

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20250125001

持续性强降雨条件下湿陷性黄土地区输电铁塔基础稳定性研究*

陈彬^{1,2}, 吴家乐¹, 贾燕峰³, 楚明月³, 李飏³, 杨松林³

(1. 湖北省输电线路工程技术研究中心(三峡大学), 湖北宜昌 443002; 2. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北宜昌 443002; 3. 国网河南省电力公司三门峡供电公司, 河南三门峡 472000)

摘要: 持续性强降雨条件下黄土体水力梯度上升, 土体由非饱和状态向饱和状态转变, 容易导致黄土地区输电铁塔基础发生失稳问题。为研究降雨对湿陷性黄土地区铁塔基础稳定性的影响, 基于非饱和土 Mohr-Coulomb 模型, 计及土体的黏聚力、内摩擦角、密度、泊松比与饱和度之间的非线性关系, 构建考虑降雨入渗和应力场耦合的铁塔基础渗流-应力耦合模型。通过该模型揭示降雨条件下湿陷性黄土地基的水力特征时空演化规律, 分析前峰型、后峰型、中峰型、均匀型降雨模式下的基础-土体空间应变与应力响应特征。结果表明: 在降雨总量和附加应力相同条件下, 后两种降雨模式对湿陷性黄土地区塔基的扰动最为显著, 基础的早期累积沉降量显著大于前峰型和后峰型降雨模式。降雨入渗过程中, 入渗区土体竖向有效应力逐步降低, 基础-土体界面的负侧摩擦阻力绝对值随之增大。对比分析湿陷性黄土地区掏挖式、灌注桩和阶梯型三种常用基础在降雨过程中的抗沉降性能, 发现掏挖式基础因扩大头结构能有效延缓负摩擦阻力的发展, 具有优异的抗湿陷性沉降性能。

关键词: 湿陷性黄土; 输电铁塔基础; 降雨条件; 流固耦合; 基础稳定性

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)04-0712-14

Research on Stability of Transmission Tower Foundations in Collapsible Loess Areas under Continuous Heavy Rainfall Conditions

CHEN Bin^{1,2}, WU Jiale¹, JIA Yanfeng³, CHU Mingyue³, LI Biao³, YANG Songlin³

(1. Hubei Provincial Engineering Technology Research Center for Power Transmission Line (China Three Gorges University), Yichang 443002, China; 2. College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 3. Sanmenxia Electric Company, State Grid Henan Electric Power Company, Sanmenxia 472000, China)

Abstract: Under continuous heavy rainfall conditions, the hydraulic gradient of loess increases, and the soil transitions from an unsaturated to a saturated state, which can easily lead to instability of transmission tower foundations in loess areas. To investigate the influence of rainfall on the stability of tower foundations in collapsible loess areas, a seepage-stress coupling model for tower foundations was established based on the Mohr-Coulomb model for unsaturated soil. This model incorporated the nonlinear relationships between soil cohesion, internal friction angle, density, Poisson's ratio, and satura-

* 收稿日期: 2025-01-25; 修回日期: 2025-03-31

基金项目: 国网河南省电力公司科技项目(5217I0240003)资助

作者简介: 陈彬(1989—), 男, 副教授, 博导, 博士。主要从事输电线路防灾减灾、电力装备电磁特性模拟与测量技术、输变电设备数字化及智能化运检技术等研究。E-mail: chenbin@ctgu.edu.cn

tion, considering the coupling between rainfall infiltration and the stress field. Using this model, the spatiotemporal evolution patterns of hydraulic characteristics in collapsible loess foundations under rainfall were revealed, and the spatial strain and stress response characteristics of the foundation - soil system were analyzed under four rainfall patterns: early-peak, late-peak, mid-peak, and uniform patterns. The results showed that under the same total rainfall and additional stress conditions, the latter two rainfall patterns caused the most significant disturbance to the foundations in collapsible loess areas, with the early-stage cumulative settlement of the foundation being significantly greater than that under early-peak and late-peak patterns. During the rainfall infiltration process, the vertical effective stress in the infiltrated soil gradually decreased, and the absolute value of the negative lateral friction resistance at the foundation-soil interface increased accordingly. A comparative analysis of the anti-settlement performance of three common foundation types—excavated, cast-in-place pile, and stepped foundations—in collapsible loess areas during the rainfall process revealed that the excavated foundation can effectively delay the development of negative friction resistance due to its enlarged head structure, demonstrating excellent resistance to collapsible settlement.

Keywords: collapsible loess; transmission tower foundation; rainfall conditions; fluid-solid interaction; foundation stability

0 引言

近年来我国极端天气事件频发,强降雨过程呈现出频次增多、强度增大、持续时间延长等特点。与其他非饱和土相比,黄土具有较大的孔隙结构、水敏性等特点^[1-2]。在持续性强降雨情况下,黄土体基质吸力降低,含水率梯度上升,土体由非饱和状态向饱和状态转变,土体强度显著降低,容易导致铁塔基础承载性能衰减和沉降变形等工程问题^[3-5]。因此,研究持续性强降雨下黄土地区输电铁塔基础稳定性,是输电线路防灾减灾的重要内容。

目前,国内外学者围绕水分入渗对非饱和土体稳定性的影响开展了大量研究,从边坡到建筑物基础,从现场试验到数值分析模型,研究方法和视角多种多样。如韦秉旭等^[6]在降雨入渗条件下膨胀土边坡非饱和渗流的数值模拟研究中,通过编制程序将膨胀土的膨胀应变引入非饱和土的流固耦合模型,并探讨研究膨胀应变对饱和度和暂态面积比的影响规律。董建军等^[7]以现场试验获取的荷载-位移数据曲线为基础,在FLAC3D中进行不同降雨强度下地基土体塑性区的发展以及基础抗拔承载性能变化分析,并指出基质吸力的减小对基础抗拔性能起决定性作用。张治国等^[8]提出一种适用于不同降雨工况下的分层假定Green-Ampt模型来模拟降雨入渗过程,采用两阶段分析方法,研究了降雨影响下基坑开挖与邻近基桩相互作用的问题。赵鹏

等^[9]研究发现杆塔荷载的存在会延长近地表土体正孔隙水压力消散的时间,进而延长土体的欠稳定状态历时。毕钊^[10]利用Abaqus软件对降雨入渗条件下桩筏基础的影响展开研究,通过对桩筏基础在二维情况下进行的仿真研究揭示了雨水入渗引起的地基增湿变形规律。孙晨东^[11]基于Plaxis3D岩土分析软件对浸水状态下单桩和长短桩基础的力学响应特性进行分析,揭示了桩与地基土之间相互作用机理及其变形破坏规律。张延杰等^[12]利用人工制备湿陷性黄土对桩周土体的湿陷变形规律和基础荷载传递特征开展研究。刘建磊等^[13]通过室内湿陷性试验和现场大型试坑浸水试验,结合数值模拟分析的方法提出用分层计算法进行土体的自重湿陷沉降量的计算。

目前湿陷性黄土地区等非饱和土地区的水分入渗稳定性研究仍存在以下几点不足:(1)研究对象主要集中在边坡工程^[14-15]和一般建筑物基础^[16],输电铁塔作为典型的离散式基础结构,其地基稳定性受地形复杂和环境变异等因素显著影响,现有研究缺乏针对这类离散式基础结构的研究;(2)对于降雨过程中铁塔基础与土体相互作用机理的研究较少,尤其是力学参数和水力特征参数的演化规律尚不明确;(3)现有数值模拟模型往往将土体参数简化,缺乏对水分入渗过程中土体黏聚力、内摩擦角、密度、泊松比等多参数耦合衰减特性的综合考虑。

针对上述问题,本文结合ABAQUS软件渗流分析模块,采用自主编写的模拟黄土湿陷特性USDFLD子程序,构建降雨过程中的铁塔基础稳定性

评估模型,对湿陷性黄土区域常用的掏挖式、灌注桩、阶梯型基础的抗湿陷性沉降性能进行比较,为降雨条件下的非饱和渗流场分析以及复杂三维铁塔基础稳定性分析提供计算依据。

1 渗流-应力耦合模型建立原理

本文建立基于渗流-应力耦合的湿陷性黄土地区铁塔基础三维数值模型。首先,通过渗流控制基本微分方程,考虑入渗过程中的水分迁移;然后,通过非饱和土的非线性抗剪强度模型,考虑基质吸力对于非饱和土体抗剪强度的影响;最后,为了考虑土体强度参数在入渗过程中的实时变化,运用USDFLD子程序构建起基于饱和度的土体强度参数非线性关系。本文建立的湿陷性黄土基础渗流-应力耦合模型的计算流程如图1所示。

