

DOI: 10.11779/CJGE20230205

多层非均质边坡降雨入渗分析的改进 Green-Ampt 模型

蒋水华¹, 刘 贤^{*1,2}, 黄劲松¹, 周创兵¹

(1. 南昌大学工程建设学院, 江西 南昌 330031; 2. 中山大学土木工程学院, 广东 珠海 519082)

摘要: 边坡降雨入渗分析对于降雨型滑坡加固设计、治理和风险防控至关重要。经典的 Green-Ampt 模型参数虽然具有明确的物理意义, 计算便捷, 但是忽略了入渗区客观存在的过渡层, 并且不能有效分析考虑土体渗透系数空间变异性的多层非均质边坡降雨入渗问题。为此, 提出了一种适用于多层非均质边坡降雨入渗分析的改进 Green-Ampt 模型, 考虑了降雨入渗的椭圆形过渡层, 推导了不同降雨历时下边坡含水率分布情况。同时, 以无限长边坡模型为例, 通过 4 种常见的边坡工况验证了该模型的有效性, 并进行了降雨入渗条件下非均质边坡稳定性分析。结果表明: 对于设定的 4 种工况, 提出的改进 Green-Ampt 模型计算的边坡体积含水量分布、安全系数和滑动面深度与 Richards 方程数值解吻合, 而基于修正 Green-Ampt 模型计算的边坡体积含水量和滑动面分布存在偏差, 边坡安全系数偏小。此外, 基于提出的改进 Green-Ampt 模型能够准确识别最危险滑动面位置。研究成果可为多层非均质边坡降雨入渗分析及降雨型滑坡加固设计及风险防控提供理论参考。

关键词: 非均质边坡; 降雨入渗; 稳定性分析; 改进 Green-Ampt 模型; 空间变异性

中图分类号: TU47 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2024)06-1177-10

作者简介: 蒋水华(1987—), 男, 江西九江人, 教授, 博士生导师, 主要从事水工岩土工程可靠度和灾害风险防控方面的研究工作。E-mail: sjiangaa@ncu.edu.cn。

An improved Green-Ampt model for rainfall infiltration analysis of multi-layered heterogeneous soil slopes

JIANG Shuihua¹, LIU Xian^{1,2}, HUANG Jinsong¹, ZHOU Chuangbing¹

(1. School of Infrastructure Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China; 2. School of Civil Engineering, Sun Yat-Sen University, Zhuhai 519082, China)

Abstract: The rainfall infiltration analysis of slopes is of a great significance to the reinforcement design, mitigation and risk mitigation of rainfall-induced landslides. The classical Green-Ampt model, whose parameters have clear physical meanings and which is easy to implement, ignores the fact that a transition layer objectively exists in infiltration zone. It cannot effectively analyze the rainfall infiltration process of multi-layered heterogeneous slopes considering the spatial variability of hydraulic conductivity. To this end, an improved Green-Ampt model is proposed for the rainfall infiltration analysis of multi-layered heterogeneous slopes, and it considers the elliptical transition layer of rainfall infiltration and evaluates the water content distributions under different rainfall durations. Additionally, an infinite slope model is taken as an example to validate the effectiveness of the proposed improved Green-Ampt model through four common slope scenarios. The corresponding slope stability analyses under rainfall infiltration are also conducted. The results indicate that the distributions of volumetric water content and the factors of safety evaluated using the proposed model are well consistent with the numerical results of Richards' equation for these four slope cases. In contrast, the modified Green-Ampt model produces the biased distributions of volumetric water content and smaller factors of safety. In addition, the location of the critical slip surface of the slope can be accurately identified using the proposed improved Green-Ampt model. The research outcome provides theoretical references for the rainfall infiltration analysis of multi-layered heterogeneous soil slopes and the reinforcement design and risk control of rainfall-induced landslides.

Key words: heterogeneous slope; rainfall infiltration; stability analysis; improved Green-Ampt model; spatial variability

0 引言

降雨入渗是造成滑坡最为重要的诱因之一^[1], 降

基金项目: 国家自然科学基金优秀青年基金项目(52222905); 国家自然科学基金项目(5217910342272326); 江西省自然科学基金项目(20232ACB204031, 20224ACB204019)

收稿日期: 2023-03-08

*通信作者(E-mail: liux597@mail2.sysu.edu.cn)

雨入渗会降低土体抗剪强度，增加土体重度，进而导致边坡下滑力增大，诱发边坡失稳。发展一种有效的降雨入渗模型进而在最大程度上降低降雨对边坡的危害，是降雨作用下边坡稳定性分析的关键。目前常用的边坡降雨入渗分析方法主要有^[2]：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计算方法，如Green-Ampt（GA）入渗模型、Smith模型和Philip模型等。数值分析方法需要不断迭代求解降雨入渗控制方程，计算过程较为繁琐，对于复杂问题将十分耗时，并且若是网格尺寸和时间步长选择不当，将会导致计算不收敛。相较之下，以GA入渗模型为代表的解析计算方法，模型参数具有明确的物理意义，计算过程便捷，在降雨入渗下边坡稳定性研究中得到了广泛应用^[3-14]。如Chen等^[3]基于GA入渗模型研究了边坡降雨入渗过程，推导了边坡降雨入渗率计算表达式。张杰等^[4]考虑气阻作用建立了分层假定的雨水入渗计算分析的GA模型。Zhang等^[5]基于GA模型建立了可以计算时变破坏概率和失效时间的可靠度分析框架，并开发了基于电子表格的降雨型边坡破坏概率预测方法。Dou等^[6]考虑土体饱和渗透系数变异性，基于GA入渗模型建立了雨水入渗-重分布分析模型。潘永亮等^[7]建立了可综合考虑地下水位、初始含水量及不同降雨工况的改进GA模型。蒋水华等^[8]提出了一种可考虑土体参数空间变异性修正GA模型，并探讨了降雨入渗与多参数空间变异性作用下边坡失稳机理。

虽然上述研究大大地拓展了GA入渗模型的应用范围，但是忽略了土壤中客观存在的湿润区非饱和过渡层。大量试验发现湿润锋至土体入渗表面之间的土体并非处于完全饱和状态，在饱和区和天然区之间至少存在一个过渡层，并且过渡层内不同深度处土体体积含水量也不尽相同^[9-10]。为此，张杰等^[11]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。胡海军等^[12]在分层GA模型基础上，合理考虑湿润锋处吸力作用和水分剖面形状，分析了积水和降雨作用下非饱和重塑黄土的降雨入渗过程。Yao等^[13]将饱和层与非饱和层厚度设定为入渗区深度的50%，分别对无限长边坡和马家沟滑坡进行了稳定性分析，并发现分层GA模型对研究强降雨事件下边坡稳定性问题十分有效。温馨等^[14]针对黄土入渗中存在的非饱和区，提出了一种修正的GA模型来表征土体实际渗透系数随埋深的变化规律。

