

膨胀土地基中单桩受扭非线性分析

江 杰^{1,2,3}, 王顺苇^{1,2,3}, 欧孝夺^{1,2,3}, 王 智⁴, 杨 迪⁴

(1. 广西大学土木建筑工程学院, 广西, 南宁 530004; 2. 工程防灾与结构安全教育部重点实验室, 广西, 南宁 530004;

3. 广西防灾减灾与工程安全重点实验室, 广西, 南宁 530004; 4. 中铁建设集团有限公司, 北京 100040)

摘 要: 膨胀土地基中桩-土相互作用较为复杂, 膨胀土浸水对单桩扭矩承载特性的影响机理尚未明确。该文基于荷载传递法建立桩身位移控制方程, 考虑膨胀土浸水隆起对桩侧摩阻力及桩端边界条件的影响, 利用有限差分法求解出桩侧竖向摩阻力的分布。在此基础上, 结合边界元法提出膨胀土地基浸水后单桩受扭的非线性分析方法, 揭示了桩侧环向摩阻力的分布规律, 并通过模型试验验证了该文方法的正确性。研究表明: 膨胀土地基浸水膨胀引起的地表隆起会使单桩的扭矩承载力大幅度降低, 常规的计算方法高估了基桩的极限扭矩和桩-土体系加载刚度, 偏于不安全; 浸水前单桩的桩身扭矩沿桩身近似线性减小, 浸水后桩-土界面“滑移段”的扭矩接近于桩顶扭矩, “未滑移段”桩身扭矩近似线性减小; 随着膨胀土膨胀率的增加, 单桩的抗扭能力降低, 且桩-土界面“滑移段”的长度也在增加。

关键词: 桩基础; 扭矩荷载; 理论分析; 模型试验; 膨胀土

中图分类号: TU471.91 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2020.04.0243

NONLINEAR TORSIONAL ANALYSIS OF A SINGLE PILE IN AN EXPANSIVE SOIL FOUNDATION

JIANG Jie^{1,2,3}, WANG Shun-wei^{1,2,3}, OU Xiao-duo^{1,2,3}, WANG Zhi⁴, YANG Di⁴

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China;

2. Key Laboratory of Disaster Prevention and Structural Safety of Ministry of Education, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China;

3. Guangxi Key Laboratory of Disaster Prevention and Engineering Safety, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China;

4. China Railway Construction Group Co., Ltd, Beijing 100040, China)

Abstract: The pile-soil interaction in an expansive soil foundation is complicated, and the influence of the inundation swelling deformation on the torsional bearing characteristics of the pile foundation remains unknown. In this paper, the displacement governing equations for the pile shaft were proposed considering the load transfer method. The distribution of the vertical resistance of the shaft was calculated by the finite difference method considering the influence of the swelling deformation of the expansive soil on the shaft resistance and the boundary condition of the pile tip. A new nonlinear analytical method for the torsion of a single pile due to the inundation swelling deformation was proposed incorporating the boundary element method. The distribution law of the circumferential frictional resistance of piles was revealed and the effectiveness of the proposed method was verified by model tests. It was shown that the ground heave induced by the swelling of the expansive soil foundation would significantly reduce the torsional bearing capacity of the single pile. In addition, the safety is threatened because the conventional calculation method overestimates the ultimate torque of the pile and the loading stiffness of the pile-soil system. The torque of a single pile approximately decreases linearly along the pile

收稿日期: 2020-04-20; 修改日期: 2020-06-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(52068004, 51568006, 51978179); 广西自然科学基金项目(2018JJA160134);

广西重点研发计划项目(桂科 AB19245018)

通讯作者: 欧孝夺(1970—), 男(壮族), 广西人, 教授, 博士, 博导, 主要从事特殊土的特性研究 (E-mail: ouxiaoduo@163.com).

作者简介: 江 杰(1979—), 男, 湖北人, 研究员, 博士, 硕导, 主要从事桩基工程理论与应用研究 (E-mail: jie_jiang001@126.com);

王顺苇(1991—), 男, 河南人, 硕士生, 主要从事桩基工程理论研究 (E-mail: shunweiwang01@163.com);

王 智(1984—), 男, 陕西人, 高工, 硕士, 主要从事基础工程结构设计及项目管理 (E-mail: 932745433@qq.com);

杨 迪(1992—), 男, 河南人, 工程师, 学士, 主要从事基础工程建设 (E-mail: 447056767@qq.com).

shaft prior to the inundation swelling deformation. However, the torque of the pile shaft is close to that of the pile top and the torque of the pile shaft decreases rapidly in the “unslip section”. The length of the interface “slap section” increases and torsional force capacity of the single pile decreases with the increase of the swelling ratio.

Key words: pile foundations; torque load; theoretical analysis; model test; expansive soil

膨胀土在全球 40 多个国家均有分布, 范围十分广泛, 在我国主要分布在云南、广西、四川等 10 多个省份^[1]。其胀缩特性是造成地基上方建(构)筑物发生倾斜、变形、不均匀沉降的重要因素, 具有十分突出的工程问题^[2]。为了保证膨胀土地区建(构)筑物的安全, 实际工程中往往采用桩基础形式。大型广告牌、风力发电塔以及弯梁桥在不均匀水平力的作用下, 会对其桩基础产生扭矩^[3-7], 当竖向荷载较小时, 扭矩将会成为桩身承载力的控制性因素, 在设计中若忽略扭矩的作用, 可能会造成重大的工程损失^[8]。膨胀土浸水后会对桩基础产生轴向拉力作用^[1,9], 而研究表明轴向力的存在会使单桩扭矩承载力降低^[10-12], 因此有必要对膨胀土地基中的受扭单桩进行进一步的研究, 为工程设计提供参考。

