



水平循环荷载作用下群桩基础 累积变形三维数值模拟

王多银^{1,2}, 李国洋¹, 王丽¹, 段伦良^{1,2}, 唐选海¹, 吴穗庆¹, 杜文力¹

(1. 重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074; 2. 国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074)

摘要: 为进一步研究群桩基础水平累积变形特性, 以及桩体自身因素、荷载因素、桩周土体因素等影响下的变化规律, 结合 USDFLD 子程序的实现过程与 ABAQUS 三维建模过程, 采用有限元计算结果对群桩累积变形特性进行研究。通过改变桩距、桩数、荷载入射角度、加载频率、土体初始弹性模量、桩-土界面摩擦系数等参数, 进一步对群桩水平累积变形特性, 及其在桩体自身因素、荷载因素、桩周土体因素等影响下的变化规律进行研究。数值模拟中经常忽略桩周土体弱化对群桩基础累积变形特性的影响, 因此对如何在数值模型中实现土体软化也进行了研究。最终得到群桩水平累积变形特性, 以及在各种影响因素下的变化规律, 如在桩体自身因素的影响下, 群桩承台水平累积变形随桩距与桩数的增加不断减小, 荷载-位移滞回圈随桩数的减少越饱满, 土体非线性越明显等变化规律。

关键词: 群桩基础; 水平循环荷载; 累积变形; 三维数值

中图分类号: U65

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)09-0048-09

Three-dimensional numerical simulation of cumulative deformation of pile group foundation under horizontal cyclic loading

WANG Duoyin^{1,2}, LI Guoyang¹, WANG Li¹, DUAN Lunliang^{1,2}, TANG Xuanhai¹, WU Suiqing¹, DU Wenli¹

(1. Hehai College of Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. National Technical Research Center for Inland Waterway Regulation Engineering, Chongqing 400074, China)

Abstract: To further study the horizontal cumulative deformation characteristics of pile group foundation, as well as the variation patterns under the influence of factors such as the pile itself, load factors and soil around piles, this paper combines the implementation process of USDFLD subroutine and ABAQUS three-dimensional modeling process to study the cumulative deformation characteristics of pile groups using finite element calculation results. By changing parameters such as pile distance, pile number, load incidence angle, loading frequency, initial elastic modulus of soil, pile-soil interface friction coefficient and other parameters, the horizontal cumulative deformation characteristics of pile groups are further studied, and the variation rules under the influence of factors such as pile itself, load factor and soil around pile. The effect of soil weakening around piles on the cumulative deformation characteristics of pile group foundation is often ignored in numerical simulation. Therefore, this article also studies how to achieve soil softening in numerical model. Finally, the horizontal cumulative deformation characteristics of pile groups and the variation rules under various influencing factors are obtained. For example, under the influence of pile body itself, the horizontal cumulative deformation of pile caps decreases with the increase of pile distance and pile number, the load-displacement hystericity ring becomes fuller with the decrease of pile number, and the soil nonlinearity becomes more obvious.

Keywords: pile group foundation; horizontal cyclic load; cumulative deformation; three-dimensional numerical

收稿日期: 2023-11-04

作者简介: 王多银 (1965—), 男, 硕士, 教授、博导, 研究方向为港航工程等领域结构与介质相互作用等。

近年来,我国海上工程普遍采用高承台群桩作为基础形式,但长期循环荷载^[1]导致海洋黏土软化,桩基础产生累积变形,增加倾覆、倒塌等事故风险,降低了服役寿命^[2-4]。因此,研究并掌握群桩基础在海上复杂环境中的动力特性,对近海工程设计及稳定性评价具有重大指导意义。

目前,反映水平循环荷载作用下近海群桩基础的破坏模式还未建立。关于群桩基础力学响应的研究多集中于静力荷载下的承载特性,而对动力荷载作用下桩基的累积变形特性研究略少^[5]。为保证近海工程群桩基础在长期水平循环荷载作用下的安全性,有必要对水平循环荷载下群桩基础的力学响应及性状开展研究^[6]。

为了研究群桩复杂的动力特性,试验是最直观的手段,其重点主要集中在桩基刚度退化、桩-土-桩间黏结力改变、桩侧摩阻力退化、摩阻力系数变化等方面。现阶段针对桩基特性开展的试验主要包括现场试验^[7]、离心模型试验、1g模型试验^[8],值得注意的是,张宇亭^[9]和张伟等^[10]成功开展了此类现场试验,提出群桩基础在水平循环荷载作用下的受力特性,以及群桩效应与桩间距的相关性,现场试验数据真实可靠,反映桩基循环加载特性,并可验证模型试验准确性与数值分析可行性。然而,现场试验成本高、周期长、重复性差,受场地条件影响大,因此应用较少。目前现场试验中的循环次数有限,无法模拟桩基础长期循环荷载作用,限制其应用发展。

与试验研究相比,数值分析成本较低、可重复性更强,更直观地反映水平循环荷载下群桩受力变形的分布情况。随着有限元、离散元等软件的开发进程加快,基于理论研究对水平循环荷载下的群桩桩-土相互作用展开大量数值模拟,Zhang等^[11]采用三维弹塑性有限元软件模拟12桩群桩基础的动力响应,并基于弱化理论,在非线弯矩关系中考虑轴向力的基础上提出一种新的钢筋混凝土梁理论;Küçükarslan等^[12]基于混合边界元理论对群桩在横向循环荷载下的受力变形性能模拟与分析,研究1×2、2×3、3×3三组不同布置形式的群桩动态响应;韩铭哲^[13]以软土地区为研究背景,通过