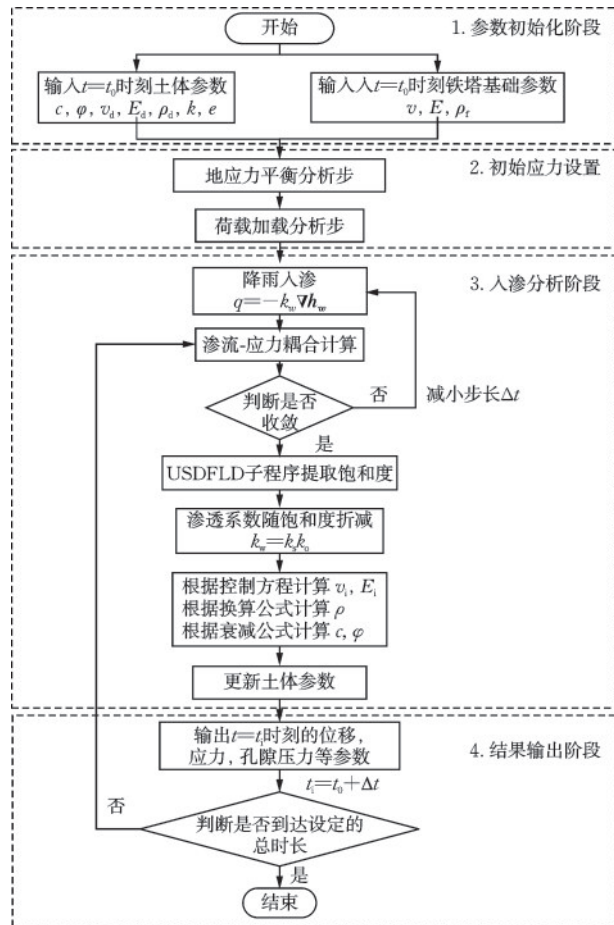


图1 研究流程

Fig.1 Research flowchart

1.1 非饱和土水力特征表征方法

非饱和土是指土壤孔隙中既含有水分又含有

气体的土体。对于湿陷性黄土而言,非饱和状态是其自然状态的主要表现形式。这种土壤的主要特征是在干燥状态下物理性质相对稳定,在遇水后会导导致土体体积收缩和强度下降,且湿陷性变形存在突变性、非连续性和不可逆性等特点^[17]。

一般采用土-水特征曲线(SWCC)来描述非饱和土的含水量与基质吸力之间的关系。对于湿陷性黄土而言,SWCC曲线可以用来预测在不同的水分条件下土壤的水分吸附性能和渗透速率特征。非饱和土的SWCC曲线通常呈现出以下特点:(1)在低含水率时,吸力迅速增加;(2)当接近饱和状态时,吸力急剧下降。

对于非饱和土,M.T. Van Genuchten^[18]提出了土体中体积含水率与负压的四参数关系方程,其表达式为:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + (\alpha\psi)^n\right]^m} \quad (1)$$

式中, θ 为体积含水率; θ_r 为残余体积含水率; θ_s 为饱和和体积含水率; ψ 为基质吸力; α 为与进气值相关的参数; m, n 为拟合参数, $m = 1 - 1/n$ 。

本文设置的湿陷性黄土SWCC曲线如图2所示。

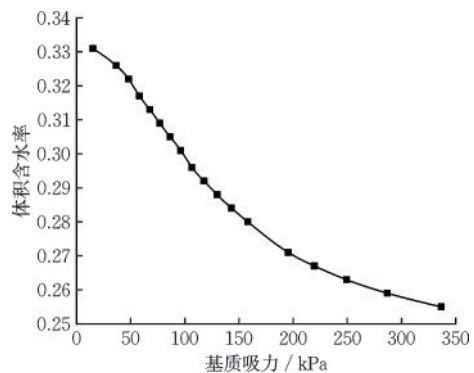


图2 土-水特征曲线

Fig.2 Soil-water characteristic curve

在ABAQUS中考虑非饱和土的问题时,通常使用折减系数 k_s 定义渗透系数与基质吸力之间的关系,其与基质吸力之间的函数关系可由式(2)表示:

$$k_s = \frac{\left\{1 - (\alpha\psi)^{n-1} \left[1 + (\alpha\psi)^n\right]^{-m}\right\}^2}{\left[1 + (\alpha\psi)^n\right]^{m/2}} \quad (2)$$

拟合后的折减系数和基质吸力的关系曲线如图3所示。

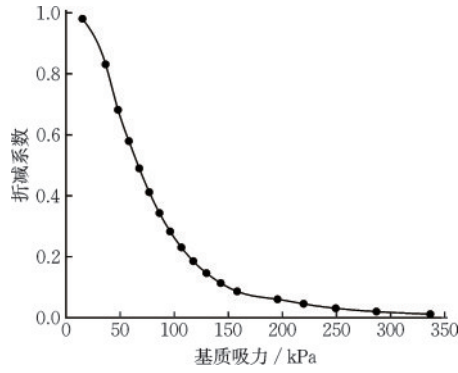


图3 折减系数—基质吸力关系曲线

Fig.3 Relationship curve between reduction coefficient and matrix suction

1.2 非饱和土渗流基本控制微分方程

非饱和土的降雨渗流过程涉及到降雨水分在非饱和土体中的运动过程。在非饱和状态下,土体的孔隙比、渗透系数等水力特性,对水分运动具有决定性的影响。当降雨发生时,水分首先从土体表层开始向下渗透,这一过程受到重力和基质吸力的共同作用。同时,土壤的水力传导率和孔隙率会随着水分含量的变化发生动态变化,进一步影响水分的运动。在湿陷性黄土地区,非饱和土降雨渗流的动力学研究尤为关键,这是因为黄土的结构和孔隙特性在遭受水分入侵后会显著变化,间接对铁塔基础的稳定性构成威胁。在ABAQUS中常用Richards方程修正扩展后的达西定律进行非饱和土的渗流分析,其方程可表示为:

$$q = -k_s k_0 \nabla h_w \quad (3)$$

式中, q 为单位时间内水通过单位面积多孔介质的流量; ∇h_w 为水力梯度矢量; k_0 为土体饱和渗透系数。

在非饱和土体中选取如图4所示的无穷小正六面体单元,由质量守恒定律可知,单位时间内该六面体流入和流出水质量之差等于水质量的变化量。对于三维非饱和土渗流问题,结合达西定律,其渗流控制方程可推导为:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial H}{\partial z} \right) = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (4)$$

式中, k_x 、 k_y 、 k_z 为土体在 x 、 y 、 z 三个方向上的渗透系数,当土体达到饱和状态后 $\partial \theta / \partial t = 0$,土体的含水率将不再随着时间变化。

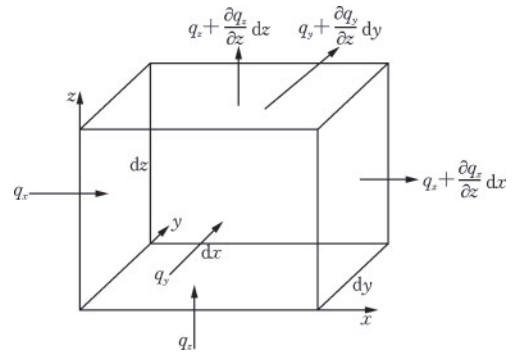


图4 微分单元土体渗流示意

Fig.4 Schematic diagram of seepage in differential soil element

1.3 非饱和土非线性抗剪强度模型

大量的实际三轴剪切试验表明土体的破坏包络线在不同饱和度下呈现出明显的非线性,尤其在非饱和土体中更为突出。因此对于非饱和土体,D. G. Fredlund等^[19]提出非饱和土体抗剪强度包络面模型,如图5所示,其抗剪强度方程可表达为:

$$\tau = c' + (\sigma - u_a)_f \tan \varphi' + (u_a - u_w)_f \tan \varphi_b \quad (5)$$

式中, τ 为土体抗剪强度; σ 为法向应力; c' 为土体的有效黏聚力; $(\sigma - u_a)_f$ 为破坏面上的净法向应力状态; $(u_a - u_w)_f$ 为破坏面的基质吸力; φ' 为法向应变关联摩擦角; φ_b 表示基质吸力关联摩擦角。