国内外学者对膨胀土地区竖向和水平荷载作用下单桩的承载特性进行了相关研究^[13-19], 对于受扭单桩, Stoll^[20]在砂土中对钢管桩回填混凝土首次对单桩进行了扭矩加载试验, 得到了桩顶扭矩和扭转角的关系曲线, 为后续研究奠定了基础; Poulos^[21]基于弹性连续介质理论求解出了桩顶扭矩和扭转角的关系, 并在粘性土中进行了验证; Zhang 等^[22]利用力学的变分原理推导出了桩的控制微分方程, 通过迭代法求解出了桩顶扭矩和扭转角的关系, 并在砂土和黏土地基中进行了验证; 邹新军等^[4]结合平衡原理和剪切位移法求得了砂土中单桩受扭的弹塑性解; 赵明华等^[23]假设桩为弹性梁, 采用非线性弹簧模拟桩土间的相互作用关系, 建立了粉土地基中受扭单桩的简化计算模型; Basack 等^[24]采用边界元法求得砂土地基中单桩在扭矩作用下的数值解; Li 等^[25]利用现有的界面剪切试验建立荷载传递模型, 采用有限差分法, 得到单桩受扭的非线性计算方法。

综上所述: 目前国内外学者主要针对砂土、黏土和粉土地基中的受扭单桩进行了研究, 对于膨胀土地区受扭单桩的研究较少。膨胀土浸水后桩身轴力的存在, 使得常规的单桩受扭计算理论会过高的估计承载力, 偏于不安全。鉴于此, 本

文对膨胀土浸水后桩侧竖向摩阻力的分布模式进行了探讨, 在此基础上求出膨胀土地基浸水后受扭单桩的非线性解, 通过膨胀土地基中单桩模型试验, 对理论进行了验证, 并对浸水前后单桩扭转承载特性以及不同膨胀率的膨胀土浸水对基桩的受力和变形的影响进行了分析。

1 计算模型及假定

本文的分析基于以下假定:

1) 桩为线弹性等截面桩。

2) 定义被浸润的膨胀土层厚度为“膨胀影响深度”; 假设膨胀影响深度内的膨胀土隆起量随深度线性变化^[15], 膨胀影响深度以下的隆起量为 0, 计算公式如下:

$$w_s(z) = \begin{cases} w_{s0} - \frac{w_{s0}}{h_0}z, & 0 \leq z \leq h_0 \\ 0, & z > h_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $w_s(z)$ 为深度 z 处的膨胀土隆起量; h_0 为膨胀影响深度; w_{s0} 为膨胀的土地表膨胀量。

3) 膨胀土浸水会对桩身产生上拔力, 在桩身中性点(桩土相对位移为 0 处)以上对桩身作用竖直向上的摩阻力, 在中性点下对桩身作用竖直向下的摩阻力。因此可假设膨胀土浸水时的桩-土界面模型如图 1 所示, 浸水过程中桩-土界面竖向正、负摩阻力以及扭矩作用下的桩身环向摩阻力($s(z) \geq 0$ 段)均符合 Kraft 等^[26]提出的荷载传递函数形式。

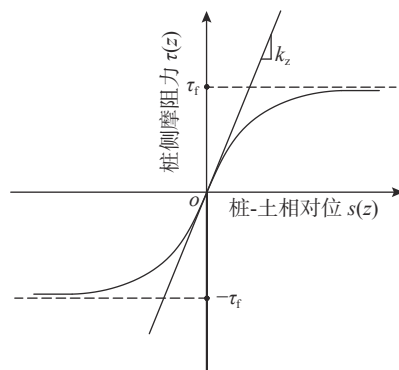


图 1 膨胀土浸水条件下桩-土界面模型
Fig. 1 Load-transfer model for pile-soil interaction under expansive soil swelling

$$\tau(z) = \begin{cases} \frac{G_s s(z)}{r_0 \ln\left(\frac{r_m/r_0 - \psi}{1 - \psi}\right)}, & s(z) \geq 0 \\ -\frac{G_s |s(z)|}{r_0 \ln\left(\frac{r_m/r_0 - \psi}{1 - \psi}\right)}, & s(z) < 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $s(z)$ 为桩-土相对位移 $s(z) = w(z) - w_s(z)$; $w_s(z)$ 为桩所处位置深度 z 处的膨胀土浸水后的隆起量; G_s 为土体小应变时的初始剪切模量; $\psi = \tau(z)R_f/\tau_f$, R_f 为应力-应变曲线拟合常数, 可取 0.9~1.0; τ_f 为桩侧极限摩阻力; r_0 为桩截面半径; r_m 为有效影响半径。

2 理论分析及推导

2.1 环向极限摩阻力的确定

浸水后对桩顶施加扭矩作用, 桩侧土体对桩身产生环向的摩阻力, 桩侧竖向及环向摩阻力共同作用于桩身。如图 2 所示, 采用边界元法将桩纵向离散为 n 个长度为 L/n 的单元, 第 i 单元的桩侧竖向和环向摩阻力分别为 $\tau_v(i)$ 和 $\tau_t(i)$, 假设两者共同作用下的桩侧合摩阻力 $\tau(i)$ 不大于极限摩阻力 $\tau_f(i)$, 可得到:

$$\tau(i) = \sqrt{[\tau_t(i)]^2 + [\tau_v(i)]^2} \leq \tau_f(i) \quad (3)$$

膨胀土浸水后, 在桩顶扭矩作用下的环向极限摩阻力为:

$$\tau_{tf}(i) = \sqrt{[\tau_f(i)]^2 - [\tau_v(i)]^2} \quad (4)$$

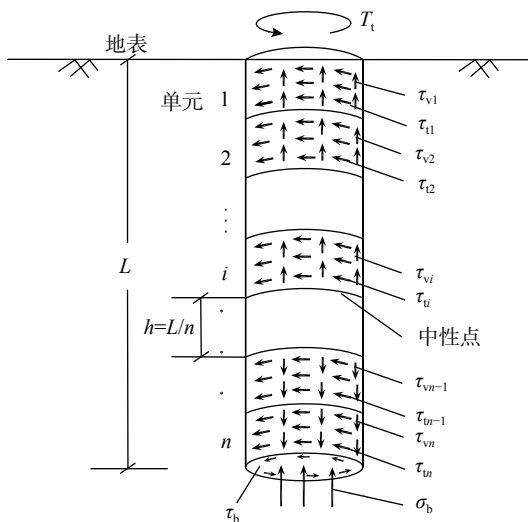


图 2 浸水后单桩边界元离散示意图

Fig. 2 Boundary element discretization of pile after immersion

式中: $\tau_f(i)$ 为第 i 单元的极限摩阻力; $\tau_{tf}(i)$ 为第 i 单元环向极限摩阻力。

由式 (4) 可知要想得到环向的极限摩阻力, 须先求出单桩浸水后的竖向摩阻力。

2.2 浸水作用下单桩竖向摩阻力 $\tau_v(i)$ 的求解

取深度 z 处的微小桩段 dz 进行分析, 在竖向荷载的作用下, 由静力平衡条件可得:

$$\frac{dP(z)}{dz} = -U_p \tau_v(z) \quad (5)$$

式中: U_p 为桩的周长; $P(z)$ 为桩身在深度 z 处的轴力; $\tau_v(z)$ 为深度 z 处桩侧竖向方向摩阻力。

桩身微单元的弹性压缩为:

$$dw(z) = -\frac{P(z)dz}{E_p A_p} \quad (6)$$

式中: $w(z)$ 为桩身竖向位移; E_p 和 A_p 分别为桩的弹性模量和横截面积。

联立式 (5) 和式 (6) 可以得到桩身控制方程:

$$\frac{d^2 w(z)}{dz^2} - \frac{U_p}{E_p A_p} \tau_v(z) = 0 \quad (7)$$

桩侧土体的切线刚度为:

$$k_v = \frac{U_p \tau_v(z)}{s_v(z)} \quad (8)$$

令 $\lambda = \sqrt{\frac{k_v}{E_p A_p}}$, 则桩身控制方程变为:

$$\frac{d^2 w(z)}{dz^2} - \lambda^2 (w(z) - w_s(z)) = 0 \quad (9)$$

桩顶和桩端边界如下。

对于桩顶, 有:

$$P(0) = 0 \quad (10)$$

对于桩端, 王年香等^[27]通过试验发现膨胀土浸水后, 桩端的上升量大于桩端土层的隆起量, 即桩端与桩端土脱开, 因此桩端边界条件可表示为:

$$P(L) = 0 \quad (11)$$

采用中心差分法将桩长离散成 n 个相等的单元, 并在桩顶和桩端各增加一个虚拟等分节点, 并代入桩端和桩顶边界条件对式 (9) 进行差分离散, 可以得到方程组:

$$K'_v \mathbf{w} = \mathbf{F}'_v \quad (12)$$

式中: $\mathbf{w}$ 为桩身节点竖向位移向量, $\mathbf{w} = \{w_0 \ w_1 \ \cdots \ w_i \ \cdots \ w_{n-1} \ w_n\}^T$; $\mathbf{F}'_v$ 为桩身节点竖向荷载向量, $\mathbf{F}'_v = \{-\lambda_0'^2 h^2 w_{s,0} \ -\lambda_1'^2 h^2 w_{s,1} \ \cdots \ -\lambda_i'^2 h^2 w_{s,i} \ \cdots \ -\lambda_{n-1}'^2 h^2 w_{s,n-1} \ -\lambda_n'^2 h^2 w_{s,n}\}^T$

$w_{s, n-1} - \lambda_n'^2 h^2 w_{s, n}\}^T$; K'_v 为桩身竖向刚度矩阵:

$$K'_v = \begin{bmatrix} A_0 & 2 & & & & \\ 1 & A_1 & 1 & & & \\ & \ddots & \ddots & \ddots & & \\ & & 1 & A_i & 1 & \\ & & & \ddots & \ddots & \ddots \\ & & & & 1 & A_{n-1} & 1 \\ & & & & & 2 & A_n \end{bmatrix}_{(n+1) \times (n+1)} \quad (13)$$

式中, $A_i = -(\lambda_i'^2 h^2 + 2)$ 。

对式 (12) 进行求解便可得到沿桩身竖向位移:

$$w = K_v'^{-1} F_v' \quad (14)$$

式 (14) 的求解过程如下: ① 假设沿桩身节点位移 $w=0$, 由桩侧土体自由位移场 $w_s(z)$ 求桩土相对位移 $s(z)=w(z)-w_s(z)$, 进而求出桩身节点切线刚度; ② 由式 (14) 求出沿桩身节点的位移 w^k ; ③ 用新求出的桩身节点位移 w^k 求出桩-土相对位移和桩侧土体的切线刚度。利用新的割线刚度求出新的桩身节点位移 w^{k+1} ; ④ 取 $|w^{k+1}-w^k|$ 作为迭代控制误差, 若误差大于限定值则重复②~④直至迭代误差小于限定值。

由以上数值解求出桩土相对位移, 结合式 (2) 即可求出桩身单元竖向摩阻力。

2.3 浸水作用下单桩受扭非线性计算

同样取深度 z 处的微小桩段 dz 进行分析, 在扭矩作用下, 由静力平衡条件可得:

$$\frac{dT(z)}{dz} = 0.5\pi\tau_t(z)D^2 \quad (15)$$

式中: $T(z)$ 为深度 z 处的扭矩; $\tau_t(z)$ 为深度 z 处桩侧环向摩阻力; D 为桩的直径。

由长度为 dz 的桩单元在扭矩作用下的变形条件可知:

$$\frac{d\theta(z)}{dz} = -\frac{T(z)}{J_p G_p} \quad (16)$$

式中: $\theta(z)$ 为深度 z 处的扭转角; G_p 为桩的剪切模量; J_p 为桩截面的极惯性矩。

桩身任意深度的扭转角可以表示为^[25]:

$$\theta(z) = \frac{2s_t(z)}{D} \quad (17)$$

式中, $s_t(z)$ 为深度 z 处桩的扭转位移。

联立式 (15)~式 (17) 可得到桩身扭转控制方程:

$$\frac{d^2\theta(z)}{dz^2} = \alpha^2\theta(z) \quad (18)$$

式中, $\alpha = \sqrt{\frac{k_\theta \pi D^3}{4G_p J_p}}$, 其中, k_θ 可以表示为:

$$k_\theta(z) = \frac{\tau_t(z)}{s_t(z)} \quad (19)$$

桩顶和桩端边界条件如下。

对于桩顶, 有:

$$T(0) = T_t \quad (20)$$

式中, T_t 为对桩顶施加的扭矩。

对于桩端, 因桩端的上升量大于桩端土体的隆起量而无压力^[27], 故桩端土体不会对其产生约束, 扭矩为 0, 边界条件为:

$$T(L) = 0 \quad (21)$$

为得到每个桩单元的桩侧环向摩阻力, 采用中心差分法将桩长离散成 n 个相等的单元, 并在桩顶和桩端各增加一个虚拟等分节点, 并代入桩端和桩顶边界条件对式 (18) 进行差分离散, 可以得到方程组:

$$K'_t \theta = T'_t \quad (22)$$

式中: θ 为桩身节点扭转角度向量, $\theta = \{\theta_0 \ \theta_1 \ \cdots \ \theta_i \ \cdots \ \theta_{n-1} \ \theta_n\}^T$; T'_t 为桩身节点扭转荷载向量, $T'_t = \{-2Th/(G_p J_p) \ \cdots \ 0 \ \cdots \ 0 \ \cdots \ 0 \ \cdots \ 0\}^T$; K'_t 为桩身扭转刚度矩阵:

$$K'_t = \begin{bmatrix} B_0 & 2 & & & & \\ 1 & B_1 & 1 & & & \\ & \ddots & \ddots & \ddots & & \\ & & 1 & B_i & 1 & \\ & & & \ddots & \ddots & \ddots \\ & & & & 1 & B_{n-1} & 1 \\ & & & & & 2 & B_n \end{bmatrix}_{(n+1) \times (n+1)} \quad (23)$$

式中, $B_i = -(\alpha_i^2 h^2 + 2)$ 。

对式 (12) 进行求解便可得到沿桩身扭转角为:

$$\theta = K_t'^{-1} T'_t \quad (24)$$

式 (24) 的求解过程如下: ① 假设沿桩身节点的扭转角 θ 为任意非零矩阵, 由式 (17) 求得深度 z 处的相对扭转位移 $s_t(z)$, 将 $s_t(z)$ 代入式 (2) 求出 $\tau_t(z)$, 由式 (4) 求出 $\tau_{tf}(z)$, 若 $\tau_t(z) \geq \tau_{tf}(z)$, 则取 $\tau_t(z) = \tau_{tf}(z)$, 由式 (9) 求出 $k_\theta(z)$, 进而得到 K'_t ; ② 由式 (24) 求出沿桩身节点的扭转角 θ^k ; ③ 用新求出的桩身节点扭转角 θ^k 求出桩身扭转刚度矩阵 $K_t'^k$;

利用新求出的桩身扭转刚度矩阵 K_t^k 求出新的桩身节点扭转角 θ^{k+1} ; ④ 取 $|\theta^{k+1} - \theta^k|$ 作为迭代控制误差, 若误差大于限定值则重复②~④直至迭代误差小于限定值。

3 方法验证与分析

通过试验分别对桩侧竖向摩阻力 $\tau_v(i)$ 和环向摩阻力 $\tau_t(i)$ 的求解进行验证, 在此基础上将浸水条件下单桩受扭的求解与本文的试验结果与进行对比分析。

3.1 试验及测量装置

采用自主研制的桩基加载装置, 对膨胀土地基中的单桩进行浸水前后的室内静载模型试验, 加载装置如图 3 所示。试验装置主要分为三个部分: 模型箱、加载装置和浸水装置。模型箱尺寸为 $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 。加载装置由加载架、滑轮和力臂组成。浸水装置由竖向浸水管和水桶组成, 模型箱底部填筑约 250 mm 厚的砂砾层, 浸水管插入砂砾层。通过水管将模型箱底部和水桶连接, 利用虹吸原理对水桶注水, 以保持水平面与土表面高程一致, 实现对膨胀土的全浸水膨胀。

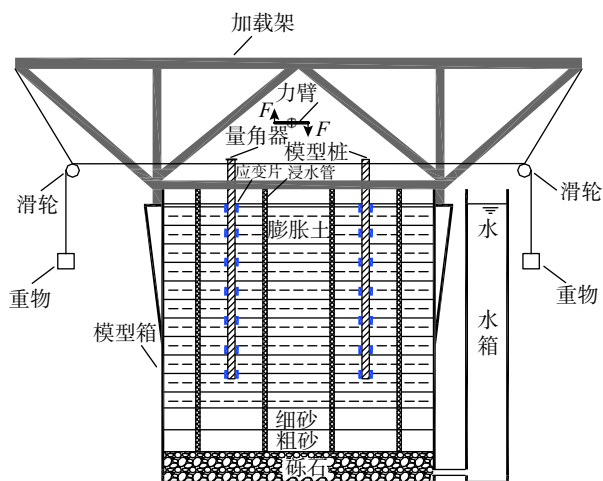


图 3 加载装置示意图

Fig. 3 Schematic of loading device

在膨胀土地基表面设置百分表测量地表隆起量, 通过固定于桩顶的量角器测量桩顶扭转角, 在桩顶设置一个长为 0.1 m 的力臂, 通过定滑轮对力臂施加水平力, 使其转化为扭矩, 两个定滑轮的摩擦系数 μ_1 和 μ_2 分别为 0.943 和 0.914 , 桩顶扭矩可通过下式确定:

$$T_t = 0.5(\mu_1 G_1 + \mu_2 G_2) l \cos \theta_t \quad (25)$$

式中: G_1 和 G_2 分别为两端重物的重量; θ_t 为测得

的桩顶扭转角, 为方便计量, 本试验采用水来代替重物。

通过应变片测量桩身切应变和轴向应变, 桩身扭矩和轴力分别由式 (25)、式 (26) 确定:

$$T' = G_p J_p \gamma / \rho \quad (26)$$

$$P' = \varepsilon E_p \quad (27)$$

式中: 桩身剪切模量 $G_p = E_p / (2(1 + \nu))$; 桩身泊松比 ν 取值为 0.3 ; γ 为桩身切应变; ρ 为应变片距中性轴的距离; E_p 为桩身弹性模量; ε 为桩身轴向应变。