ABAQUS建模分析水平循环荷载下群桩桩-土体系相互作用机理;邢磊等^[14]通过ABAQUS二次开发引入刚度衰减模型,实现桩周土体的循环弱化,依托三峡某货运码头研究群桩基础桩顶及桩身侧向累积位移发展规律。

本文通过控制荷载和桩距、桩数等变量条件,在相同的循环次数 $N=5\ 000$ 前提下,利用ABAQUS有限元分析软件,建立饱和黏土中群桩基础数值计算模型,采用Fortran语言将土体刚度衰减模型通过USDFLD子程序嵌入分析模型,并引入土体刚度衰减模型,模拟水平循环荷载下群桩的动态响应,得到群桩相应的受力变形规律及响应机理,有助于未来近海工程群桩基础的设计与施工。

1 模型建立

1.1 ABAQUS用户子程序及二次开发

本文主要研究水平循环荷载下群桩累积变形特性,涉及到土体刚度衰减问题,因此可利用USDFLD子程序定义土体弹性模量为场变量的函数,实现饱和黏土刚度弱化。

使用USDFLD子程序时,将从材料或时间点获取的数据设为场变量,使材料属性与场变量相关联,通过更新场变量的值改变材料参数。如图1所示,分析模型中的主程序读取到USDFLD子程序获得的第 N 个增量步的场变量值后,将其进行插值处理,根据土体初始弹性模量 E_0 计算得到第 N 个增量步对应的土体弹性模量 E_n ,然后利用新的 E_n 计算出新的应变 ε_n 。在 $N+1$ 个增量步开始时,ABAQUS再次调用USDFLD子程序,以此循环计算出 E_{n+1} 与 ε_{n+1} 。

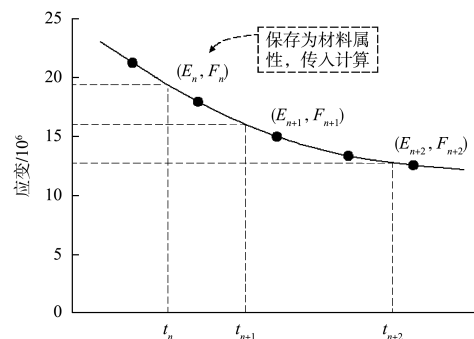


图1 场变量更新过程

调用 USDFLD 子程序时需要在主程序中声明 User Defined Field 使子程序发挥作用。通过调用应用程序 GETVRM 计算得到材料点应力、应变等数据,并通过定义状态变量传递数据,以实现场变量的更新。

相关研究表明在循环荷载作用下土体呈现出刚度衰减的特性,Idriss 等^[15]循环三轴试验提出软化指数的概念,建立软化指数与循环加载次数的表达式,研究发现它们之间存在指数函数关系。程星磊等^[16]在 Idriss 的研究基础上,进一步考虑初始偏应力的影响,研究软化系数与初始静偏应力水平以及循环偏应力水平的关系。如图 2 所示,在循环荷载作用下,土体软化特性通常表现为应力-应变滞回曲线的割线模量随循环次数的增加逐渐减小。

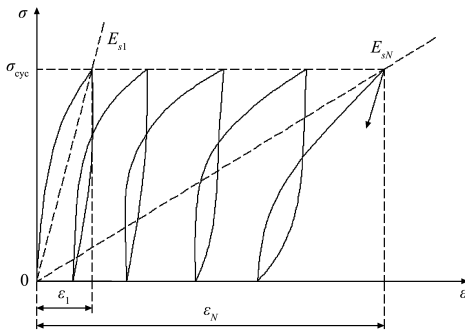


图 2 土体割线模量衰减

基于以上研究,程星磊利用循环加载、卸载时的卸载曲线割线模量随循环加载次数的衰减来描述黏土的软化特性,引入 Idriss 的软化指数关系,定义第 N 次循环后的割线模量与第 1 次循环后的割线模量为循环软化系数 ζ ,近似拟合出 ζ 随 N 的变化关系:

$$\zeta = N^{-t} \quad (1)$$

式中: ζ 为循环软化系数, N 为循环加载次数, t 为软化参数。

通过初始静偏应力与循环偏应力共同作用下的循环动三轴试验,发现软化参数受应力水平的影响。为了得出软化参数与应力水平的关系,引入循环应力参数 S 表征循环应力水平,可表达为:

$$S = \frac{\tau_{8,cy}(2\tau_{8,f} - \tau_{8,a})}{2\tau_{8,f}^2} \quad (2)$$

式中: S 为循环应力参数; $\tau_{8,a}$ 为土样初始八面体静剪应力; $\tau_{8,cy}$ 为土样循环八面体剪应力; $\tau_{8,f}$ 为

土样破坏时峰值八面体剪应力; $\tau_{8,a}/\tau_{8,f}$ 为土样八面体静剪应力比; $\tau_{8,cy}/\tau_{8,f}$ 为土样八面体循环剪应力比; 其中八面体静剪应力比 $\tau_{8,a}/\tau_{8,f}$ 与八面体循环剪应力比 $\tau_{8,cy}/\tau_{8,f}$ 取值及两者之和均小于 1,因此循环应力参数 S 的取值范围为 0~1。

