

DOI: 10.20271/j.cnki.1673-9833.2026.1002

基于改进 Green-Ampt 模型的 土质边坡降雨入渗规律研究

朱鹏程, 杨辉鸿, 朱浩锋

(湖南省水文地质环境地质调查监测所, 湖南 株洲 412008)

摘要: 同时考虑土层初始含水率随深度变化非线性特性、降雨入渗边界条件及饱和与非饱和区动态发展的特点, 对 Green-Ampt (GA) 模型进行修正, 并采用参数计算分析的方法, 对修正模型的实用性及参数影响规律开展研究。研究表明: 改进 GA 模型将降雨入渗过程细分为 3 个阶段, 推导出了对应的时间边界条件以及各阶段降雨历时与湿润锋及饱和区深度的计算公式; 降雨强度较小时, 降雨入渗过程分为 3 个阶段, 但随着降雨强度的增加, 降雨入渗过程可以简化为 2 个阶段; 初始含水率分布模式对土体入渗时间边界条件、湿润锋与饱和区深度具有显著的影响。随着降雨历时增加, 指数分布模式湿润锋深度发展较定值分布模式发展更快, 且降雨入渗初期, 初始含水率分布模式对参数 ξ 影响较大, 但随着降雨历时增加, 对 ξ 影响逐渐可以被忽略。

关键词: 改进 Green-Ampt 模型; 土质边坡; 初始含水率; 入渗规律; 湿润锋

中图分类号: TU446

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2026)01-0009-07

引文格式: 朱鹏程, 杨辉鸿, 朱浩锋. 基于改进 Green-Ampt 模型的土质边坡降雨入渗规律研究 [J]. 湖南工业大学学报, 2026, 40(1): 9-15.

Study on Rainfall Infiltration Law of Soil Slope Based on Improved Green-Ampt Model

ZHU Pengcheng, YANG Huihong, ZHU Haofeng

(Survey and Monitoring Institute of Hydrogeology and Environmental Geology of Hunan Province, Zhuzhou Hunan 412008, China)

Abstract: Taking into consideration the nonlinear characteristics of the initial soil moisture content with depth, the boundary conditions of rainfall infiltration, and the dynamic development of saturated and unsaturated zones, a modification has been made of the Green-Ampt (GA) model, followed by a study on the practicality and parameter influence of the modified model based on a parameter calculation and analysis. The research results indicate that the improved GA model divides the rainfall infiltration process into three stages, thus deriving corresponding time boundary conditions, as well as calculating the duration of rainfall and the depth of the wetting front and saturation zone in each stage. When the rainfall intensity is low, the rainfall infiltration process is divided into three stages, but as the rainfall intensity increases, the rainfall infiltration process can be simplified into two stages. When a rainfall intensity is relatively small, the rainfall infiltration process can be divided into three stages, while with the increase of rainfall intensity, the rainfall infiltration process can be simplified to 2 stages. The initial moisture content distribution mode has exerted a significant influence on the soil infiltration time boundary condition, wetting front and saturation zone depth.

收稿日期: 2024-10-14

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目 (2024JJ8368, 2024JJ7152); 湖南省地质院科研基金资助项目 (HNGSTP202440)

作者简介: 朱鹏程, 男, 湖南省水文地质环境地质调查监测所高级工程师, 主要研究方向为地质灾害勘查与设计, 生态修复,

E-mail: 1209031344@qq.com

As the duration of rainfall increases, the development of the wetting front depth in the exponential distribution pattern is faster than that in the fixed value distribution pattern. In addition, in the early stage of rainfall infiltration, the initial moisture content distribution pattern has a significant impact on the parameter ζ , but the impact on ζ can gradually be ignored with an increase of rainfall duration.

