

后峰型降雨条件下地基瞬态极限承载力解析解

秦卫星^{1,2}, 邓传雄^{1,2}, 胡惠仁³, 熊轩宇^{1,2}, 刘泽辰^{1,2}

(1. 长沙理工大学水利与环境工程学院, 湖南 长沙 410114;

2. 水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114; 3. 长沙理工大学交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要:为快速获得后峰型降雨入渗过程非饱和地基承载性能演化规律,在 Richards 非饱和渗流控制方程中引入 Gardner 渗透系数函数和土-水特征曲线模型,推导了后峰型降雨入渗过程地基瞬态基质吸力解析解,并利用有限元模拟结果对解析解进行验证;基于瞬态基质吸力解析解,推导了考虑基质吸力影响的后峰型降雨过程地基瞬态极限承载力解析解,建立了非饱和地基极限承载力和起始雨强、雨强变化系数以及降雨历时之间的映射关系;基于地基瞬态极限承载力解析解,研究了后峰型降雨入渗过程地基承载性能演化特性,分析了起始雨强和雨强变化系数变化对地基承载性能的影响。结果表明:遭遇后峰型降雨入渗时,地基极限承载力随降雨历时增加而逐渐降低,降低速率呈现先慢后快的非线性特点,不同于遭遇均匀型降雨时地基极限承载力近线性减小的特点;雨强变化系数一定时,起始雨强越大,地基承载性能降低越快;起始雨强一定时,雨强变化系数越大,地基承载性能降低越快。

关键词:非饱和地基;极限承载力;基质吸力;后峰型降雨;解析解

中图分类号:TU43 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2023)02-0033-06

Analytical solution of transient ultimate bearing capacity for foundation under delayed-peak pattern rainfall infiltration//QIN Weixing^{1,2}, DENG Chuanxiong^{1,2}, HU Hui ren³, XIONG Xuanyu^{1,2}, LIU Zhe chen^{1,2} (1. School of Hydraulic and Environmental Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. Key Laboratory of Water-Sediment Sciences and Water Disaster Prevention of Hunan Province, Changsha 410114, China; 3. School of Traffic & Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: To reveal the influence of delayed-peak rainfall infiltration on ultimate bearing capacity of an unsaturated foundation rapidly, the following research work was carried out. The Gardner's permeability coefficient function and the soil-water characteristic curve model were introduced to simplify the Richards unsaturated seepage control equation, and the Laplace transform was adopted to derive the transient analytical solution of matrix suction for foundation under delayed-peak rainfall infiltration with rain intensity, which was verified with the finite element numerical simulation results. Based on the theory of shear strength for unsaturated soil and the transient analytical solution of matrix suction, the expression of transient ultimate bearing capacity for foundation was obtained under delayed-peak rainfall infiltration. The mapping relationship between the ultimate bearing capacity and the initial rain intensity, the rain intensity variation coefficient, and the rainfall duration was established. With the analytic solution of the ultimate bearing capacity, the evolution characteristics of the bearing capacity for foundation were studied during the delayed-peak rainfall, and the effects of the initial rain intensity and the rain intensity coefficient on the ultimate bearing capacity for foundation were analyzed. The results show that during delayed-peak rainfall infiltration, the ultimate bearing capacity decreases gradually with a nonlinear velocity from low to high, which is different from the near linear reduction when encountering uniform rainfall. When the rain intensity coefficient is constant, ultimate bearing capacity for foundation decreases faster with the greater initial rain intensity. When the initial rain intensity is constant, the ultimate bearing capacity for foundation decreases faster with greater rain intensity variation coefficient.

Key words: unsaturated soil foundation; ultimate bearing capacity; matrix suction; delayed-peak rainfall; analytical solution

基金项目:国家自然科学基金(51208062,51508039);湖南省自然科学基金(2022JJ30601);湖南省交通科技计划(201140);湖南省研究生科研创新项目(CX20190680)

作者简介:秦卫星(1978—),男,副教授,博士,主要从事水利水电工程研究。E-mail:qinweixing@csust.edu.cn

雨水入渗会改变非饱和和地基浅表层土体基质吸力,影响地基承载性能,进而诱发建筑物失稳破坏^[1-3]。因此快速准确预测降雨入渗过程地基基质吸力和承载性能演变特性,对雨季地基承载性能评价和及时采取针对性措施防止地基破坏具有重大现实意义。