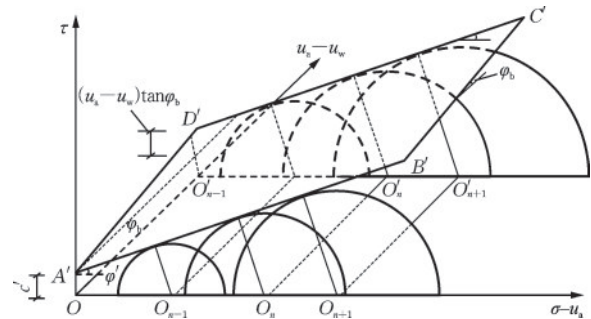


图5 非饱和土的抗剪强度包络面

Fig.5 Shear strength envelope of unsaturated soil

在式(5)的基础上结合J.K.M. Gan等^[20]提出的Mohr-Coulomb破坏包络面和剪应力和基质吸力平面相交线方程,即可得到将Mohr-Coulomb强度理论与水力特征联系起来的非饱和土体广义强度方程:

$$c_a = c' + (u_a - u_w)_f \tan \varphi_b \quad (6)$$

$$\tau = c_a + (\sigma - u_a)_f \tan \varphi' \quad (7)$$

式中, c_a 为考虑基质吸力影响的黏聚力。

1.4 渗流过程中土体强度参数演化模型

在铁塔基础稳定性的分析中,降雨对土体的力学参数有显著影响。然而ABAQUS中自带的本构模型中,如Mohr-Coulomb模型和Drucker-Prager模型,在降雨入渗过程中不能实现土体相关力学参数指标随降雨过程的实时变化。为了更准确地模拟降雨条件下土体的力学行为,本文通过Fortran语言编写USDFLD子程序来实现降雨过程中土体力学参数的动态非线性变化。

ABAQUS的渗流计算中可以实时的计算出模型中任意一点的饱和度参数,可以通过Fortran语言编写子程序实时提取饱和度并作为场变量,通过USDFLD子程序在软件中实时更新不同饱和度下的土体密度、弹性模量和泊松比等参数,即可实现土体饱和度变化对渗流过程中土体强度参数的影响。根据土体的饱和度按照式(8)计算出实时含水量,然后根据式(9)计算出土体的实时密度。

$$S_r = \frac{1}{100} \frac{d_s}{e} \omega \quad (8)$$

$$\rho = \rho_d(1 + \omega) \quad (9)$$

式中, S_r 为土体饱和度; d_s 为土颗粒相对密度; e 为土体孔隙比; ω 为实时含水量; ρ 为实时密度; ρ_d 为土体干密度。

本文采用员康锋等^[21]提出的基于饱和度的湿陷性黄土参数变化拟合公式来描述降雨条件下土体粘聚力和内摩擦角的变化关系,该经验公式通过拟合大量试验数据得到。该公式的优点在于通过固结排水三轴试验即可预测黄土的本构模型参数,且饱和度容易测得。通过编写USDFLD子程序,可以直接调用这些拟合公式,以实现土体强度参数随饱和度变化的动态更新。

$$\begin{cases} c = -13.052 \ln(S_r) + 71.429 \\ \varphi = -0.8356 \ln(S_r) + 27.738 \end{cases} \quad (10)$$

该经验公式得到的黏聚力和内摩擦角随饱和度的变化形式为对数函数,满足土体参数在饱和度增大过程中,初始阶段快速变化、后期趋于平缓的特征,且与文献[22-23]中换算后的公式形式相似,具有较高的可信度。

郑宏等^[24]、王学滨^[25]研究发现自然界的各类土体在一般情况下,强度参数粘聚力和内摩擦角值越大,其弹性模量也会越大,泊松比则越低。若要使土体符合Mohr-Coulomb准则,其内摩擦角和泊松

比必须满足式(11),而土体的泊松比与弹性模量之间的关系成反比,因此可通过式(12)进行调整。

$$\sin \varphi = \beta(1 - 2\nu) \quad (11)$$

$$E_i \nu_i = E \nu = \text{const} \quad (12)$$

式中, β 为经验系数,用于建立摩擦角 φ 和泊松比 ν 之间的关系, $\beta \geq 1$,当计算得出时 $\beta < 1$,令 $\beta = 1$; E 和 E_i 分别为折减前后的土体弹性模量; ν 和 ν_i 为折减前后的土体泊松比。

2 基础-土体三维数值模型建立与降雨模式分析

2.1 本构模型及材料参数

土体本构模型选用修正的Mohr-Coulomb模型,通过USDFLD子程序实现强度参数随饱和度的动态更新,以反映降雨入渗对湿陷性黄土强度特性的影响。同时,铁塔基础采用线弹性模型,通过采用主-从接触算法模拟基础与土之间的剪力传递和相对位移,选择刚度大的基础表面作为主控面,土体表面为从属面,基础与土体接触采用罚函数形式,摩擦系数由 $u = \tan(0.75\varphi)$ 计算得出,在本文中取土体自然状态下的内摩擦角即 26° ,摩擦系数为0.354。自然状态下湿陷性黄土及铁塔基础的模型材料的物理力学参数和非饱和渗流参数见表1和表2。通过渗流-应力耦合分析,模拟降雨条件下铁塔基础与湿陷性黄土之间的力学行为。

表1 材料物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of materials

材料类别	$\rho/(\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	ν	E/MPa	c/kPa	$\varphi/(\text{^\circ})$
土体	1.3	0.3	20	18	26
基础	2	0.2	3×10^4	/	/

表2 土体非饱和渗流参数

Table 2 Unsaturated seepage parameters of soil

材料类别	ω	$k/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	e
土体	17.8%	2.4×10^{-6}	0.898

需指出的是,本文所建立的降雨入渗模型做出了如下的假设:(1)不考虑地下水渗流的影响,只考虑雨水的入渗作用;(2)忽略温度对土体渗流过程的影响;(3)忽略界面张力对吸力的影响;(4)将铁塔基础所受荷载简化为均布荷载进行施加。

2.2 边界条件和初始条件

当桩土模型中桩侧土体边界取12倍桩径以上,桩端土体深度边界取两倍桩体埋深时,即可充分利用土的承载能力并满足计算精度要求^[26]。本文以图6所示湿陷性黄土地区某220 kV输电线路铁塔基础为例,建立工程尺寸长×宽×高为:20 m×20 m×22 m的三维土体模型,20 m以下为地下水水位层。仿真的整体模型包括铁塔基础和土体两个部分。铁塔基础所受的荷载依据《架空输电线路荷载规范》^[27],考虑由2F4-SDJ-27型耐张塔的自重,以及线路导线、地线自重和相关金具及附属设备产生的竖向静荷载估算,估算值为300 kN。

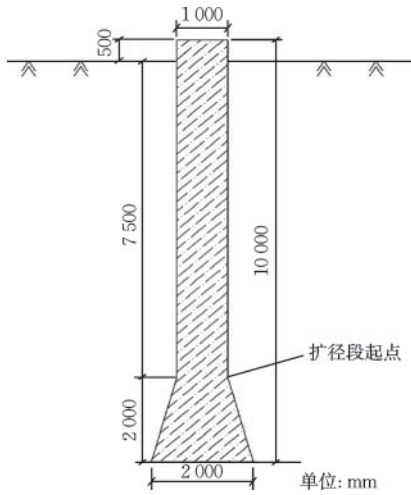


图6 铁塔基础尺寸

Fig.6 Dimensions of tower foundation

基础-土体三维模型的边界条件按照图7进行设置,边界条件设置为四类:(1)设置模型的四周和底部为力学的法向固定约束;(2)设置水位以下的边界为随深度线性增加的静水孔压边界,按照深度进行设置;(3)模型上表面为入渗边界条件,用于施加不同的降雨强度和类型;(4)模型四周和底部边界设置为不排水边界,模型上表面为自由排水边界。

为了保证初始时刻土体饱和度分布情况与实际情况一致,需要对不同深度土体的含水率进行测量,然后通过式(8)计算出不同深度土体的饱和度,将计算结果作为降雨入渗分析的初始渗流条件。图8为土壤水分测定设备,5个土壤水分含量传感器测得20 m深度范围内的土体含水率。图9为不同深度土体饱和度测量结果。