程星磊对试验结果进行拟合时发现 t 与 S 之间基本呈现相同的单调递增关系,用线性函数表示为:

$$t = 0.3353S \quad (3)$$

使用经验公式分析水平循环荷载条件下群桩基础累积变形特性,建立循环加载 N 次时土体弹性模量与加载 1 次时土体弹性模量的关系,设土体初始弹性模量为 E_0 ,则循环加载 N 次时土体弹性模量 E_N 为:

$$E_N = \zeta E_0 \quad (4)$$

式中: E_N 为循环加载 N 次时土体弹性模量; E_0 为循环加载 1 次时土体初始弹性模量。

由式(1)~(3)可得循环软化参数为:

$$\zeta = N^{-0.3353 \frac{\tau_{8,cy}}{\tau_{8,f}} \left(1 - 0.5 \frac{\tau_{8,a}}{\tau_{8,f}}\right)} \quad (5)$$

将上述刚度衰减模型通过 USDFLD 子程序嵌入群桩分析模型,实现土体刚度随循环加载的衰减,得到土体弱化后的塑性变形,进而可对水平循环荷载作用下的群桩侧向累积变形进行分析。

1.2 群桩基础的三维有限元模型

本次数值模拟中土体选用 ABAQUS 内置的 Mohr-coolomb 弹塑性本构模型。一方面 Mohr-coolomb 弹塑性模型形式清晰、物理意义明确、参数简单易测以及可靠性高;另一方面可反映土体抗压强度不同的 S-D(strength difference effect)效应及其对正应力的敏感性,因此被广泛应用于岩土工程中。ABAQUS 中 Mohr-coolomb 模型通常采用剪切破坏准则作为屈服准则,其屈服面函数为:

$$F = R_{mc}q - p \tan \varphi - c = 0 \quad (6)$$

其中 $R_{mc}(\Theta, \varphi)$ 为偏应力系数,控制屈服面在 π 平面上的形状,按照下式计算:

$$R_{mc} = \frac{1}{\sqrt{3} \cos \varphi} \sin \left(\Theta + \frac{\pi}{3} \right) + \frac{1}{3} \cos \left(\Theta + \frac{\pi}{3} \right) \tan \varphi \quad (7)$$

$$\cos(3\Theta) = \frac{J^3}{q^3} \quad (8)$$

式中: φ 为 $q-p$ 平面 Mohr-coolomb 屈服面的倾斜角, 称为材料的摩擦角, 取值范围为 $0^\circ \sim 90^\circ$; c 为材料黏聚力; p 为平均主应力; q 为偏应力; Θ 为极偏角; J 为第三偏应力不变量。

在三维数值模拟中通过室内土工试验获取地基土的物理力学参数, 对于 ABAQUS 中的 Mohr-coolomb 模型需要设置弹性模量 E 、泊松比 μ 、内摩擦角 φ 、剪胀角 ψ 、黏聚力 c 等参数。模型中地基土为饱和

黏土, 根据室内土工试验结果设置模型参数为密度 $\rho=1.73 \text{ t/m}^3$ 、 $\mu=0.3$ 、 $E=9 \text{ MPa}$ 、 $c=15.6 \text{ kPa}$ 、 $\varphi=14.6^\circ$, 根据孔位学等^[17]对土体材料剪胀角在非关联流动法则下的探讨结果, 取剪胀角 $\psi=\varphi/2=7.3^\circ$ 。

模型中桩基与承台材料的强度远大于土体强度, 因此选用线弹性模型模拟桩体与承台, 其参数设置见表 1。

表 1 模型中土体与桩基参数

材料	$\rho/(\text{t}\cdot\text{m}^{-3})$	E/MPa	μ	$\varphi/(^\circ)$	c/kPa	$\psi/(^\circ)$
饱和黏土	1.73	9	0.3	14.6	15.6	7.3
桩基	2.70	7.1×10^4	0.2	-	-	-
承台	2.40	7.1×10^4	0.2	-	-	-

为了消除边界效应对数值模拟中群桩桩-土体系的影响, 几何模型采用大尺寸模拟半无限空间体, 整个土体模型采用 $67.5 \text{ m} \times 60 \text{ m} \times 40 \text{ m}$ 的长方体, 桩径 $D=1.25 \text{ m}$, 桩长 $L=45.75 \text{ m}$, 埋深 $H=35 \text{ m}$ 。土体单元、桩体单元、承台单元均采用八节点线性六面体缩减积分单元, 在计算过程中可有效控制沙漏现象, 从而减小单元扭曲变形对计算结果的影响。为保证计算精度, 土体单元按照单精度方法进行布种, 采用扫掠的方式划分网格。其中土体模型共划分 5.069 6 万个单元, 群桩中单根桩基础共划分 372 个单元, 见图 3。