解析解因简单、直观、高效等优点在非饱和地基承载特性研究中被广泛采用。Vanapalli 等^[1]考虑了基底 1.5 倍基础宽度范围内的基质吸力影响,建立了非饱和地基极限承载力计算公式。张常光等^[4]推导了基质吸力均匀、线性分布时非饱和条形地基极限承载力表达式。赵炼恒等^[5]根据 Fredlund 非饱和抗剪强度理论,分别给出了基质吸力沿深度均匀、线性分布时非饱和土条形基础竖向极限承载力计算的上限法。Vahedifard 等^[6]引入均匀型降雨稳定入渗条件下基质吸力解析解,建立了非饱和土地基极限承载力计算公式。陈茜等^[7]基于恒定雨强稳定入渗时基质吸力解析解获得了非饱和土地基极限承载力表达式。由此可见,目前非饱和地基承载力解析解研究已取得较丰硕成果,但现有成果多以基质吸力分布状态已知或假定雨水以恒定均匀雨强稳定入渗为基础,鲜见前峰、中峰、后峰等非均匀型降雨入渗过程地基瞬态极限承载力解析解研究的报道。

本文以后峰型降雨为例,基于 Richards 非饱和渗流控制方程,采用 Gardner 渗透系数函数和土-水特征曲线模型,推导了后峰型降雨入渗过程地基瞬态基质吸力解析解和考虑基质吸力影响的后峰型降雨过程地基瞬态极限承载力解析解,建立了非饱和地基极限承载力和起始雨强、雨强变化系数以及降雨历时之间的映射关系;研究了后峰型降雨入渗过程地基承载性能演化特性,并分析了起始雨强和雨强变化系数变化对地基承载性能的影响。

1 地基基质吸力解析解

1.1 基本假定

参考文献[3,8],引入如下基本假定描述非饱和和地基水文地质特征:①地基土体均质且各向同性,雨水入渗过程土体孔隙保持不变;②地下水位距地基表面较远,雨水入渗过程水位保持不变。后峰型降雨以瞬时雨强 q_B 入渗地基:

$$q_B = q_0 + at \tag{1}$$

式中: q_0 为起始雨强,cm/h; a 为雨强变化系数,大于零,cm/h²; t 为降雨历时,h。

基于上述假定和降雨入渗边界条件,绘制后峰型降雨入渗作用下均匀地基基质吸力计算示意图如

图 1 所示。

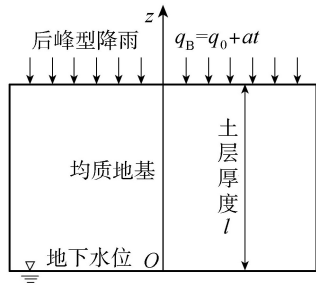


图 1 地基基质吸力计算示意图

1.2 控制方程及方程化简

建立混合格式的非饱和渗流控制方程^[8-12]:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[k \left(\frac{\partial h_m}{\partial z} + 1 \right) \right] = \frac{\partial \theta}{\partial t} \tag{2}$$

其中 $k = k_s e^{\beta h_m}$ $\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) e^{\beta h_m}$ 式中: k 为非饱和土体渗透系数,cm/h; z 为研究点相对地下水位距离,地表处为 l ,cm; h_m 为 z 处基质吸力,cm; θ 为体积含水率,cm³/cm³; k_s 为饱和渗透系数,cm/h; β 为去饱和系数,cm⁻¹; θ_r 为残余体积含水率,cm³/cm³; θ_s 为饱和体积含水率,cm³/cm³。

引入无量纲值 $Z = \beta z$ 、 $L = \beta l$ 、 $K = \frac{k}{k_s}$ 、 $T = \frac{\beta k_s t}{\theta_s - \theta_r}$,控制方程(2)可简化为

$$\frac{\partial^2 K}{\partial Z^2} + \frac{\partial K}{\partial Z} = \frac{\partial K}{\partial T} \tag{3}$$