3.2 模型桩

采用铝合金空心管制作单桩模型, 弹性模量 69.7 GPa , 长 800 mm , 埋入膨胀土 650 mm , 直径 25 mm , 壁厚 2 mm 。在模型桩内表面每隔 100 mm 设置一组测点, 每组测点设置一个 BF350-3AA 和 BHF350-3HA 型应变片分别测量桩身轴向应变和切应变, 最后一组应变片设置在桩端以上 5 mm 处, 共设 7 组测点, 通过 TST3822EN 静态应变测试仪采集应变。桩端采用尼龙塞进行粘贴封底, 待模型箱内土体填置 100 mm 之后将模型桩垂直插入土体, 土体填筑过程中不断测量模型桩与模型箱之间的距离, 对桩实时进行纠偏, 保持其竖直。

3.3 土体参数

试验用膨胀土取自广西南宁水牛研究所附近的灰白色膨胀土, 其自由膨胀率为 65.5% , 属于中等膨胀土, 基本物理力学性质如表 1 所示。土料经过烘干、粉碎, 制成初始含水量为 20% 的土样。土样采用人工夯实进行分层填筑, 每层控制夯实后的厚度为 100 mm , 填土总高度为 700 mm , 填筑土层干密度为 1.46 g/cm^3 。

表 1 膨胀土基本物理力学性质

Table 1 Physical and mechanical properties of expansive soil

状态	弹性模量/GPa	密度/(g/cm ³)	粘聚力/kPa	内摩擦角/(°)
浸水前	17.98	1.75	92.8	23.0
浸水后	6.16	1.89	51.9	22.7

3.4 试验方案

为了研究膨胀土浸水对单桩扭转承载特性的影响, 共设计 3 组试验, 第 1 组测量浸水后的桩身轴向应变; 第 2、3 组分别测量浸水前后, 不同的桩顶扭矩作用下的桩身切应变和桩顶扭转角, 具体如表 2 所示。

表 2 试验加载方案及测量数据
Table 2 Test loading scheme and measurement data

编号	土体状态	加载方式	测量数据
1	浸水	不加载	轴向应变
2	浸水	逐级施加扭矩	环向切应变、桩顶扭转角
3	未浸水	逐级施加扭矩	环向切应变、桩顶扭转角

试验采用分级的方式加载，每级加载增量为预计极限荷载的 1/10，当桩顶扭矩-扭转角曲线 ($T-\theta$ 曲线) 出现突变时加载结束。对于浸水前的模型桩，夯土结束后即可进行加载试验，对于浸水后的模型桩，浸水完成后即可进行加载试验。当百分表读数与应变仪数据趋于稳定后 48 h 内再无明显波动，则浸水试验完成。本次试验浸水历时 14 d，地表隆起 0.011 m。试验装置如图 4 所示。



图 4 模型桩加载试验装置
Fig. 4 Loading test device of model pile

3.5 试验结果与分析

1) 浸水后桩侧竖向摩阻力分布

通过第 1 组试验测得的桩身轴向应变求出桩身轴力，利用式 (5) 对桩身轴力数据进行处理得到桩身竖向摩阻力，图 5 为浸水完成后桩身竖向摩阻力分布图，图中竖向摩阻力向上为正，由图 5 可知，桩侧竖向摩阻力呈现出先增大再减小然后反向增大的特点。大约在桩深为 0.4 m 以上部分的膨胀土对桩产生向上的上拔力，摩阻力为正值；0.4 m 以下部分的膨胀土对桩作用向下的拉力，阻碍单桩的抬升，摩阻力为负值。即未施加桩顶扭矩时，中性点位置约在桩的中下部 0.4 m 处，与张大峰^[1]的结论相似，计算结果和试验数据相比最大误差为 2.8% 相差较小，验证了本文竖向摩阻力的计算方法。

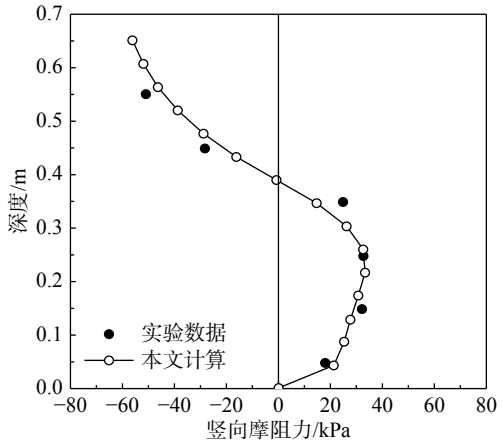


图 5 桩身竖向摩阻力分布
Fig. 5 Vertical frictional resistance distribution of pile shaft

2) 浸水后桩侧环向摩阻力分布

对桩顶施加扭矩之后，桩-土界面之间会产生环向相对位移，从而产生了环向摩阻力，为验证本文环向摩阻力计算的正确性，分别提取第 2 组试验中桩顶扭矩为 1.5 N·m、3.0 N·m、4.5 N·m、6.0 N·m 所对应的桩身切应变数据，并求出桩身扭矩，利用式 (15) 对桩身扭矩数据进行处理得到桩身环向摩阻力，计算结果与试验数据对比如图 6 所示，4 组数据与试验结果均比较接近，证明了环向摩阻力计算的正确性。

