

无限长均质斜坡降雨入渗解析解

李 宁^{1, 2}, 许建聪^{1, 2}

(1. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘 要: 降雨是导致边坡失稳的最主要的环境因素, 研究降雨入渗对边坡稳定性的影响, 关键和难点是计算降雨入渗在边坡土体中引起的渗流场。采用 Fourier 积分变换分别对降雨强度小于和大于土体饱和渗透系数情况下的斜坡入渗解析解进行了推导, 并给出了这两种情况下斜坡入渗解析解的统一表达式。该解不仅能反映非饱和土特性及斜坡的影响, 还能反映当降雨强度大于土体饱和渗透系数时, 坡面边界由流量边界转化为水头边界的动态变化过程, 便于更全面地对降雨情况下斜坡的入渗规律进行研究。通过与有限元软件的计算结果进行对比, 证明该解是稳定可靠的, 且其形式简单, 计算效率高; 该解可精确计算坡面积水时间及任意时间点及空间点的孔隙水压力值, 并用于评估降雨入渗对非饱和土斜坡稳定性的影响。

关键词: 非饱和土; 无限长斜坡; 降雨入渗; 解析解

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2012)12-2325-06

作者简介: 李 宁(1982-), 男, 博士研究生, 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。

Analytical solutions for rainfall infiltration into homogenous infinite slopes

LI Ning^{1, 2}, XU Jian-cong^{1, 2}

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2.

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

Abstract: Rainfall is the main environmental factor for the failure of slopes. To study the effect of the rainfall on the slope stability, the most important thing is to obtain the seepage field in slopes under rainfall condition. By using the Fourier integral transform, the analytical solutions for water infiltration into the slopes under rainfall, of which the intensity is less or more than saturated permeability coefficient of soils, are developed, and the unified analytical expression for water infiltration into the slopes under the two rainfall conditions is presented. The analytical solution can consider the dynamic changing process, in which the boundary condition of slopes changes from flux boundary to pressure one, as well as the properties of unsaturated soils and the effect of slopes. It is convenient to study the laws of water infiltration into slope more comprehensively. By comparing the analytical solutions with those obtained from numerical simulation, it is proved that the analytical solutions are reasonable, simple and efficient in computation. They can be used to calculate the ponding time and the pore water pressure at arbitrary point of the slope at any time, as well as to evaluate the effect of the rainfall infiltration on the stability of unsaturated soil slopes.

Key words: unsaturated soil; infinite slope; rainfall infiltration; analytical solution

0 引 言

中国是一个滑坡灾害频发的国家, 据资料显示, 中国有新老滑坡约 30 万处, 其中灾害性的约 1.5 万处, 每年损失高达 100 亿元以上^[1]。众多的事实表明, 降雨是影响边坡稳定性, 导致边坡失稳的最主要和最普遍的环境因素, 是浅层滑坡最关键的触发因素^[2-3]。研究降雨入渗对边坡稳定性的影响, 问题的关键和难点在于如何计算降雨入渗在边坡土体中引起的渗流场^[4-5], 因此对降雨条件下斜坡渗流场进行研究具有重

要意义。

荣冠等^[6]、谭新等^[7]分别采用数值模拟对降雨条件下岩质与土质边坡的渗流场进行了研究; 李兆平等^[8]、吴长富等^[9]在分别对降雨条件下边坡渗流场进行数值模拟的基础上, 结合刚体极限平衡法对边坡的稳定性进行了分析。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40872179)

收稿日期: 2012-01-02

与数值解相比,解析解更清晰简洁,能更直观地显示定解问题对边界条件的响应,且便于对各影响因素进行参数敏感性分析,并能对数值解的结果进行验证^[10-11]。Basha 利用 Green 函数法得到了规定边界条件下多维非稳态入渗解析解^[12]。Srivastava 等通过拉普拉斯变换法得到了降雨条件下一维瞬态入渗解析解^[13]。Chen 等通过 Fourier 积分变换法得到了任意降雨边界条件下多维入渗解析解^[14]。但是这些解析解均是在地表水平的情况下推出的,均未能考虑斜坡的影响。