1.3 初始和边界条件

采用前期均匀型降雨雨强 q_A 入渗地表形成的稳定渗流场作为初始条件,由无量纲值表示为

$$K(Z, 0) = Q_A - (Q_A - e^{\beta h_0}) e^{-Z} \tag{4}$$

其中

$$Q_A = q_A / k_s$$

降雨入渗的任意时刻,地地下水位处 $Z=0$ 基质吸力 h_0 保持不变,则有:

$$K(0, T) = e^{\beta h_0} \tag{5}$$

后期降雨过程,地表处 $Z=L$ 入渗流量为后峰型降雨雨强 $q_B = q_0 + at$,则有:

$$\left(\frac{\partial K}{\partial Z} + K \right)_{Z=L} = Q_B \tag{6}$$

其中

$$Q_B = \frac{q_0 + at}{k_s} = Q_0 + AT$$

$$A = \frac{(\theta_s - \theta_r) a}{\beta k_s}$$

1.4 解析解推导

结合式(4)~(6)所示的初始条件和边界条件,利用拉普拉斯正、逆变换对非饱和渗流控制方程(3)进行求解。

1.4.1 拉普拉斯正变换

令 $\bar{K} = \int_0^{+\infty} K e^{-sT} dT$, s 为常数,将式(3)乘以 e^{-sT}

并积分,得到拉普拉斯正变换后的控制方程以及相应初始条件和边界条件:

$$\frac{\partial^2 \bar{K}}{\partial Z^2} + \frac{\partial \bar{K}}{\partial Z} = s\bar{K} - K(Z, 0) \tag{7}$$

$$\bar{K}(Z, 0) = \frac{K(Z, 0)}{s} \tag{8}$$

$$\bar{K}(0, T) = \frac{e^{\beta h_0}}{s} \tag{9}$$

$$\left(\frac{\partial \bar{K}}{\partial Z} + \bar{K}\right)_{Z=L} = \frac{1}{s} \left(\frac{A}{s} + Q_0\right) \tag{10}$$

1.4.2 求解非齐次线性微分方程

结合初始条件(8)和边界条件(9)(10),由非齐次线性微分方程(7)可得:

$$\bar{K} = \frac{K(Z, 0)}{s} + e^{\frac{1}{2}(L-Z)} [Ag(s) + (Q_0 - Q_A)f(s)] \tag{11}$$

其中

$$g(s) = \frac{1}{s^2} \frac{\sinh\left[\left(\frac{1}{4}+s\right)^{\frac{1}{2}}Z\right]}{\frac{1}{2}\sinh\left[\left(\frac{1}{4}+s\right)^{\frac{1}{2}}L\right] + \left(\frac{1}{4}+s\right)^{\frac{1}{2}}\cosh\left[\left(\frac{1}{4}+s\right)^{\frac{1}{2}}L\right]}$$

$$f(s) = \frac{1}{s} \frac{\sinh\left[\left(\frac{1}{4}+s\right)^{\frac{1}{2}}Z\right]}{\frac{1}{2}\sinh\left[\left(\frac{1}{4}+s\right)^{\frac{1}{2}}L\right] + \left(\frac{1}{4}+s\right)^{\frac{1}{2}}\cosh\left[\left(\frac{1}{4}+s\right)^{\frac{1}{2}}L\right]}$$

1.4.3 拉普拉斯逆变换

利用留数定理对式(11)进行拉普拉斯逆变换消除参数 s , 得到后峰型降雨入渗过程瞬态非饱和渗透系数解析解:

$$K = K(Z, 0) + e^{0.5(L-Z)} [AG(T) + (Q_0 - Q_A)F(T)] \tag{12}$$

其中

$$G(T) = 2e^{-0.5L}Z\cosh(0.5Z) + \sinh(0.5Z) [2Te^{-0.5L} - 4e^{-L}\cosh(0.5L) - 2Le^{-0.5L}] + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{16 \cos^2(\lambda_n L) \sin(\lambda_n Z) \sin(\lambda_n L) e^{(-\lambda_n^2 - 0.25)T}}{1 + 0.5L + 2\lambda_n^2 L}$$

$$F(T) = e^{0.5(Z-L)} - e^{-0.5(Z+L)} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{-4\sin(\lambda_n Z) \sin(\lambda_n L) e^{(-\lambda_n^2 - 0.25)T}}{1 + 0.5L + 2\lambda_n^2 L}$$