Keywords: improved Green-Ampt model; soil slope; initial moisture content; infiltration law; wetting front

1 研究背景

滑坡现象因其分布广、频率高、危害性大,受到工程界与学术界的广泛关注,其中滑坡地质灾害触发机制已成为世界级地质灾害难题。据国内外统计资料显示,我国约有 1.5×10^4 处具有灾害性的新老滑坡,其中 60%~80% 的滑坡均发生在雨季^[1]。图 1 为 2024 年 7 月受台风“格美”影响,湖南省郴州市资兴出现大量的山体滑坡,进一步证实了降雨是诱发滑坡地质灾害的重要外部因素^[2]。降雨入渗会引起土体含水率增加,提高土体自身重度,导致坡体下滑力增大。此外,降雨入渗对非饱和土体的基质吸力有弱化效应,并引起土体的抗剪强度降低,从而降低边坡稳定性,触发滑坡地质灾害。因此,对边坡降雨入渗规律开展系统研究,对于揭示降雨频繁触发滑坡地质灾害具有重要的工程意义。



图 1 资兴山体滑坡

Fig. 1 Landslide in Zixing Mountain

目前针对边坡降雨入渗分析^[3-4]常用的方法有两大类:1) 基于 Richards 方程的数值分析方法;2) 基于物理入渗模型的解析算法,如 Green-Ampt (GA) 模型、Smith 模型和 Philip 模型。相较于基于 Richards 方程的数值分析方法,GA 模型的参数简单,物理意义明确,在土壤降雨入渗分析中得到了广泛的应用。然而,GA 模型假设土层表面水平,具有薄层积水,降雨入渗区完全饱和,不存在非饱和过渡区等诸多假设,与实际工程中边坡降雨入渗存在一定差异,故许多学者从不同角度对 GA 模型进行修正与改

进,以期在实际工程中边坡降雨入渗问题解决上起到良好的效果。蒋水华等^[5-6]提出了一种可考虑土体参数空间变异性的修正 GA 模型,探讨了降雨入渗与多参数空间变异性作用下的边坡失稳机理;张杰等^[7]基于土体分层假定,推导了 GA 模型降雨历时与湿润锋深度之间的函数关系;Yao W. M. 等^[8]研究发现,降雨入渗存在饱和层与非饱和层,并且假设其厚度为入渗区深度的 50%;温馨等^[9]针对黄土入渗中存在的非饱和区,提出了一种修正的 GA 模型表征土体实际渗透系数随埋深的变化规律。许多学者在改进降雨入渗模型时常将初始含水率设为均值,但与实际情况不符,初始含水率的变化,会引起湿润锋的迁移速率发生变化。基于此,潘永亮等^[10]建立了综合考虑地下水位、初始含水率及不同降雨工况的改进 GA 模型。唐扬等^[11]对 Green-Ampt 模型进行了改进,认为坡体初始含水率对滑坡降雨入渗过程存在一定程度的影响;张洁等^[12]通过基质吸力确定坡体不同深度的初始含水率,推导了斜坡初始含水率为非均匀分布条件下的降雨入渗模型,过程较为复杂;简文星等^[13]推导了坡体初始含水率为指数形式的浅层滑坡非积水降雨入渗模型,简化了计算过程,但并未讨论其他降雨工况;Liu Z. Z. 等^[14]假定坡体的初始含水率呈线性分布,对 Green-Ampt 模型进行了改进,但适用工况有限。

尽管已有许多学者从土体参数空间变异性、降雨入渗饱和与非饱和分区、初始含水率的非线性特征等方面,对经典的 GA 模型进行了修正,深化了土质边坡雨水入渗方面的研究。然而,现有的研究中要么简化了初始含水率的影响,要么将降雨入渗过程划分为降雨强度控制和土体入渗能力控制两个阶段,而忽略了降雨入渗过程中饱和与非饱和分区动态演变的特点,对初始含水率及降雨入渗边界划分并不合理,脱离实际情况。基于此,本文拟同时考虑土层初始含水率随深度变化非线性特性、降雨入渗边界条件及饱和与非饱和区动态发展的特点,对 GA 模型进行改进,并采用参数计算分析方法,对改进模型的适用性及参数影响规律开展研究,以深化土质边坡降雨入渗

规律。

2 改进 Green-Ampt 入渗模型

大量现场勘察资料及 J. W. Godt 等^[15]研究表明,对于存在地下水的土质边坡,土中初始含水率并非随深度定值分布,而是受地下水位、孔隙水毛细作用,以及日晒蒸发等诸多因素共同影响,水位线以上土中含水率分布表现出明显的非线性特征。J. W. Godt 等建议在均质土质边坡中,土体含水率可以采用指数函数来表达:

$$\theta_{iz} = \theta_s (d+1-z)^{-a} \quad (1)$$

式中: θ_s 为土体饱和含水率;

d 为地下水位埋深;

a 为拟合系数;