针对以上问题,Chen 等^[15]通过对 Green-Ampt 入渗模型进行改进,提出了斜坡的 Green-Ampt 入渗模型,并推导了稳恒与非稳恒降雨下斜坡的入渗公式。但该模型假定存在明显湿润锋,且湿润锋以上土体的含水率是相同的,这种假定与实际的入渗情况相比是不严格的。Iverson^[16]基于严格的 Richards 控制方程提出了一个斜坡的降雨入渗模型。但模型中假定非饱和土渗透系数等于其饱和渗透系数,未能体现出土体的非饱和特性。詹良通等^[10]在合理简化的基础上,推导了无限长斜坡降雨入渗解析解,该解析解采用了较严格的 Richards 控制方程并能反映土体的非饱和特性,同时还考虑了斜坡的影响,更适宜于进行降雨条件下斜坡渗流场的分析研究。但是该解析解只考虑了坡面边界条件为恒定流量的情况,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^[17-18];该解析解并不能反映这种在一次降雨过程中坡面边界条件由流量边界条件转变为水头边界条件的动态变化过程。因此对于这种情况下的斜坡入渗解析解,还需要作进一步的研究。

为了更全面地对降雨情况下斜坡内的入渗规律进行研究,在文献[10]的基础上,采用 Fourier 积分变换分别对降雨强度小于和大于土体饱和渗透系数情况下的斜坡入渗解析解进行了推导,并给出了两种情况下斜坡入渗解析解的统一表达式,该解析解既考虑了坡面倾斜的影响,同时还考虑了不同的降雨形式:低强度降雨(降雨强度小于饱和渗透系数)和高强度降雨(降雨强度大于饱和渗透系数)。最后通过与有限元数值模拟结果进行比较,对得到的解析解的正确性进行了验证。

1 降雨入渗条件下无限长斜坡内水分运移模型

1.1 模型建立的基本假定

采用与文献[10]相同的假定:①假定斜坡的长度为无限长;②假定斜坡中主地下水位及负孔隙水压力等值线平行于坡面;③本模型考虑的是一场均匀降雨,即降雨过程中雨强保持不变。

1.2 控制方程的推导

图 1 所示为二维坐标下的无限长斜坡,其中 γ 为斜坡倾角, x 与 z 为标准笛卡尔坐标系, x^* 与 z^* 为旋转后的坐标系,两坐标之间的关系为

$$\begin{cases} x^* = x \cos \gamma - z \sin \gamma, \\ z^* = x \sin \gamma + z \cos \gamma. \end{cases} \quad (1)$$

对于各向同性土来说,二维非饱和控制方程为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial \psi}{\partial z} + k \right) = \frac{\partial \theta}{\partial t}, \quad (2)$$

式中, k 为土体的渗透系数, θ 为土体的体积含水率, ψ 为孔隙水压力水头。

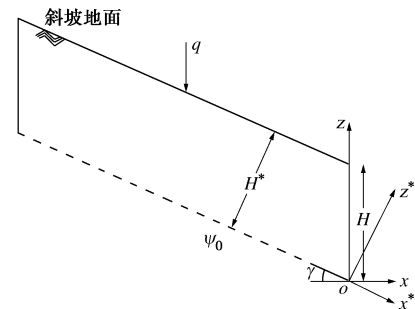


图 1 均质无限长斜坡示意图

Fig. 1 Coordinate system for homogeneous infinite slopes

将式(1)代入式(2)可得

$$\frac{\partial}{\partial x^*} \left(k \frac{\partial \psi}{\partial x^*} \right) + \frac{\partial}{\partial z^*} \left(k \frac{\partial \psi}{\partial z^*} \right) + \frac{\partial k}{\partial z^*} \cos \gamma - \frac{\partial k}{\partial x^*} \sin \gamma = \frac{\partial \theta}{\partial t}. \quad (3)$$