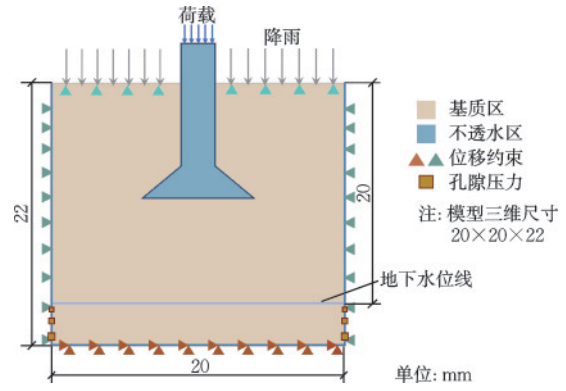


图7 边界条件

Fig.7 Boundary conditions

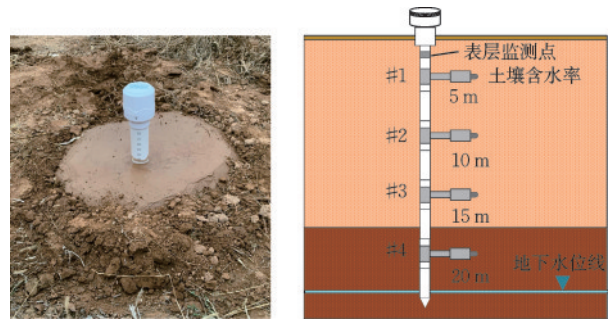


图8 土壤水分监测仪及设备布置示意

Fig.8 Schematic diagram of soil moisture monitoring instrument and layout

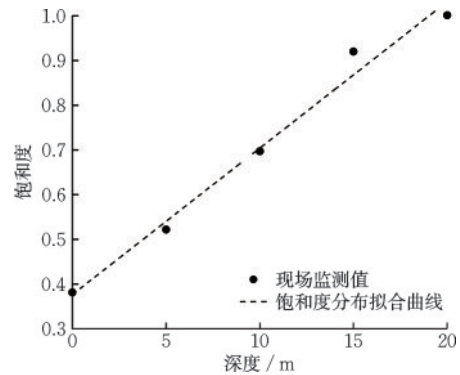


图9 土体饱和度测量结果

Fig.9 Measurement results of soil saturation

2.3 网格划分

在流固耦合的计算过程中,极易出现不收敛现象,所以要对模型进行六面体网格划分并确保其网格质量。在模型网格划分中,模型整体共划分为28 872个网格单元,其中土体28 272个,掏挖式基础600个,考虑到湿陷性黄土的非均质性和湿陷特性,采用三维八节点减缩积分单元(C3D8R)对铁塔基础进行空间离散化和网格划分,土体采用八结点六

面体单元,三向线性位移,三向线性孔隙压(C3D8P)单元类型,网格划分后的模型如图10所示。

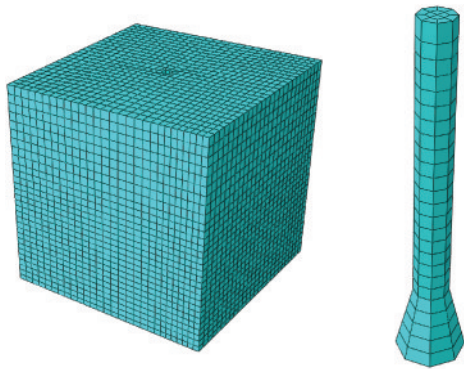


图10 模型网格划分示意

Fig.10 Schematic diagram of model mesh division

2.4 降雨方案

“强降雨”通常指日降雨量 ≥ 25 mm的降水过程,结合中国气象局公布的7个降水强度等级划分标准(表3),在进行湿陷性黄土地区铁塔基础稳定性分析中,采用大雨及以上4个级别的降雨等级作为降雨方案。

表3 降水强度等级划分标准

Table 3 Classification criteria for precipitation intensity levels

等级	12 h降雨量	24 h降雨量
微量降雨	< 0.1	< 0.1
小雨	0.1~4.9	0.1~9.9
中雨	5.0~14.9	10.0~24.9
大雨	15.0~29.9	25.0~49.9
暴雨	30.0~69.9	50~99.9
大暴雨	70.0~139.9	100.0~249.9
特大暴雨	≥ 140	≥ 250

目前已有研究^[28-29]表明,土体的破坏过程会受降雨模式的影响,因此除了考虑不同降雨强度外,还需要考虑4类典型的降雨模式,分别为:前峰型、后峰型、中峰型、均匀型,其降雨幅值曲线如图11所示。在气象灾害预警中,“强降雨”的界定与灾害风险挂钩,灾害预警等级通常按照未来24 h降雨量来划分,比如当未来24 h降雨量 ≥ 50 mm时发布蓝色预警。并且,根据中国气象局对于降雨等级的划分,是按照12 h或24 h内的降雨量进行划分,因此

本文中采用24 h的连续降雨作为数值模拟方案的降雨时长。仿真设置的降雨方案见表4。

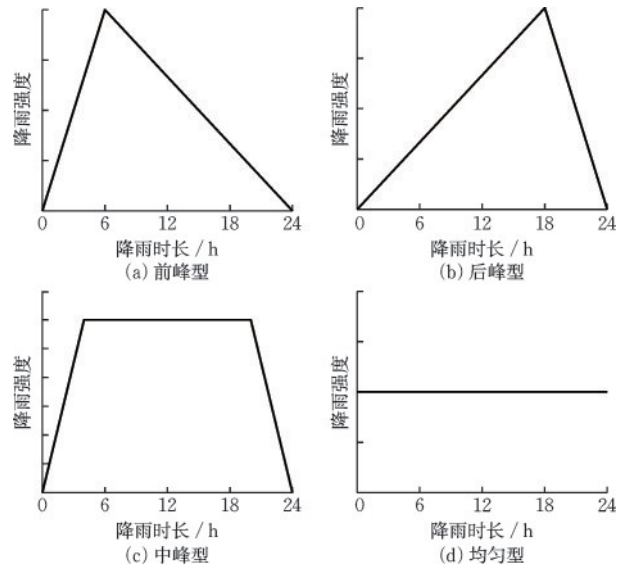


图11 典型降雨模式

Fig.11 Typical rainfall patterns

表4 仿真设置的降雨强度和降雨模式

Table 4 Rainfall intensity and rainfall pattern settings for simulation

等级	降雨强度/($m \cdot h^{-1}$)	降雨时长/h	降雨模式
大雨	0.001 7	24	中峰型
		24	前峰型
		24	后峰型
		24	均匀型
暴雨	0.003 3	24	中峰型
大暴雨	0.005 8	24	中峰型
特大暴雨	0.009 2	24	中峰型

2.5 数值模型准确性验证

为验证建立的数值模拟模型准确性,以黄雪峰等^[30]在大厚度自重湿陷性黄土地区进行的大型现场载荷-浸水现场试验为基础,基于本文中的方法在ABAQUS中建立起等效数值模型。首先根据给出的SWCC曲线获取不同基质吸力下对应的土体饱和度,然后根据文献[31]中通过直剪试验得到的不同基质吸力下的土体内摩擦角和粘聚力,最后通过最小二乘法拟合得到不同饱和度下的土体内摩擦角和粘聚力函数关系式,其他参数随饱和度变化关系的获取方法与本文中1.4节一致。桩和地基的相关计算参数在文献[30、31]中有详细数据,不再重

复阐述。在进行桩顶位移加载需要对模型进行初始地应力平衡并调整初始条件使得土体自重湿陷量和桩达到相对真实的状态。

$$\begin{cases} c = -25.82\ln(S_r) + 124.5 \\ \varphi = -1.318\ln(S_r) + 34.61 \end{cases} \quad (13)$$

图 12 为数值模拟过程中土体屈服区发展过程图,由图 12 可知,桩基础为深埋深破坏模式:土体屈服区最初出现在桩端部的周边土体,在初始阶段,屈服区向桩侧向水平扩展,当荷载达到极限承载状态力阈值时,屈服区开始沿桩轴向向下而上垂向发展,直至形成贯通的塑性区。将模拟计算所得荷载—位移曲线与现场试验实测结果值进行对比,如图 13 所示。