θ_{iz} 为 z 深度位置处初始含水率。

根据 GA 模型可知,边坡降雨入渗过程本质上为边坡表层土体含水率逐渐增大过程,也即表层土体由非饱和向饱和发展过程。基于此,根据控制土坡降雨入渗机理,将降雨入渗过程划分为降雨量控制非饱和阶段、降雨量控制饱和与非饱和组合阶段和土体入渗率控制阶段 3 个阶段。

2.1 降雨量控制非饱和阶段

图 2 为降雨量控制非饱和阶段入渗模型,在降雨强度控制阶段,降雨强度小于土体入渗能力。当降雨历时短,降雨量前部渗入土体中,但边坡表层土体尚未出现饱和,则此阶段属于非饱和阶段。已有研究表明^[4-6],降雨入渗后非饱和区土体含水率沿深度变化曲线可以用椭圆形曲线来描述。

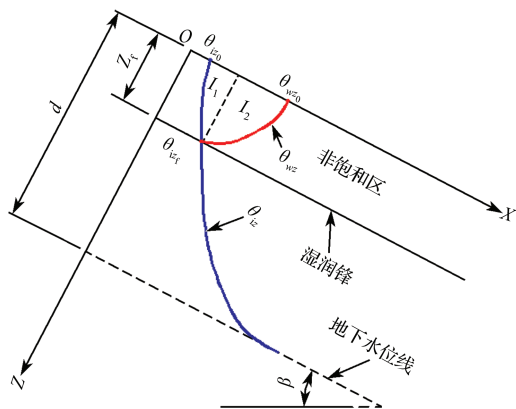


图 2 降雨量控制非饱和阶段入渗模型

Fig. 2 Infiltration model for the unsaturated stage under rainfall control

由图 2 可知,当降雨历时为 t 时,湿润锋范围内土体体积含水率变化总量 I 可以由 I_1 和 I_2 叠加所得,其中 I_1 和 I_2 为

$$\begin{cases} I_1 = \theta_{izf} z_f - \int_0^{z_f} \theta_{iz} dz, \\ I_2 = \pi(\theta_{wz0} - \theta_{izf}) z_f / 4. \end{cases} \quad (2)$$

式中: θ_{izf} 为湿润锋处土层初始含水率;

z_f 为湿润锋深度。

联立式 (1) 和 (2), 即可以确定降雨历时为 t 时,总降雨入渗量 I 为

$$I = \eta_1 z_f + \eta_2 z_f \eta_0^{-a} + \eta_3 \eta_0^{(1-a)} + \eta_4 \quad (3)$$

式中: η_0 、 η_1 、 η_2 、 η_3 、 η_4 均为计算参数,可以分别通过

$$\eta_0 = d+1-z_f,$$

$$\eta_1 = \pi \theta_{wz0} / 4,$$

$$\eta_2 = (1-\pi/4) \theta_s,$$

$$\eta_3 = \theta_s (1-a),$$

$$\eta_4 = -\theta_s (d+1)^{(1-a)/(1-a)} \text{ 确定,}$$

其中, d 为初始水位深度。

该阶段降雨量小于土层入渗率,故若降雨强度为 q ,则降雨历时 t 与降雨入渗总量 I 之间满足

$$t = I / (q \cos \beta) \quad (4)$$

当坡面土体含水率 θ_{wz0} 刚好达到饱和含水率 θ_s 时,土体刚好达到饱和。因此,将 $\theta_{wz0} = \theta_s$ 代入式 (3) 和 (4), 即可以确定坡体表层开始出现降雨饱和区的降雨时间边界为

$$t_{p1} = \frac{(\eta_3 + \eta_2 \eta_0^{-a}) z_f + \eta_3 \eta_0^{1-a} + \eta_4}{q \cos \beta} \quad (5)$$

式中: η_5 为计算参数,可以采用 $\eta_5 = 0.25 \pi \theta_s$ 确定。

根据何忠明等^[4]的研究可知,当降雨入渗控制且仅有非饱和区时,湿润锋深度临界值 z_{fp1} 可以采用下式确定:

$$z_{fp1} = \frac{(k_s - k_i) s_f}{[q \ln(k_s / k_i) - (k_s - k_i)] \cos \beta} \quad (6)$$

