

DOI:10.11918/202401053

非稳定渗流作用下非饱和土朗肯土压力分析

郭 顶,张明宇,刘 艳,吴永权

(城市地下工程国家重点实验室(北京交通大学),北京 100044)

摘要:含水量变化会引起土体力学特性的改变,现有的工程中所采用的土压力计算理论仍然以饱和土理论为主,为研究渗流影响下非饱和土土压力变化,基于动态土水特征曲线,考虑非稳定渗流,对渗流过程中的 Richards 方程进行求解,得到了考虑动态土水特征曲线情况下吸力的理论解,并对吸力分布规律进行分析。基于动态效应下吸力的理论解,推导了渗流影响下非饱和土朗肯土压力方程,基于所得的土压力方程分析了动态效应对非饱和土压力分布的影响;将所得土压力理论解用于分析基坑支护结构,利用数值软件模拟不同的降雨强度入渗过程中支护结构土压力的变化;基于非饱和土理论计算了基坑支护结构的安全系数。结果表明:动态效应下主动土压力增加,被动土压力减小,吸力越大,土压力差别越明显;降雨入渗条件下,动态效应支护结构受到的主动土压力会明显小于静态效应,且入渗速率越大,土压力差值越明显;非饱和土理论计算的安全系数高于饱和土。考虑动态效应影响后安全系数有所下降,说明降雨入渗将增加基坑失稳的风险。

关键词:非饱和土;土水特征曲线;动态效应;朗肯土压力;渗流

中图分类号: TU432

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2025)11-0045-08

Unsaturated Rankine soil pressure analysis under unsteady seepage

GUO Ding, ZHANG Mingyu, LIU Yan, WU Yongquan

(Key Laboratory of Urban Underground Engineering of Ministry of Education(Beijing Jiaotong University), Beijing 100044, China)

Abstract: Changes in water content alter soil mechanical properties. Current engineering theories for earth pressure calculation mainly use saturated soil theory. This study investigates unsaturated soil pressure under seepage effects with dynamic soil-water characteristic curves. Unsteady seepage is considered. The Richards equation during seepage process is solved. A theoretical solution for suction considering dynamic soil-water characteristic curves is obtained. Suction distribution patterns are analyzed. Using the suction solution with dynamic effects, the Rankine earth pressure equation for unsaturated soil under seepage is derived. The equation helps analyze dynamic effects on unsaturated soil pressure distribution. The theoretical earth pressure solution is applied to foundation pit support structures. Numerical software simulates earth pressure changes on support structures during rainfall infiltration with different intensities. Safety factors of support structures are calculated using unsaturated soil theory. Results show: Dynamic effects increase active earth pressure and decrease passive earth pressure. Larger suction leads to more significant differences. Under rainfall infiltration, dynamic effects make active earth pressure on support structures smaller than static effects. Faster infiltration rates cause greater pressure differences. Safety factors calculated by unsaturated soil theory exceed those by saturated soil theory. Considering dynamic effects reduces safety factors, indicating rainfall infiltration increases foundation pit instability risks.

Keywords: unsaturated soil; soil-water characteristic curve; dynamic effect; Rankine earth pressure; seepage

实际工程中存在大量非饱和土相关问题,尤其在土体发生入渗、蒸发、水位升降时,位于表层处于非饱和状态的土体其含水状态将不断变化,导致土体变形和强度特性发生变化,对工程结构的安全性带来影响。比如降雨或水管破裂导致的基坑失稳的问题时有发生^[1],分析这些问题就有必要考虑渗流和含水状态的变化对土压力的影响。

很多学者对非饱和土的土压力问题进行研究,为了考虑基质吸力的影响,文献[2]基于 Bishop 有效应力给出了非饱和土郎肯土压力的解析解表达式,文献[3]基于净应力和基质吸力双应力变量推导得到了广义郎肯土压力解析解表达式。由于土的含水状态会受降雨蒸发等环境因素影响而发生改变,因此有必要考虑渗流影响下土压力的变化,文

收稿日期: 2024-01-18;录用日期: 2024-02-23;网络首发日期: 2025-02-18

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20250218.1138.006>

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(2023JBM046);国家自然科学基金(52278325)

作者简介: 郭 顶(2000—),男,硕士研究生;刘 艳(1983—),女,副教授

通信作者: 刘 艳, yanl@bjtu.edu.cn

献[4]得到降雨条件下的主动土压力和被动土压力方程。文献[5-6]根据非饱和土稳定流,得到基质吸力的分布,得到降雨情况下的土压力方程。文献[7]为了评估强降水对土结构的影响,研究了非稳定流作用下非饱和土中的土压力分布。文献[8]建立了非饱和静态渗流和瞬态渗流条件下三维主动土压力系数的计算框架,得到垂直非饱和稳定渗流条件下的土体强度。