另一方面，受沉积、后沉积等地质作用的影响，岩土体参数存在固有的空间变异性。现有研究^[8,15-16]表明土体水力参数的空间变异性是影响降雨入渗下边坡渗流计算的关键因素。为客观评价降雨入渗下边坡失稳机理及稳定性，需要合理表征岩土体参数空间变

异性的影响。然而，目前缺乏适用于考虑土体渗透系数空间变异性多层非均质边坡的降雨入渗模型。为此，提出了一种改进的Green-Ampt模型，通过4种常见的边坡工况验证该模型的有效性，进而探讨降雨入渗下多层非均质边坡含水率分布及稳定性问题。

1 改进 Green-Ampt 入渗模型

1.1 Green-Ampt 入渗模型

Green-Ampt（GA）入渗模型是1911年由Green等^[17]提出的，最初用于解决初始干燥土体在薄层积水时的入渗问题。该模型假定雨水在入渗时存在可将湿润区和非湿润区明确分开的水平湿润锋面（图1）。GA模型假设土体体积含水量呈矩形分布，湿润区为土体饱和层，其体积含水量为饱和体积含水量 θ_s ，非湿润区为天然层，其体积含水量为初始体积含水量 θ_i 。

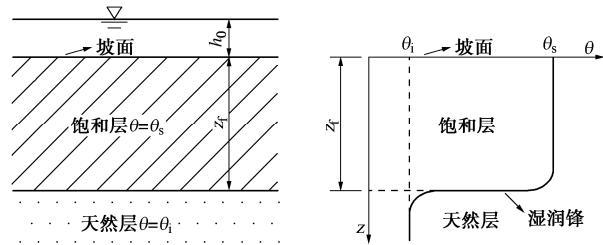


图1 经典 GA 入渗模型的含水率分布

Fig. 1 Distribution of water content of classic Green-Ampt model

据此，土体入渗率 f 可表示为

$$f = -k_s \frac{dh}{dz} = -k_s \frac{(h_i - z_f) - h_0}{z_f - 0} \\ = k_s \left(1 + \frac{h_0 - h_i}{z_f} \right) = k_s \left(1 + \frac{h_0 + S_f}{z_f} \right)。 \quad (1)$$

式中： k_s 为土体饱和渗透系数； h_0 为地面处积水水头； z_f 为湿润锋深度； h_i 为湿润锋下方的水头； S_f 为湿润锋处土体概化基质吸力水头，是一个关于含水量的函数，可通过相关试验或下面的推导方程进行求解^[18]：

$$S_f = \frac{\int_{K_r(\theta_i)}^1 \psi(K_r) dK_r}{1 - K_r(\theta_i)} \\ = \frac{3\lambda + 2}{3\lambda + 1} \psi_b \left[1 - K_r(\theta_i)^{\frac{3\lambda + 1}{3\lambda + 2}} \right] \approx \frac{3\lambda + 2}{3\lambda + 1} \psi_b。 \quad (2)$$

式中： ψ_b 为土体进气值； K_r 为湿润锋处相对饱和渗透系数； λ 为表征土体孔径分布特征的拟合系数。进而，可获得累积降雨入渗量 I 为

$$I = (\theta_s - \theta_i) z_f。 \quad (3)$$

可见，该模型计算简单，且模型参数具有明确的物理意义。然而，针对边坡降雨入渗问题，该模型存

在如下不足: ①在模拟降雨入渗时, 该模型没有考虑到降雨强度 R 对入渗率 f 的影响, 将会高估入渗量 I , 导致计算的湿润锋深度偏大。②该模型没有考虑客观存在的过渡层, 大量试验研究^[19-21]表明, 湿润锋至土体入渗表面之间的土体并非完全处于饱和状态, 即在饱和区和天然区之间应至少存在一个过渡层。如不考虑客观存在的过渡层, 将会高估湿润锋以上的土重, 低估边坡安全系数。③当只考虑参数(如饱和渗透系数)变异性时, 传统的GA模型可以采用临界渗透系数划分降雨入渗边界条件, 但是一旦考虑土体参数空间变异性, 整个土层剖面的渗透系数呈空间非均匀分布, 不同位置处数值大小不同, 此时采用临界渗透系数划分降雨入渗边界条件不再适用^[8]。

1.2 改进 Green-Ampt 入渗模型

为克服上述不足, 十分必要对经典 GA 入渗模型进行改进, 使其能够处理考虑土体参数空间变异性多层非均质边坡降雨入渗问题。实际工程边坡或天然边坡通常存在一定的坡度, 因而积水易形成坡面径流, 其中的关键难题是如何确定不同时刻下边坡降雨入渗边界条件。鉴于采用临界渗透系数划分降雨入渗边界条件不适用考虑参数空间变异性多层非均质边坡, 为此蒋水华等^[8]提出采用开始积水时间 t_p 划分入渗边界, 本文将该 GA 模型称为“修正 GA 模型”。由 GA 入渗模型^[11, 13]可知, 土体入渗率 f 随着累计入渗量 I 的增加而逐渐减小。对于倾角为 α 的边坡而言, 当土体的累计入渗量达到某一累积入渗量 I_p 值时, 边坡坡面开始积水^[5, 7], 此时 $f = R \cos \alpha$, I_p 的计算表达式为

$$I_p = \frac{(\theta_s - \theta_i) S_f}{\cos \alpha (R/k_s - 1)} \quad (4)$$

式中: I_p 为积水时刻 t_p 所对应的累积入渗量; α 为边坡倾角; R 为降雨强度。据此可得边坡开始积水的时间 t_p 为

$$t_p = I_p / (R \cos \alpha) \quad (5)$$

根据开始积水时间 t_p 可划分入渗边界条件如下:

(1) 当降雨历时 $t < t_p$ 时, 入渗区土体处于非饱和状态, 雨水将全部入渗至土体中, 此时的入渗边界由流量控制, 可得到入渗控制方程为

$$f = R \cos \alpha = k(\theta) + \frac{k_s [\psi_r(\theta) - \psi_r(\theta_i)]}{z_f} \quad (6)$$

式中: θ 为土体体积含水量; $\psi_r(\theta)$ 为湿润锋处土体相对吸力水头^[8],

$$\begin{aligned} \psi_r(\theta) &= \int_{\psi}^{-\infty} \frac{k(\theta)}{k_s} d\psi = \int_{\psi}^{-\infty} \left(\frac{\psi_b}{\psi} \right)^{3\lambda+2} d\psi \\ &= \left(\frac{\psi_b}{\psi} \right)^{3\lambda+1} \frac{\psi_b}{3\lambda+1} = S_e^{3+1/\lambda} \frac{\psi_b}{3\lambda+1} \end{aligned} \quad (7)$$