式中: z_{fp1} 为降雨历时 t_{p1} 对应的湿润锋深度;

k_s 为土体饱和渗透系数;

k_i 为土体初始导水系数,可以由 R. H. Brooks 等^[16]建议公式计算,即

$$k_i = k_s S_e^{3+2\lambda} \quad (7)$$

式中: S_e 为土体相对含水率, $S_e = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r)$, 其中 θ_r 为土体残余含水率。

联立式 (5) ~ (7), 可以确定降雨量控制入渗阶段边坡表层出现饱和和降雨历时 t_{p1} 。

2.2 降雨量控制饱和与非饱和组合阶段

图 3 为降雨量控制饱和与非饱和组合阶段入渗模型。

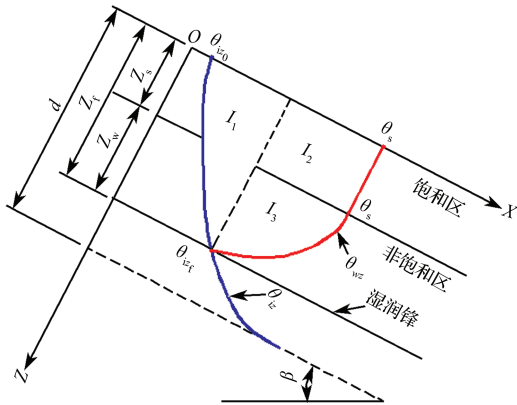


图3 降雨量控制饱和与非饱和组合阶段入渗模型

Fig. 3 Infiltration model for the coexistence stage of unsaturation and saturation under rainfall control

如图3所示,当降雨历时 $t > t_{p1}$,湿润锋位置不断下移的同时,土坡表层土体开始饱和,且饱和与非饱和区范围出现动态变化。该阶段初期,土层入渗能力仍大于降雨强度,故仍由降雨量控制土层降雨入渗过程。

由图3可知,当降雨时间 $t > t_{p1}$,体积降雨入渗量可以通过将 I_1 、 I_2 和 I_3 叠加得到:

$$\begin{cases} I_1 = \theta_s z_f \eta_0^{-a} + \theta_s [\eta_0^{(1-a)} - (d+1)^{(1-a)}] (1-a)^{-1}, \\ I_2 = (\theta_s - \theta_{zf}) z_s, \\ I_3 = \frac{\pi}{4} (\theta_s - \theta_{zf}) z_w. \end{cases} \quad (8)$$

彭振阳等^[17]通过试验发现,该阶段非饱和区深度与湿润锋深度之间存在如下比例关系:

$$z_w = \xi z_f. \quad (9)$$

式中 ξ 为非饱和区占湿润锋深度的比例。

联立式(4)(8)(9),可以得到该阶段湿润锋深度与降雨历时 t 时的总入渗量 I 满足

$$I = \eta_6 (1 - \eta_0^{-a}) z_f + (\eta_7 - \eta_8 z_f) \eta_0^{-a}. \quad (10)$$

式中: η_6 、 η_7 、 η_8 为计算参数,可分别采用

$$\begin{aligned} \eta_6 &= [1 - \eta(1 - \pi/4)] \theta_s, \\ \eta_7 &= [d+1 - (d+1)^{(1-a)}] \theta_s (1-a)^{-1}, \\ \eta_8 &= a \theta_s (1-a)^{-1} \end{aligned}$$

计算确定。

2.3 土体入渗率控制阶段

假设降雨历时为 t_{p2} 时,坡面开始出现积水,此时降雨入渗由土体入渗率控制。根据GA入渗模型,考虑边坡倾角 β ,取坡面积水高度为0,则土体入渗率为

$$i = k_s \left(\cos \beta + \frac{s_f}{z_f} \right). \quad (11)$$

式中 s_f 为湿润锋处概化基质吸力,I. D. Moore等^[18]建议采用下式确定:

$$s_f = \frac{3\lambda + 2}{3\lambda + 1} \psi_b. \quad (12)$$

其中, ψ_b 为土体进气值, λ 为表征土体孔径分布特征的拟合系数。

若降雨强度与土体入渗率相等时降雨历时为 t_{p2} ,从而可以确定此时降雨湿润锋临界深度为

$$z_{f_{p2}} = \frac{1 + s_f}{(q/k_s - 1) \cos \beta}. \quad (13)$$

故联立式(4)(10)(13),从而可以得到降雨入渗由降雨量控制向土体渗透率控制转变的降雨时间边界 t_{p2} 。

当降雨入渗历时大于 t_{p2} ,即降雨强度大于土体入渗率,土体渗透率控制降雨入渗,坡面开始积水。若降雨历时在 t_{p2} 的基础上增加 Δt ,由式(11)可以确定对应的降雨入渗增量为

$$\Delta I_1 = k_s (\cos \beta + s_f/z_f') \Delta t. \quad (14)$$

同时,由于该阶段边坡表层土体含水量分区仍为饱和与非饱和组合模式,故可以分别假设降雨历时 $t_{p2} + \Delta t$ 与 t_{p2} 所对应湿润锋深度 z_f' 与 z_f ,并代入式(10),然后分别将所对应的土体降雨入渗量相减,即得到降雨历时增加 Δt 所对应的土层降雨入渗量增量 ΔI_2 。最后,根据降雨量守恒原理,取 $\Delta I_1 = \Delta I_2$,则可以确定取值。通过改变 Δt 取值,重复上述步骤,即可以得到 $t > t_{p2}$ 后湿润锋深度随降雨历时 t 的发展规律。

3 边坡降雨入渗规律研究

湖南湘中地区雨水充沛,降雨触发浅层滑坡灾害频发。为验证本文改进Green-Ampt模型的适用性,选取湖南省株洲市茶陵县某土质边坡,其坡高7.5 m,宽23.6 m,天然坡角为 38.7° ,地下水位埋设5.6 m。勘察报告显示坡脚以上土层均为粉质黏土(Q^{el+dl})层,土体结构较松散,透水性较好。根据室内试验测定该边坡土体VG试验参数如表1所示。

表1 粉质黏土计算参数

Table 1 Silty clay calculation parameters

θ_f	θ_s	α	n	$k_s/(m \cdot s^{-1})$	s_f
0.217	0.361	0.138	0.31	8.32×10^{-7}	7.56

为获得该土质边坡地下水位线以上土层初始含水率随深度变化关系,现场选取边坡中部位置ZK5号勘察孔,从地表往下,每隔0.5 m取3个土样进行土体含水率平行试验,共取36个试样。绘制土样深度与含水率散点图,如图4所示。

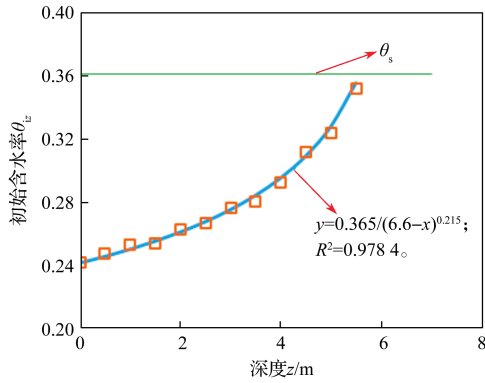


图 4 初始含水率分布曲线

Fig. 4 Initial moisture content distribution curve

由图 4 可知, 土层初始含水率具有较强的非线性, 故根据 J. W. Godt 等^[15] 的建议, 对试验结果进行指数拟合, 拟合曲线见图 4。由拟合结果可以看出, 拟合均方差 R^2 达 0.978 4, 拟合度较高, 故地水位以上土层初始含水率与深度关系可以采用如下拟合公式描述:

$$\theta_{iz} = \frac{0.365}{(6.6 - z_f)^{0.215}} \quad (17)$$

3.1 降雨强度对时间边界条件的影响

图 5 为降雨历时与土层降雨入渗率关系曲线。

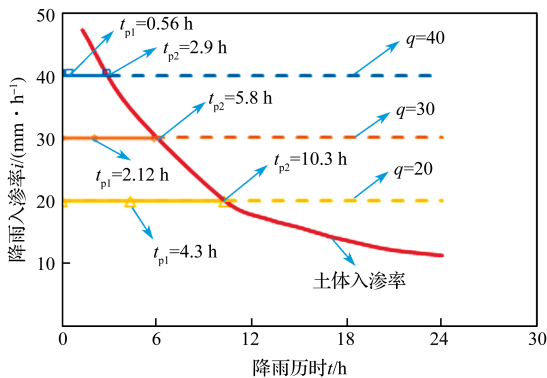


图 5 降雨入渗率曲线

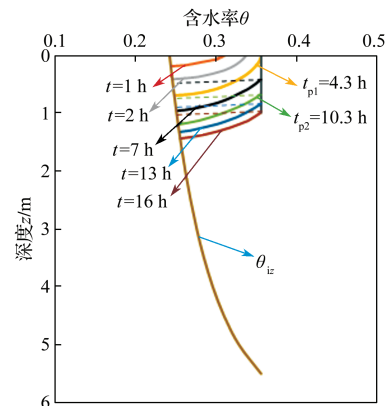
Fig. 5 Rainfall infiltration rate curve

考虑水位线以上土体含水率非线性, 利用改进的 Green-Ampt 模型, 确定降雨强度为 20 mm/h 时, 时间边界条件 t_{p1} 和 t_{p2} 分别为 4.3 h 和 10.3 h。同理, 可以确定降雨强度为 30 mm/h 和 40 mm/h 情况下, 对应的 t_{p1} 分别为 2.12 h 和 0.56 h, t_{p2} 分别为 5.8 h 和 2.9 h。从中可以发现, 随降雨强度增大, 降雨入渗模式所对应的降雨历时边界减小, 且当降雨强度足够大, t_{p1} 将接近 0, 此时土坡表面将在极短的时间内达到饱和, 从而可以不考虑单一非饱和区阶段情况。此外, 以 $q=20$ mm/h 为例, 由图 5 可知, 当 $t < 10.3$ h, 土坡表层土体基质吸力仍然较大, 土体入渗率大于降

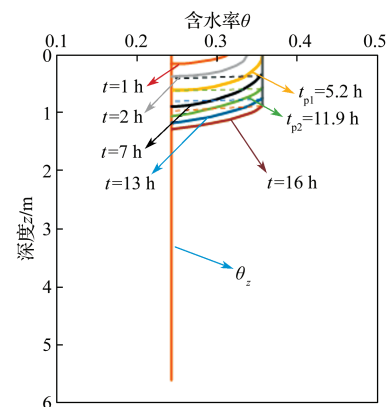
雨强度, 故该阶段降雨入渗率由降雨强度控制。当 $t > 10.3$ h 之后, 受土层湿润锋及饱和区向下发展的影响, 土层基质吸力迅速降低, 土体渗透率显著下降, 并小于降雨强度, 此阶段降雨入渗将由土体入渗率控制。

3.2 初始含水率分布对降雨入渗规律的影响

图 6 为边坡含水率分布曲线图, 分别比较了不同天然含水率分布时土体含水率分布曲线随降雨历时的变化关系。从图 6 可以看出, 无论初始含水率是指数分布还是定值分布, 随降雨历时发展, 土层含水率分布均存在非饱和区、非饱和与饱和区共存两个阶段。



a) 指数分布



b) 定值分布

图 6 $q=20$ mm/h 时边坡含水率分布曲线Fig. 6 Slope moisture distribution profile with $q=20$ mm/h

此外, 由图 6 还可以看出, 根据本文改进的 Green-Ampt 入渗模型, 当降雨强度为 20 mm/h 时, 初始含水率指数分布与定值分布相比, t_{p1} 由 5.2 h 降低到 4.3 h, t_{p2} 由 11.9 h 降低到 10.3 h, 充分表明初始含水率的非线性分布模式对土体入渗时间边界条件影响较大, 如果忽略, 将对降雨入渗影响下边坡稳定性分析产生误判。

