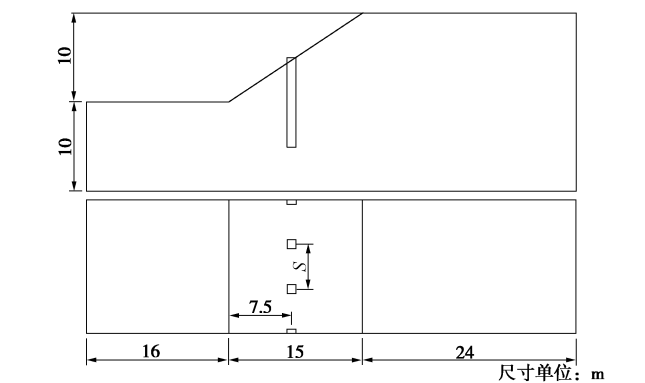


图4 抗滑桩边坡正视、俯视图

Fig. 4 Front and top views of anti-slide pile slope

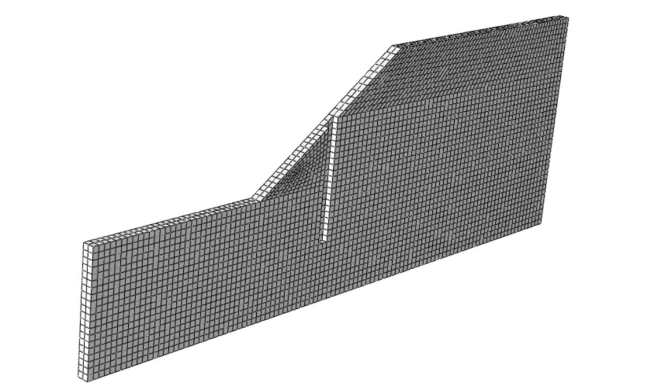


图5 抗滑桩边坡有限元网格

Fig. 5 Finite element mesh of pile-reinforced slope

初始地下水位水平且与坡脚等高，初始时刻地表的相对饱和度 $S_e = 0.720$ ，并随着坡高线性变化到地下水位处。边坡左端为静水压边界，边坡的坡面与坡顶为降雨边界，施加的降雨强度为 10 mm/h ，持续 10 h 。土体参数按文献[3]中的 USS 选取，具体见表 2。

表 2 边坡土体材料的 VG 模型参数

Table 2 Soil parameters of slope for VG model				
θ_r	θ_s	$\alpha/(1\cdot\text{m}^{-1})$	n	$k_s/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$
0.049	0.304	7.087	1.810	18.292×10^{-4}

4.2 抗滑桩边坡孔隙水压力变化过程

图 6 为降雨各时段抗滑桩边坡内孔隙水压力分布图，为了准确的区分饱和区与非饱和区，将非饱和区显示为黑色，饱和区与非饱和区的交界处即为浸润线。由图可以看出，随着降雨时间增长，浸润线逐渐升高，坡体内的饱和区不断扩大，非饱和区不断减小；根据水压数值可以看出，随着雨水不断入渗进入坡体，饱和区的水压不断增加，非饱和区的基质吸力不断减小。

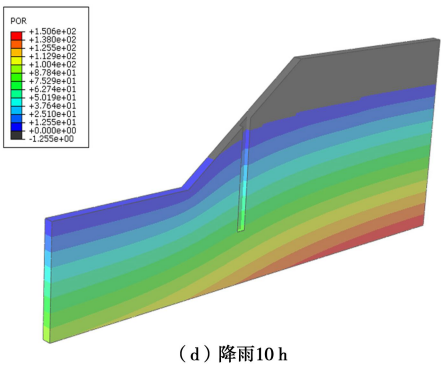
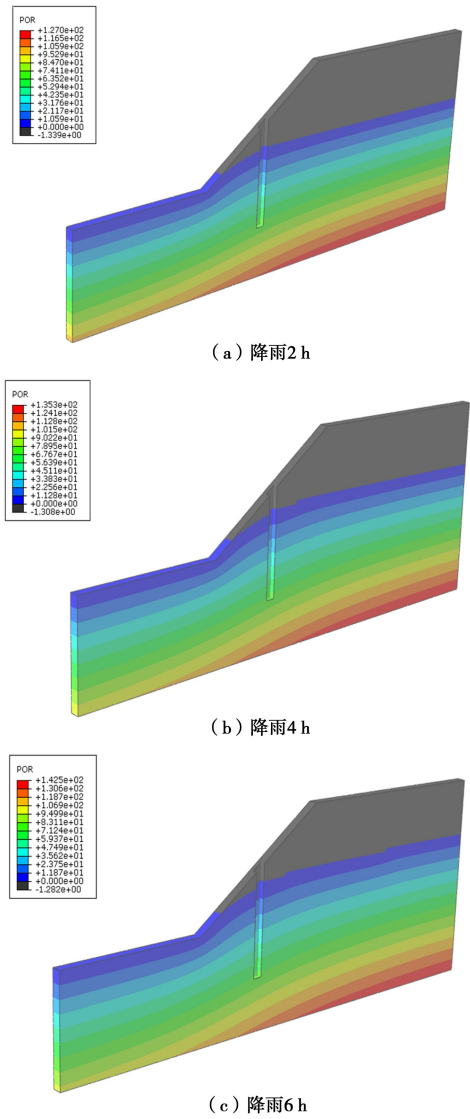