式中: θ_f 为土体残余体积含水量; S_e 为有效饱和度, $S_e = (\theta - \theta_f) / (\theta_s - \theta_f)$ 。

随后, 依据 GA 模型的矩形入渗原理可推导相应的湿润锋深度为

$$z_f = \frac{I}{\theta - \theta_i} = \frac{Rt \cos \alpha}{\theta - \theta_i} \quad (8)$$

将式(8)代入式(6)中, 可得到非线性方程:

$$f = R \cos \alpha = k(\theta) + \frac{k_s [\psi_r(\theta) - \psi_r(\theta_i)] (\theta - \theta_i)}{Rt \cos \alpha} \quad (9)$$

求解式(9)所示的非线性方程, 可得到不同降雨历时下土体体积含水量 θ 分布, 进而结合式(8)可以计算得到对应的湿润锋深度。

(2) 当降雨历时 $t \geq t_p$ 时, 此时边坡表面开始积水, 因降雨强度超过土体允许入渗率, 故土体表面入渗区处于饱和状态, 此时的入渗边界由水头控制^[2, 6, 8]。降雨入渗过程可分为自由入渗和积水入渗两个阶段。其入渗率 f 和累计入渗量 I 可为^[11, 13]

$$f(t) = \begin{cases} R \cos \alpha & (t \leq t_p) \\ k_s (\cos \alpha + S_f / z_f) & (t > t_p) \end{cases}, \quad (10)$$

$$I = \int_0^t f(t) dt \quad (11)$$

按照式(11)进行积分得到累积入渗量, 进而得到入渗饱和区湿润锋深度 z_f 为

$$z_f = \frac{I}{\theta_s - \theta_i} \quad (12)$$

因此, 一旦确定了土体饱和渗透系数 k_s 和相应的降雨历时 t , 便可针对上述两种降雨入渗边界, 分别求解对应的土体湿润锋深度和含水量分布。

另一方面, 大量相关试验研究^[9-10, 19]表明: 湿润锋至土体入渗表面之间的土体真实体积含水量并非完全处于饱和状态, 即在饱和层和天然层之间应至少存在一个过渡层。根据文献[9~13], 将GA入渗模型进行分层处理, 增加客观存在的过渡层, 如图2(b)所示。从图2中可以看出, 改进后的土体体积含水量分布包含饱和层、过渡层和天然层3部分。其中饱和层深度为 z_s , 过渡层深度为 z_t 。

文献[9, 10]的相关试验数据表明, 采用椭圆曲线分布来表征过渡区含水量分布具有较高的计算精度, 故本文也采用椭圆曲线来描述过渡层含水量分布, 由此可得修正的土体含水量分布为

$$\theta(z) = \begin{cases} \theta_s & (\text{饱和层}, \quad 0 \leq z \leq z_s) \\ \theta_i + (\theta_s - \theta_i) \sqrt{1 - \left(\frac{(z - z_s)^2}{z_t^2} \right)} & (\text{过渡层}, \quad z_s \leq z \leq z_h) \\ \theta_i & (\text{天然层}, \quad z > z_h) \end{cases} \quad (13)$$

式中: z_h 为整个入渗区深度,

$$z_h = z_s + z_t \quad (14)$$

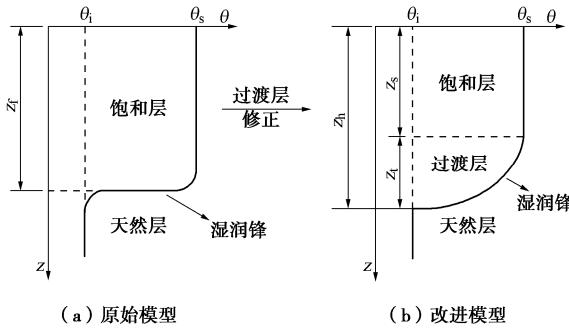


图 2 改进的 GA 入渗模型的含水量分布

Fig. 2 Distribution of water content of improved Green-Ampt model

随着降雨入渗的推进, 饱和层、过渡层和天然层的深度都会发生变化。彭振阳等^[10]通过试验发现过渡层深度与总入渗区深度 z_h 存在一个比例关系, 并且该比例与整个入渗区深度之间具有良好的线性关系:

$$\left. \begin{aligned} z_t &= \eta z_h, \\ \eta &= az_h + b_0 \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

式中: η 为过渡层占整个入渗区深度的比例; a 和 b 为拟合系数。

在过渡层修正过程中, 应保持累计入渗量不变, 即 $I = I_M$ 。 I 可通过式(8)和(11)计算得到, I_M 为增加过渡层后的累计入渗量, 其值应等于饱和层入渗量 I_s 和过渡层入渗量 I_t 之和。其中对于饱和层, 入渗量 $I_s = (\theta_s - \theta_i)z_s$; 对于过渡层, 由于其为椭圆曲线分布, 故其入渗量等于 $1/4$ 的椭圆面积 $I_t = 0.25\pi(\theta_s - \theta_i)z_t$, 据此可得总的累计入渗量为

$$I = I_M = I_s + I_t = (\theta_s - \theta_i)z_s + 0.25\pi(\theta_s - \theta_i)z_t. \quad (16)$$

联立式(14)~(16), 便可计算得到饱和层深度 z_s 和过渡层深度 z_t , 进而可求得整个边坡土层的入渗区深度 z_h 及体积含水量分布。本文将所提模型称为“改进 GA 模型”

2 多层非均质边坡稳定性分析

降雨诱发滑坡通常是沿边坡浅层面发生, 在剪切力作用下趋于破坏, 滑动面深度远小于滑动面长度, 故常采用图 3 所示的无限长边坡模型分析浅层滑坡稳定性。根据莫尔-库仑破坏准则, 基于极限平衡分析的无限长边坡模型安全系数计算公式为^[15, 22]

$$F_s = \frac{\tau_f}{\tau_m} = \frac{c' + [(\sigma_n - u_a) - \sigma_s] \tan \varphi'}{W \sin \alpha \cos \alpha}. \quad (17)$$

式中: τ_f 为土的抗剪强度; τ_m 为沿潜在破坏面任意一点的剪应力; W 为单位土体切片的重量; c' , φ' 分别为土体有效黏聚力和有效内摩擦角; $(\sigma_n - u_a)$ 为单