根据假定②可知,孔隙水压力仅随 t 和 z^* 改变,因此式(3)可以写为

$$\frac{\partial}{\partial z^*} \left(k \frac{\partial \psi}{\partial z^*} \right) + \frac{\partial k}{\partial z^*} \cos \gamma = \frac{\partial \theta}{\partial t}. \quad (4)$$

非饱和土土水特征曲线和渗透系数方程参照文献[10],均用指数函数来描述:

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) e^{\alpha \psi}, \quad (5)$$

$$k = k_s e^{\alpha \psi}. \quad (6)$$

将式(5)、(6)代入式(4)可以得到无限长斜坡非饱和渗流控制方程:

$$\frac{\partial^2 k}{\partial z^{*2}} + \alpha \cos \gamma \frac{\partial k}{\partial z^*} = \frac{\alpha (\theta_s - \theta_r)}{k_s} \frac{\partial k}{\partial t}, \quad (7)$$

以上推导及所得公式均参考文献[10]。

为了计算简便,令 $z' = \alpha \cos \gamma z^*$, $t' = \frac{\alpha \cos^2 \gamma k_s t}{\theta_s - \theta_r}$

$k' = \frac{k}{k_s}$, 并将其代入式(7)可得

$$\frac{\partial^2 k'}{\partial z'^2} + \frac{\partial k'}{\partial z'} = \frac{\partial k'}{\partial t'} \quad (8)$$

式 (8) 还可以进一步简化, 令 $k'' = k' e^{\frac{z'}{2} + \frac{t'}{4}}$, 可得

$$\frac{\partial k''}{\partial t'} = \frac{\partial^2 k''}{\partial z'^2} \quad (9)$$

1.3 初始条件的推导

由于初始状态为稳态, 因此其控制方程可由式 (8) 变换得到

$$\frac{\partial^2 k'}{\partial z'^2} + \frac{\partial k'}{\partial z'} = 0 \quad (10)$$

初始时刻下边界条件为恒定孔隙水压力水头 ψ_0 (如图 1 所示), 即

$$k'|_{z'=0} = e^{\alpha\psi_0} \quad (11)$$

上边界条件采用与文献[10]相同的做法, 假设其前期雨强为 q_a , 则

$$k' + \frac{\partial k'}{\partial z'} \Big|_{z'=H'} = \frac{q_a}{k_s} \quad (12)$$

式中, $H' = \alpha \cos \gamma H^*$ 。

联立式 (10)、(11)、(12) 并求解可得

$$k' = \frac{q_a}{k_s} + \left(e^{\alpha\psi_0} - \frac{q_a}{k_s} \right) e^{-z'} \quad (13)$$

由式 (13) 可进一步得

$$k'' \Big|_{t'=0} = k' e^{\frac{z'}{2}} = \frac{q_a}{k_s} \left(e^{\frac{z'}{2}} - e^{-\frac{z'}{2}} \right) + e^{\left(\alpha\psi_0 - \frac{z'}{2} \right)} \quad (14)$$

1.4 边界条件的确定

下边界条件始终为恒定孔隙水压力水头 ψ_0 , 则有

$$k'' \Big|_{z'=0} = e^{\left(\alpha\psi_0 + \frac{t'}{4} \right)} \quad (15)$$

上边界条件将根据降雨强度与土体饱和渗透系数的关系而定。

(1) 降雨强度小于饱和渗透系数

设此时的降雨强度为 q_b , 且 $q_b < k_s$ 。这种情况下, 雨水将全部入渗, 坡面不会产生积水, 则上边界条件为流量边界条件:

$$\frac{\partial k''}{\partial z'} + \frac{k''}{2} \Big|_{z'=H'} = \frac{q_b}{K_s} e^{\frac{H'}{2} + \frac{t'}{4}} \quad (16)$$