分析渗流对土压力影响时,土水特征曲线是必不可少的,它表征了吸力与含水率的关系。目前大多渗流模型中采用的土水特征曲线都是平衡条件下得到的。大量试验已经证实^[9-12],土水特征曲线存在动态效应,与平衡态土水特征曲线相比,相同饱和度时,动态土水特征曲线的吸力在脱湿过程中要更大,而吸湿过程中则更低^[13]。说明非平衡渗流过程中的土水特征曲线具有明显的动态效应,即不同的渗流速度下得到的土水特征曲线并不重合。流速或含水量的变化率对土水特征曲线会产生影响。目前已经建立了动态毛细压力的本构关系^[14],引入动态毛细压力系数来表明土水特征曲线的动态效应,得到动态毛细压力和静态毛细压力之间的关系。

实际工程中降雨的大小,蒸发的快慢,水位升降的速度等都会改变土水特征曲线分布,进而导致非饱和土渗流过程中吸力分布发生改变。本文将考虑土水特征曲线的动态效应,推导相应的吸力分布和土压力方程。并对得到的非饱和土压力公式进行工程应用,以北京地铁 13 号线东直门车站的基坑支护结构为例,用软件模拟降雨入渗过程,探讨考虑土水特征曲线的这种动态效应对实际问题的影响。

1 动态效应下非饱和土的渗流方程

吸力水头与含水率的关系可由土水特征曲线表征。文献[13]基于熵增不等式推导得到了毛细压力随饱和度的变化为

$$P_{\text{dyn}} - P_{\text{stat}} = -\tau \frac{\partial S}{\partial t} \quad (1)$$

式中: S 为饱和度; t 为时间; P_{stat} 为平衡时的毛细压力; P_{dyn} 为动态毛细压力,等于流体的压力差,即 $P_{\text{dyn}} = u_a - u_w$,其中 u_a 和 u_w 分别为气相和液相的平均压力; τ 为动态毛细系数,反映了孔隙水压力的动态效应,是饱和度变化速率的量度。不同学者提出了不同的确定方法,比如 Stauffer(1978)^[11]根据土壤的性质、粒度分布、孔隙度和渗透率等得出了经验公式,但涉及较多参数。此外也有学者根据实验结果反演出 τ 的取值,根据实验结果发现该参数可以表示为饱和度的函数^[15]、有线性方程^[16]、指数方

程^[17]等。从实验结果来看,参数 τ 随饱和度变化率波动较大,本文主要讨论动态效应对土压力的影响,因此简化考虑参数 τ 随饱和度的变化,假设其不随饱和度变化。

式(1)就是描述率相关土水特征曲线的方程,右边第 2 项的存在说明此时实际的毛细力与饱和度的变化历史有关,只有在平衡条件下,饱和度不随时间变化,右边第 2 项等于 0,式(1)退化为传统的土水特征曲线方程。根据式(1),当考虑到动态效应时,可以得到吸力水头 h 为

$$h - h_m = -\frac{\tau}{\gamma_w} \frac{\partial S}{\partial t} \quad (2)$$

式中: h 为实际水头, h_m 为静态平衡条件下的吸力水头, γ_w 为水的重度。

非饱和土均匀土体的一维垂直入渗可以用一维 Richards 方程来描述,即

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[k(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (3)$$

式中: $k(h)$ 为表示随水头变化的渗透系数, z 为土体的深度, θ 为土体的含水率。

采用 Gardner^[15]提出的非饱和土的渗透系数方程和土水特征曲线方程有

$$k(h) = k_s e^{\beta h} \quad (4)$$

$$\theta(h) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) e^{\beta h} \quad (5)$$

式中: k_s 为饱和土的渗透系数; $\theta(h)$ 为随吸力水头变化的含水率; θ_r 为残余含水率; θ_s 为饱和含水率; β 为土壤孔隙大小分布参数,表示随着土体吸力的增加,渗透性和含水量随吸力水头变化的过程,相对粗颗粒的土(如砂土) β 值较大,而相对细颗粒的土(如黏土、粉土) β 值较小。

本文忽略土水特征曲线的滞后效应,只考虑入渗的情况,将式(4)、(5)代入式(3),即可获得线性化的 Richards 方程:

$$\frac{\partial^2 k}{\partial z^2} + \beta \frac{\partial k}{\partial z} = \frac{\beta(\theta_s - \theta_r)}{k_s} \frac{\partial k}{\partial t} \quad (6)$$

考虑均匀土壤向地下水位方向的一维垂直渗透。 z 为到地下水位的深度,因此在地下水位处 $z = 0$,地表处 $z = L$ 。方程求解需要给出边界条件,这里规定地下水位处压力水头 $h = 0$, q_a 为土壤表面的初始流量, q_b 大于土壤表面的规定流量。为方便起见,定义以下无量纲参数:

$$Z = \beta z \quad (7)$$

$$L = \beta l \quad (8)$$

$$K = \frac{k}{k_s} \quad (9)$$

$$Q_a = \frac{q_a}{k_s} \quad (10)$$

$$Q_b = \frac{q_b}{k_s} \quad (11)$$

$$T = \frac{\beta k_s t}{\theta_s - \theta_r} \quad (12)$$

通过引入无量纲参数对方程(6)进行变换得到

$$\frac{\partial^2 K}{\partial Z^2} + \frac{\partial K}{\partial Z} = \frac{\partial K}{\partial T} \quad (13)$$