单桩极限承载力数值模拟计算值为 8 740 kN,现场试验值为 8 400 kN,误差 4.05%,且曲线趋势一致,证明该数值模拟计算方法较为可行。

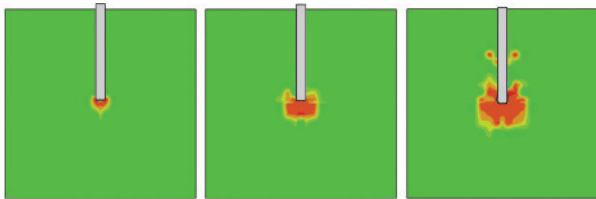


图 12 土体屈服区发展过程

Fig.12 Development process of soil yield zone

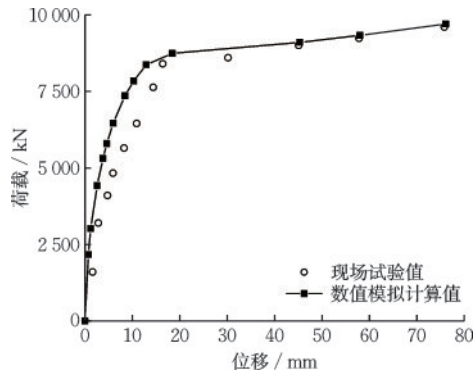


图 13 有限元结果与试验结果对比

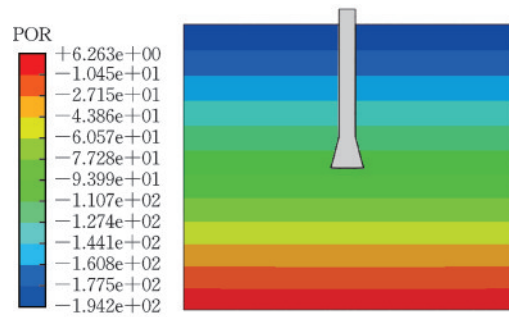
Fig.13 Comparison between finite element results and experimental results

3 模型仿真结果与分析

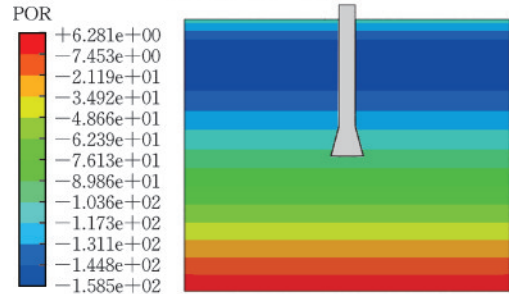
3.1 雨水作用下土体水力参数响应规律

3.1.1 水力特征时空演化规律

图 14 和图 15 分别为降雨 24 h 前后的孔隙水压



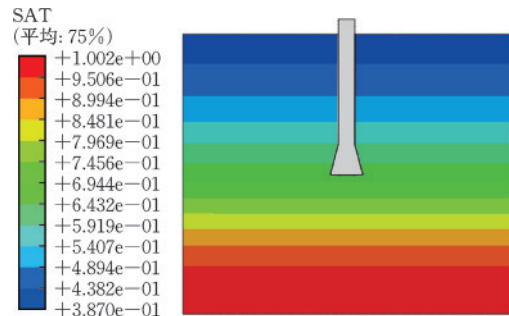
(a) 初始孔隙水压力分布



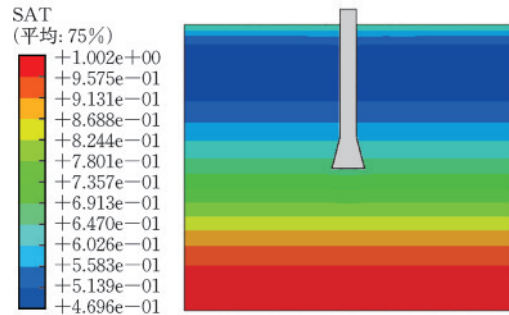
(b) 降雨24 h后孔隙水压力分布

图 14 降雨前后孔隙水压力变化云图

Fig.14 Contour maps of pore water pressure changes before and after rainfall



(a) 初始饱和度分布



(b) 降雨24 h后饱和度分布

图 15 土体饱和度分布云图

Fig.15 Contour maps of soil saturation distribution

力和饱和度分布情况,由图 14、15 可知:(1)降雨前,在地下水位以上会由于毛细作用,使得土体中的水分会随深度增加而逐渐饱和。在由浅表层靠近地下水位过程中,由于地下水位的影响,饱和度会呈现出过渡性的渐变分布。孔隙水压力在浅表层为

负压分布,随着深度的增加由负压过度至正压;(2)降雨发生后,雨水入渗过程只发生在浅表层土体,并在土体的表层形成暂饱和区,导致该层孔隙水压力由负值逐渐向正值转变。图16所示的土体饱和度时空分布图表明,雨水入渗只会对表层土体的水力参数产生影响,非入渗区的土体的饱和度分布相对稳定。

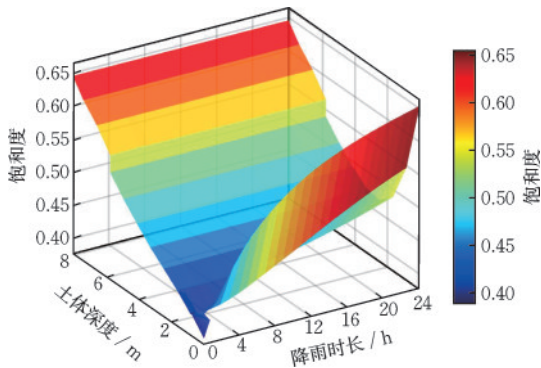


图16 土体饱和度时空分布

Fig.16 Spatiotemporal distribution of soil saturation

3.1.2 降雨强度对水力特征的影响

为探究不同降雨等级下湿陷性黄土区域铁塔基础土体的水力特征时空演化规律,选取大雨、暴雨、大暴雨及特大暴雨四种极端持续性降雨工况进行对比分析。研究不同降雨强度下不同深度土体的饱和度、孔隙水压力及渗流场的演化特征,揭示降雨强度对湿润锋面推进深度及土体水力特征的动态响应机制。选取10 m深度范围的饱和度和孔隙水压力进行分析,绘制出的不同降雨强度下的地基土体的饱和度和孔隙水压力分布曲线如图17和图18所示。

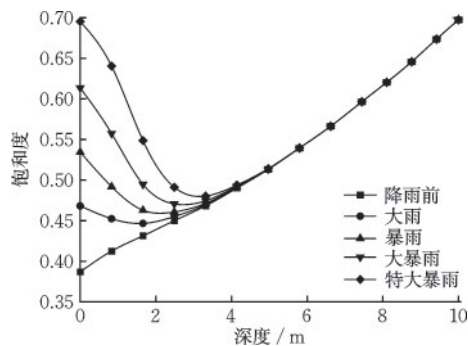


图17 不同降雨强度下的饱和度分布

Fig.17 Saturation distribution under different rainfall intensities

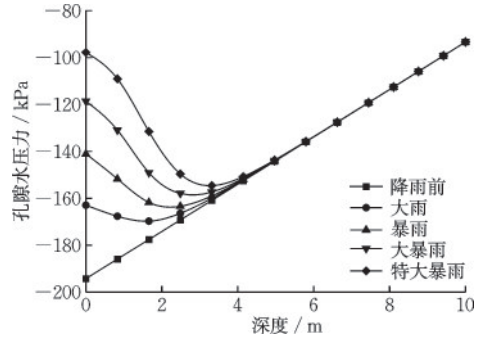


图18 不同降雨强度下的孔隙水压力分布

Fig.18 Distribution of pore water pressure under different rainfall intensities

由图17和图18可知,随着降雨强度的增加,土体饱和度呈现明显的增长趋势,在特大暴雨工况下,表层土体饱和度最高可达0.695,土体的水力响应主要集中在0~3 m深度范围内,该区间内饱和度和孔隙水压力表现出最显著的变化特征。湿润锋面的推进表现出明显的降雨强度依赖性,相较于大雨工况,暴雨、大暴雨和特大暴雨工况下的湿润锋面分别向下推进了17、22、28 mm。这种推进规律主要源于降雨强度增大导致的水力梯度增加,更大的水力梯度驱动力促进了土体水分的深部渗透,同时土-水相互作用加剧了优势渗流通道的发展。湿润锋面以上土体饱和度显著增大,而湿润锋面以下土体的饱和度则逐渐过渡至初始状态分布。土体孔隙水压力随降雨强度增加而增大,呈现出明显的正相关分布特征,表层负孔隙水压力变化最为显著,这种水力特征的空间分异性反映了降雨强度对土体水分运移的驱动机制。

3.1.3 降雨模式对水力特征的影响

图19和图20分别绘制出大雨工况下的4组不同降雨类型下的饱和度和孔隙水压力随深度的变化曲线,用于表征降雨时序分布对湿润锋面推进深度的影响及土体水力响应的作用机制。