式中 λ_n 为特征方程 $\tan(\lambda_n L) + 2\lambda_n = 0$ 的正根, 可采用 MATLAB 程序求解。

1.4.4 基质吸力解析解

将式(12)中无量纲变量还原, 代入 Gardner^[10]提出的非饱和土体渗透系数函数 $k = k_s e^{\beta h_m}$, 获得以压力形式表示的基质吸力解析解:

$$(u_a - u_w)_z = -\frac{1000}{\alpha} \ln \left[\frac{q_A - \left[q_A - k_s e^{\frac{\alpha(u_a - u_w)_0}{1000}} \right]}{k_s} \right] e^{\frac{\alpha \gamma_w z}{100}}$$

$$e^{\frac{\alpha \gamma_w}{200}(l-z)} \left[\frac{a}{k_s} G'(t) + \frac{(q_0 - q_A)}{k_s} F'(t) \right] \tag{13}$$

其中

$$F'(t) = e^{\frac{\alpha \gamma_w}{200}(l-z)} - e^{\frac{\alpha \gamma_w}{200}(l+z)} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{-4\sin\left(\frac{\alpha \gamma_w \lambda_n z}{100}\right) \sin\left(\frac{\alpha \gamma_w \lambda_n l}{100}\right) e^{(-\lambda_n^2 - \frac{1}{4}) \frac{\alpha \gamma_w k_s t}{100(\theta_s - \theta_r)}}}{1 + \frac{\alpha \gamma_w l}{200} + \frac{2\alpha \gamma_w \lambda_n^2 l}{100}}$$

$$G'(t) = 2e^{-\frac{\alpha \gamma_w l}{200}} \frac{\alpha \gamma_w z}{100} \cosh\left(\frac{\alpha \gamma_w z}{200}\right) + \sinh\left(\frac{\alpha \gamma_w z}{200}\right) \left[2Te^{-\frac{\alpha \gamma_w l}{200}} - 4e^{-\frac{\alpha \gamma_w l}{100}} \cosh\left(\frac{\alpha \gamma_w l}{200}\right) - \frac{\alpha \gamma_w l}{50} e^{-\frac{\alpha \gamma_w l}{200}} \right] + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{16 \cos^2\left(\frac{\alpha \gamma_w \lambda_n l}{100}\right) \sin\left(\frac{\alpha \gamma_w \lambda_n z}{100}\right) \sin\left(\frac{\alpha \gamma_w \lambda_n l}{100}\right) e^{(-\lambda_n^2 - \frac{1}{4}) \frac{\alpha \gamma_w k_s t}{100(\theta_s - \theta_r)}}}{1 + \frac{\alpha \gamma_w l}{200} + \frac{\alpha \gamma_w \lambda_n^2 l}{50}}$$

式中: u_a 为孔隙气压, kPa; u_w 为孔隙水压力, kPa; α 为压力形式表示的去饱和系数, 表达式为 $100\beta/\gamma_w$, kPa⁻¹; γ_w 为水的容重, 10 kN/m³。

1.5 解析解验证

某均质地基地表相对地下水位距离 $l = 5$ m, 土体相关参数如下: 饱和渗透系数 $k_s = 0.36$ cm/h、去饱和系数 $\alpha = 0.0165$ kPa⁻¹、进气值 $(u_a - u_w)_a = 26.32$ kPa、储水量 $\theta_s - \theta_r = 0.27$ cm³/cm³、残余含水量 $\theta_r = 0.20$ cm³/cm³、容重 $\gamma = 20$ kN/m³、有效黏聚力 $c' = 18$ kPa、有效内摩擦角 $\varphi' = 16^\circ$ 。该地基遭遇降雨历时 12 h、总降雨量为 48 mm 的后峰型降雨, 起始雨强 q_0 为 0.1 cm/h, 雨强变化系数 a 为 0.05 cm/h²。在这场后峰型降雨之前, 该地基所在区域长时间没发生降雨, 因而前期雨强 q_A 可取为 0 cm/h。

分别利用有限元软件 Geo-Studio 的渗流分析模块 SEEP/W 和式(13)所示基质吸力解析解, 研究后峰型降雨入渗过程该地基基质吸力演化过程, 如图 2 所示。