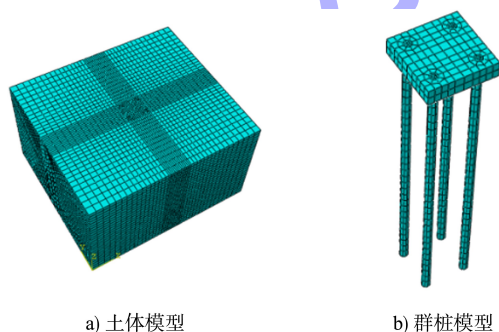


图 3 数值模型网格划分

依据模型试验实际情况, 对土体侧向边界施加水平向约束, 对土体底部边界施加全约束, 保证土体在受荷时无侧向位移。进行地应力平衡时在桩土接触界面施加垂直于触面的约束。

在 ABAQUS 中通过周期性幅值曲线来定义水

平循环荷载, 根据模型试验中水平循环加载系统输出的荷载值, 拟合得到水平循环荷载 H 为:

$$H = \frac{H_c}{2} + \frac{H_c}{2} \sin(\omega t) \quad (9)$$

式中: H_c 为水平循环荷载幅值; ω 为循环荷载频率; t 为循环荷载加载时间。

对于接触面的设置, 将承台底面与桩基顶面设置为绑定接触, 桩土接触面采用主-从接触面算法, 刚度较大的桩基表面为主控面, 刚度较小的土体表面为从属面, 接触面法向行为选择硬接触, 切向行为选择摩尔-库仑罚函数接触, 摩擦系数为 0.2。

分析步主要包括 3 个步骤: 第 1 步为地应力分析步, 在模型中设置初始地应力场, 使得该预应力场为重力沿深度呈线性分布, 其中横向系数 $K=1-\sin\varphi$, 本次数值计算取 $K=0.74$, 其他参数如应力量级 1 取 0, 纵坐标 1 为 0, 应力量级 2 取 68 000, 纵坐标 2 取 -40; 第 2 步为施加水平静力分析步(按照施加的水平循环荷载形式); 第 3 步为施加等幅值正弦循环荷载分析步。

2 群桩基础累积变形特性影响因素分析

2.1 桩距的影响

以 2×2 群桩的水平循环加载模型试验作为参考, 利用 ABAQUS 建立不同桩距下的群桩三维模

型, 见图4。以此探讨桩距对群桩水平累积变形的影响, 并与模型试验结果进行对比。

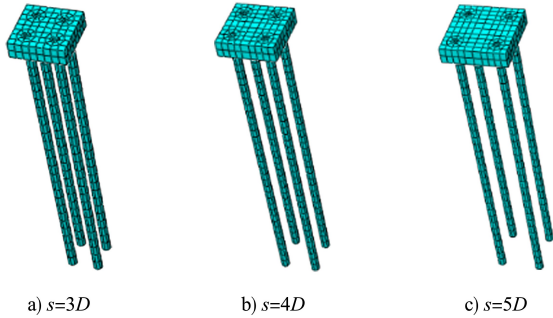
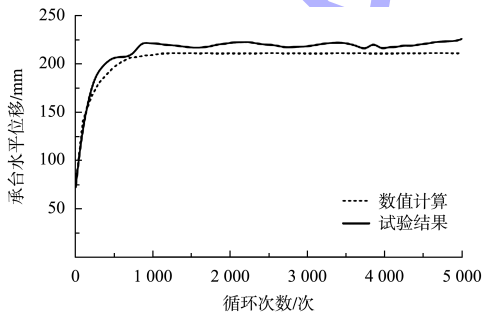
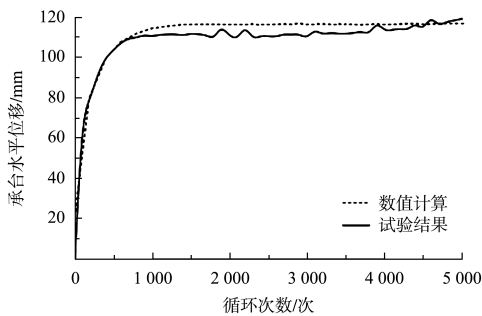


图4 不同桩距群桩模型

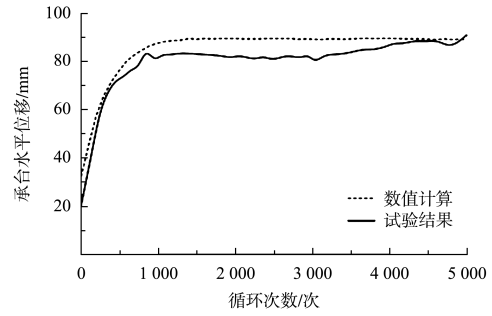
数值计算与模型试验结果对比见图5。数值计算结果显示, 桩距对群桩承台水平累积变形影响显著。不同桩距下, 群桩承台水平变形在加载初期快速累积, 后期速率逐渐变缓, 最终趋于稳定。随着桩距增大, 群桩承台水平累积变形逐渐减小, 减小幅度逐渐降低。数值计算结果与模型试验结果稍有差异, 原因是模型试验中土体强度不均匀, 而数值模型默认土体强度分布均匀, 但整体趋势基本一致。因此, 本次数值计算结果较为精确, 能够准确模拟水平循环荷载下饱和黏土中群桩基础的累积变形特性。