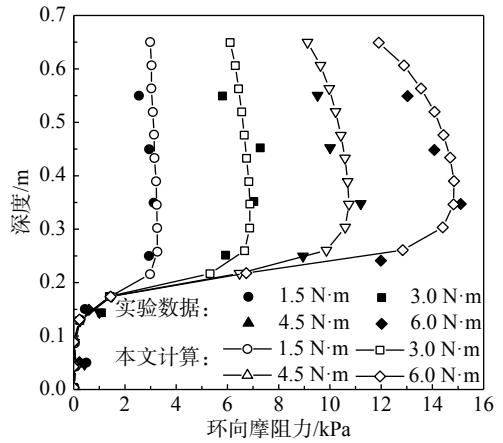


图 6 浸水后桩侧环向摩阻力分布
Fig. 6 Distribution of lateral circular friction after immersion

由图 6 可知：在 0 m~0.15 m 范围，由于桩土竖向相对位移较大，桩-土界面已经进入塑性阶段，导致桩侧环向摩阻力较小；在 0.15 m~0.25 m 深度范围，桩-土界面处于弹塑性状态，桩侧环向摩阻力快速增加；在 0.25 m 深度以下，当桩顶扭矩为 1.5 N·m 和 3.0 N·m 时，由于桩-土界面相对位移较小尚处于弹性状态，环向摩阻力几乎没有变化，当桩顶扭矩增加到 4.5 N·m 和 6 N·m

时, 桩-土界面渐渐进入塑性阶段, 由于土体的抗力作用越来越明显, 环向摩阻力也在增加, 呈现出非线性的变化。

3) 浸水前后荷载位移对比分析

对于浸水前单桩, 只需令竖向摩阻力为 0, 引入 Poulos^[21] 提出的桩端边界条件进行计算, 即可得到 $T-\theta$ 曲线。将本文计算得到的 $T-\theta$ 曲线与试验数据进行对比, 如图 7 所示, 当桩顶扭矩较大时本文计算方法和试验结果均较为吻合, 但当荷载较小时误差较大, 原因是试验过程中当桩顶扭矩较小时, 桩顶扭转角并没有明显的变化, 导致观测结果存在一定的误差。但整体来看本文计算得到的 $T-\theta$ 曲线和试验数据较为吻合, 证明本文提出的膨胀土地基浸水后单桩受扭非线性计算方法的正确性。此外还可看出, 浸水前后单桩的极限扭矩分别为 19.82 N·m 和 6.88 N·m, 即浸水后单桩的极限扭矩降低了 65%。

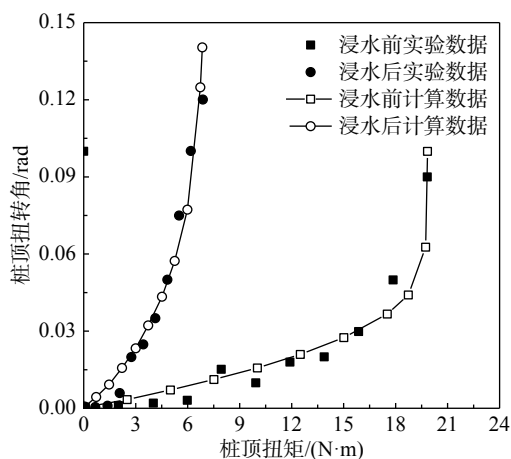


图 7 浸水前后 $T-\theta$ 曲线对比

Fig. 7 Comparison of $T-\theta$ curves before and after immersion

分别提取第 2、3 组试验中桩顶扭矩为 2 N·m 和 4 N·m 时桩身扭矩试验数据与计算数据进行对比, 如图 8 所示: 浸水前后的桩身扭矩分布计算结果与试验数据相比趋势均一致且误差较小, 浸水前桩身的扭矩近似线性分布, 与文献 [4] 趋势一致, 再次证明了本文计算方法的正确性。浸水后单桩的桩身扭矩分布呈现出非线性变化的规律, 在深度为 0 m~0.25 m 范围, 桩身扭矩变化幅度较小, 是由于在施加扭矩之前, 此深度范围内膨胀土的膨胀作用导致桩土竖向剪切位移较大, 桩-土界面已经发生了滑移 (简称“滑移段”), 从而使环向摩阻力的作用不明显, 导致桩身扭矩的增量较小; 在 0.25 m 深度以下, 桩身扭矩呈现出近似线性快速减小的特点, 究其原因, 桩土竖向相对

位移较小, 桩-土界面尚未发生滑移 (简称“未滑移段”), 环向摩阻力有较大的发挥空间, 土体作用的环向摩阻力使桩身扭矩快速减小。此外还可以看出当桩顶扭矩相同时, 浸水前后的桩身扭矩分布有着较大的差异, 在实际工程中可根据桩身扭矩分布特点进行合理配筋。

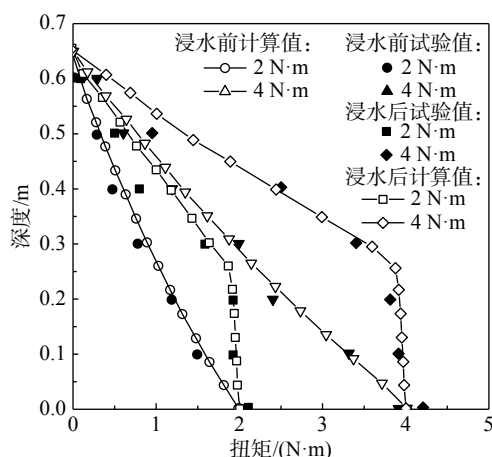


图 8 浸水前后桩身扭矩分布情况

Fig. 8 Distribution of pile torque before and after immersion

4) 膨胀率的影响

为研究不同膨胀率的膨胀土浸水后对单桩 $T-\theta$ 曲线的影响, 设不同膨胀率的膨胀土对应的地表隆起高度为 0.004 m~0.016 m, 由图 9 可知: 随着膨胀率的增加, 单桩的极限扭矩依次降低, 且降低的幅度越来越小; 当桩顶扭矩为定值时, 随着膨胀土膨胀率的增加, 桩顶扭转角增加的幅度越来越大, 桩-土体系的加载刚度降低的幅度越来越大。因此, 地表隆起会造成桩-土体系加载刚度和极限扭矩大幅度降低, 且膨胀土的膨胀率越高, 单桩抗扭能力和桩-土体系加载刚度降低的幅度越大。