假设土壤表面流量恒定,下边界为固定边界,初始条件和边界条件可以表示为

$$K(Z, 0) = Q_A - (Q_A - e^{-\beta h_0})e^{-Z} \quad (14)$$

$$K(0, T) = e^{-\beta h_0} \quad (15)$$

$$\left[\frac{\partial K}{\partial Z} + K \right]_{Z=L} = Q_B \quad (16)$$

对式(16)进行拉普拉斯变换有

$$\frac{\partial^2 \bar{K}}{\partial Z^2} + \frac{\partial \bar{K}}{\partial Z} - S\bar{K} + K_0 = 0 \quad (17)$$

相应的边界条件(14)、(15)变换为

$$\bar{K}(0) = \frac{e^{-\beta h_0}}{S} \quad (18)$$

$$\left[\frac{\partial \bar{K}}{\partial Z} + \bar{K} \right]_{Z=L} = \frac{Q_B}{S} \quad (19)$$

在此边界条件中,式(17)的通解为

$$\bar{K} = \frac{\bar{K}(Z)}{S} + Q_B e^{\frac{L-Z}{2}} F(S) \quad (20)$$

其中

$$F(S) = \frac{1}{S} \frac{\sinh \left[z \left(S + \frac{1}{4} \right)^{\frac{1}{2}} \right]}{\frac{1}{2} \sinh \left[L \left(S + \frac{1}{4} \right)^{\frac{1}{2}} \right] + \left(S + \frac{1}{4} \right)^{\frac{1}{2}} \cosh \left[L \left(S + \frac{1}{4} \right)^{\frac{1}{2}} \right]} \quad (21)$$

经变换得到渗透系数的解析解为

$$K = Q_b - (Q_b - e^{\beta h_0})e^{-z} - 4(Q_b - Q_A) \cdot e^{\frac{L-z}{2} - \frac{T}{4}} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(\lambda_n Z) \sin(\lambda_n L) e^{-\lambda_n^2 T}}{1 + \frac{L}{2} + 2\lambda_n^2 L} \quad (22)$$

式中 λ_n 为方程(23)第 n 次根

$$\tan(\lambda L) + 2\lambda = 0 \quad (23)$$

其中, L 是地下水位低于地面的无量纲深度,确定土体的渗透系数之后,再根据式(2)即可得到在动态效应下吸力水头随渗透系数的变化,得到吸力水头在动态效应下的方程:

$$h = \frac{\ln K}{\beta} - \frac{\tau}{\gamma_w} \frac{\partial S}{\partial t} \quad (24)$$

如果不考虑入渗过程中孔隙水压力的动态效应,即 $\tau = 0$ 时,式(24)退化为静态条件下的结果。

2 考虑动态效应的非饱和土朗肯土压力

基于考虑动态效应的渗流方程,可以推导考虑动态效应后非饱和土的朗肯土压力,得到考虑动态效应的非饱和土压力方程。推导过程中,非饱和土的有效应力将采用 Bishop 有效应力形式,即

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w) \quad (25)$$

式中: σ' 为粒间有效应力; σ 为总应力; u_a 为孔隙气压力; u_w 为孔隙水压力; $(u_a - u_w)$ 为基质吸力; χ 为有效应力参数, χ 与饱和度有关,可以假设为与土体的有效饱和度相同,取值为 $0 \sim 1$, 即

$$\chi = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (26)$$

其中: θ 为体积含水量; θ_r 为残余体积含水量; θ_s 为饱和和体积含水量。

2.1 主动土压力

当墙体在土体压力作用下,背离土体移动,就会产生主动土压力。根据莫尔-库伦强度准则,当土体到达主动极限平衡状态,可认为土体达到破坏状态。基于 Bishop 应力可得到非饱和土主动土压力方程为^[2]

$$\sigma_h - u_a = (\sigma_v - u_a) K_a - 2c' \sqrt{K_a} - \chi(u_a - u_w)(1 - K_a) \quad (27)$$

式中 K_a 为朗肯主动土压力系数,

$$K_a = \frac{\sigma'_3}{\sigma'_1} = \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi'}{2} \right) \quad (28)$$

根据式(24),可以计算此时水压为

$$u_w = \gamma_w h = \gamma_w \frac{\ln K}{\beta} + \tau \frac{\partial S}{\partial t} \quad (29)$$

将式(29)代入式(27)中,得到动态效应下非饱和土主动土压力 p_a 公式为

$$p_a = \sigma_h - u_a = (\sigma_v - u_a) K_a - 2c' \sqrt{K_a} - \chi \left(u_a - \gamma_w \frac{\ln K}{\beta} + \tau \frac{\partial S}{\partial t} \right) (1 - K_a) \quad (30)$$

2.2 被动土压力

被动土压力是指挡土墙在外力的作用下,向填土方向进行移动,并且向后挤压土体,致使土体向后发生位移,当挡土墙达到一定位移时,会使墙后土体达到极限平衡状态,此时的土压力就是被动土压力。基于 Bishop 应力可得到非饱和土被动土压力方程^[2]为

$$\sigma_h - u_a = (\sigma_v - u_a) K_p + 2c' \sqrt{K_p} + \chi(u_a - u_w)(K_p - 1) \quad (31)$$