图 7 为降雨强度 $q=20$ mm/h 时湿润锋与饱和区深度随降雨历时的变化曲线。

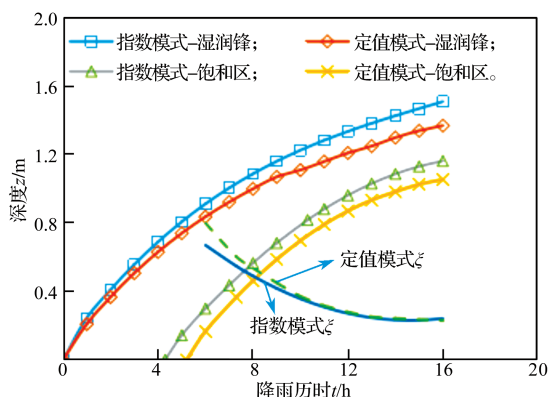


图 7 湿润锋与饱和区深度变化曲线

Fig. 7 Deep change curves of wetting front and saturated zone

由图 7 可以看出,不同土层初始含水率分布假设模式下湿润锋与饱和区深度变化曲线均表现出显著的非线性。对于湿润锋深度,随着降雨入渗的持续发生,土层初始含水率指数分布假设情况下湿润锋深度较定值分布假设情况下的增长速度更快,并且随着降雨历时的增加,两者间的差距也存在增大的变化趋势。对于饱和区深度,随着降雨历时的增加,初始含水率定值假设下饱和区深度滞后于指数分布假设。此外, z_w/z_f 比值 ζ 的取值随降雨历时增加快速降低,降雨入渗初期,土层初始含水率假设对参数 ζ 影响较大,但随降雨历时的持续,两者差距逐渐降低并基本重合,表明初始含水率假设对 ζ 影响在后期基本可以忽略不计。

4 结论

1) 考虑土层初始含水率非线性特征,降雨入渗边界条件及饱和与非饱和区动态发展的特点,对 Green-Ampt 模型进行改进,将降雨入渗过程细分为 3 个阶段,并得到了对应的时间边界条件以及各阶段降雨历时与湿润锋及饱和区深度的计算公式;

2) 利用改进的 Green-Ampt 模型,对工程案例进行计算分析,结果表明,降雨强度较小时,降雨入渗过程由 3 个阶段组成,但随着降雨强度的增加,时间边界条件相应降低,且降雨强度足够大时, t_{p1} 将接近 0,此时降雨入渗过程可简化为 2 个阶段;

3) 初始含水率分布模式对土体入渗时间边界条件、湿润锋与饱和区深度具有显著的影响。随着降雨历时增加,指数分布模式湿润锋深度增加比定值分布模式发展更快。此外,降雨入渗初期,初始含水率分布模式对参数 ζ 影响较大,但随着降雨历时增加,对 ζ 的影响逐渐可以被忽略。

参考文献:

- [1] SENTHILKUMAR V, CHANDRASEKARAN S S, MAJI V B. Rainfall-Induced Landslides: Case Study of the Marappalam Landslide, Nilgiris District, Tamil Nadu, India[J]. International Journal of Geomechanics, 2018, 18(9): 05018006.
- [2] PENG J B, WANG S K, WANG Q Y, et al. Distribution and Genetic Types of Loess Landslides in China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2019, 170: 329-350.
- [3] GREEN W H, AL E. Studies of Soil Physics, Part I-the Flow of Air and Water Through Soils[J]. Journal of Agricultural Science, 1911, 4: 1-24.
- [4] 何忠明, 钟 魏, 刘正夫, 等. 基于改进的 Green-Ampt 入渗模型的炭质泥岩粗粒土路堤边坡稳定性分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(7): 2179-2187.
HE Zhongming, ZHONG Wei, LIU Zhengfu, et al. Stability Analysis of Carbonaceous Mudstone Coarse-Grained Soil Embankment Slope Based on Improved Green-Ampt Infiltration Model[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(7): 2179-2187.
- [5] 蒋水华, 刘 贤, 黄发明, 等. 考虑多参数空间变异性的降雨入渗边坡失稳机理及可靠度分析[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(5): 900-907.
JIANG Shuihua, LIU Xian, HUANG Faming, et al. Failure Mechanism and Reliability Analysis of Soil Slopes Under Rainfall Infiltration Considering Spatial Variability of Multiple Soil Parameters[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(5): 900-907.
- [6] 蒋水华, 刘 贤, 黄劲松, 等. 多层非均质边坡降雨入渗分析的改进 Green-Ampt 模型[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(6): 1177-1186.
JIANG Shuihua, LIU Xian, HUANG Jinsong, et al. An Improved Green-Ampt Model for Rainfall Infiltration Analysis of Multi-Layered Heterogeneous Soil Slopes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(6): 1177-1186.
- [7] 张 杰, 韩同春, 豆红强, 等. 基于分层假定入渗模型的边坡安全性分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(9): 3211-3218.
ZHANG Jie, HAN Tongchun, DOU Hongqiang, et al. Analysis Slope Safety Based on Infiltration Model Based on Stratified Assumption[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45(9):