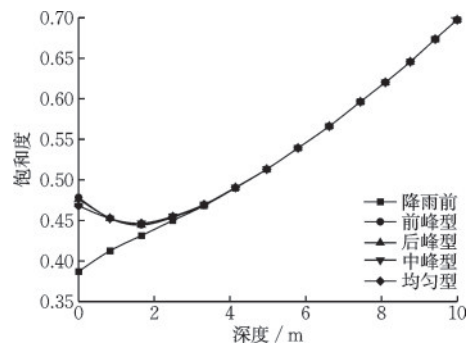


图19 不同降雨模式下的饱和度分布

Fig.19 Saturation distribution under different rainfall patterns

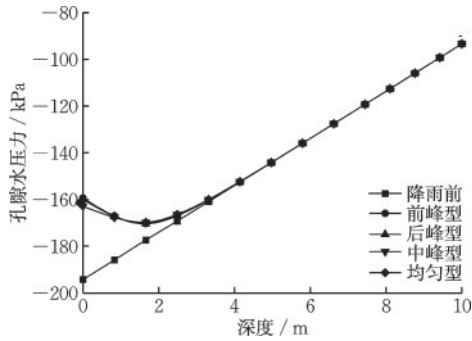


图20 不同降雨模式下的孔隙水压力分布

Fig.20 Distribution of pore water pressure under different rainfall patterns

由图19和图20可知,降雨时序分布会对湿陷性黄土区域铁塔基础土体的水力特征产生影响。前锋型降雨和后峰型降雨在降雨24h后的饱和度相较于中峰型和后峰型有提高的现象可以说明,有突变性的降雨类型可以使得土体表层可以形成较大的水力梯度,从而使入渗区土体的饱和度和孔隙水压力呈现更大的变化。同时比对不同降雨类型的水力特征分布,可以发现不同雨型对湿润锋推进深度的影响差异较小,这是由于土体最终接收的累积水量相等,且受土体本身的水力传导特性制约,使得湿润锋面的最终推进深度趋于一致。

3.2 雨水作用下基础-土体应变与应力响应分析

3.2.1 基础-土体相互作用力演化过程分析

图21为降雨入渗过程中不同时刻基础-土体竖向应力分布图。由图21可知,基础周边土体的竖向应力随深度逐渐增大,且随着降雨持续时间的增加,土体竖向应力呈现出轻微减小的趋势。这种应

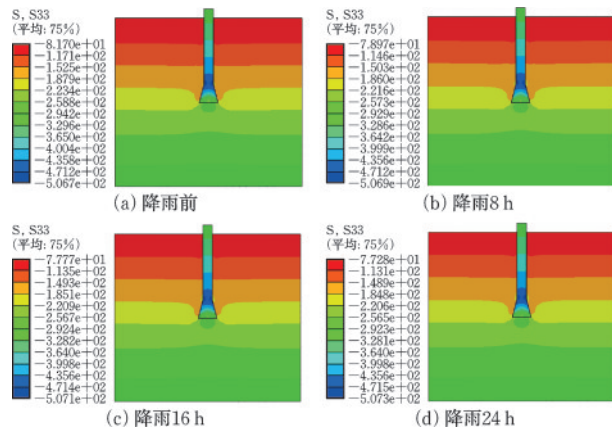


图21 降雨入渗过程中竖向应力变化云图

Fig.21 Contour maps of vertical stress changes during rainfall infiltration process

力减小现象主要是由于雨水入渗导致土体孔隙水压力增大,部分抵消了垂直方向上的荷载作用。从基础竖向应力分布来看,以掏挖式基础扩体起点为特征断面点,应力绝对值从基础顶部至扩径段起点逐渐增加至最大值,而后呈现递减趋势。

图22为不同降雨时刻下基础侧摩擦力随深度的分布情况,侧摩擦阻力沿基础埋深的分布呈现出明显的分区特征。图23给出了降雨12h后的基础-土体位移云图,在埋深8m以内区域,由于降雨入渗引起的土体变形大于基础位移,导致土体相对于基础产生了向下的相对位移,进而引起基础表面的负摩擦力;而在埋深8m以上区域,土体位移渐趋稳定,基础位移大于土体位移,基础-土体界面相对位移方向反转,继而形成正摩擦力。随着入渗过程的持续,表层土体因其较大的人渗梯度,使得该区域基础的负摩擦力绝对值略微增长。在埋深8m处基础的侧摩擦力变化速率开始增大,这主要是扩径段起点处截面积的变化所导致的应力扰动。

对比图21和图22可知,最大竖向应力位置与摩擦力中性点位置相对应,证明该处为应力传递的

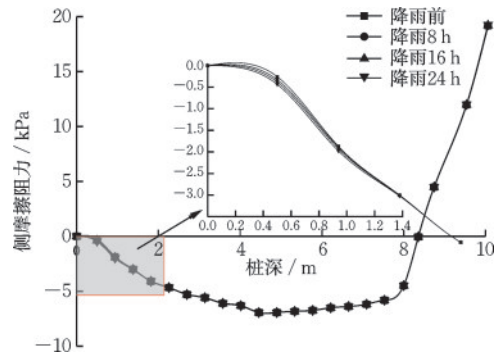


图22 不同降雨时刻下的基础侧摩擦力曲线

Fig.22 Curves of lateral friction on foundation at different rainfall times

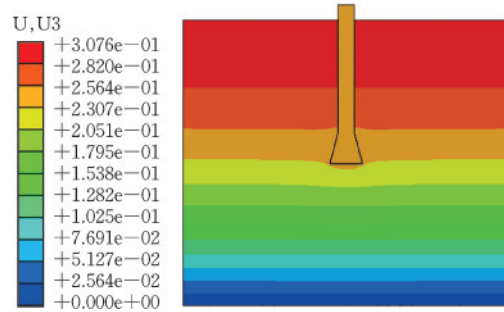


图23 降雨12h下基础-土体位移云图

Fig.23 Contour maps of foundation - soil displacement after 12 hours of rainfall

关键断面,上部土体的自重和附加应力在此处充分集中,不仅导致竖向应力达到峰值,同时也使得基础-土体界面产生的摩擦阻力开始向正摩擦阻力转变。

3.2.2 基础沉降—时间响应特性分析

在相同的竖向荷载作用下,降雨入渗过程会导致铁塔基础周围土体的含水量逐渐增加,引起土体强度和变形特性的显著改变,进而影响基础的稳定性。为了深入研究这一过程,本文通过数值模拟分析不同降雨条件下铁塔基础的沉降响应特征。图24和图25分别展示了不同降雨模式和不同降雨强度下的沉降—时间曲线。

由图24可知,中峰型和均匀型降雨模式下,基础的早期累积沉降量显著大于前锋型和后峰型降雨模式。这种差异性主要是因为中峰型和均匀型降雨在初始阶段即有较大的降雨强度,使得表层土体可以快速吸水,导致基质吸力迅速衰减,土体抗剪强度降低,进而导致较大的早期沉降。相较于

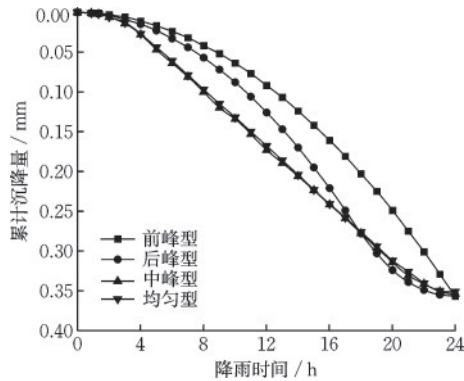


图24 大雨强度、不同降雨模式下的沉降—时间曲线

Fig.24 Settlement - time curves under heavy rainfall intensity and different rainfall patterns

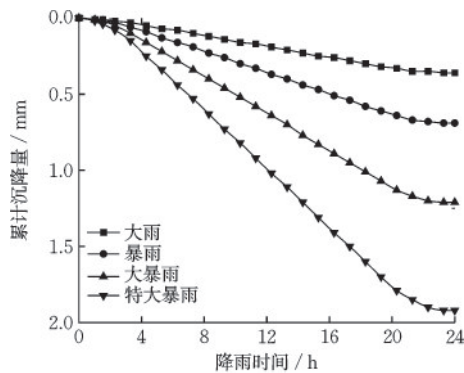


图25 中峰型降雨模式、不同降雨强度下的沉降—时间曲线
Fig.25 Settlement - time curves under mid-peak rainfall pattern and different rainfall intensities

