

DOI: 10.11779/CJGE202204017

# 考虑软土软化效应时单桩基础水平循环受荷的有限元数值模拟

慕东霖<sup>1</sup>, 田英辉<sup>2</sup>, 王乐<sup>1</sup>, 肖忠<sup>\*1</sup>

(1. 天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072; 2. 墨尔本大学基础设施工程系, 澳大利亚 墨尔本)

**摘要:** 海洋环境中的单桩基础受到风、波浪、海流等循环荷载长期作用, 在循环荷载作用下桩和软土之间的接触面上的剪应力和桩周软土的剪切强度均会降低, 从而影响桩基的承载特性。结合试验手段, 通过界面剪切试验获得了 Q235 钢与天津滨海淤泥质软黏土之间的循环界面摩擦系数, 通过动三轴试验获得了天津滨海淤泥质软黏土的循环软化参数, 为量化桩土界面循环摩擦特性和桩周软土循环软化特性提供了一种参数获取方法。在此基础上, 结合可考虑软土应变软化效应的软土本构模型, 建立了不排水软基上单桩基础受水平循环荷载作用的有限元模型, 研究了单桩在受到水平循环荷载作用下的桩头位移-反力响应与桩身截面弯矩的发展规律, 并获得了循环荷载作用后桩周土体软化区域的发展规律。计算结果表明: 随着循环振次的增加, 桩基周围土体软化区域不断发展, 高水平循环位移作用下土体软化区域沿深度发展程度高, 对应桩身最大弯矩出现位置下移。

**关键词:** 有限元数值分析; 界面剪切试验; 动三轴试验; 单桩基础

中图分类号: TU447

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2022)04-0740-09

**作者简介:** 慕东霖(1995—), 男, 硕士研究生, 主要从事土与结构相互作用等方面的科研工作。E-mail: mudl44738945@tju.edu.cn。

## Finite element numerical simulation of single pile under horizontal cyclic loading considering softening effect of soft soil

MU Dong-lin<sup>1</sup>, TIAN Ying-hui<sup>2</sup>, WANG Le<sup>1</sup>, XIAO Zhong<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Department of Infrastructure Engineering, The University of Melbourne, Melbourne Australia)

**Abstract:** The single pile foundation in marine environment is subjected to long-term cyclic loading due to wind, waves and currents. Under the cyclic loading, the interface shear stress between pile and soft soil and the shear strength of soft soil around the pile will decrease, thus affecting the bearing characteristics of pile foundation. The cyclic interface friction coefficient between Q235 steel and Tianjin coastal soft clay is obtained through the interface shear tests, and the cyclic softening parameters of Tianjin coastal soft clay are obtained through the dynamic triaxial tests, which provides a method to obtain the parameters for quantifying the cyclic friction characteristics of pile-soil interface and the cyclic softening characteristics of soft soil around piles. On this basis, a finite element model for single pile foundation in undrained soft foundation under horizontal cyclic loading is established with the combination of the constitutive model for soft soil, which can consider the strain softening effect of soft soil. The development laws of pile head displacement and reaction response and pile section bending moment under horizontal cyclic loading are studied while the development law of softening area of soil around the pile under cyclic loading is obtained. The calculated results show that the softening area of soil around the pile foundation develops continuously with the increase of cyclic number. Meanwhile, the softening zone of soil has a high degree of development along the depth under the action of high horizontal cyclic displacement. The position corresponding to the maximum bending moment of pile body moves downward.

**Key words:** finite element numerical analysis; interface shear test; dynamic triaxial test; single pile foundation

## 0 引言

单桩基础在海洋风电基础工程中得到广泛应用。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51879187, 51890915)

收稿日期: 2021-06-04

\*通信作者(E-mail: tjuzhongxiao@tju.edu.cn)

在正常使用期间, 不仅要承受上部结构自重引起的竖向荷载, 同时也要承受由风、浪、流等环境条件产生的水平循环荷载。长期循环荷载作用下软土的软化是单桩基础承载力的安全隐患。

传统桩基设计过程中常采用  $p-y$  曲线计算方法, 该方法经由 McClelland 等<sup>[1]</sup>、Matlock<sup>[2]</sup>、Moss 等<sup>[3]</sup>以及国内学者田平等<sup>[4]</sup>、张陈蓉等<sup>[5]</sup>的发展, 已经成为 API 规范<sup>[6]</sup>与国内相关规范<sup>[7]</sup>的推荐方法。但是, 众多学者进行的试验研究<sup>[8-12]</sup>表明, 单桩在循环荷载作用下承载能力将减弱。API 规范<sup>[6]</sup>中针对  $p-y$  曲线中的  $p$  进行削减以考虑循环效应, 却无法考虑循环次数的影响。夏华盛等<sup>[13]</sup>与黄茂松等<sup>[14]</sup>通过削减桩身周围土体不排水抗剪强度, 提出预测黏土中单桩受水平循环荷载的承载特性的循环  $p-y$  方法; 朱斌等<sup>[10]</sup>通过其所开展的现场试验结果, 建立了水平循环荷载作用下的桩基双曲线型  $p-y$  曲线分析模型; Rajashree 等<sup>[15]</sup>提出与循环次数相关的单桩水平循环极限承载力退化公式。