(2) 降雨强度大于饱和渗透系数

降雨强度大于饱和渗透系数时, 当降雨持续一段时间后, 坡面将出现积水, 设积水时间为 t_p 。

当降雨时间 $t < t_p$ 时, 此时坡面还未积水, 则上边界条件为流量边界条件, 其表达式可用式 (16) 表示。

当降雨时间 $t > t_p$ 时, 此时坡面出现积水, 由于坡面的存在, 设积水全部流走, 则上部水压为 0, 则上边界条件为水头边界条件:

$$k'' \Big|_{z'=H'} = e^{\frac{H'}{2} + \frac{t'}{4}} \quad (17)$$

由此可以看出, 该情况下随着降雨时间的增长, 上边界条件将由流量边界过渡到水头边界。

2 不同降雨条件下的解析解

2.1 降雨强度小于饱和渗透系数

当降雨强度小于饱和渗透系数时, 坡面不会出现积水, 因此联立式 (9)、(14) ~ (16) 并利用傅里叶积分变换法^[19], 可以求得

$$k'' = \sum_{m=1}^{\infty} e^{-\beta_m^2 t'} \cdot K_1(\beta_m, z') \left[F_1(\beta_m) + \int_0^{t'} e^{\beta_m^2 t} A_1(\beta_m, t) dt \right] \quad (18)$$

式中, β_m 满足 $\beta_m \cot \beta_m H' = -0.5$; 以下将分别给出式 (18) 中其他符号的计算公式及其结果:

$$K_1(\beta_m, z') = B(\beta_m) \sin \beta_m z' \quad (18a)$$

$$\text{式中, } B(\beta_m) = \sqrt{\frac{2(\beta_m^2 + 0.25)}{H'(\beta_m^2 + 0.25) + 0.5}} \quad (18b)$$

$$F_1(\beta_m) = \int_0^{H'} K_1(\beta_m, z) \cdot k'' \Big|_{t'=0} dz \quad (18b)$$

将式 (14) 代入式 (18b) 可得

$$F_1(\beta_m) = \frac{B(\beta_m)}{\beta_m^2 + 0.25} \left(e^{\frac{H'}{2}} \cdot \sin \beta_m H' \cdot \frac{q_a}{k_s} + \beta_m \cdot e^{\alpha\psi_0} \right) \quad (18c)$$

$$A_1(\beta_m, t) = \frac{\partial K_1}{\partial z'} \Big|_{z'=0} \cdot k'' \Big|_{z'=0} + K_1 \Big|_{z'=H'} \cdot \left(\frac{\partial k''}{\partial z'} + \frac{k''}{2} \right) \Big|_{z'=H'} \quad (18d)$$

将 (15)、(16) 代入式 (18d) 可得

$$A_1(\beta_m, t) = C_1(\beta_m) e^{\frac{t'}{4}} \quad (18e)$$

$$\text{式中, } C_1(\beta_m) = B(\beta_m) \cdot \left(\beta_m e^{\alpha\psi_0} + \sin \beta_m H' \frac{q_b}{k_s} e^{\frac{H'}{2}} \right) \quad (18e)$$

求得 k'' 后, 可进一步求得斜坡内孔隙水压力的解析表达式:

$$\psi(z', t') = \frac{1}{\alpha} \ln \left\{ e^{-\frac{z'}{2}} \left[\sum_{m=1}^{\infty} D_1 \sin \beta_m z' e^{-\left(\beta_m^2 + 0.25 \right) t'} + \sum_{m=1}^{\infty} D_2 \sin \beta_m z' \right] \right\} \quad (19)$$

$$\text{式中, } D_1 = B(\beta_m) \left[F_1(\beta_m) - \frac{C_1(\beta_m)}{\beta_m^2 + 0.25} \right], D_2 = B(\beta_m) \cdot$$

$$\frac{C_1(\beta_m)}{\beta_m^2 + 0.25} \quad (19)$$

2.2 降雨强度大于饱和渗透系数

降雨强度大于饱和渗透系数时, 降雨持续一段时间后, 坡面将出现积水或径流。根据式 (19), 利用 $\psi(z', t') \Big|_{z'=H'} = 0$, 可以求得积水时间 t_p 以及此时的水压分布:

$$\psi(z', t') \Big|_{t'=t_p} = \frac{1}{\alpha} \ln \left(e^{-\frac{z'}{2}} \cdot \sum_{m=1}^{\infty} B_1 \sin \beta_m z' \right) \quad (20)$$