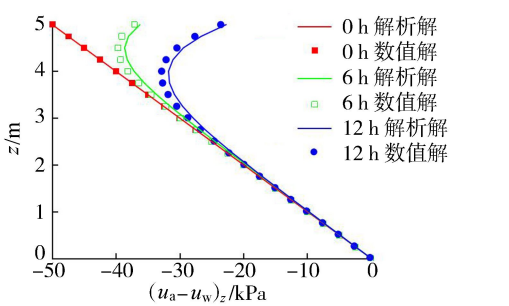


图 2 地基基质吸力解析解和有限元数值解

由图 2 可知, 降雨过程中地基基质吸力沿深度分布迅速由初始的线性分布变为非线性分布; 地基中上部基质吸力大小随时间推移不断减小, 其减小幅度及影响区域深度不断增加。同时可以发现 2 种

方法求解的雨水入渗过程地基基质吸力大小和变化规律几乎一致,表明推求的后峰型降雨过程地基基质吸力解析解是正确的。

2 地基极限承载力解析解

非饱和土抗剪强度理论中,常将基质吸力产生的吸附强度 c_s 视为一种特殊黏聚力:

$$c_s = (u_a - u_w)_a (1 - S_e) \tan \varphi' + (u_a - u_w)_z S_e \tan \varphi' \quad (14)$$

其中 $S_e = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r)$

式中 S_e 为有效饱和度。

在计算非饱和地基极限承载力时,以 c_s 考虑基质吸力对非饱和地基承载性能的影响^[1-2]。

a. 当地基基质吸力沿深度均匀分布时,宽为 b 、埋深为 d 的基础极限承载力 p_u 的计算公式为

$$p_u = \frac{1}{2} \gamma_1 b N_\gamma \xi_\gamma + \gamma_2 d N_q \xi_q + (c' + c_s) N_c \xi_c \quad (15)$$

式中: γ_1 为基底以下土体容重, kN/m^3 ; γ_2 为基底以上土体容重, kN/m^3 ; N_γ 、 N_q 、 N_c 分别为容重、荷载、黏聚力对应的承载力系数; ξ_γ 、 ξ_q 、 ξ_c 分别为容重、荷载、黏聚力对应的形状系数,其求解可参照文献[11]。

b. 当基质吸力沿深度非线性分布时,参照文献[4,6]的做法,将基底中心下 $1.5b$ 范围内应力球平均基质吸力产生的吸附强度 c_s 用于计算地基极限承载力。平均基质吸力确定方法如下:先以基础中心线与地下水位线交点为坐标原点, z 轴铅直向上、 x 轴水平向右,建立如图3所示的坐标系;然后在基底以下 $1.5b$ 范围内画应力球,该应力球范围内基质吸力分布曲线与坐标轴 z 围成图形形心 o 处的基质吸力值即为该应力球平均基质吸力。图3中所示阴影部分形心 o 的纵坐标 z_o 为

$$z_o = \frac{1}{A} \int_{l-d-1.5b}^{l-d} z (u_a - u_w)_z dz \quad (16)$$

式中 A 为阴影部分面积。

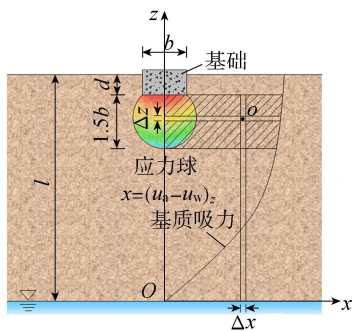


图3 地基平均基质吸力计算示意图

为考虑后峰型降雨入渗过程地基非线性分布基质吸力对地基极限承载力的影响,将式(16)代入

式(13)得到相应降雨时刻的平均基质吸力 $(u_a - u_w)_{zo}$,根据式(14)计算平均基质吸力对应的吸附强度,进而得到降雨过程非饱和地基瞬态极限承载力 p_u 的计算公式:

$$p_u = \frac{1}{2} \gamma_1 b N_\gamma \xi_\gamma + \gamma_2 d N_q \xi_q + \{c' + (u_a - u_w)_a [1 - e^{-\alpha(u_a - u_w)_{zo}}] \tan \varphi' + (u_a - u_w)_{zo} e^{-\alpha(u_a - u_w)_{zo}} \tan \varphi'\} N_c \xi_c \quad (17)$$