a) $s=3D$



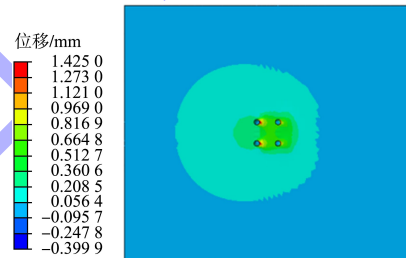
b) $s=4D$



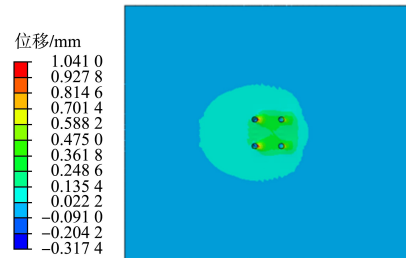
c) $s=5D$

图5 承台水平累积变形的模型试验与数值计算结果对比

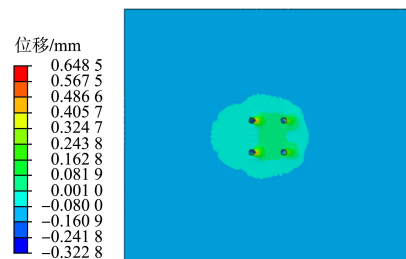
$N=1\ 000$ 时不同桩距下群桩基础桩侧土体位移云图见图6。显然, $s=3D$ 时桩侧土体受到的扰动明显大于 $s=4D$ 与 $s=5D$, 说明随着桩距的增大桩侧土体受扰动区域不断减小, 且桩与桩之间的相互影响也逐渐降低, 证明群桩效应的影响随桩距的增大不断减弱。



a) $s=3D$



b) $s=4D$



c) $s=5D$

图6 $N=1\ 000$ 时不同桩距下群桩基础桩侧土体位移云图

2.2 桩数的影响

如图 7 所示, 以 $s=3D$ 时的双桩、四桩、九桩为研究对象, 对群桩基础的累积变形特性进行分析并得出相应结论。不同桩数下承台荷载-位移曲线随循环加载的变化规律见图 8, 表明可模拟水平循环荷载下群桩基础动力特性的滞回性、非线性与变形累积特性。研究发现承台水平累积变形在前几次加载中的变化比在后期加载中的变化更明显, 特别是第 1 次加载中承台水平累积变形的变化尤为突出, 说明前几个循环加载周期对承台水平累积变形的贡献很大。其次, 可以看到九桩时的滞回圈最扁平, 承台荷载-位移曲线表现出的非线性较弱, 双桩时的滞回圈最饱满, 承台荷载-位移曲线呈现出强烈的非线性。说明桩数越少, 承台滞回圈越饱满, 土体非线性越明显, 桩侧土体在水平循环荷载下的塑性应变不断累积, 发生软化, 饱和黏土地基中群桩基础表现出循环动力特性。相同受力条件下, 随桩数增加承台水平累积变形逐渐减小。

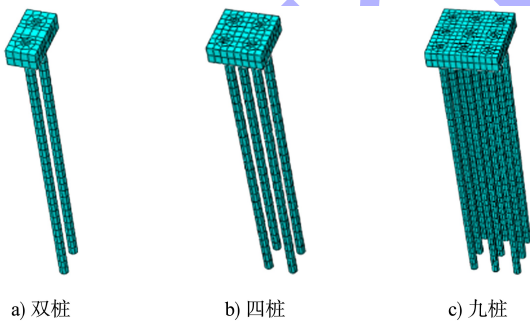
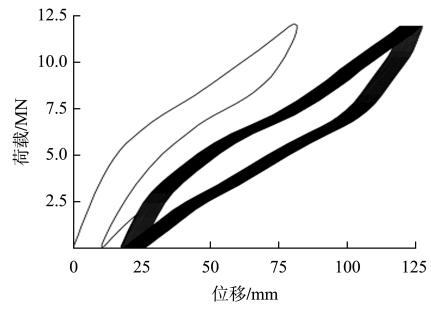
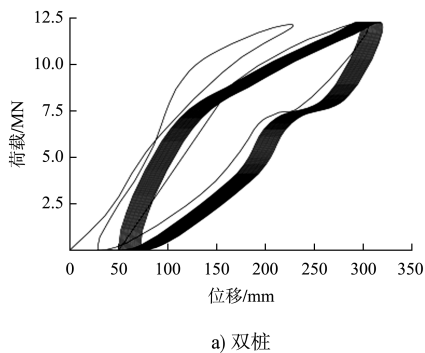
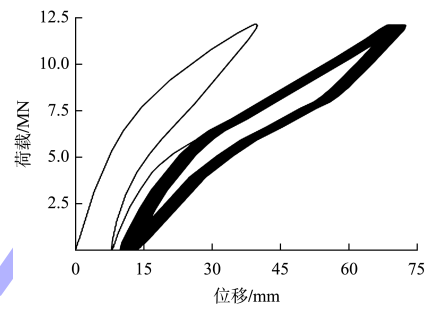