图 6 孔隙水压力分布图
Fig. 6 Contours of pore pressure

4.3 抗滑桩对渗流场的影响分析

为了分析抗滑桩的布设对边坡渗流场的影响，在相同的计算条件下再对未布设抗滑桩的边坡进行降雨入渗分析，然后将两者的计算结果进行比较。

图 7 中的左图为抗滑桩边坡在降雨 10 h 后的孔隙水压力分布，右图为相同尺寸的不含抗滑桩的边坡在降雨 10 h 后的孔隙水压力分布；通过图 7 可以看出，由于抗滑桩的存在，减小了排水有效断面，从坡体后缘汇集而来的地下水得不到及时排泄，在相同的降雨时间后，其边坡后缘的浸润线升高幅度要大于不含抗滑桩的边坡。

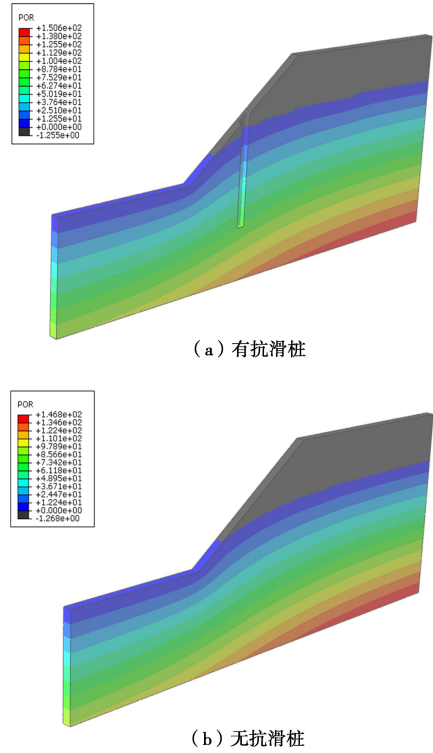


图 7 持续降雨 10 h 后孔隙水压力比较图
Fig. 7 Comparison of pore pressures after rainfall time of 10 h
图 8 中上方的图表示降雨 10 h 后距基底 6 m 处的横断面上抗滑桩附近的流速矢量图，下方为相同位置

处不含抗滑桩的边坡的流速矢量图。通过图 8 可以看出, 由于抗滑桩相对于土体而言, 渗透系数极小, 相当于形成了一个隔水层, 在抗滑桩附近渗透的雨水将绕过抗滑桩而在土体中流动。

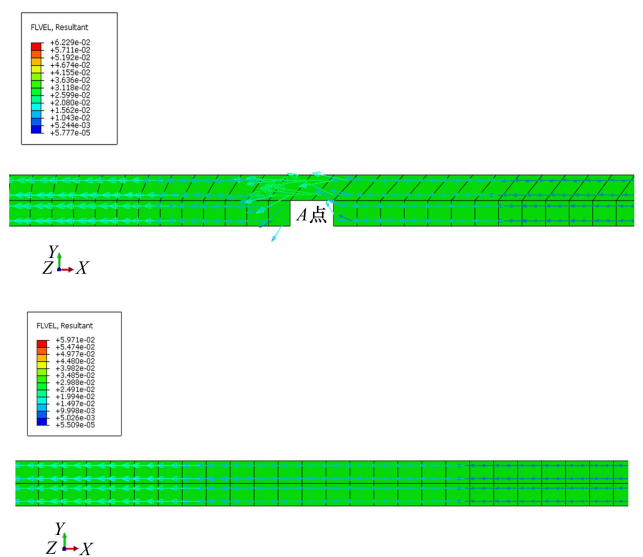


图 8 降雨 10 h 后距基底 6 m 处的横断面上的流速矢量比较图
Fig. 8 Comparison of pore pressures after rainfall time of 10 h

选取图 8 中抗滑桩侧边的中点 A 作为特征点, 并将该点的水压及流速与未布设抗滑桩的边坡相同位置的水压及流速进行比较, 比较结果见表 3。

表 3 降雨各时段特征点水压及流速比较表

Table 3 Comparison of pore pressures and velocities						
类型	2 h		6 h		10 h	
	流速	水压/ kPa	流速	水压/ kPa	流速	水压/ kPa
有桩	0.014	58.602	0.021	64.596	0.025	67.809
无桩	0.008	57.840	0.011	62.955	0.013	65.386