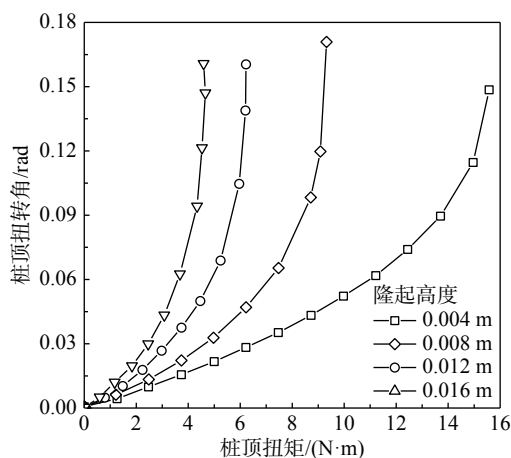


图 9 不同膨胀率的膨胀土对应的 $T-\theta$ 曲线

Fig. 9 $T-\theta$ curve corresponding to expansive soil with different expansion rates

图 10 为桩顶扭矩为 $4.5 \text{ N}\cdot\text{m}$ 时不同膨胀率的膨胀土对应的桩身扭矩分布情况, 假设不同膨胀率的膨胀土对应的地表隆起高度同上, 由图 10 可知, 膨胀率对桩身扭矩的分布有着重要的影响, 随着膨胀率的增加“滑移段”的长度也在增加。

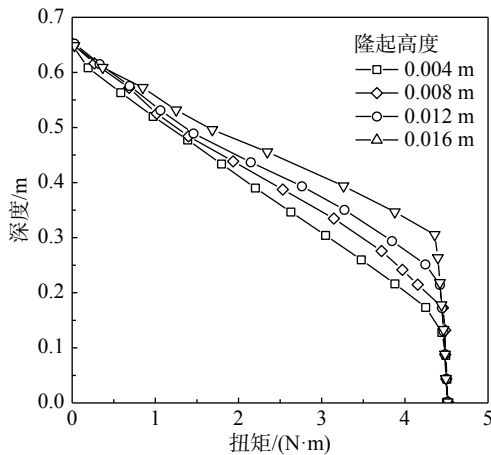


图 10 不同膨胀率的膨胀土对应的桩身扭矩

Fig. 10 Pile shaft torque corresponding to expansive soil with different expansion rates

4 结论

为探讨膨胀土地基中受扭单桩的承载特性, 考虑膨胀土浸水隆起对桩侧摩阻力及桩端边界条件的影响, 采用有限差分法和边界元法, 对桩身的内力进行了分析, 主要结论如下:

(1) 提出了膨胀土地基浸水后单桩桩侧竖向摩阻力的计算方法, 在此基础上, 结合边界元法提出了膨胀土地基浸水后单桩受扭的非线性分析方法, 并通过单桩模型试验进行验证, 结果较为吻合。

(2) 桩侧竖向摩阻力沿桩身先增大后减小, 随后反向增大, 中性点位于桩身的中下部; 桩侧环向摩阻力在桩身中上部接近于 0, 然后沿桩身快速增加, 达到峰值之后, 当桩-土界面处于弹性状态时趋于稳定, 处于塑性状态时沿桩身缓慢减小。

(3) 常规的计算方法高估了基桩的极限扭矩和桩-土体系加载刚度, 对于浸水后的膨胀土地基并不适用, 实际工程中应考虑地表隆起造成的单桩极限扭矩和桩-土体系加载刚度的降低。

(4) 在桩顶扭矩的作用下, 浸水前后单桩的桩身扭矩分布规律有着很大的差异, 浸水前单桩的桩身扭矩沿桩身近似线性减小, 浸水后在“滑移段”桩身扭矩变化较小, “未滑移段”转身扭矩

近似线性减小。可根据此特点对膨胀土地区受扭单桩进行合理配筋。

(5) 膨胀土的膨胀率会对单桩承载力和桩身扭矩产生较大的影响, 随着膨胀率的增加, 单桩的抗扭能力明显降低, “滑移段”的长度也在增加。

(6) 本文采用有限单元法对膨胀土地基中的受扭单桩进行了分析, 由于暂无实测资料, 采用室内模型试验进行了验证, 并对均质地层中桩身受力情况进行了分析。

参考文献:

- [1] 张大峰, 杨军, 李连友, 等. 考虑膨胀土地基膨胀率和刚度沿深度变化的桩-土共同作用解析解[J]. 工程力学, 2016, 33(12): 86—93.
Zhang Dafeng, Yang Jun, Li Lianyou, et al. Analytical solutions of pile-soil interaction in expansive soil foundation with expansion rate and stiffness variation along the depth [J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(12): 86—93. (in Chinese)
- [2] Yenes M, Nespereira J, Blanco J A, et al. Shallow foundation on expansive soils: A case study of the EI Viso Geotechnical Unit, Salamanca, Spain [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2010, 71(1): 51—59.
- [3] 闫启方, 刘林超. 基于多孔介质理论的饱和土中单桩的扭转复刚度研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(9): 1460—1463.
Yan Qifang, Liu Linchao. Torsional complex stiffness of single pile in saturated soil based on theory of porous medium [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(9): 1460—1463. (in Chinese)
- [4] 邹新军, 徐洞斌, 王亚雄, 等. 考虑地基土剪切模量非线性分布的基桩受扭分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(6): 1267—1275.
Zou Xinjun, Xu Dongbin, Wang Yaxiong, et al. Elastic-plastic torsional behavior of single pile in double-layered non-homogeneous subsoil [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(6): 1267—1275. (in Chinese)
- [5] 李焱, 唐友刚, 朱强, 等. 考虑系缆拉伸-弯曲-扭转变形的浮式风力机动力响应研究[J]. 工程力学, 2018, 35(12): 229—239.
Li Yan, Tang Yougang, Zhu Qiang, et al. Study on dynamic response of floating offshore wind turbine based on stretching-bending-torsion coupled nonlinear mooring loads [J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(12): 229—239. (in Chinese)
- [6] 徐玉野, 何叶, 王全凤. 压弯剪扭作用下异形柱的抗扭性能研究[J]. 工程力学, 2014, 31(6): 101—109, 116.
Xu Yuye, He Ye, Wang Quanfeng. Study on the torsion