式中朗肯被动土压力系数

$$K_p = \frac{\sigma'_1}{\sigma'_3} = \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi'}{2} \right) \quad (32)$$

类似地,将式(29)代入式(31)中,得到动态效应下非饱和土被动土压力 p_p 方程:

$$p_p = \sigma_h - u_a = (\sigma_v - u_a)K_p + 2c' \sqrt{K_p} + \chi \left(u_a - \gamma_w \frac{\ln K}{\beta} + \tau \frac{\partial S}{\partial t} \right) (K_p - 1) \quad (33)$$

3 数值分析

通过算例分析一下考虑动态效应后,非饱和土

朗肯土压力结果的变化情况。假设地下水位线位于地表下 100 cm 处,以地下水位线到地表处的均质非饱和土层为研究对象,取地下水位处的吸力水头为 0,同时规定土壤表面的初始流量为 0。假设所有情况下初始负孔隙水压力为静水压力,孔隙气压力 $u_a = 0$ 。当考虑非稳态情况下的吸力随深度的变化规律,通过饱和度随时间变化过程,得到饱和度随时间的变化率,给定动态毛细系数 $\tau = 100 \text{ Pa} \cdot \text{h}$ 。考虑两种不同的土体孔径分布指数,参考文献[2],选定土体相关参数(见表 1),计算 2、5、10 h 时的主动土压力和被动土压力随深度的变化。

表 1 土体的参数

Tab. 1 Soil parameters

土体编号	β/cm^{-1}	$q_b/(\text{cm} \cdot \text{h}^{-1})$	$k_s/(\text{cm} \cdot \text{h}^{-1})$	θ_r	θ_s	$\varphi/(\text{°})$	c/kPa	$\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$
1	0.075	0.4	2	0.078	0.43	30	2	18
2	0.050	0.2	1	0.034	0.46	25	2.5	17

根据的两种土体参数,利用式(4)、(5)可计算出其水力条件,如图 1 所示,分表展示了土体 1 和土

体 2 的渗透系数方程曲线(图 1(a))和土-水特征曲线(图 1(b))情况。

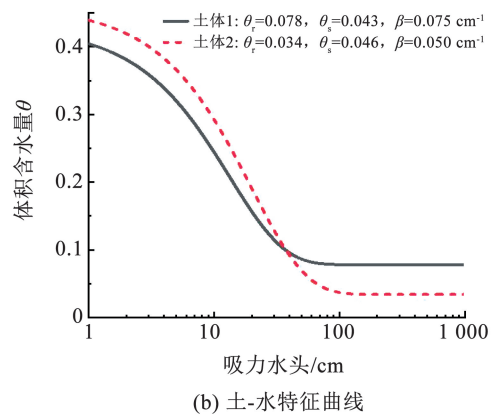
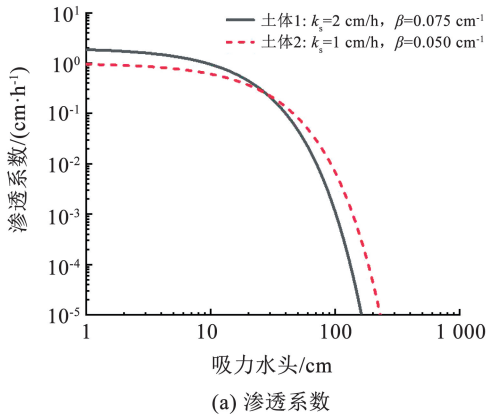


图 1 土体的水力条件

Fig. 1 Distribution of hydrological parameters of soil

利用式(30)、(33),可得到不同情况下主动土压力的结果,如图 2 所示。从图中可以看到埋深较大的部位,实现与虚线接近重合,说明较深处动态效应的影响几乎可以忽略,原因在于其靠近水位线,吸力影响也相对小。在深度较小的部位,土压力小于 0,出现拉应力区,与底部的压应力区相比,张应力区动态效应影响更加明显。比如图 2(a)中, $t = 2 \text{ h}$ 时考虑动态效应的土压力比静态情况下 $t = 10 \text{ h}$ 的土压力还要大。在 $\beta = 0.05 \text{ cm}^{-1}$ 时,土体上部张应力区深度要大于压应力区深度,而且在张应力区动态曲线与静态曲线的差别也更明显。随着入渗时间增加,在土体表层,动态效应下的土压力与静态效应下

的土压力差值也越大,而土压力的动态效应随深度的增加变得不明显。

图 3 给出了考虑动态效应后被动土压力的对比结果。动态情况下的被动土压力要小于静态情况下的被动土压力,在土体表层的两者的差值更明显,而在土体深部两者几乎观察不到差别。当 $\beta = 0.05 \text{ cm}^{-1}$ 时,在 2 h 和 5 h 时,静态情况下的土压力和动态情况下的土压力线几乎重合,这说明此时土压力的动态效应并不明显,但在 10 h 时能明显观察到动态土压力要更小,说明随着时间的增加,静态情况和动态情况下被动土压力的差值也会增加。