式中, $t'_p = \frac{\alpha \cos^2 \gamma k_s t_p}{\theta_s - \theta_r}$, $B_1 = D_1 e^{-(\beta_m^2 + 0.25)t'_p} + D_2$ 。

当降雨时间 $t < t_p$ 时, 此时还未出现积水, 上边界条件仍为流量边界条件, 此时的水压仍采用式 (19) 计算。

当降雨时间 $t > t_p$ 时, 令 $t'' = t' - t'_p$, 并以 t'' 作为时间变量, 则式 (9) 可改写为

$$\frac{\partial k''}{\partial t''} = \frac{\partial^2 k''}{\partial z'^2} \quad (21)$$

同样以 t'' 作为时间变量, 则式 (20) 可改写为

$$\psi(z', t'')|_{t''=0} = \frac{1}{\alpha} \ln \left(e^{-\frac{z'}{2}} \cdot \sum_{m=1}^{\infty} B_1 \sin \beta_m z' \right), \quad (22)$$

由式 (22) 可进一步得

$$k''(z', t'')|_{t''=0} = \sum_{m=1}^{\infty} B_1 \sin \beta_m z' \quad (23)$$

式 (23) 即为新时间变量下的初始状态, 联立式 (15)、(17)、(21)、(23), 并利用傅里叶积分变换法^[19], 可以求得

$$k'' = \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\beta_n^2 t''} \cdot K_2(\beta_n, z') \left[F_2(\beta_n) + \int_0^{t''} e^{\beta_n^2 t} A_2(\beta_n, t) dt \right], \quad (24a)$$

式中 β_n 满足 $\sin \beta_n H' = 0$, 以下将分别给出式 (24a) 中其他符号的计算公式及其结果:

$$K_2(\beta_n, z') = \sqrt{\frac{2}{H'}} \sin \beta_n z' \quad ; \quad (24b)$$

$$F_2(\beta_n) = \int_0^{H'} K_2(\beta_n, z) \cdot k''|_{t''=0} dz \quad ; \quad (24c)$$

将式 (22) 代入式 (24c) 可得

$$F_2(\beta_n) = \sqrt{\frac{2}{H'}} \beta_n \cos \beta_n H' \cdot \sum_{m=1}^{\infty} B_1(\beta_m) \frac{\sin \beta_m H'}{(\beta_m - \beta_n) \cdot (\beta_m + \beta_n)}; \quad (24d)$$

$$A_2(\beta_n, t) = \frac{\partial K_2}{\partial z'} \Big|_{z'=0} \cdot k''|_{z'=0} - \frac{\partial K_2}{\partial z'} \Big|_{z'=H'} \cdot k''|_{z'=H'}; \quad (24e)$$

将 (15)、(17) 代入式 (24e) 可得

$$A_2(\beta_n, t) = C_2(\beta_n) e^{\frac{t}{4}}, \quad (24f)$$

式中, $C_2(\beta_n) = \sqrt{\frac{2}{H'}} \beta_n \left(e^{\alpha \psi_0} - e^{\frac{H'}{2}} \cos \beta_n H' \right)$ 。

求得 k'' 后, 又有 $t'' = t' - t'_p$, 可进一步求得斜坡内孔隙水压力的解析表达式:

$$\psi(z', t') = \frac{1}{\alpha} \ln \left\{ e^{-\frac{z'}{2}} \left[\sum_{n=1}^{\infty} D_3 \sin \beta_n z' e^{-(\beta_n^2 + 0.25)t'} + \sum_{n=1}^{\infty} D_4 \sin \beta_n z' \right] \right\}, \quad (25)$$