位土条底部净法向力, u_a 为孔隙气压力。根据文献[2, 6, 8, 15], 取 $u_a = 0$, $\sigma_n = \gamma_t z \cos^2 \alpha$, 其中 γ_t 为土体有效重度, z 为滑动面深度, α 为无限长边坡倾角; σ_s 为吸应力,

$$\sigma_s = -S_e \psi(\theta). \quad (18)$$

式中: $\psi(\theta)$ 为基质吸力, 是关于土体体积含水量 θ 的函数。

为了考虑降雨入渗过程中因体积含水量变化而引起的土体单位重量变化, 对滑动面以上土体部分进行积分得到土体重量为

$$W = \int_0^z \gamma_t dz. \quad (19)$$

式中: 土体有效重度 γ_t ^[15] 为

$$\gamma_t = \gamma_d + \theta(z) \gamma_w. \quad (20)$$

式中: γ_d 和 γ_w 分别为土体干重度和水重度。

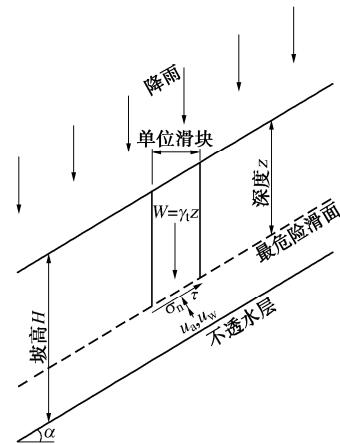


图 3 无限长边坡计算模型

Fig. 3 Diagram of an infinite slope model

综上, 基于本文提出的改进 GA 模型进行降雨入渗下非均质边坡稳定性分析的步骤如下:

(1) 收集并确定土体参数统计特征(包括均值、标准差、自相关函数、波动范围及概率分布等), 沿垂直方向将边坡划分为 H/d 个等厚的均质土层(H 为坡高, d 为随机场单元尺寸)。

(2) 基于土体参数统计特征, 采用蒙特卡洛模拟(MCS)方法产生 N 组独立标准正态随机样本, 随后基于 Karhunen-Loeve (KL) 级数展开方法^[15-16, 23]生成 N 组土体参数随机场实现值, 并将其一一赋值给对应的土层。

(3) 采用式(5)计算开始积水时间 t_p , 并与降雨历时 t 进行比较, 划分降雨入渗边界条件, 再根据式(8), (12), (13)~(16), 求解考虑客观存在过渡层的降雨入渗下边坡体积含水量分布。

(4) 采用式(17)计算边坡每个土层及湿润锋处安全系数, 从中可获得 $(H/d+1)$ 个安全系数, 并将其中最小的安全系数视作该边坡安全系数, 对应的滑

动面则为该边坡最危险滑动面。

3 算例分析

下面以图 3 所示的非饱和无限长边坡为例^[6, 24], 验证提出的改进 GA 模型的有效性。边坡坡高 $H = 3$ m, 倾角 $\alpha = 50^\circ$, 下部为不透水基岩, 降雨强度 R 恒定为 5 mm/h。采用 Brook 等^[25]提出的土水特征曲线模型描述土体渗透系数和基质吸力与体积含水量之间的函数关系为

$$k(\theta) = k_s S_e^{3+2/\lambda}, \quad (21)$$

$$\psi(\theta) = \psi_b S_e^{-1/\lambda}. \quad (22)$$

式中: $k(\theta)$ 为土体渗透系数。根据文献[6, 24], 得到土体物理力学参数取值如表 1 所示。另外根据文献^[10]的试验结果, 取式(15)中的系数 a 和 b 分别为 -0.003, 0.8712。

表 1 土体物理力学参数取值

Table 1 Values of physical parameters of soil

计算参数	取值	计算参数	取值
饱和渗透系数 k_s / ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)	3	有效黏聚力 c' / kPa	5
有效内摩擦角 $\varphi' / (\text{°})$	28	进气值 ψ_b / kPa	2.752
土体干重度 γ / ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	16.217	湿润锋处土体概化基质吸力 S_f / mm	424.3
饱和含水量 θ_s	0.335	残余含水量 θ_r	0.068
初始含水量 θ_i	0.148	土体孔隙分布特征参数 λ	0.319

通过以下 4 种常见的边坡工况, 验证采用本文提出的改进 GA 模型进行降雨入渗下边坡体积含水量计算及稳定性分析的有效性: ①均质边坡; ②两层边坡(上层渗透性大、下层渗透性小); ③两层边坡(上层渗透性小、下层渗透性大); ④考虑任意一次参数随机场典型实现的非均质边坡。同时, 选用 Richards 方程数值解和修正 GA 入渗模型^[8]计算结果进行对比分析。其中, Richards 方程数值解采用一维流动模型来模拟边坡垂直入渗过程, 描述一维水流在边坡上的入渗过程控制方程为^[26]

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[k(\theta) \left(\frac{\partial h}{\partial z} - \cos \alpha \right) \right]. \quad (23)$$

式中: $\theta \in [\theta_r, \theta_s]$; h 为压力水头。

本文借助 Hydrus-1D 软件^[27]对式(23)所示 Richards 方程进行数值求解, 可得到不同降雨历时 t 下不同深度 z 处压力水头 $h(z, t)$ 和土体体积含水量 $\theta(z, t)$ 分布。本文将 Richards 方程数值解视作精确解进行判断对比分析。

3.1 工况 1: 均质边坡

基于表 1 中的土体参数均值, 对图 3 所示均质边

坡模型进行降雨入渗分析。图 4 比较了采用修正 GA 模型和提出的改进 GA 模型计算的体积含水量分布和安全系数及 Richards 方程数值解。

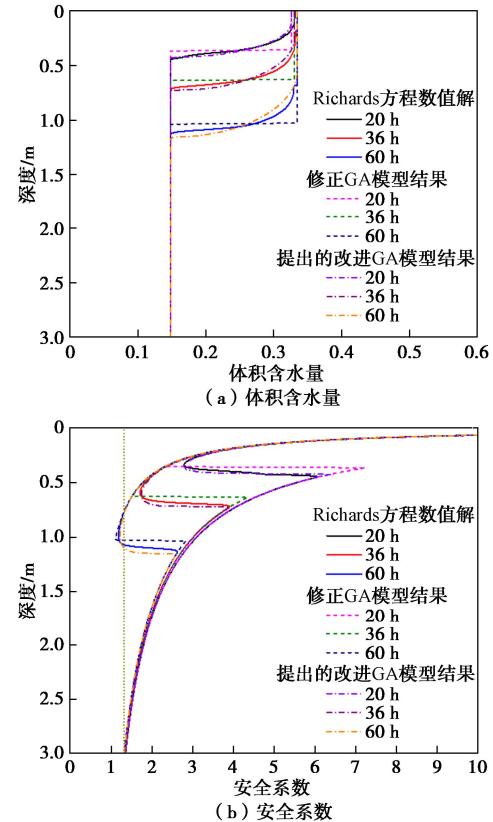


图 4 不同降雨历时下边坡体积含水量和安全系数分布的比较
(工况 1)