言,前锋型与后峰型初期降雨强度相对较小,其峰值相对滞后,使得这两种模式下的降雨初期沉降量相对较小。因此实际工程需要重视中峰型和均匀型降雨初期的基础稳定性监测与防护。此外,降雨强度与基础的沉降响应表现出显著的正相关特性,随着降雨等级的递进,即从大雨、暴雨、大暴雨到特大暴雨,基础的沉降量分别达到0.36、0.69、1.21、1.92 mm,呈现出了明显的非线性递增特征。

3.3 不同基础形式抗湿陷沉降性能分析

在满足输电铁塔安全和可靠运行的前提下,低造价、更优的抗沉降性能是所有输电塔基础设计的目标。鉴于此,本文针对相同埋深、材料以及初始条件的掏挖式基础、灌注桩基础和阶梯型基础等三种湿陷性黄土地区典型基础形式进行建模仿真,基础上部所受竖向荷载均为300 kN,基础与土体的摩擦系数为0.354。分别计算24 h中峰型降雨模式、大雨强度下基础-土体位移、基础侧摩擦阻力、降雨24 h后的累积沉降量,如图26所示。

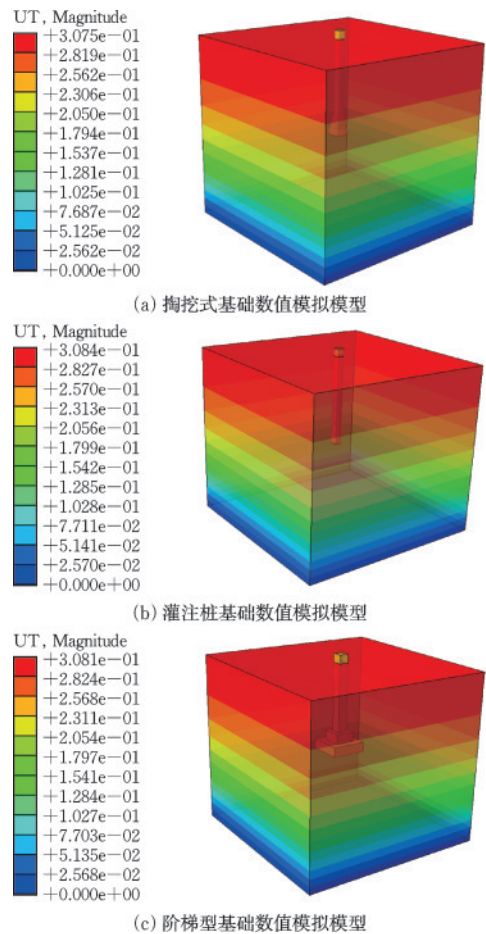


图26 降雨24 h后不同类型基础-土体位移云图
Fig.25 Contour maps of foundation - soil displacement for different foundation types after 24 hours of rainfall

由图 27 可知,三种基础的侧摩擦阻力分布均表现为先增加后减小,到达中性点后再逐渐增大,中性点以上为负摩擦阻力,中性点以下负摩擦阻力消失,正摩擦阻力开始发挥作用。掏挖式基础、灌注桩基础和阶梯型基础的中性点位置分别处于基础埋深处 8.3、6.4、9.1 m。掏挖式基础相较于灌注桩基础,掏挖式基础的中性点位置出现较晚,这是由于扩大头形成的压拱效应使基础周土体应力分布更加均匀,基础负侧摩擦阻力的分布较为平缓,减小了局部应力集中;同时,掏挖式基础最大负侧摩擦阻力最小,反映了其独特的扩大头构型在应力调节方面具有显著优势。此外,掏挖式基础一次性扩大的构造方式避免了阶梯式基础分段变径导致的应力突变,从而更有效地控制了负摩擦阻力的发展。由图 28 可知,降雨入渗导致三种基础的沉降量分别为 0.354、0.37、0.43 mm,说明掏挖式桩基础具有更优的抗沉降性能。

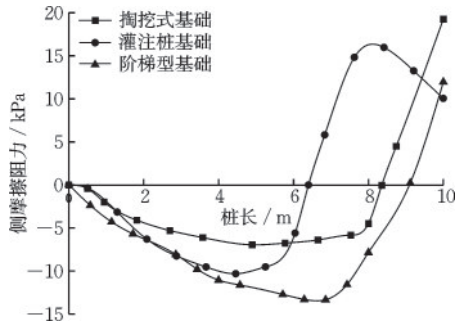


图 27 不同类型基础侧摩擦阻力分布曲线

Fig.27 Distribution curves of lateral friction resistance for different foundation types

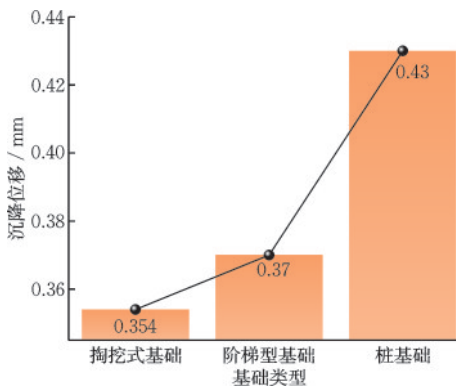


图 28 不同基础的沉降位移柱状图

Fig.28 Bar chart of settlement displacement for different foundation types

4 结论

基于非饱和土非线性抗剪强度模型,构建起以

饱和度为基本控制变量的黏聚力、内摩擦角、密度和泊松比等土体强度参数的多参数耦合衰减的本构关系,该模型能够有效体现湿陷性黄土地基的非线性变形特征和水力场动态演化过程,为湿陷性黄土区域铁塔基础稳定性分析提供依据,所得结论如下:

(1) 降雨入渗对铁塔基础周边土体的影响主要体现在 4 m 以内的表层土体,入渗过程中表层土体饱和度会迅速增大,使得土体力学性质发生改变,而深层土体受影响较小;降雨模式对黄土地基变形特征具有显著影响。在相同降雨量条件下,中峰型和均匀型降雨引起的基础扰动最为明显,因这两种降雨模式导致的早期累积沉降量显著大于前锋型和后峰型降雨工况,沉降量最大差值可达 0.1 mm。

(2) 在相同降雨时间和荷载条件下,降雨入渗过程中,土体竖向有效应力逐步降低,且铁塔基础侧负摩擦阻力绝对值会随入渗时间延长而增大,在大雨强度、中峰型降雨模式下在基础埋深 1 m 以内的增大较为明显。

(3) 通过对比掏挖式、灌注桩、阶梯型基础构型的抗沉降性能可知,掏挖式基础通过扩大头结构形成压拱效应,能够有效避免应力集中现象,表现出较好的变形控制效果,适用于地下水位较高的黄土地区。

(4) 需指出的是,本文进行输电铁塔基础稳定性的分析时,仅考虑了竖向荷载作用,在输电铁塔的实际运行中同时会受到风荷载和导线张力等水平荷载的作用,可能会对基础的整体稳定性产生显著影响。后续应对水平荷载的作用和基础抗拔稳定性开展进一步研究。

参考文献:

[1] 何亮,李慧丽,刘维正,等.多雨地区路基湿度变化对路面力学响应影响研究[J/OL]. 防灾减灾工程学报, 1-11 [2024-06-20]. <https://doi.org/10.13409/j.cnki.jdpme.20240201002>.

He L, Li H L, Liu W Z, et al. Study on the effect of moisture variation in subgrade on the mechanical response of pavement in rainy areas[J/OL]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 1-11 [2024-06-20]. <https://doi.org/10.13409/j.cnki.jdpme.20240201002>. (in Chinese)

[2] 周凤玺,周志雄,邵生俊.非饱和黄土的增湿湿陷变形特性分析[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(增1): 36-40.