式中, $D_3 = \sqrt{\frac{2}{H'}} \left(F_2(\beta_n) - \frac{C_2(\beta_n)}{\beta_n^2 + 0.25} \right) e^{(\beta_n^2 + 0.25)t'_p}$, $D_4 =$

$$\sqrt{\frac{2}{H'}} \frac{C_2(\beta_n)}{\beta_n^2 + 0.25}。$$

2.3 降雨条件下斜坡解析解的统一形式

由式 (19)、(25) 可以看出, 在降雨条件下, 不论降雨强度是大于还是小于土体饱和渗透系数, 坡体内水压剖面的解析解形式是一致的, 只是系数选取不同。因此降雨条件下斜坡剖面水压解析解可以写成如下统一形式:

$$\psi(z', t) = \frac{1}{\alpha} \ln \left\{ e^{-\frac{z'}{2}} \left[\sum_{i=1}^{\infty} E_1 \sin \beta_i z' e^{-(\beta_i^2 + 0.25)t'} + \sum_{i=1}^{\infty} E_2 \sin \beta_i z' \right] \right\}. \quad (26)$$

式中 当降雨强度小于土体饱和渗透系数或降雨强度大于饱和渗透系数且降雨时间 $t < t_p$ 时, $\beta_i = \beta_n$, $E_1 = D_1$, $E_2 = D_2$; 当降雨强度大于土体饱和渗透系数且降雨时间 $t > t_p$ 时, $E_1 = D_3$, $E_2 = D_4$ 。

3 解析解与数值模拟对比

参照文献[10], 假定斜坡非饱和土层的垂直厚度为 2 m, 斜坡水平长度为 40 m, 倾角 $\gamma = 30^\circ$, 饱和系数 $\alpha = 0.01$ /cm, 饱和含水率 $\theta_s = 0.45$, 残余含水率 $\theta_r = 15\%$, 孔隙水压力水头 $\psi_0 = -100$ cm, 前期雨强 q_a 为 0。以下将分别对降雨强度小于和大于土体饱和渗透系数时的解析解与有限元数值模拟 (采用 GEOSLOPE-SEEP/W 进行模拟) 的结果进行比较, 从而验证推导解析解的正确性。

3.1 降雨强度小于饱和渗透系数

计算中采用饱和渗透系数 $k_s = 3.6 \times 10^{-3}$ m/h, 后期雨强 q_b 为 2.16×10^{-3} m/h, 此时的降雨强度小于土体饱和渗透系数。采用 GEOSLOPE-SEEP/W 进行数值模拟, 并与计算得到的解析解进行对比。

图 2 给出了降雨强度小于土体饱和渗透系数时, 不同时刻的解析解与数值解模拟得到的孔隙水压力沿斜坡面方向的孔隙水压力分布情况 (其中点值为解析解, 线值为数值解)。从图 2 中可以看出, 在降雨强度小于土体渗透系数情况下, 利用推导的解析解得到的孔隙水压力结果与数值模拟得到的结果基本是一致的。

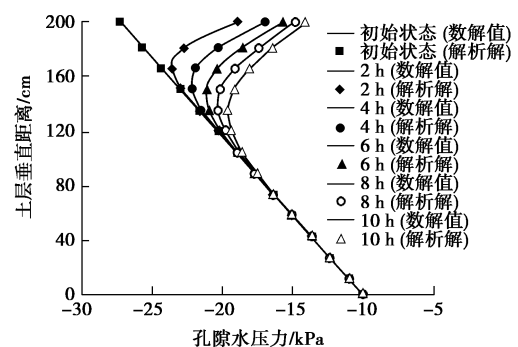


图 2 不同时刻斜坡内孔隙水压力分布 ($q_b < k_s$)