Fig. 4 Comparison of distribution of water content and factors of safety of slope under different rainfall durations (Scenario I)

由图 4 可知, 采用修正 GA 模型计算的体积含水量分布与提出的改进 GA 模型计算结果和 Richards 方程数值解均存在较大差别, 这是由于修正 GA 模型假定雨水呈矩形入渗, 没有考虑客观存在的过渡层。在此基础上进行边坡稳定性分析, 其边坡 F_S 沿坡体深度的变化如图 4 (b) 所示。由图 4 可知, 随着降雨的进行, 雨水入渗区也不断下移, 饱和层内土体基质吸力基本丧失, 导致入渗区内边坡 F_S 随着埋深的增大而逐渐减小。到达过渡层后, 由于土体并非完全处于饱和状态, 基质吸力的作用未完全丧失, 边坡 F_S 先下降而随后又呈增加趋势。接着, 虽然土体天然层内土体含水量和基质吸力均保持初始状态, 但由于土体深度不断增加, 导致土条自重逐渐增加, 坡体滑动力增大, 此时的边坡 F_S 表现为随着埋深的增大而逐渐降低, 并在埋深 $z = 3.0$ m 的不透水层处达到最小值。

表 2 比较了不同方法计算的降雨历时 20, 36, 60 h 下边坡安全系数和最危险滑动面深度。表中, 入渗区是指雨水入渗至坡体内的区域, 包括饱和层和过渡

层（例如降雨历时 60 h，图 4 (a) 中入渗区可视为距离坡面 0~1.25 m 区域）；整个边坡则包含入渗区和天然区。将其分开进行处理，可分析不同降雨历时下边坡最危险滑动面位置和确定边坡失稳是否因降雨所诱发。若边坡最危险滑动面位于入渗区，可认为边坡失稳因降雨造成。由表 2 可知，边坡安全系数随着降雨历时的增加而减小。相较于修正 GA 模型，提出的改进 GA 模型与基于 Richards 方程数值方法计算的安全系数吻合。如降雨历时 60 h，提出的改进 GA 模型计算的边坡安全系数为 1.22，与基于 Richards 方程数值方法计算的 1.19 差别很小。表 2 中采用修正 GA 模型计算的边坡安全系数偏小的原因是，该模型假定雨水呈矩形入渗，导致计算的体积含水量 θ 偏大，进而高估了土条重量 W ，造成边坡安全系数偏小。相较之下，提出的改进 GA 模型因考虑了客观存在的过渡层，计算的边坡体积含水量、安全系数以及最危险滑动面位置均与 Richards 方程数值解吻合，这表明提出的改进 GA 模型能够有效分析均质边坡降雨入渗问题。此外，降雨历时 20, 36 h 时，3 种方法均识别出边坡最危险滑动面位于 $z=3.0$ m 不透水层处。降雨历时 60 h，相较于修正 GA 模型计算结果 (1.03 m)，本文提出的改进 GA 模型结果 (0.99 m) 与精确解 (0.99 m) 更吻合，说明提出方法能够准确识别边坡最危险滑面位置。

表 2 边坡安全系数和最危险滑动面深度的比较 (工况 1)

Table 2 Comparison of factors of safety and depths of critical slip surface of slope (Scenario I)

类别	降雨历时/h	Richards 方程数值解	修正 GA 模型	提出的改进 GA 模型
入渗区安全系数	20	2.79	2.35	2.78
	36	1.72	1.53	1.74
	60	1.19	1.10	1.22
整个边坡安全系数	20	1.36	1.36	1.36
	36	1.34	1.34	1.34
	60	1.19	1.10	1.22
最危险滑动面深度	20	3.00 m	3.00 m	3.00 m
	36	3.00 m	3.00 m	3.00 m
	60	0.99 m	1.03 m	0.99 m

3.2 工况 2：两层边坡（上层渗透性大、下层渗透性小）

为了进一步说明提出的改进 GA 模型的有效性，本节对两层边坡（上层渗透性大、下层渗透性小）进行降雨入渗分析。第一层土饱和渗透系数为 3 mm/h，土层厚度为 0.5 m；第二层土饱和渗透系数为 3.5 mm/h，土层厚度为 2.5 m。两个土层的其他参数均相同，见表 1。图 5 比较了工况 2 下采用上述 2 种模型和 Richards 方程数值方法计算的土体体积含水量分布。由图 5 可知，提出的改进 GA 模型计算结果同样与 Richards 方程数值解吻合。表 3 比较了采用不同方法

计算的降雨历时 20, 36, 60 h 安全系数及最危险滑动面深度。可见，提出的改进 GA 模型与 Richards 方程数值方法计算的边坡安全系数依然吻合。如降雨历时 20 h，Richards 方程数值方法计算的入渗区安全系数为 2.83，提出的改进 GA 模型结果为 2.81，而修正 GA 模型结果为 2.39，进一步体现了提出的改进 GA 模型的有效性及考虑客观存在的过渡层的必要性。

表 3 边坡安全系数和最危险滑动面深度的比较 (工况 2)

Table 3 Comparison of factors of safety and depths of critical slip surface of slope (Scenario II)

类别	降雨历时/h	Richards 方程数值解	修正 GA 模型	提出的改进 GA 模型
入渗区安全系数	20	2.83	2.39	2.81
	36	1.71	1.55	1.76
	60	1.19	1.10	1.22
整个边坡安全系数	20	1.36	1.36	1.36
	36	1.34	1.34	1.34
	60	1.19	1.10	1.22
最危险滑动面深度	20	3.00 m	3.00 m	3.00 m
	36	3.00 m	3.00 m	3.00 m
	60	0.98 m	1.03 m	0.99 m

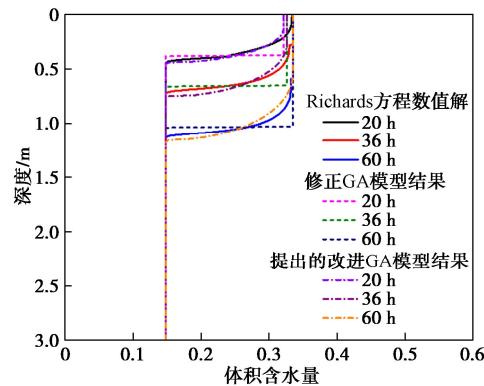


图 5 不同降雨历时下边坡体积含水量分布的比较 (工况 2)