联立式(13)(16)(17),可以建立后峰型降雨入渗作用下地基瞬态极限承载力和起始雨强 q_0 、雨强变化系数 a 以及降雨历时 t 之间的直接映射关系。此外,根据雨强变化系数 a 取值,建立的地基瞬态极限承载力解析解还适用于均匀型、前峰型降雨入渗情况。具体如下:当雨强变化系数 a 等于零时,入渗雨水转变为均匀型降雨,式(13)退化为文献[3]中均匀型雨水入渗作用下地基基质吸力解析解;当雨强变化系数 a 小于零时,为前峰型降雨,降雨强度随时间增加而减小,式(13)可用于计算前峰型雨水入渗下地基基质吸力。

3 参数影响分析

以第1.5节采用的非饱和地基为研究对象,计算示意图如图3所示。基础宽 $b=1\text{ m}$ 、长 $f=10\text{ m}$ 、埋深 $d=0\text{ m}$,基底完全粗糙。前期降雨强度 q_A 为 0 cm/h ,初始时刻基质吸力沿地基深度线性分布。后期遭遇后峰型降雨,雨水直接以雨强值 $q_B=q_0+at$ 入渗地基表面,地下水位保持不变。

针对不同起始雨强 q_0 和雨强变化系数 a 的后峰型降雨,利用式(17)所示极限承载力解析解研究后峰型降雨入渗作用下地基极限承载力演化规律,探究起始雨强 q_0 和雨强变化系数 a 对地基极限承载力的影响。

3.1 起始雨强 q_0 的影响

降雨历时 $t=24\text{ h}$,雨强变化系数 $a=0.02\text{ cm/h}^2$ 保持不变,分别取起始雨强 $q_0=0.12\text{ cm/h}$ 、 0.24 cm/h 、 0.36 cm/h 、 0.48 cm/h 来研究起始雨强 q_0 对地基极限承载力的影响,结果如图4所示。

从图4(a)可以看出:降雨前地基极限承载力为 414.6 kPa ;经历4种不同起始雨强的后峰型降雨历时 24 h 入渗后,地基极限承载力分别降低为 380.6 kPa 、 368.8 kPa 、 357.1 kPa 和 346.3 kPa ,地基极限承载力随着雨水入渗以先慢后快的规律降低。这是因为后峰型降雨的初期入渗雨量小,基质吸力减小较慢,地基极限承载力缓慢降低;降雨中后期,入渗雨量逐渐增大,基质吸力快速减小,地基极限承载力加速降低。由图4(b)可知:地基极限承载力随

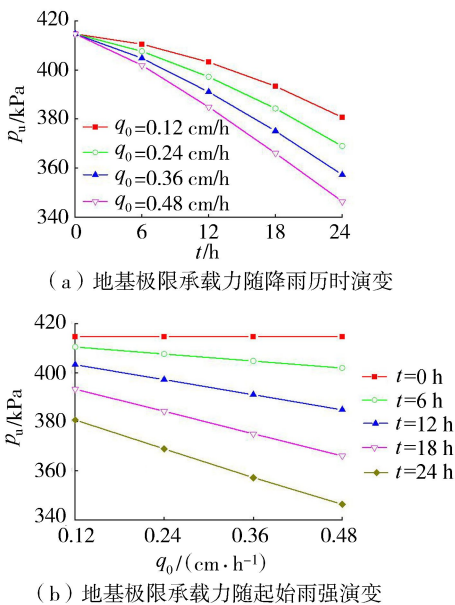


图4 起始雨强对地基极限承载力的影响

随着起始雨强 q_0 增加迅速降低,承载力降幅随降雨历时增加而变大。这是因为起始雨强 q_0 越大,初期入渗雨量大,基质吸力减小越快,导致地基极限承载力在降雨初期迅速降低。

3.2 雨强变化系数的影响

降雨历时 24 h,起始雨强 $q_0 = 0.24$ cm/h 保持不变,分别取雨强变化系数 $a = 0$ cm/h²、0.01 cm/h²、0.02 cm/h²、0.03 cm/h² 来研究雨强变化系数 a 对地基极限承载力的影响,结果如图 5 所示。