Fig. 2 Distribution of pore water pressure at different time

3.2 降雨强度大于饱和渗透系数

计算中采用饱和渗透系数 $k_s = 3.6 \times 10^{-3}$ m/h, 后期雨强 q_b 为 1.08×10^{-2} m/h, 此时的降雨强度大于土体饱和渗透系数。采用 GEOSLOPE-SEEP/W 进行数值模拟, 并与计算得到的解析解进行对比。

解析解得到的积水时间为 11.297 h; 数值模拟由于设定了一定的时间步, 因此其积水时间不能精确得出, 只能根据坡面水压变化情况得到在某 2 个时间步之间出现积水, 经计算可得其积水时间为 11.2~11.3 h; 解析解得到的积水时间正好落在数值模拟得到的这个时间段内, 说明两者的计算结果是吻合的。

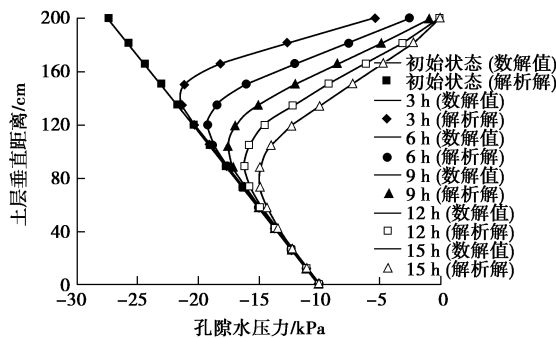


图 3 不同时刻斜坡内孔隙水压力分布 ($q_b > k_s$)

Fig. 3 Distribution of pore water pressure at different time

图 3 给出了降雨强度大于土体饱和渗透系数时, 不同时刻的解析解与数值解模拟得到的孔隙水压力沿斜坡面方向的孔隙水压力分布情况 (其中点值为解析解, 线值为数值解)。从图 3 中可以看出, 在降雨强度大于土体渗透系数情况下, 利用推导的解析解得到的孔隙水压力结果与数值模拟得到的结果也是一致的。

通过以上比较可以看出, 在两种降雨形式下, 解析解与数值模拟的结果均吻合较好, 说明第 2 节得到的解析解是正确的。

4 结 语

在文献[10]的基础上, 采用 Fourier 积分变换得到了降雨强度小于及大于土体饱和渗透系数下的斜坡入渗解析解的统一表达式; 该解析解不仅反映了土体的非饱和特性及斜坡的影响, 还在文献[10]解析解的基础上更进一步, 能够反映当降雨强度大于土体饱和渗透系数时, 坡面边界由流量边界转化为水头边界的动态变化过程, 便于更全面地对降雨情况下斜坡的入渗规律进行研究。

通过解析解与数值模拟的对比可以看出, 该解析解是稳定可靠的; 可用于预测降雨强度小于及大于土体饱和渗透系数时斜坡内孔隙水压力随降雨时间的变化规律, 并可用来确定积水时间; 得到的孔隙水压力

还可用于评估降雨入渗对非饱和土斜坡稳定性的影响。

在计算效率方面, 得到的解析解形式简单, 便于进行编程计算, 与采用大型有限元程序进行计算相比, 其计算效率比较高; 在计算精度方面, 从 3.2 节中对积水时间的计算上可以看出, 有限元只能得到积水时间的一个大概范围, 而解析解则可以得到具体的积水时间数值。这是由于数值解采用了离散的网格及时间步, 所以在计算某一非结点的空间点或非时间步的时间点上的孔隙水压力值时, 会出现困难; 而解析解则比较精确地给出任意时间点及空间点的孔隙水压力值。但由于解析解的边界相对简单, 因此其适用范围没有数值解广泛。

参考文献:

- [1] 刘新喜, 晏鄂川, 王鹏飞, 等. 滑坡稳定性评价的非线性方法[J]. 中国安全科学学报, 2003, 13(1): 34 - 36. (LIU Xin-xi, YAN E-chuan, WANG Peng-fei, et al. Nonlinear method for evaluating the landslide stability[J]. China Safety Science Journal, 2003, 13(1): 34 - 36. (in Chinese))
- [2] 刘新喜, 夏元友, 蔡俊杰, 等. 降雨入渗下强风化软岩高填方路堤边坡稳定性研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(8): 1705 - 1709. (LIU Xin-xi, XIA Yuan-you, CAI Jun-jie, et al. Study on stability of high-filled embankment slope of highly weathered soft rock under rainfall infiltration[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(8): 1705 - 1709. (in Chinese))
- [3] 许建聪, 尚岳全, 陈侃福, 等. 强降雨作用下的浅层滑坡稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(18): 3246 - 3251. (XU Jian-cong, SHANG Yue-quan, CHEN Kan-fu, et al. Analysis of shallow landslide stability under intensive rainfall[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(18): 3246 - 3251. (in Chinese))
- [4] 郭 璇, 赵成刚, 于威威. 非饱和土边坡稳定的安全分析及进展[J]. 中国安全科学学报, 2005, 15(1): 14 - 18. (GUO Xuan, ZHAO Cheng-gang, YU Wei-wei. Stability analysis of unsaturated soil slope and its progress[J]. China Safety Science Journal, 2005, 15(1): 14 - 18. (in Chinese))
- [5] 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 - 13. (NG C W W, 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 - 13. (in Chinese))
- [6] 荣 冠, 张 伟, 周创兵. 降雨入渗条件下边坡岩体饱和和非饱和渗流计算[J]. 岩土力学, 2005, 26(10): 1545 - 1550. (RONG Guan, ZHANG Wei, ZHOU Chuang-bing.

- Numerical analysis of saturated-unsaturated seepage problem of rock slope under rainfall infiltration[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, **26**(10): 1545 – 1550. (in Chinese))
- [7] 谭新, 陈善雄, 杨明. 降雨条件下土坡饱和-非饱和渗流分析[J]. *岩土力学*, 2003, **24**(3): 381 – 384. (TAN Xin, CHEN Shan-xiong, YANG Ming. Saturated-unsaturated seepage analysis of slope under rainfall[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2003, **24**(3): 381 – 384. (in Chinese))
- [8] 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))
- [9] 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))
- [10] 詹良通, 贾官伟, 陈云敏, 等. 考虑土体非饱和特性的无限长斜坡降雨入渗解析解[J]. *岩土工程学报*, 2010, **32**(8): 1214 – 1220. (ZHAN Liang-tong, JIA Guan-wei, CHEN Yun-min, et al. Analytical solution for rainfall infiltration into infinite long slopes considering properties of unsaturated soil[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, **32**(8): 1214 – 1220. (in Chinese))
- [11] ZHAN L T, NG C W W. Analytical analysis of rainfall infiltration mechanism in unsaturated soils[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2004, **4**: 273 – 284.
- [12] BASHA H A. Multidimensional linearized nonsteady infiltration toward a shallow water table[J]. *Water Resources Research*, 2000, **36**(9): 2567 – 2573.
- [13] SRIVASTAVA R, YEH T C J. Analytical solutions for one-dimensional, transient infiltration toward the water table in homogeneous and layered soils[J]. *Water Resources Research*, 1991, **27**(5): 753 – 762.
- [14] CHEN J M, TAN Y C, CHEN C H. Multidimensional infiltration with arbitrary surface fluxes[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, 2001, **127**(6): 370 – 377.
- [15] CHEN L, YOUNG M H. Analytical Green-Ampt infiltration model for sloping surfaces[J]. *Water Resources Research*, 2006, **42**: 1 – 9.
- [16] IVERSON R M. Landslides triggering by rain infiltration[J]. *Water Resources Research*, 2000, **36**(7): 1897 – 1910.
- [17] 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. 土壤水动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988. (LEI Zhi-dong, YANG Shi-xiu, XIE Shen-chuan. *Soil water dynamics*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1988. (in Chinese))
- [18] 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))
- [19] OZISIK M N. Boundary value problems of heat conduction[M]. New York: Dover, 2002: 58 – 63.