Fig. 5 Comparison of distribution of water content of slope under different rainfall durations (Scenario II)

3.3 工况 3：两层边坡（上层渗透性小、下层渗透性大）

本节进一步分析两层边坡（上层渗透性小、下层渗透性大）来验证改进 GA 模型的有效性。第一层土饱和渗透系数为 3 mm/h，土层厚度为 0.5 m；第 2 层土饱和渗透系数为 3.5 mm/h，土层厚度为 2.5 m。这两个土层的其他参数均相同，见表 1。图 6 比较了采用上述 2 种模型和 Richards 方程数值方法计算的边坡体积含水量分布。表 4 比较了基于不同方法计算的边坡安全系数。与工况 2 类似，提出的改进 GA 模型与 Richards 方程数值方法计算的安全系数一致，说明提出的改进 GA 模型可有效求解多层边坡降雨入渗问题。

表4 边坡安全系数和最危险滑动面深度的比较 (工况3)

Table 4 Comparison of factors of safety and depths of critical slip surface of slope (Scenario III)

类别	降雨历时/h	Richards 方程数值解	修正 GA 模型	提出的改进 GA 模型
入渗区安全系数	20	2.79	2.35	2.78
	36	1.72	1.53	1.74
	60	1.19	1.10	1.22
整个边坡安全系数	20	1.36	1.36	1.36
	36	1.34	1.34	1.34
	60	1.19	1.10	1.22
最危险滑动面深度	20	3.00 m	3.00 m	3.00 m
	36	3.00 m	3.00 m	3.00 m
	60	1.01 m	1.04 m	1.00 m

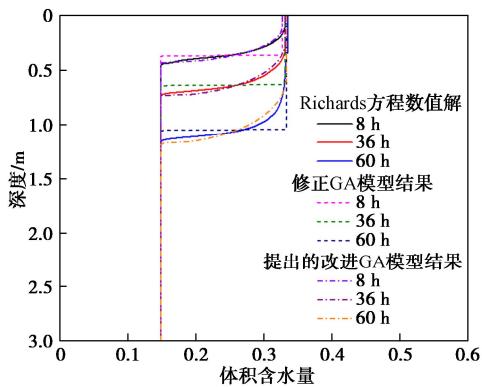


图6 不同降雨历时下边坡体积含水量分布的比较 (工况3)

Fig. 6 Comparison of distribution of water content of slope under different rainfall durations (Scenario III)

3.4 工况4: 考虑一次参数随机场典型实现的非均质边坡

工程实际中, 土体饱和渗透系数 k_s 呈空间非均质分布。本文将边坡沿垂直方向上划分为 60 个均质土层, 厚度为 $d = 0.05 \text{ m}$ ^[6]。基于 KL 级数展开方法来离散 k_s 随机场, 利用高斯型自相关函数模拟土体 k_s 的空间自相关性, 垂直自相关距离 l_v 取 0.5 m。当 KL 级数展开截断项数取 6 时, 计算的期望能比率因子 ε 为 95.67%, 可以满足随机场离散精度要求(大于 95%)。图 7 给出了土体饱和渗透系数随机场的一次典型实现, 图中颜色较深部分表示 k_s 值较大区域, 颜色较浅部分表示 k_s 值较小区域。

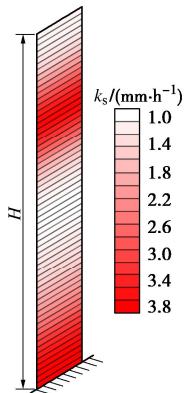


图7 饱和渗透系数随机场一次典型实现分布图

Fig. 7 Typical realization of random filed of hydraulic conductivity

图8比较了不同方法计算的降雨历时 8, 36, 60 h 边坡体积含水量分布。由图8可知, 在3个不同降雨历时下, 提出的改进GA模型计算的体积含水量分布和Richards方程数值解同样吻合, 入渗区和整个边坡的安全系数和最危险滑动面深度几乎相同(见表5), 同样说明了基于提出的改进GA模型进行多层非均质边坡降雨入渗分析的有效性。由表5可知, 降雨历时8, 36 h, 由这2种模型和Richards方程数值方法计算的整个边坡安全系数皆小于入渗区安全系数, 此时边坡最危险滑动面均位于 $z = 3 \text{ m}$ 的不透水层处。然而, 在降雨历时60 h时, 提出的改进GA模型和Richards方程数值方法均表明边坡最危险滑动面位于 $z = 3 \text{ m}$ 不透水层处。而基于修正GA模型计算的整个边坡安全系数等于入渗区安全系数, 即修正GA模型认为此时最危险滑动面处于入渗区(距离坡面约 0.85 m), 显然错误评估了边坡失稳模式。这是由于该典型实现下土层表面渗透性低, 湿润锋推进缓慢, 虽然湿润锋处安全系数在不断减小, 但是始终大于不透水层处安全系数, 故而边坡仍然沿着不透水层处发生失稳破坏。综上, 采用修正GA模型会造成对边坡失稳机理的错误认识, 相比之下采用提出的改进GA模型能够准确识别最危险滑动面位置, 获得更合理的边坡安全系数。另外需要说明的是, 提出的改进Green-Ampt模型和Richards方程数值解得到的过渡层分布存在误差, 并且该误差随着降雨历时的增加而增大, 见图4(a), 5, 6, 这是因为本文没有考虑式(15)中系数 a 和 b 随着降雨历时的增加有可能发生变化。尽管如此, 两者计算的湿润锋深度随着降雨历时的增加均保持一致。

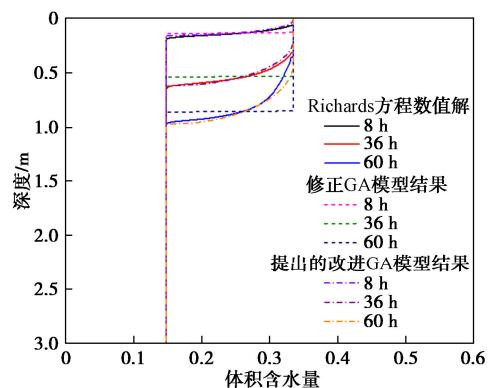


图8 工况4不同降雨历时下边坡体积含水量分布比较

Fig. 8 Comparison of distribution of water content of slope under different rainfall durations (Scenario IV)

为了说明这4种工况下边坡体积含水量分布之间的差别, 图9比较了这4种工况降雨历时 36, 60 h 的边坡含水量分布曲线。由图9(a)可知, 工况1, 2, 3 的边坡含水量分布曲线重合, 而工况4入渗区较小。这是由于工况4边坡表面渗透性小, 雨水入渗率较低,