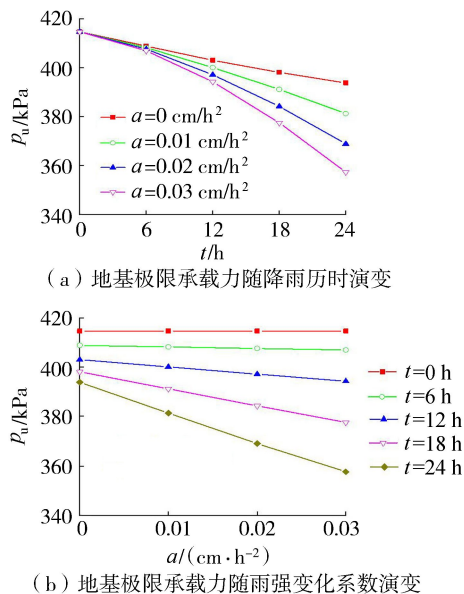


图5 雨强变化系数对地基极限承载力的影响

从图 5(a) 可以看出:经历 4 种不同雨强变化系数的后峰型降雨历时 24 h 入渗后,地基极限承载力由 414.6 kPa 分别降低为 393.7 kPa、381.3 kPa、368.8 kPa 和 357.4 kPa;雨强变化系数 a 越大,地基极限承载力降低越快,当雨强变化系数 $a = 0$ 时,降

雨退化为均匀型,此时地基极限承载力降低最慢,随降雨历时呈现近似线性减小特点。这是因为雨强变化系数 a 越大,降雨强度增加越快,进入地基的雨水越多,地基中上部基质吸力减小越大,地基极限承载力降低越快。由图 5(b) 可知:降雨初期,入渗雨强变化不大,地基极限承载力降幅受雨强变化系数 a 影响不大;随着时间推移,雨强变化系数 a 较大的后峰型降雨,雨强值大幅增加,入渗地基的雨水增多,地基极限承载力迅速降低。

4 结 论

a. 遭遇后峰型降雨入渗时,地基极限承载力随降雨历时增加而逐渐降低,降低速率呈现先慢后快的非线性特点,不同于遭遇均匀型降雨时地基极限承载力近线性减小的特点。

b. 地基极限承载力受起始雨强和雨强变化系数影响较大;雨强变化系数一定时,起始雨强越大,地基极限承载力降低越快;起始雨强一定时,雨强变化系数越大,地基极限承载力降低越快。

参考文献:

- [1] VANAPALLI S K, MOHAMED F M O. Bearing capacity of model footings in unsaturated soils [J]. Springer Proceedings in Physics, 2007, 112: 483-493.
- [2] 王海鹏,徐杨,唐彤芝,等. 超软地基排水板弯折特性与抗弯折结构[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022, 50(6): 130-137. (WANG Haipeng, XU Yang, TANG Tongzhi, et al. Bending characteristics and anti-bending structure of drainage plate in super soft foundation [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(6): 130-137. (in Chinese))
- [3] 秦卫星,胡惠仁,廖紫欣,等. 基于 BP-Olden 方法的均质地基基质吸力影响因素显著性分析[J]. 安全与环境学报, 2022, 22(1): 103-108. (QIN Weixing, HU Huiren, LIAO Zixin, et al. Significant analysis of influence factors on matric suction of homogeneous foundation based on the BP-Olden method [J]. Journal of Safety and Environment, 2022, 22(1): 103-108. (in Chinese))
- [4] 张常光,晏青,周菲,等. 不同吸力分布下条形地基极限承载力解答[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(5): 1237-1251. (ZHANG Changguang, YAN Qing, ZHOU Fei, et al. Formulas of ultimate bearing capacity for strip foundation on unsaturated soils with different suction distributions [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(5): 1237-1251. (in Chinese))
- [5] 赵炼恒,李亮,杨峰,等. 基于 SQP 和上限法的非饱