从表 3 可以看出, 在降雨的各个时段, 抗滑桩附近的流速与水压均要大于无桩边坡在相同位置处的流速与水压, 这主要是因为抗滑桩的存在减小了排水有效断面, 从而造成流速增加, 同时使从坡体后缘汇集而来的地下水得不到及时排泄, 进一步抬高了地下水位, 从而使水压也进一步增加。

5 结 论

(1) 采用 Python 语言对 ABAQUS 软件的降雨入渗边界进行二次开发, 将降雨边界作为不定边界, 采用迭代算法对降雨入渗边界进行处理, 开发出基于 ABAQUS 软件的降雨入渗模块。该模块克服了 ABAQUS 软件中只能模拟降雨全部入渗, 水的入渗率保持不变的单一情况, 可以根据降雨强度与土壤入渗能力之间的关系, 即时改变降雨边界条件, 从而准确的反映降雨过程中降雨边界的动态变化过程, 完善了 ABAQUS 软件的降雨入渗分析功能。

(2) 通过对陈学东土柱入渗试验进行数值模拟可以看出, 开发出的降雨入渗模块可以完整的模拟当降雨强度大于土体饱和渗透系数时的整个降雨入渗过程, 且与试验结果基本上是吻合的; 说明开发出的降雨入渗模块是稳定可靠的, 可以用于边坡降雨入渗的分析。

(3) 对抗滑桩边坡的降雨入渗过程进行数值模拟可以看出, 抗滑桩作为一种边坡加固技术, 虽然可以有效的提高边坡的安全性, 但是, 在降雨条件下, 抗滑桩的存在减小了排水有效断面, 使坡体后缘汇集而来的地下水得不到及时排泄, 从而造成桩体附近的流速及水压要高于未施设抗滑桩的边坡, 这对于边坡稳定性又会产生不利影响。因此在多雨地区进行抗滑桩设计应充分考虑降雨所带来的不利影响, 综合评价抗滑桩的加固效果。

(4) 降雨入渗模块是基于 ABAQUS 软件进行的二次开发, 便于利用 ABAQUS 软件所提供的各类功能完成更加复杂的研究工作; 因此, 可以为以后进行与降雨相关的更复杂问题的研究提供一个良好的研究平台。

本文的重点是开发基于 ABAQUS 的降雨入渗模块, 同时限于文章篇幅, 因而对降雨条件下抗滑桩边坡的渗流场特性只是做了初步研究, 下一步将对不同桩间距、不同桩长及不同桩位对边坡渗流场特性的影响进行深入研究, 并进一步对其稳定性进行研究。

参考文献:

[1] DAI F C, LEE C F, NGAI Y Y. Landslide risk assessment and management: an overview[J]. Engineering Geology, 2002, 64(1): 65 - 87.

[2] 戚国庆, 黄润秋, 速宝玉, 等. 岩质边坡降雨入渗过程的数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(4): 625 - 629. (QI Guo-qing, HUANG Run-qiu, SU Bao-yu, et al. Numerical simulation on rainfall infiltration on rock slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(4): 625 - 629. (in Chinese))

[3] CAI F, UGAI K. Numerical analysis of rainfall effects on slope stability[J]. International Journal of Geomechanics, 2004, 4(2): 69 - 78.

[4] 吴长富, 朱向荣, 尹小涛, 等. 强降雨条件下土质边坡瞬态稳定性分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(2): 386 - 391. (WU Chang-fu, ZHU Xiang-rong, YIN Xiao-tao, et al. Analysis of soil slope's transient stability under intensive rainfall[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(2): 386 - 391.(in Chinese))