- 3211-3218.
- [8] YAO W M, LI C D, ZHAN H B, et al. Time-Dependent Slope Stability During Intense Rainfall with Stratified Soil Water Content[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2019, 78(7): 4805-4819.
- [9] 温 馨, 胡志平, 张 勋, 等. 基于 Green-Ampt 模型的饱和-非饱和黄土入渗改进模型及其参数研究 [J]. 岩土力学, 2020, 41(6): 1991-2000.
- WEN Xin, HU Zhiping, ZHANG Xun, et al. Modified Infiltration Model for Saturated-Unsaturated Loess Based on Green-Ampt Model and Its Parametric Study[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(6): 1991-2000.
- [10] 潘永亮, 简文星, 李林均, 等. 基于改进 Green-Ampt 模型的花岗岩残积土边坡降雨入渗规律研究 [J]. 岩土力学, 2020, 41(8): 2685-2692.
- PAN Yongliang, JIAN Wenxing, LI Linjun, et al. A Study on the Rainfall Infiltration of Granite Residual Soil Slope with an Improved Green-Ampt Model[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(8): 2685-2692.
- [11] 唐 扬, 殷坤龙, 夏 辉. 前期含水率对浅层滑坡降雨入渗及稳定性影响研究 [J]. 地质科技情报, 2017, 36(5): 204-208, 237.
- TANG Yang, YIN Kunlong, XIA Hui. Effects of Initial Water Content on the Rainfall Infiltration and Stability of Shallow Landslide[J]. Geological Science and Technology Information, 2017, 36(5): 204-208, 237.
- [12] 张 洁, 吕 特, 薛建锋, 等. 适用于斜坡降雨入渗分析的修正 Green-Ampt 模型 [J]. 岩土力学, 2016, 37(9): 2451-2457.
- ZHANG Jie, LÜ Te, XUE Jianfeng, et al. Modified Green-Ampt Model for Analyzing Rainfall Infiltration in Slopes[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(9): 2451-2457.
- [13] 简文星, 蒋 毅. 基于指数型的浅层滑坡非积水降雨入渗模型研究 [J]. 安全与环境工程, 2017, 24(1): 22-25, 32.
- JIAN Wenxing, JIANG Yi. Exponential Model of Rainfall Infiltration of Shallow Landslides for Non-Ponding Conditions[J]. Safety and Environmental Engineering, 2017, 24(1): 22-25, 32.
- [14] LIU Z Z, YAN Z X, DUAN J, et al. Infiltration Regulation and Stability Analysis of Soil Slope Under Sustained and Small Intensity Rainfall[J]. Journal of Central South University, 2013, 20(9): 2519-2527.
- [15] GODT J W, ŞENER-KAYA B, LU N, et al. Stability of Infinite Slopes Under Transient Partially Saturated Seepage Conditions[J]. Water Resources Research, 2012, 48(5): W05505.
- [16] BROOKS R H, COREY A T. Hydraulic Properties of Porous Media[M]. Hydrology Papers 3, Fort Collins: Colorado State University, 1964: 215-216.
- [17] 彭振阳, 黄介生, 伍靖伟, 等. 基于分层假设的 Green-Ampt 模型改进 [J]. 水科学进展, 2012, 23(1): 59-66.
- PENG Zhenyang, HUANG Jiesheng, WU Jingwei, et al. Modification of Green-Ampt Model Based on the Stratification Hypothesis[J]. Advances in Water Science, 2012, 23(1): 59-66.
- [18] MOORE I D, EIGEL J D. Infiltration into Two-Layered Soil Profiles[J]. Transactions of the ASAE, 1981, 24(6): 1496-1503.

(责任编辑: 申 剑)