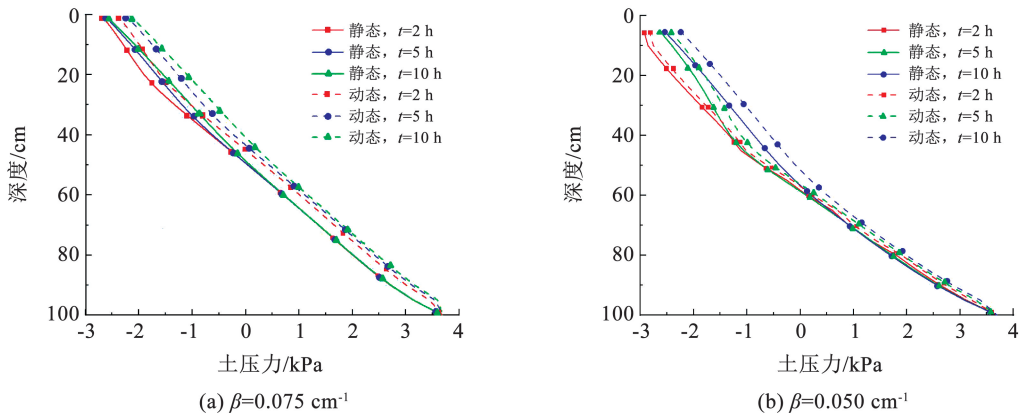


图 2 主动土压力对比

Fig. 2 Comparison of active earth pressure

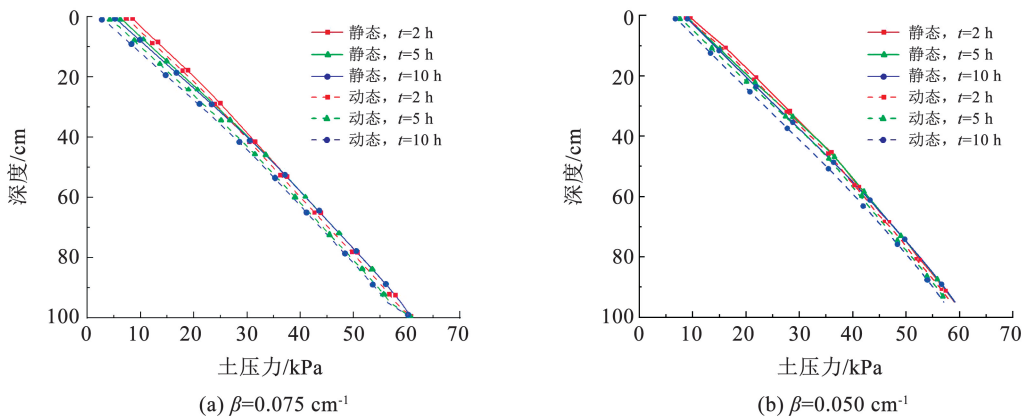


图 3 被动土压力对比

Fig. 3 Comparison of passive earth pressure

4 工程应用

利用本文得到的非饱和土土压力公式可用于实际工程分析。以北京地铁 13 号线东直门车站基坑支护工程为例,采用 ABAQUS 有限元软件模拟不同的降雨速率下,地铁东直门站基坑在降雨入渗过程中基坑支护结构的土压力。

车站相关资料来源于参考文献[3],车站基坑南北长为 160 m,东西宽为 76 m,深度为 16 m。由于基坑为左右对称结构,所以选择基坑的一半作为研究对象,支护结构右侧填土长为 25 m。支护结构左侧基坑长度为 25 cm。采用的基坑支护结构模型如图 4 所示。选取东直门车站南部的 70#护坡桩为研究对象,土的物理指标见表 2。

利用土水特征曲线拟合软件 RETC,根据 70#桩的土体物理力学指标,利用 VG 模型,拟合出 3 种土体的土水特征曲线,进行非饱和土的渗流分析,土体的拟合参数见表 3。

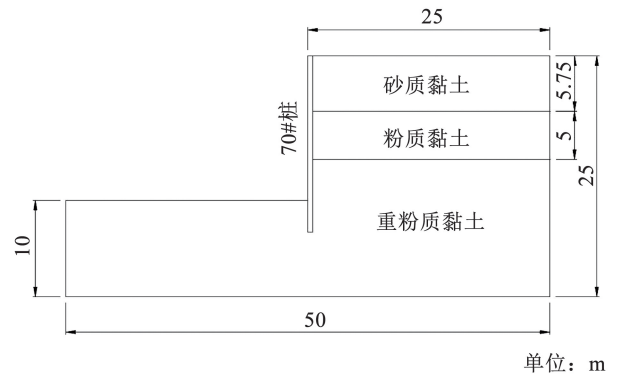


图 4 基坑结构断面

Fig. 4 Section of foundation pit structure

表 2 桩周围土体的力学指标

Tab. 2 Mechanical indexes of soil around pile

土层名称	厚度/ m	天然含水 率 $w/\%$	重度 $\gamma/$ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	黏聚力 c/kPa	内摩擦 角/ $(^\circ)$
砂质黏土	5.75	17	20.3	19	38
粉质黏土	5	26	19.8	14	23
重粉质黏土	10	29	19.6	47	8