上述研究表明: 选择合适的土强度退化模型是进行单桩基础循环承载特性数值模拟的关键。Einav 等<sup>[16]</sup>提出一个考虑应变软化、应变率效应的黏土强度演化模型(以下简称 E-R 模型)。同时 Xiao 等<sup>[17]</sup>的研究表明, 该模型可量化软黏土海床上浅基础受循环荷载时破坏包络面的发展规律; Zhou 等<sup>[18]</sup>证明该模型可以准确拟合 T-bar 贯入阻力退化曲线; Cheuk 等<sup>[19]</sup>使用该模型模拟软黏土海床上管道动态铺设过程及小振幅振动下的管道埋置特性。该模型可准确模拟软黏土海床受循环荷载时的抗剪强度的软化规律, 且参数少, 物理意义明确, 参数通过室内试验易获得。

桩-土之间的界面摩擦行为不仅影响着单桩基础的贯入阻力和竖向承载能力, 对于其水平反力也有影响。Donna 等<sup>[20]</sup>指出软黏土与界面材料间的单调界面摩擦系数与循环界面摩擦系数存在较大差异。Hammoud 等<sup>[21]</sup>提出在较低的法向应力水平下, 界面材料与土样之间主要发生的是界面剪切行为。因此有必要研究单桩与软黏土界面之间的循环摩擦行为。

本文首先通过界面剪切试验确定了单桩与软土之间的循环界面摩擦系数, 其次通过应变控制式动三轴试验获得了软土 E-R 模型的软化参数。通过二次开发将 E-R 模型嵌入到 ABAQUS 有限元软件中, 建立了单桩基础循环受荷的有限元模型, 研究了其受水平循环荷载时桩头位移-反力的响应与桩身截面弯矩的变化, 并分析了桩周土体软化区域随振次的发展规律。

## 1 循环界面剪切试验

采用 GDS 界面剪切仪进行了天津滨海淤泥质软

黏土与单桩基础常用钢材料 Q235 钢之间的界面循环剪切试验, 试验仪器如图 1 所示。

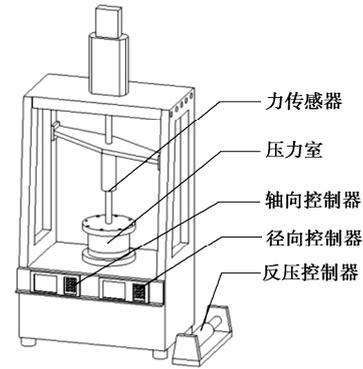


图 1 GDS 界面剪切仪

Fig. 1 GDS interface shear instrument

试验所用软黏土的物理力学性质如表 1 所示。Q235 钢的屈服强度为 238 MPa, 弹性模量为 220 GPa, 表面光滑, 没有进行表面喷砂处理。

表 1 试验所用黏土的物理力学性质

Table 1 Physical and mechanical properties of clay

含水率 $w/\%$	塑限 $w_L/\%$	液限 $w_p/\%$	相对质 量密度 $G_s$	密度 $\rho$ $/(g \cdot cm^{-3})$	孔隙 比 $e$	不排水抗 剪强度 $c_u/kPa$
17	18.6	34.2	2.72	1.89	0.665	15

### 1.1 试验方案

试验过程中轴向加载装置通过压力杆将轴压施加于土样上, 土样在径向控制器带动下发生转动, 从而使上表面与压力杆上的界面材料发生摩擦。由于试样尺寸相较于宏观桩土模型足够小, 在摩擦剪切过程中, 假定上表面受到均匀分布的界面剪应力  $\tau_{int}$ , 如图 2 所示, 上表面半径为  $R$ , 在距圆心  $r$  处取宽度为  $dr$  的微小圆环, 则该微小圆环上受到的界面摩擦力为

$$dF = 2\pi r dr \times t \quad (1)$$

该圆环上的扭矩  $dM$  为

$$dM = dF \times r = 2\pi r^2 dr \times t \quad (2)$$

由定积分可得在剪切面上平均分布的界面剪应力  $\tau_{int}$

$$\tau_{int} = \frac{M}{\int_0^R 2\pi r^2 dr} = \frac{3M}{2\pi R^3} \quad (3)$$

剪切面平均半径  $R_{aver}$  为

$$R_{aver} = \frac{\int_0^R 2\pi r^2 dr}{\pi R^2} = \frac{2}{3} R \quad (4)$$

则剪切位移  $s$  为

$$s = \frac{\pi}{180} \omega R_{aver} t = \frac{\pi}{270} \omega R t \quad (5)$$

式中,  $\omega$  为角速度,  $t$  为试验时间。界面材料与试样间的界面摩擦因子由下式确定:

$$\alpha = \frac{\tau_{\text{int}}}{\sigma_v}, \quad (6)$$

式中,  $\sigma_v$  为轴向压力。试样尺寸为  $\Phi 70 \text{ mm} \times 22 \text{ mm}$ , 试验前根据《土工试验方法标准: GBT50123—2019》的<sup>[22]</sup>规定对试样进行抽真空饱和。按要求装样完毕后, 通过轴压控制器对试样施加 10 kPa 的轴向应力, 同时通过反压控制器控制压力室内水压保持不变, 在侧限状态下对试样进行固结。根据文献<sup>[22]</sup>, 当试验中试样的轴向变形不大于 0.005 mm/h 时, 可认为固结完成, 固结试验中试样轴向变形与试验时间的关系如图 3 所示, 固结试验开始前后试样形状对比如图 4 所示。