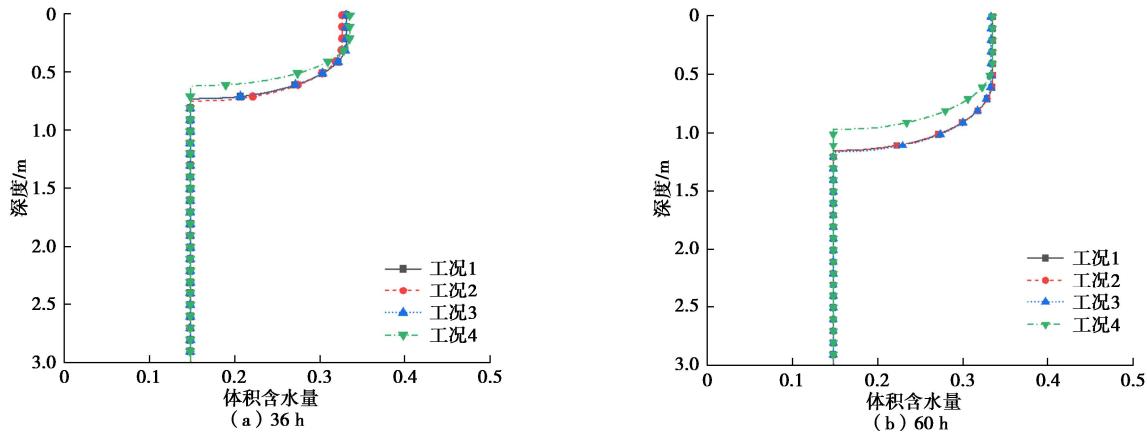


图 9 不同工况下边坡体积含水量分布的比较

Fig. 9 Comparison of distribution of water content of slope for different scenarios

进而导致入渗区小。工况1, 3由于上层饱和渗透系数相同, 故其在降雨历时36 h下含水量分布曲线重合。工况2与工况1, 3的边坡含水量分布曲线重合的原因是, 在降雨初期, 降雨历时未超过积水时刻 t_p , 雨水入渗率等于 $R\cos\alpha$, 此时的入渗量仅与降雨历时相关, 与土体饱和渗透系数大小无关。因此, 工况1, 2, 3在降雨历时36 h入渗量相差不大, 对应的边坡含水量分布曲线基本重合。相比之下, 降雨历时60 h, 工况4由于其自身的渗透性较低, 故入渗区小; 工况3下由于下层土体渗透性大, 导致入渗量增大, 进而入渗深度更大; 工况1, 2由于下层土体的饱和渗透系数一致, 故这两种工况不仅入渗率和入渗量相等, 而且边坡体积含水量分布也相同, 见图9 (b)。

表 5 边坡安全系数和最危险滑动面深度的比较 (工况 4)

Table 5 Comparison of factors of safety and depths of critical slip

surface of slope (Scenario IV)

类别	降雨历时/ h	Richards 方 程数值解	修正 GA 模 型	提出的改进 GA 模型
入渗区安 全系数	8	6.58	5.62	6.43
	36	1.95	1.72	1.98
	60	1.40	1.24	1.39
整个边坡 安全系数	8	1.37	1.37	1.37
	36	1.35	1.35	1.35
	60	1.33	1.24	1.33
最危险滑 动面深度	20	3.00 m	3.00 m	3.00 m
	36	3.00 m	3.00 m	3.00 m
	60 h	3.00 m	0.85 m	3.00 m

4 结 论

考虑降雨入渗作用下边坡土体中客观存在的过渡层, 提出了一种适用于多层非均质边坡降雨入渗分析的改进 GA 模型, 为合理确定不同降雨历时下多层非均质边坡的入渗区深度和土体体积含水量分布奠定了基础。同时, 以无限长边坡模型为例, 进行降雨入渗

下边坡稳定性分析, 并与采用 Richards 方程数值解和修正 GA 模型计算的边坡安全系数和最危险滑动面深度进行了对比分析, 验证了提出的改进 GA 模型的有效性。

(1) 修正 GA 模型局限于雨水呈矩形入渗, 没有考虑雨水入渗过程中土体客观存在的过渡层, 导致降雨入渗过程中单位土体重度被高估, 计算的边坡安全系数偏小, 造成对边坡失稳机理的错误认识。

(2) 提出的改进 GA 模型因考虑了边坡土体入渗区内客观存在的过渡层, 故计算的土体含水量分布、安全系数和滑动面分布不仅贴近客观实际, 而且与 Richards 方程数值解吻合, 能够较好地解决考虑土体饱和渗透系数空间变异性的问题。

(3) 相比于修正 GA 模型, 提出的改进 GA 模型能够准确识别非均质边坡最危险滑动面位置, 为降雨型滑坡加固设计及风险防控提供了一条有效途径。如工况4中, 降雨历时60 h时, 修正 GA 模型认为最危险滑动面位于入渗区, 而改进 GA 模型和 Richards 方程计算结果均证明边坡最危险滑动面位于不透水层处。

(4) 工程实际中存在多种环境因素对边坡降雨入渗过程具有重要的影响, 包括边坡初始状态(如含水量, 土壤类型等)的不均匀分布、边坡倾角大小、覆土厚度和降雨雨型等, 融入多种环境因素影响的边坡降雨入渗模型还有待进一步研究。

参考文献:

- [1] FROUDE M J, PETLEY D N. Global fatal landslide occurrence from 2004 to 2016[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2018, 18(8): 2161-2181.
- [2] 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 Zhidong, YANG Shixiu, XIE Senchuan. Soil Water Dynamics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1988. (in Chinese))
- [3] CHEN L, YOUNG M H. Green-Ampt infiltration model for sloping surfaces[J]. Water Resources Research, 2006, **42**(7): W07420.
- [4] 张杰, 韩同春, 豆红强, 等. 探讨考虑气阻作用下分层假定的雨水入渗计算分析模型[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(12): 2219-2225. (ZHANG Jie, HAN Tongchun, DOU Hongqiang, et al. Analysis model for rainwater infiltration considering gas resistance under stratified assumption[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(12): 2219-2225. (in Chinese))
- [5] ZHANG J, HUANG H W, ZHANG L M, et al. Probabilistic prediction of rainfall-induced slope failure using a mechanics-based model[J]. Engineering Geology, 2014, **168**: 129-140.
- [6] DOU H Q, HAN T C, GONG X N, et al. Probabilistic slope stability analysis considering the variability of hydraulic conductivity under rainfall infiltration-redistribution conditions[J]. Engineering Geology, 2014, **183**: 1-13.
- [7] 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. (in Chinese))
- [8] 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. (in Chinese))
- [9] 王文焰, 汪志荣, 王全九, 等. 黄土中 Green-Ampt 入渗模型的改进与验证[J]. 水利学报, 2003, **34**(5): 30-34. (WANG Wenyan, WANG Zhirong, WANG Quanjiu, et al. Improvement and evaluation of the Green-Ampt model in loess soil[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, **34**(5): 30-34. (in Chinese))
- [10] 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. (in Chinese))
- [11] 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. (in Chinese))
- [12] 胡海军, 李博鹏, 田堪良, 等. 积水和降雨下非饱和重塑黄土水分入渗模拟[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019, **47**(11): 1565-1573. (HU Haijun, LI Bopeng, TIAN Kanliang, et al. Simulation of water movement in unsaturated remolded loess under ponding infiltration and rainfall infiltration[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2019, **47**(11): 1565-1573. (in Chinese))
- [13] 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.
- [14] 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. (in Chinese))
- [15] CHO S E. Probabilistic stability analysis of rainfall-induced landslides considering spatial variability of permeability[J]. Engineering Geology, 2014, **171**: 11-20.
- [16] JIANG S H, LI D Q, ZHANG L M, et al. Slope reliability analysis considering spatially variable shear strength parameters using a non-intrusive stochastic finite element method[J]. Engineering Geology, 2014, **168**: 120-128.
- [17] GREEN W H, AMPT G A. Studies on soil physics: 1, flow of air and water through soils[J]. Journal of Agricultural Science, 1911, **4**(1): 1-24.
- [18] MOORE I D, EIGEL J D. Infiltration into two-layered soil profiles[J]. Transactions of the ASAE, 1981, **24**(6): 1496-1503.
- [19] 王文焰, 王全九, 张建丰, 等. 甘肃秦王川地区土壤水分运动参数及相关性[J]. 水土保持学报, 2002, **16**(3): 110-113.

- (WANG Wenyan, WANG Quanjiu, ZHANG Jianfeng, et al. Soil hydraulic properties and correlation in qingwangchuan area of Gansu Province[J]. Journal of Soil Water Conservation, 2002, 16(3): 110-113. (in Chinese))
- [20] MA Y, FENG S Y, SU D Y, et al. Modeling water infiltration in a large layered soil column with a modified Green-Ampt model and HYDRUS-1D[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2010, 71: 40-47.
- [21] DAMODHARA RAO M, RAGHUVANSHI N S, SINGH R. Development of a physically based 1D-infiltration model for irrigated soils[J]. Agricultural Water Management, 2006, 85(1/2): 165-174.
- [22] CAI J S, YEH T C J, YAN E C, et al. Uncertainty of rainfall-induced landslides considering spatial variability of parameters[J]. Computers and Geotechnics, 2017, 87: 149-162.
- [23] LALOY E, ROGIERS B, VRUGT J, et al. Efficient posterior exploration of a high-dimensional groundwater model from two-stage Markov chain Monte Carlo simulation and polynomial chaos expansion[J]. Water Resources Research, 2013, 49: 2664-2682.
- [24] 豆红强, 韩同春, 龚晓南, 等. 降雨条件下考虑饱和渗透系数变异性的边坡可靠度分析[J]. 岩土力学, 2016, 37(4): 1144-1152. (DOU Hongqiang, HAN Tongchun, GONG Xiaonan, et al. Reliability analysis of slope stability considering variability of soil saturated hydraulic conductivity under rainfall infiltration[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(4): 1144-1152. (in Chinese))
- [25] BROOKS R H, COREY A T. Hydraulic Properties of Porous Media[M]. Fort Collins: Colorado State University, 1964.
- [26] YUAN J, PAPAOANNOU I, STRAUB D. Probabilistic failure analysis of infinite slopes under random rainfall processes and spatially variable soil[J]. Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards, 2019, 13(1): 20-33.
- [27] SIMUNEK J, VAN GENUCHTEN M T, SEJNA M. The Hydrus-1D Software Package for Simulating the Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably Saturated Media, Version 4.16, HYDRUS Software Series 3[M]. Riverside: University of California Riverside, 2013.

第五届全国岩土本构理论研讨会（第 1 号通知）

第五届全国岩土本构理论研讨会将于 2024 年 10 月 26 日—27 日在北京举行。

主办单位: 中国土木工程学会土力学及岩土工程分会中国力学学会岩土力学专业委员会。

承办单位: 北京交通大学。

协办单位: 清华大学, 北京航空航天大学, 北京工业大学, 北京建筑大学, 中国科学院力学研究所, 中国水利水电科学研究院, 中国铁道科学研究院, 中国建筑科学研究院。

本次会议将围绕“岩土本构理论与基础设施安全”主题, 聚焦土、岩石等岩土类材料的本构理论、试验方法、数值模拟、工程应用等多个领域的前沿热点问题, 旨在为国内外同行提供一个开放的学术平台, 以利于交流基础设施安全中岩土本构理论与应用的新进展, 探讨岩土本构理论研究的新挑战、新趋势。特通过多种形式的学术报告, 促成参会学者共享新思想, 激发新思维, 拓宽新视野, 破解新难题, 解决新问题, 推动我国在岩土本构理论、方法和应用等方面不断发展和进步。望广大从事岩土本构理论及相关领域研究的专家、学者、工程技术人员以及研究生踊跃投稿并参加本次会议。

会议主题: 岩土本构理论与基础设施安全; 征文范围①岩

土材料本构理论与建模方法; ②岩土材料力学特性与试验技术; ③岩土本构理论的数值实现手段; ④岩土本构关系的工程应用实例。

征文要求: ①论文截稿日期: 2024 年 8 月 31 日。②投稿论文须未在国内外公开出版物或网站上发表过, 并严格按照《岩土工程学报》征文要求规范编辑全文。会议学术委员会将组织专家对所提交的论文进行审查, 精选一定数量的优秀论文推荐到《岩土工程学报》、《岩土力学》、《北京交通大学学报》等期刊。通过审稿程序的论文, 将在相关期刊发表。③论文的保密审查由作者及所在单位自行处理, 会议组委会不再作保密审查, 作者本人对此负全部责任。④来稿请用 word 文档版, 具体格式参见《岩土工程学报》模板。请在稿件首页注明作者研究方向、电话、Email 等联系方式。⑤稿件通过电子邮件发送到会议专用邮箱 (gctc_bjtu@163.com)。

论文投稿截止日期 2024 年 8 月 31 日; 地址: 北京市海淀区上园村 3 号北京交通大学 (100044); 联系人: 李规 (13436891261), 史小萌 (18618320917), 金大龙 (18001066820) 杨芮 (13031060210); E-mail: gctc_bjtu@163.com。

(大会组委会 供稿)