表 3 土体的水力参数

Tab. 3 Hydromechanical parameters of soil

土层名称	饱和含水率 θ_s	残余含水率 θ_r	a	n	饱和渗透系数 $k_s / (\text{cm} \cdot \text{h}^{-1})$
砂质黏土	0.38	0.100	0.027	1.23	0.12
粉质黏土	0.36	0.070	0.005	1.09	0.02
重粉质黏土	0.38	0.068	0.008	1.09	0.20

模型底部设置为固定边界条件,约束水平位移和竖向位移,不约束转角。设置底部为不透水边界,模型左右两侧约束水平方向的位移,模型左右两侧设置为排水边界。假设地下水位位于基坑底部,基

坑底部以下土体为饱和土,土体表面和基坑底部设置为大气边界条件。分别考虑入渗强度为 0.010 m/h 和 0.005 m/h 时,初始情况下 12、24、36、48、72 h 降雨入渗情况。通过模拟可以得到在 0.010 m/h 和 0.005 m/h 两种流速时孔隙水压力随深度的分布规律如图 5 所示。入渗速率对孔压变化有明显影响,入渗速率快的土体孔压减小也要更快。

将不同速率下的孔隙水压力值,代入非饱和土主动土压力方程中,即可得到在静态和动态效应下的基坑支护结构的主动土压力分布。图 6 展示了计算 12、24、36 h 的主动土压力在静态情况和动态情况下的对比。

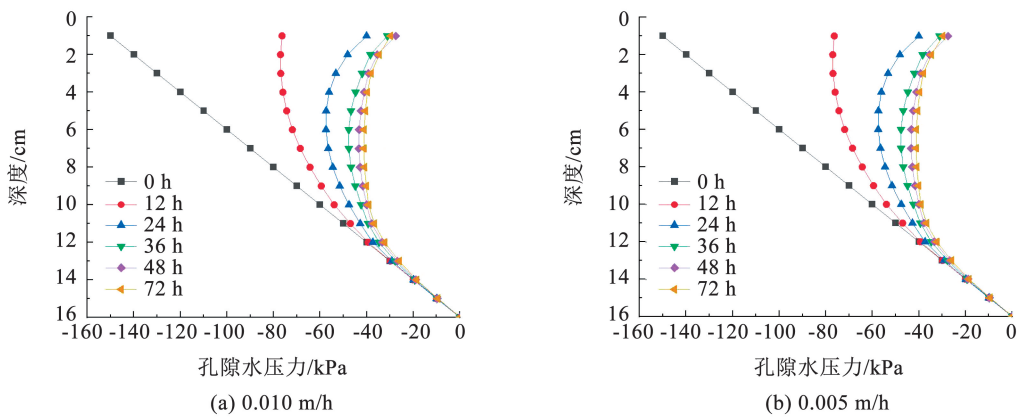


图 5 不同入渗速度孔隙水压力分布

Fig. 5 Pore water pressure under different infiltration rate

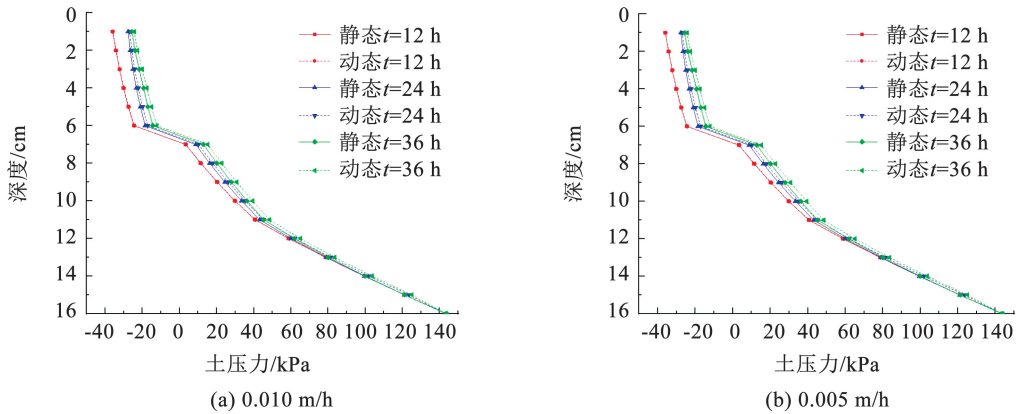


图 6 不同入渗速度下主动土压力随深度的分布对比

Fig. 6 Active earth pressure with depth for different infiltration rate

在入渗速率为 0.010 m/h 时(图 6(a)),在持续 12 h 时,基于静态方程得到土压力结果与基于动态方程得到的结果没有很大差别。随着入渗时长持续增加,能看到动态情况下的土压力要略大于静态情况下的土压力。而在降雨强度为 0.005 m/h 时,图 6(b)中的实线与虚线非常接近,36 h 时能看到静态情况下的土压力和动态情况下的土压力的差