- Zhou F X, Zhou Z X, Shao S J. Wetting deformation properties of unsaturated collapsible loess [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(Sup1): 36-40. (in Chinese)
- [3] 陈正汉,郭楠.非饱和土与特殊土力学及工程应用研究的新进展[J].岩土力学,2019,40(1):1-54.
Chen Z H, Guo N. New developments of mechanics and application for unsaturated soils and special soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(1): 1-54. (in Chinese)
- [4] 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(1): 4805-4819.
- [5] 樊培培,张凌凯,丁旭升.干湿-冻融循环条件下湿陷性黄土剪切及压缩特性的劣化规律[J].岩土力学,2024,45(7):2050-2060.
Fan P P, Zhang L K, Ding X S. Deterioration law of shear and compression characteristics of collapsible loess under dry-wet and freeze-thaw cycles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45(7): 2050-2060. (in Chinese)
- [6] 韦秉旭,陈亮胜,肖罗明,等.基于多场耦合的膨胀土边坡非饱和降雨入渗分析[J].长江科学院院报,2021,38(3):90-96.
Wei B X, Chen L S, Xiao L M, et al. Unsaturated seepage analysis of expansive soil slope under rainfall infiltration based on multi-field coupling[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2021, 38(3): 90-96. (in Chinese)
- [7] 董建军,杨嫡,郑高阳,等.降雨条件下特高压输电线路基础安全稳定研究[J].中国安全科学学报,2021,31(1):116-124.
Dong J J, Yang D, Zhang G Y, et al. Research on safety and stability of UHV transmission line foundations under rainfall[J]. China Safety Science Journal, 2021, 31(1): 116-124. (in Chinese)
- [8] 张治国,毛敏东,朱正国,等.间歇性强降雨诱发滑坡对抗滑桩非线性力学响应分析[J].岩土力学,2023,44(7):2073-2094.
Zhang Z G, Mao M D, Zhu Z G, et al. Analysis of non-linear mechanical response of anti-slide pile induced by landslides with intermittent heavy rainfall[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(7): 2073-2094. (in Chinese)
- [9] 赵鹏,张辉,禹聪,等.杆塔荷载和降雨特征对边坡稳定性的影响分析:以滇东北山区输电线路为例[J].水利水电技术(中英文),2024,55(增1):350-363.
Zhao P, Zhang H, Yu C, et al. Impacts analysis of tower load and rainfall characteristics on slope stability: A case study of transmission lines in mountainous areas of northeast Yunnan [J]. Water Resources and Hydro-power Engineering, 2024, 55(Sup1): 350-363 (in Chinese)
- [10] 毕钊.黄土填方地基不均匀沉降及降雨入渗对桩筏基础的影响研究[D].西安:长安大学,2022.
Bi Z. Study on the influence of uneven settlement of loess filled foundation and rainfall infiltration on pile raft foundation [D]. Xi'an: Chang'an University, 2022 (in Chinese)
- [11] 孙晨东.浸水状态下湿陷性黄土地区长短桩基础负摩阻力研究[D].兰州:兰州理工大学,2023.
Sun C D. Study on negative friction of long short pile foundation in collapsible loess area under water immersion[D].Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2023. (in Chinese)
- [12] 张延杰,王旭,梁庆国,等.浸水条件下湿陷性黄土地基群桩基础承载特性模型试验研究[J].岩土工程学报,2021,43(增1):219-223.
Zhang Y J, Wang X, Liang Q G, et al. Model tests on bearing behavior of pile groups in collapsible loess ground under water immersion [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(Sup1): 219-223. (in Chinese)
- [13] 刘建磊,卫童瑶,惠寒斌,等.大厚度非连续湿陷性黄土浸水变形特征分析[J].地质力学学报,2024,30(6):921-932.
Liu J L, Wei T Y, Hui H B, et al. Analysis of soaking deformation characteristics of large-thickness discontinuous collapsible loess [J]. Journal of Geomechanics, 2024, 30(6): 921-932. (in Chinese)
- [14] 王龙,陈国兴,胡伟,等.基于拟动力法抗滑桩加固非饱和土边坡稳定性分析[J].防灾减灾工程学报,2023,43(6):1386-1394.
Wang L, Chen G X, Hu W, et al. Seismic stability of unsaturated soil slopes stabilized by anti-slide piles based on pseudo-dynamic approach[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023, 43(6): 1386-1394. (in Chinese)
- [15] 张永杰,胡涛,郭一鹏,等.降雨作用下堆积层边坡与下穿隧道相互作用模型试验研究[J].岩土力学,2024,45(12):3613-3623.
Zhang Y J, Hu T, Guo Y P, et al. Model test on interaction between colluvial slope and underpass tunnel under rainfall [J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45(12): 3613-3623. (in Chinese)
- [16] 马云峰,彭森,葛苗苗,等.黄土高填方地基上部建筑

- 施建控制标准研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2023, 43(6): 1415-1424.
- Ma Y F, Peng S, Ge M M, et al. Study on construction control standard of upper buildings on loess high fill foundation[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023, 43(6): 1415-1424. (in Chinese)
- [17] 高凌霞, 栾茂田, 杨庆. 基于微结构参数主成分的黄土湿陷性评价[J]. 岩土力学, 2012, 33(7): 1921-1926.
- Gao L X, Luan M T, Yang Q. Evaluation of loess collapsibility based on principal components of microstructural parameters[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(7): 1921-1926. (in Chinese)
- [18] Van Genuchten M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(5): 892-898.
- [19] Fredlund D G, Morgenstern N R, Widger R A. The shear strength of unsaturated soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1978, 15(3): 313-321.
- [20] Gan J K M, Fredlund D G, Rahardjo H. Determination of the shear strength parameters of an unsaturated soil using the direct shear test[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1988, 25(3): 500-510.
- [21] 员康锋, 张军, 员盼锋. 基于饱和度的湿陷性黄土邓肯-张模型参数变化规律研究[J]. 工程地质学报, 2015, 23(5): 943-947.
- Yuan K F, Zhang J, Yuan P F. Variation regularity of duncan-chang model parameters using saturation of collapsing loess [J]. Journal of Engineering Geology, 2015, 23(5): 943-947. (in Chinese)
- [22] 马少坤, 黄茂松, 范秋雁. 基于饱和土总应力强度指标的非饱和土强度理论及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(3): 635-640.
- Ma S K, Huang M S, Fan Q Y. Unsaturated soil strength theory based on total stress strength indexes of saturated soil and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(3): 635-640. (in Chinese)
- [23] 蔡国庆, 张策, 黄哲文, 等. 含水率对砂质Q3黄土抗剪强度影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(增2): 32-36.
- Cai G Q, Zhang C, Huang Z W, et al. Experimental study on influences of moisture content on shear strength of unsaturated loess [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(Sup2): 32-36. (in Chinese)
- [24] 郑宏, 李春光, 李焯芬, 等. 求解安全系数的有限元法[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(5): 626-628.
- Zheng H, Li C G, Li C F, et al. Finite element method for solving the factor of safety [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(5): 626-628. (in Chinese)
- [25] 王学滨. 软化模量对岩样全部变形特征的影响[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(5): 600-605.
- Wang X B. Effect of softening modulus on entire deformational characteristics of rock specimen [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(5): 600-605. (in Chinese)
- [26] 李嘉瑞, 景立平, 董瑞, 等. ABAQUS模拟土-结构相互作用时人工边界的选取[J]. 地震工程与工程振动, 2020, 40(3): 174-182.
- Li J R, Jing L P, Dong R, et al. Artificial boundary selection when calculating soil-structure interaction with abaqus[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2020, 40(3): 174-182. (in Chinese)
- [27] 架空输电线路荷载规范: DL/T 5551—2018[S]. 北京: 中国计划出版社, 2018.
- [28] Tsai T L, Wang J K. Examination of influences of rainfall patterns on shallow landslides due to dissipation of matric suction[J]. Environmental Earth Sciences, 2011, 63(1): 65-75.
- [29] 豆红强, 谢森华, 王浩, 等. 降雨条件下球状风化花岗岩类土质边坡渗流特性与稳定性分析[J]. 工程地质学报, 2023, 31(2): 638-649.
- Dou H Q, Xie S H, Wang H, et al. Numerical analysis of seepage characteristics and stability for spheroidal weathered granite-like soil slopes under rainfall conditions[J]. Journal of Engineering Geology, 31(2): 638-649. (in Chinese)
- [30] 黄雪峰, 陈正汉, 哈双, 等. 大厚度自重湿陷性黄土中灌注桩承载性状与负摩阻力的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(3): 338-346.
- Huang X F, Chen Z H, Ha S, et al. Research on bearing behaviors and negative friction force for filling piles in the site of collapsible loess with big thickness[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(3): 338-346. (in Chinese)
- [31] 朱元青, 陈正汉. 自重湿陷性黄土的力学特性试验研究[J]. 后勤工程学院学报, 2007(4): 50-55.
- Zhu Y Q, Chen Z H. Experimental study on mechanical properties of self weight collapsible loess[J]. Journal of the School of Logistics Engineering, 2007(4): 50-55. (in Chinese)

(本文编辑: 张艺)