- [5] 付宏渊, 曾 铃, 王桂尧, 等. 降雨入渗条件下软岩边坡稳定性分析[J]. 岩土力学, 2012, **33**(8): 2359 - 2365. (FU Hong-yuan, ZENG Ling, WANG Gui-yao, et al. Stability analysis of soft rock slope under rainfall infiltration[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(8): 2359 - 2365. (in Chinese))
- [6] 唐 栋, 李典庆, 周创兵, 等. 考虑前期降雨过程的边坡稳定性分析[J]. 岩土力学, 2013, **34**(11): 3239 - 3248. (TANG Dong, LI Dian-qing, ZHOU Chuang-bing, et al. Slope stability analysis considering antecedent rainfall process[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(11): 3239 - 3248. (in Chinese))
- [7] GRIFFITHS D V, MARQUEZ R M. Three-dimensional slope stability analysis by elasto-plastic finite elements[J]. Géotechnique, 2007, **57**(6): 537 - 546.
- [8] WEI W B, CHENG Y M, LI L. Three-dimensional slope failure analysis by the strength reduction and limit equilibrium methods[J]. Computers and Geotechnics, 2009, **36**: 70 - 80.
- [9] 徐 晗, 朱以文, 蔡元奇, 等. 降雨入渗条件下非饱和土边坡稳定分析[J]. 岩土力学, 2005, **26**(12): 1957 - 1962. (XU Han, ZHU Yi-wen, CAI Yuan-qi, et al. Stability analysis of unsaturated soil slopes under rainfall infiltration[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, **26**(12): 1957 - 1962. (in Chinese))
- [10] 崔 亮, 崔可锐. 基于 ABAQUS 对降雨条件下非饱和土坡稳定性的研究[J]. 合肥工业大学学报, 2012, **35**(11): 1560 - 1564. (CUI Liang, CUI Ke-rui. Stability studies of unsaturated soil slope under rainfall conditions based on ABAQUS[J]. Journal of Hefei University of Technology, 2012, **35**(11): 1560 - 1564. (in Chinese))
- [11] 朱 伟, 程南军, 陈学东, 等. 浅谈非饱和渗流的几个基本问题[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(2): 235 - 240. (ZHU Wei, CHENG Nan-jun, CHEN Xue-dong, et al. Some fundamental problems of unsaturated seepage[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(2): 235 - 240. (in Chinese))
- [12] SANTOSO A M, PHOON K K, QUEK S T. Effects of soil spatial variability on rainfall-induced landslides[J]. Computers and Structures, 2011, **89**: 893 - 900.
- [13] 章 正, 张本卓. 应用 ABAQUS 模拟边坡降雨入渗的评价性分析[J]. 中国科技信息, 2012, **9**: 80. (ZHANG Zheng, ZHANG Ben-zhuo. Evaluation of ABAQUS's performance in simulating rainfall infiltration into slope[J]. China Science and Technology Information, 2012, **9**: 80. (in Chinese))
- [14] 陈学东. 浅层非饱和带降雨入渗规律的试验与数值研究[D]. 南京: 河海大学, 2005. (CHEN Xue-dong. Rainfall infiltration pattern in the vadose zone[D]. Nanjing: Hohai University, 2005. (in Chinese))
- [15] MEIN R G, LARSON C L. Modeling infiltration during a steady rain[J]. Water Resources Research, 1973, **9**(2): 384 - 394.
- [16] 高润德, 彭良泉, 王 钊. 雨水入渗作用下非饱和土边坡的稳定性分析[J]. 人民长江, 2001, **32**(11): 25 - 27. (GAO Run-de, PENG Liang-quan, WANG Zhao. Unsaturated soil slope stability analysis under rain infiltration[J]. Yangtze River, 2001, **32**(11): 25 - 27. (in Chinese))
- [17] 吴宏伟, 陈守义, 庞宇威. 雨水入渗对非饱和土坡稳定性影响的参数研究[J]. 岩土力学, 1999, **20**(1): 1 - 14. (NG Wang-wai Charles, CHEN Shou-yi, PANG Yue-wai. Parametric study of effects of rain infiltration on unsaturated slopes[J]. Rock and Soil Mechanics, 1999, **20**(1): 1 - 14. (in Chinese))
- [18] 李兆平, 张 弥. 考虑降雨入渗影响的非饱和土边坡瞬态安全系数研究[J]. 土木工程学报, 2001, **34**(5): 57 - 61. (LI Zhao-ping, ZHANG Mi. Effects of rain infiltration on transient safety of unsaturated soil slope[J]. China Civil Engineering Journal, 2001, **34**(5): 57 - 61. (in Chinese))
- [19] GU C S, WU H Z, SU H Z. Research on stability of the accumulated rock-soil body of reservoir bank under rainfall condition[J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2009, **52**(9): 2528 - 2535.
- [20] 费 康, 张建伟. ABAQUS 在岩土工程中的应用[J]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010. (FEI Kang, ZHANG Jian-wei. Application of ABAQUS software in geotechnical engineering[M]. Beijing: China Water and Power Press, 2010. (in Chinese))
- [21] 朱 伟, 陈学东, 钟小春. 降雨入渗规律的实测与分析[J]. 岩土力学, 2006, **27**(11): 1873 - 1879. (ZHU Wei, CHEN Xue-dong, ZHONG Xiao-chun. Observation and analysis of rainfall infiltration[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, **27**(11): 1873 - 1879. (in Chinese))
- [22] 年廷凯, 徐海洋, 刘红帅. 抗滑桩加固边坡三维数值分析中的几个问题[J]. 岩土力学, 2012, **33**(8): 2521 - 2535. (NIAN Ting-kai, XU Hai-yang, LIU Hong-shuai. Several issues in three-dimensional numerical analysis of slopes reinforced with anti-slide piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(8): 2521 - 2535. (in Chinese))