- performances of concrete specially shaped columns under the actions of compression, bending, shear and torsion [J]. *Engineering Mechanics*, 2014, 31(6): 101 — 109, 116. (in Chinese)
- [7] 何晓宇, 李宏男. 地震与波浪荷载作用下偏心海洋平台扭转耦联参数影响分析[J]. *工程力学*, 2009, 26(12): 222 — 228, 234.
He Xiaoyu, Li Hongnan. Torsionally coupled dynamic analysis of asymmetric offshore platform subjected to wave and earthquake loadings [J]. *Engineering Mechanics*, 2009, 26(12): 222 — 228, 234. (in Chinese)
- [8] Vickery B J. Wind effects on building and structures-critical unsolved problems [C]// *Proceeding of IAHR/IUTAM Practical Experiences with Flow-induced Vibrations Symposium*. Karlsruhe : Springer-Verlag, 1979: 823 — 828.
- [9] Williams A A B, Donaldson G. Building on expansive soils in South Africa [C]// *Proceedings of 4th International Conference Expansive Soils*. Denver, Colorado, 1980(2): 834 — 838.
- [10] 邹新军, 王亚雄, 徐洞斌. Gibson地基中V-T组合受荷桩承载力分析[J]. *工程力学*, 2015, 32(8): 149 — 155.
Zou Xinjun, Wang Yaxiong, Xu Dongbin. Bearing capacity analysis of piles under V-T combined loading in Gibson subsoil [J]. *Engineering Mechanics*, 2015, 32(8): 149 — 155. (in Chinese)
- [11] Georgiadis M, Safflekou S. Piles under axial and torsional loads [J]. *Computers and Geotechnics*, 1990, 9(4): 291 — 305.
- [12] Zou X J, Du H T, Zhou M, et al. Analysis of a single pile under vertical and torsional combined loads in two-layered nonhomogeneous soil [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2019, 19(6): 040190541-1 — 040190541-15.
- [13] Soundara B, Robinson R G. Hyperbolic model to evaluate uplift force on pile in expansive soils [J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2017, 21(3): 746 — 751.
- [14] Liu Y L, Vanapalli S K. Load displacement analysis of a single pile in an unsaturated expansive soil [J]. *Computers and Geotechnics*, 2019, 106(1): 83 — 98.
- [15] 范臻辉. 膨胀土地基胀缩特性及桩-土相互作用研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2007.
Fan Zhenhui. Research on swelling-shrinking characteristic and pile-soil interaction of expansive soil foundation [D]. Changsha: Central South University, 2007. (in Chinese)
- [16] 肖宏彬, 阳生茂, 易锦, 等. 浸水与未浸水膨胀土 p - y 曲线的比较分析[J]. *公路工程*, 2015, 40(4): 1 — 5.
Xiao Hongbin, Yang Shengmao, Yi Jin, et al. Comparative analysis of p - y curves in waterlogged and not waterlogged expansive soil [J]. *Highway Engineering*, 2015, 40(4): 1 — 5. (in Chinese)
- [17] Poulos H G, Davis E H. Pile foundation analysis and design [M]. New York: John Wiley & Sons, 1980.
- [18] Fan Z H, Wang Y H, Xiao H B, et al. Analytical method of load-transfer of single pile under expansive soil swelling [J]. *Journal of Central South University of Technology*, 2007, 14(4): 575 — 579.
- [19] Xiao H B, Zhang C S, Wang Y H, et al. Pile-soil interaction in expansive soil foundation: Analytical solution and numerical simulation [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2011, 11(3): 159 — 166.
- [20] Stoll U W. Torque shear test on cylindrical friction piles [J]. *Civil Engineering*, 1972, 42(4): 63 — 64.
- [21] Poulos H G. Torsional response of piles [J]. *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 1975, 101(10): 1019 — 1035.
- [22] Zhang L M. Nonlinear analysis of torsionally loaded piles in atwo-layer soil profile [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2010, 10(2): 65 — 73.
- [23] 赵明华, 刘湘宁, 杨超炜, 等. 基于非线性规划法的单桩受扭研究[J]. *公路交通科技*, 2018, 35(5): 49 — 56.
Zhao Minghua, Liu Xiangning, Yang Chao-wei, et al. Study on single pile subjected to torsion based on nonlinear programming method [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2018, 35(5): 49 — 56. (in Chinese)
- [24] Basack S, Sen S. Numerical solution of single piles subjected to pure torsion [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2014, 140(1): 74 — 90.
- [25] Li Q, Armin W S. Simulation of torsionally loaded deep foundations considering state-dependent load transfer [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2018, 144(8): 040180531-1 — 040180531-14.
- [26] Kraft L M, Ray R P, Kagawa T. Theoretical t - z curves [J]. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 1981, 107(11): 1543 — 1561.
- [27] 王年香, 顾荣伟, 章为民, 等. 膨胀土中单桩性状的模型试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2008, 30(1): 56 — 60.
Wang Niangxiang, Gu Rongwei, Zhang Weimin, et al. Model tests on behaviour of single pile in expansive soil [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, 30(1): 56 — 60. (in Chinese)