图 7 不同桩数群桩模型



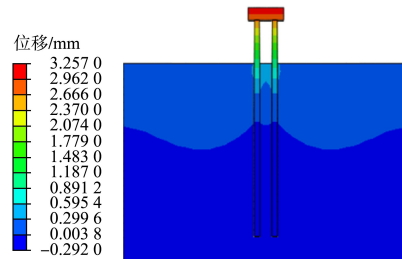
b) 四桩



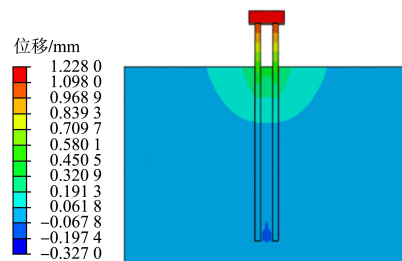
c) 九桩

图 8 不同桩数下的承台荷载-位移曲线

不同桩数下群桩基础桩-土体系位移云图见图 9, 由图可知随桩数增加承台水平累积变形逐渐减小, 桩侧土体最大位移不断减小。相反, 随桩数的增加桩侧土体受扰动的区域不断增大, 表明随着桩数的增加群桩效应的影响更为显著。由此可见, 桩数对群桩效应的影响与桩距相反, 群桩效应随桩数的增大不断加强, 随桩距的增大不断减弱, 说明桩数对桩与桩之间的相互作用起到了负面影响。



a) 双桩



b) 四桩

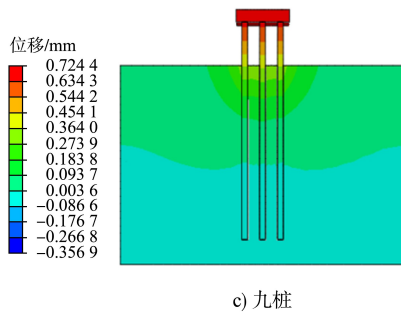


图 9 不同桩数下群桩基础桩-土体系位移云图

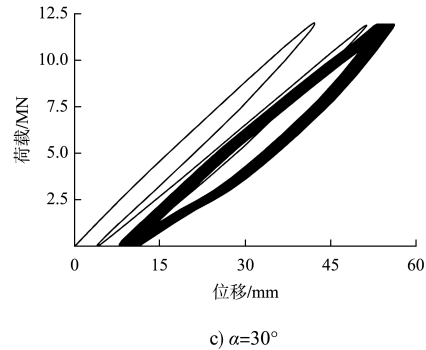


图 10 不同荷载入射角下承台荷载-位移曲线

2.3 荷载入射角度的影响

以 2×2 群桩基础为研究对象，分别采取与承台边呈 90°、45°、30°的水平循环荷载。不同荷载入射角下的承台荷载-位移曲线见图 10，研究发现在不同荷载入射角下，前几个加载周期对承台水平累积变形的影响明显大于后期加载；其次，发现随水平循环荷载入射角度的增加， $N=1\ 000$ 时群桩水平循环刚度从 218 减小到 96 kN/mm，说明群桩水平循环刚度随荷载入射角度的增加逐渐减小，承台水平累积变形随荷载入射角度的增加不断增大。与桩数对承台荷载-位移曲线的影响不同，承台滞回圈在不同荷载入射角下的饱满程度大致相同。不同荷载入射角度下群桩桩侧土体位移云图见图 11，对比发现，随荷载入射角度的增大，桩侧土体的最大位移不断增大，桩侧土体的受扰动区域不断地向水平方向发展。

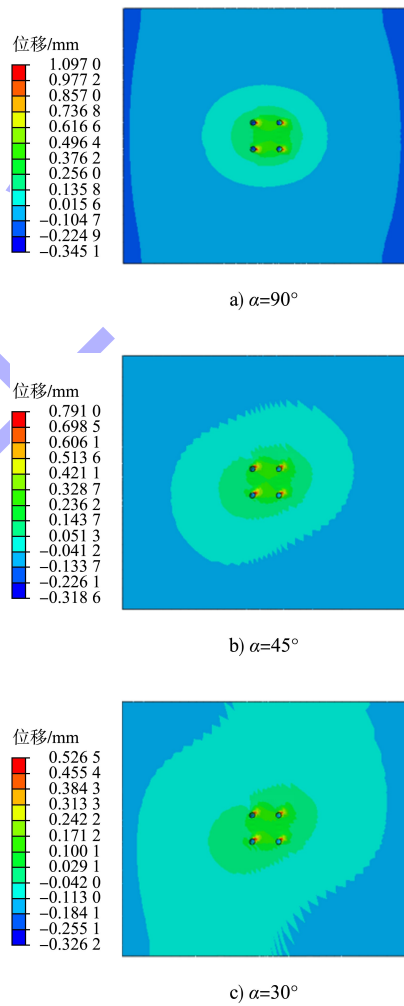
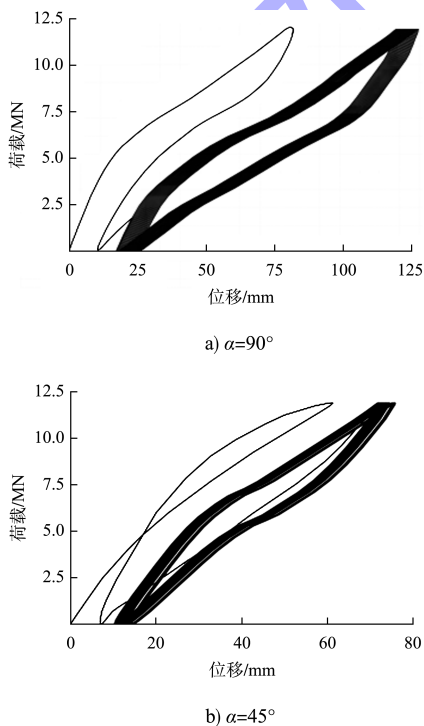