- 和土条形基础极限承载力计算[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28 (增刊 1): 3021-3028. (ZHAO Lianheng, LI Liang, YANG Feng, et al. Ultimate bearing capacity calculation of strip foundation on unsaturated soil with upper bound theorem and SQP method. [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28 (Sup1): 3021-3028. (in Chinese))
- [6] VAHEDIFARD F, ROBINSON J D. Unified method for estimating the ultimate bearing capacity of shallow foundations in variably saturated soils under steady flow [J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2016, 142(4): 04015095.
- [7] 陈茜, 程大伟. 稳态流下非饱和土地基承载力模型[J]. 土木建筑与环境工程, 2018, 40(6): 9-14. (CHEN Xi, CHENG Dawei. Bearing capacity model for foundations of unsaturated soil under steady flow condition [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2018, 40(6): 9-14. (in Chinese))
- [8] SRIVASTAVA R, YEH T C J. Analytical solutions for one-dimensional, transient infiltration towards the water table in homogeneous and layered soils [J]. Water Resources Research, 1991, 27(5): 753-762.
- [9] ZHAN T L, JIA G W, CHEN Y M, et al. An analytical solution for rainfall infiltration into an unsaturated infinite slope and its application to slope stability analysis [J]. International Journal for Numerical & Analytical Methods in Geomechanics, 2013, 37(12): 1737-1760.
- [10] GARDNER W R. Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table [J]. Soil Science, 1958, 85(4): 228-232.
- [11] VESIC A B. Analysis of ultimate loads of shallow foundations [J]. Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, 1973, 99(1): 45-73.
- [12] 张秀勇, 王海龙, 李杰. 碎石桩复合地基在大丽高速公路软土地基处理中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(5): 455-459. (ZHANG Xiuyong, WANG Hailong, LI Jie. Application of gravel pile composite foundation in improving soft subgrade of Da-Li Highway [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(5): 455-459. (in Chinese))

(收稿日期: 2022-05-24 编辑: 刘晓艳)

(上接第 15 页)

- [10] YUAN Saiyu, TANG Hongwu, LI Kun, et al. Hydrodynamics, sediment transport and morphological features at the confluence between the Yangtze River and the Poyang Lake [J]. Water Resources Research, 2021, 57(3): e2020WR028284.
- [11] YUAN Saiyu, TANG Hongwu, XIAO Yang, et al. Water flow and sediment transport at open-channel confluences: an experimental study [J]. Journal of Hydraulic Research, 2018, 56(3): 333-350.
- [12] 曾诚, 陈辰, 周舟, 等. 明渠交汇流分离区形态及二次流强度分析 [J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(2): 50-55. (ZENG Cheng, CHEN Chen, ZHOU Zhou, et al. Analysis on separation zone shape and secondary current intensity in open-channel combining flows [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(2): 50-55. (in Chinese))
- [13] 张强, 王平义, 刘倩颖. 山区河流干支流交汇形式的重新划分 [J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2010, 29(3): 458-460. (ZHANG Qiang, WANG Pingyi, LIU Qianying. Re-division of confluence patterns of main stream and tributaries of rivers at mountainous area [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2010, 29(3): 458-460. (in Chinese))
- [14] ROBERTS M V T. Flow dynamics at open channel confluent-meander bends [D]. Leeds: University of Leeds, 2004.
- [15] 张为, 刘林, 袁晶. 长江上游干支流交汇河段水流数学模型研究及应用 [J]. 科学技术与工程, 2010, 10(34): 8466-8470. (ZHANG Wei, LIU Lin, YUAN Jing. 2-D flow mathematical model and its application for the typical reach at the confluence of main stream and tributary in upstream Yangtze River [J]. Science Technology and Engineering, 2010, 10(34): 8466-8470. (in Chinese))
- [16] 付中敏. 山区河流弯曲干流型汇合口水沙运动试验及数值模拟研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2012.
- [17] SUI Bin, HUANG Shehua. Numerical analysis of flow separation zone in a confluent meander bend channel [J]. Journal of Hydrodynamics, 2017, 29(4): 716-723.
- [18] 高艳, 黄社华, 李琼. 弯道干流与支流交汇口垂线流速分布的试验研究 [J]. 水电能源科学, 2012, 30(7): 90-93. (GAO Yan, HUANG Shehua, LI Qiong. Experimental research on velocity distribution along depth at junction of bend stream with branch afflux [J]. Water Resources and Power, 2012, 30(7): 90-93. (in Chinese))
- [19] SHUKRY A. Flow around bends in an open flume [J]. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1950, 115(1): 751-778.
- [20] 隋斌. 明渠弯道交汇水流水力特性的大涡模拟与实验研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2017.

(收稿日期: 2022-05-31 编辑: 俞云利)