别。入渗速率更大时,在相同时间下图 6(a)中的土压力要比图 6(b)中的更大,但静态曲线则没有差别。且入渗速率越大,动态情况和静态情况下土压力的差值也更加明显。此外从图 6 还可以看到土压力的动态效应在张拉区域(土压力小于 0)也更加明显,由于受压区动态与静态孔隙水压力的差别较小,所以在土体下部受压区动态情况和静态情况下的土

压力差值不明显。

为了便于看出动态效应的影响,选取不同深度处的土压力差值进行进一步对比,如图 7 所示。图 7 给出了持续时长为 36 h 时,不同深度处,考虑动态效应后土压力与静态土压力的差值。在入渗速率为 0.010 m/h 情况下 36 h 时动态和静态土压力差值最大为 5.35 kPa,入渗速率为 0.005 m/h 情况下 36 h 时动态和静态土压力差值最大为 2.05 kPa,由此说明降雨强度增加,土压力差距也越大,而基于静态方程计算无法反应上述差别。

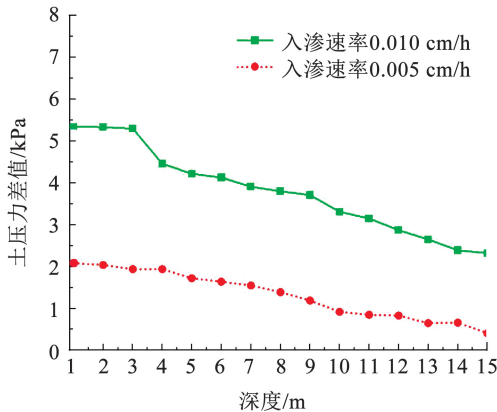


图 7 36 h 时不同入渗速度下土压力差值随深度变化

Fig.7 Variation of earth pressure difference with depth for different infiltration rate at 36 h

对基坑支护结构进行稳定性验算,根据现行的《建筑基坑支护技术规程》,悬臂式的基坑支护结构的嵌固深度(l_0)应符合嵌固稳定性的要求:

$$\frac{E_{pk} a_{pl}}{E_{ak} a_{al}} \geq K_e \quad (34)$$

式中: K_e 为嵌固稳定安全系数,安全等级为一级、二级、三级的悬臂式挡土结构, K_e 分别不应该小于 1.25、1.20、1.15; E_{ak} 、 E_{pk} 分别为基坑外侧主动土压力、基坑内侧被动土压力标准值,kN; a_{al} 、 a_{pl} 分别为基坑外侧主动土压力、基坑内侧被动土压力合力作用点至挡土构件底端的距离。

在降雨强度为 0.010、0.005 m/h 情况下,取初始时刻, $t=36$ h 和饱和朗肯土压力的稳定系数进行计算,计算结果见表 4、5。

表 4 0.010 m/h 速率时基坑支护结构的稳定系数

Tab.4 The stability coefficient of foundation pit supporting structure at 0.010 m/h

土体状态	$E_{pk} a_{pl}/(kN \cdot m)$	$E_{ak} a_{al}/(kN \cdot m)$	K_e
初始状态(0 h)	2 872.8	1 294.97	2.21
静态($t=36$ h)	2 872.8	1 828.98	1.57
动态($t=36$ h)	2 872.8	1 992.34	1.44
饱和土压力	2 872.8	2 177.39	1.31

表 5 0.005 m/h 速率时基坑支护结构的稳定系数

Tab.5 The stability coefficient of foundation pit supporting structure at 0.005 m/h

土体状态	$E_{pk} a_{pl}/(kN \cdot m)$	$E_{ak} a_{al}/(kN \cdot m)$	K_e
初始状态(0 h)	2 872.8	1 294.97	2.21
静态($t=36$ h)	2 872.8	1 670.89	1.72
动态($t=36$ h)	2 872.8	1 724.33	1.67
饱和土压力	2 872.8	2 177.39	1.31

不同时间下基坑支护结构的稳定系数,均大于规范要求的一级悬臂支挡结构的嵌固稳定安全系数 1.25。通过表中能看到,用非饱和土土压力方程计算的稳定系数要明显大于用饱和土的朗肯土压力计算结果。如果利用非饱和土理论进行计算,那么桩基的嵌固深度更小,嵌固深度只需要 5 m 即可满足设计要求。如果考虑到非饱和土的渗流过程,在静态和动态效应下,稳定系数也都大于用饱和土压力的计算结果。但由于动态效应的土压力大于静态效应的土压力,所以会使动态效应下的稳定系数小于静态效应下的稳定系数。通过两表进行对比,也能得到在降雨强度增大后,在同一时刻,基坑的稳定系数也会有明显下降。说明由于降雨强度增大会增加基坑的风险。

5 结 论

本文针对非稳定渗流条件下非饱和土的土压力问题展开研究,考虑了土水特征曲线动态效应对渗流的影响,推导得到了非稳定入渗条件下非饱和土的土压力方程,并应用于基坑稳定问题分析,主要结论如下:

1) 通过引入动态土水特征曲线方程,推导得到了非稳定入渗条件下非饱和土的朗肯土压力方程。考虑动态效应后,主动土压力有所增加,而被动土压力有所减小,吸力越大时,差别越明显。