图 11 $N=1\ 000$ 时不同荷载入射角度下桩侧土体位移云图



2.4 加载频率的影响

以 2×2 群桩作为研究对象，分别采取 1.00、0.75、0.50 Hz 的水平循环荷载加载频率，不同加载频率下承台水平累积变形时程曲线见图 12，发现在不同荷载幅值下，荷载加载频率对承台水平累积变形的影响存在一定的离散性。当荷载幅值较

大时 ($CRL \geq 0.5$), 承台水平累积变形在 1.00 Hz 的加载频率下最大, 在 0.75 Hz 的加载频率下最小; 当荷载幅值较小时 ($CRL=0.25$), 承台水平累积变形在 0.50 Hz 的加载频率下最大, 在 0.75 Hz 的加载频率下最小。出现以上结果的主要原因是桩周土体随加载频率的降低不断弱化, 但是由于 1.00 Hz 的加载频率更接近桩-土体系的第 1 阶自振频率, 所以使得承台累积变形在 1.00 Hz 加载频率时最大, 在 0.50 Hz 加载频率时大于 0.75 Hz。

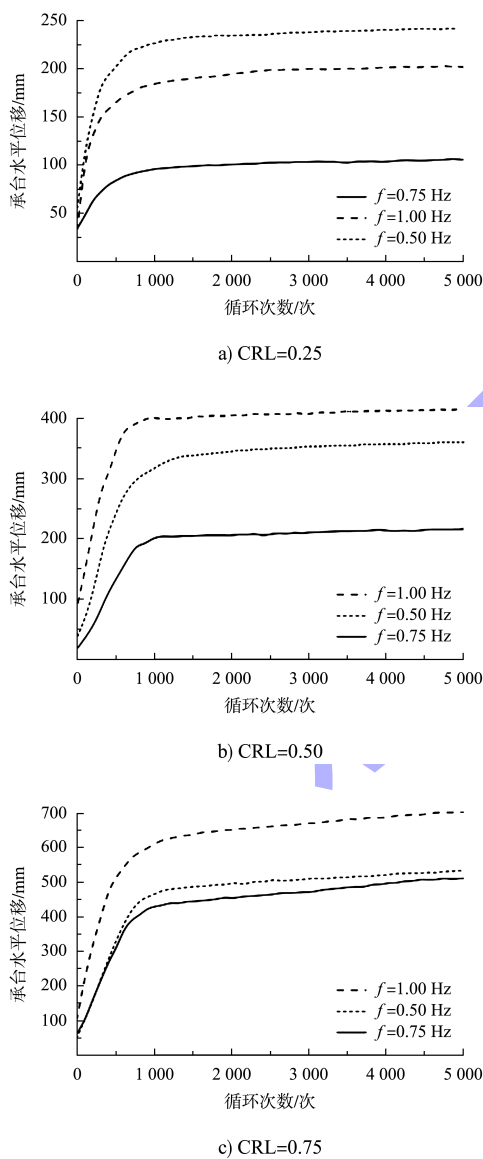


图 12 不同加载频率下承台水平累计变形时程曲线

2.5 桩周土体因素的影响

2.5.1 初始弹性模量的影响

以 2×2 群桩为研究对象, 分别采取 6、9、12 MPa

的土体初始弹性模量模拟群桩基础的累积变形特性。不同土体初始模量下群桩承台水平累积变形的时程曲线见图 13, 可知土体弹性模量对承台水平累积变形存在显著影响。当桩周土体初始弹性模量从 12 MPa 减小到 6 MPa 的过程中, 承台水平累积变形分别增加了 54% 与 32%, 表明桩周土体的变形随着土体初始弹性模量的增大逐渐减小, 使得桩周土体产生的塑性应变区域减小, 最终导致承台水平累积变形随着桩周土体初始弹性模量的增大不断减小。

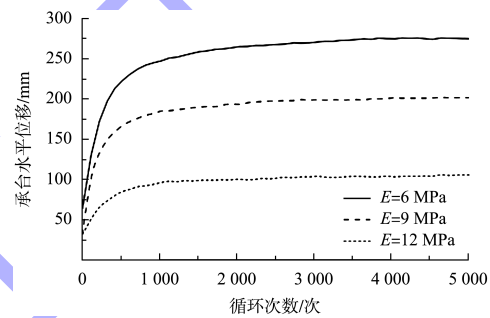


图 13 不同弹性模量下承台水平累积变形时程曲线

2.5.2 桩-土界面摩擦系数的影响

在数值模拟中桩-土之间的接触包括法向接触与切向接触, 对于水平受荷桩而言, 法向行为将直接决定桩基的承载能力, 而切向行为也会对桩基的承载变形性状产生一定影响。本次数值模拟中桩-土切向行为采用罚函数, 允许桩土之间出现一定的滑移变形。以 2×2 群桩为研究对象, 设置摩擦系数为 0.1、0.2、0.3, 研究不同桩-土界面摩擦系数对群桩水平累积变形的影响, 见图 14, 随着桩-土界面摩擦系数的增大, 承台水平累积变形略有增加。当桩-土摩擦系数从 0.1 增加到 0.2 时, 承台水平累积变形增大了 8.6%; 当桩-土摩擦系数从 0.2 增加到 0.3 时, 承台水平累积变形增大了 12.5%。说明随着桩-土界面摩擦系数的增大, 相同受荷条件下的承台水平累积变形略微增加, 但桩-土界面摩擦系数的变化对群桩累积变形特性的影响较小。