2) 基于所得的非稳定渗流条件下的土压力解,对地铁 13 号线东直门车站的基坑支护结构进行分析。降雨入渗条件下,考虑动态效应后支护结构受到的主动土压力会明显小于静态条件下的主动土压力。且入渗速率越大,土压力差值越明显。

3) 基坑稳定验算结果显示,基于非饱和土土压力理论进行设计,基坑稳定系数会大于用饱和土的计算结果,但考虑动态效应后安全系数会有所下降,说明降雨入渗将增加基坑失稳的风险。

参 考 文 献

[1] 应宏伟, 聂文峰, 黄大中. 地下水位波动下基坑周围地基土的孔压响应半解析解[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(6): 1012

- YING Hongwei, NIE Wenfeng, HUANG Dazhong. Semi-analytical solution of pore pressure response around excavations to groundwater level fluctuation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(6): 1012
- [2] LU N, LIKOS W J. 非饱和土力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004: 280
LU N, LIKOS W J. Unsaturated soil mechanics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2004: 280
- [3] 姚攀峰, 张明, 戴荣, 等. 非饱和土的广义朗肯土压力[J]. 工程地质学报, 2004, 12(3): 285
YAO Panfeng, ZHANG Ming, DAI Rong, et al. Generic rankine theory for unsaturated soils[J]. Journal of Engineering geology, 2004, 12(3): 285
- [4] 赵均海, 梁文彪, 张常光, 等. 非饱和土库仑主动土压力统一解[J]. 岩土力学, 2013, 34(3): 609
ZHAO Junhai, LIANG Wenbiao, ZHANG Changguang, et al. Unified solution of coulomb's active earth pressure for unsaturated soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(3): 609. DOI: 10.16285/j. rsm. 2013. 03. 002
- [5] 王晓亮, 李光范, 杜娟, 等. 降雨和蒸发对非饱和土土压力的影响[J]. 应用力学学报, 2014, 31(3): 423
WANG Xiaoliang, LI Guangfan, DU Juan, et al. The influence of rainfall and evaporation on the unsaturated soil pressure[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2014, 31(3): 423. DOI:10.11776/cjam. 31. 03. D018
- [6] VAHEDIFARD F, LESHCHINSKY B A, MORTEZAEI K, et al. Active earth pressures for unsaturated retaining structures[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2015, 141(11): 4015048. DOI:10.1061/(asce)gt.1943-5606.000
- [7] SHAHROKHABADI S, VAHEDIFARD F, GHAZANFARIE, et al. Earth pressure profiles in unsaturated soils under transient flow[J]. Engineering Geology, 2019, 260: 105218. DOI:10.1016/j. enggeo. 2019. 105218
- [8] LI Z, YANG X. Three-dimensional active earth pressure for retaining structures in soils subjected to steady unsaturated seepage effects[J]. Acta Geotechnica, 2020, 15(7): 2017. DOI:10.1007/s11440-019-00870-2
- [9] TOPP G C, KLUTE A, PETERS D B. Comparison of water content-pressure head data obtained by equilibrium, steady-state, and unsteady-state methods I [J]. Soil Science Society of America Journal, 1967, 31(3): 312. DOI: 10.2136/sssaj1967.03615995003100
- [10] SMILES D E, VACHAUD G, VAUCLIN M. A test of the uniqueness of the soil moisture characteristic during transient, nonhysteretic flow of water in a rigid soil I [J]. Soil Science Society of America Journal, 1971, 35(4): 534. DOI:10.2136/sssaj1971.03615995003500
- [11] STAUFFER F. Time dependence of the relations between capillary pressure water content and conductivity during drainage of porous media[C]//IAHR Symposium on Scale Effects in Porous Media. Thessaloniki, Greece: [s. n.], 1978: 3
- [12] BOTTERO S, HASSANIZADEH S M, KLEINGELD P J, et al. Experimental study of dynamic capillary pressure effect in two-phase flow in porous media[C]//Proceedings of the XVI International Conference on Computational Methods in Water Resources (CMWR). Copenhagen, Denmark: [s. n.], 2005: 18
- [13] HASSANIZADEH S M, CELIA M A, DAHLE H K. Dynamic effect in the capillary pressure-saturation relationship and its impacts on unsaturated flow[J]. Vadose Zone Journal, 2002, 1(1): 38
- [14] DIAMANTOPOULOS E, DURNER W. Dynamic nonequilibrium of water flow in porous media: a review[J]. Vadose Zone Journal, 2012, 11(3): 1. DOI:10.2136/vzj2011.0197
- [15] GARDNER W R. Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evapotranspiration from a water table[J]. Soil Science, 1958, 85(4): 228
- [16] MILATZ M, TORZS T, NIKOOEE E, et al. Theoretical and experimental investigations on the role of transient effects in the water retention behaviour of unsaturated granular soils[J]. Geomechanics for Energy and the Environment, 2018, 15(1): 54. DOI:10.1016/j. gete. 2018. 02. 003
- [17] ZHUANG L, HASSANIZADEH S M, QIN C, et al. Experimental investigation of hysteretic dynamic capillarity effect in unsaturated flow[J]. Water Resources Research, 2017, 53(11): 9078. DOI: 10.1002/2017wr020895