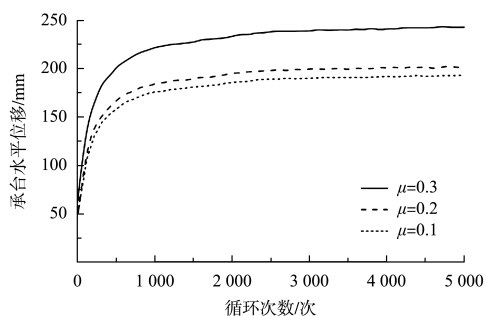


图 14 不同桩-土界面摩擦系数下承台水平累积变形时程曲线

3 结论

1) 随着桩距的增大, 桩侧土体受扰动区域逐渐减小, 桩与桩之间的相互作用也不断减弱。使得群桩承台水平累积变形随桩距的增大不断减小。

2) 桩数对群桩水平累积变形具有显著影响。随着桩数减少, 承台荷载-位移滞回圈越饱满, 桩侧土体非线性越明显。群桩承台水平累积变形随桩数的增加不断减小, 其中前几次加载对承台水平累积变形贡献较大。

3) 随着荷载入射角度的增加, 群桩水平循环刚度显著降低。然而, 随着荷载入射角度的增加, 荷载-位移滞回圈的饱满程度并未产生明显变化。同时桩侧土体受扰动区域随着荷载入射角度的增加不断地向水平方向发展。

4) 荷载加载频率对群桩水平累积变形的影响存在一定的离散性, 当荷载幅值较大时($CRL \geq 0.5$), 承台水平累积变形在 1.00 Hz 的加载频率下最大, 在 0.75 Hz 的加载频率下最小; 当荷载幅值较小时($CRL=0.25$), 承台水平累积变形在 0.50 Hz 的加载频率下最大, 在 0.75 Hz 的加载频率下最小。

5) 随着桩周土体初始弹性模量的增大, 承台水平累积变形不断减小。随着桩-土界面摩擦系数的增大, 承台水平累积变形略有增大, 但变化并不显著。

参考文献:

[1] 王森, 武东宽, 李近元, 等. 海上风电场高桩承台群桩基础平台的设计研究[J]. 海洋科学, 2020, 44(10): 114-120.
[2] 胡俊杰, 刘杰, 杨越. 双向循环荷载下海上风机群桩基础累积变形特征分析[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(11): 4497-4504.

[3] 张勋, 黄茂松, 胡志平. 砂土中单桩水平循环累积变形特性模型试验[J]. 岩土力学, 2019, 40(3): 933-941.
[4] ZHU B, BYRNE B W, HOULSBY G T. Long-term lateral cyclic response of suction caisson foundations in sand[J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2013, 139(1): 73-83.
[5] 王鹏程, 徐安花, 房建宏. 循环荷载作用下岩盐动力特性及累积变形研究[J]. 公路交通科技, 2022, 39(2): 30-39.
[6] 亓良. 水平循环荷载作用下黏土地基中桩基础的力学响应分析[D]. 烟台: 鲁东大学, 2018.
[7] 申海洋, 贾超, 任磊. 大直径群桩基础承载特性现场试验及数值模拟[J]. 自然灾害学报, 2023, 32(4): 220-228.
[8] WANG D Y, HU Y, DUAN L L, et al. Experimental study on cumulative deformation of pile group in saturated clay under horizontal cyclic loading [J]. Applied sciences, 2023, 13(9): 5440.
[9] 张宇亭. 水平循环荷载作用下群桩与软粘土相互作用离心模型试验研究[J]. 水道港口, 2018, 39(2): 211-216.
[10] 张伟, 张兴丽, 张志浩, 等. 群桩水平承载特性的现场试验研究及数值分析[J]. 工程勘察, 2023, 51(1): 19-28.
[11] ZHANG F, KIMURA M. Numerical prediction of the dynamic behaviors of an RC group-pile foundation [J]. Soils & foundations, 2002, 42(3): 77-92.
[12] KÜÇÜKARSLAN S, BANERJEE P K. Behavior of axially loaded pile group under lateral cyclic loading [J]. Engineering structures, 2003, 25(3): 303-311.
[13] 韩铭哲. 软土地基群桩-土相互作用效应研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
[14] 邢磊, 王多银, 段伦良, 等. 干湿循环及水平循环荷载下的码头群桩侧向累积位移[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(19): 8166-8175.
[15] IDRIS I M, DOBRY R, SINGH R D. Nonlinear behavior of soft clays during cyclic loading [J]. Journal of the geotechnical engineering division, 1978, 104(12): 1427-1447.
[16] 程星磊, 王建华. 考虑循环软化特性的饱和软土弹塑性本构关系研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(3): 786-794.
[17] 孔位学, 芮勇勤, 董宝弟. 岩土材料在非关联流动法则下剪胀角选取探讨[J]. 岩土力学, 2009, 30(11): 3278-3282.