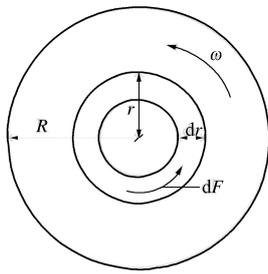


图 2 循环界面剪切试验剪切面示意图

Fig. 2 Diagram of shear plane of cyclic interfacial shear tests

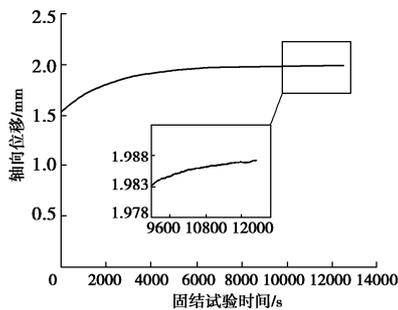


图 3 固结试验中试样轴向变形与试验时间关系曲线

Fig. 3 Relation curves between axial deformation of specimen and test time in consolidation tests

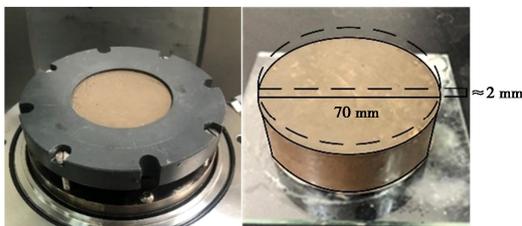


图 4 固结试验开始前与结束后试样形状对比

Fig. 4 Comparison of specimen shape before and after consolidation test

## 1.2 试验结果分析

固结完成后, 维持轴向固结压力不变, 在恒定的速率下进行循环界面剪切试验。选择 16 s 作为本次界面剪切试验循环周期, 循环位移幅值为 2 mm, 循环

次数为 40 次。图 5 为 Q235 钢与试样的界面剪切位移与界面剪应力的关系曲线; 图 6 为界面剪应力随时间的变化曲线。由图 5, 6 可见, Q235 钢与试样的初始界面剪应力与循环界面剪应力有较大差异, 在第二周循环后界面剪应力保持稳定。由于试验过程中界面剪应力远小于土的不排水抗剪强度, 因此可以判断出界面剪应力先增大后减小的现象, 是界面摩擦由静摩擦转变为动摩擦导致, 并非土体内部发生软化, 界面动摩擦逐渐降低至不再发生变化, 则可以确定, Q235 钢与试样间的循环摩擦系数为 0.2。

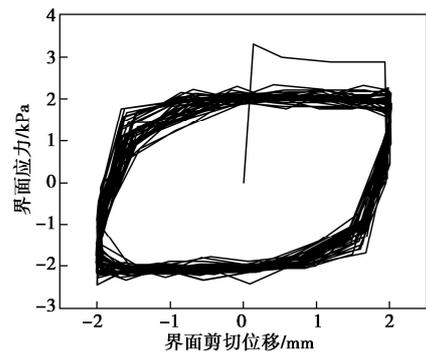


图 5 界面剪切位移与界面剪应力关系曲线

Fig. 5 Relationship between interfacial shear displacement and interfacial shear stress

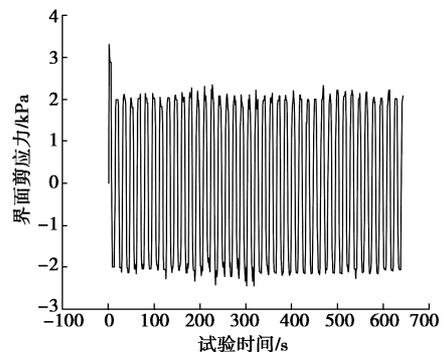


图 6 界面剪应力随时间的变化曲线

Fig. 6 Relationship between test time and interfacial shear stress

## 2 应变控制式动三轴试验

本试验的目的是通过对软黏土试样施加相同应变幅值的循环荷载, 根据测得的初始最大剪应力与多次循环后的残余最大剪应力, 确定饱和黏土的灵敏度  $S_r$ ; 根据试样发生 95% 重塑时的循环振次确定发生 95% 重塑时的累积塑性应变  $\xi_{95}$ , 为考虑软土软化效应的有限元数值模型计算提供软化参数。

### 2.1 试验方案

对所用黏土进行饱和, 在 10 kPa 的围压下固结, 固结过程中试样孔隙水压力与试验时间关系曲线如图

7 所示。此时维持固结围压不变，对试样施加应变幅值为 5%、周期为 6 s（考虑为循环波浪力的周期）的应变控制式循环加载，共计 200 次。

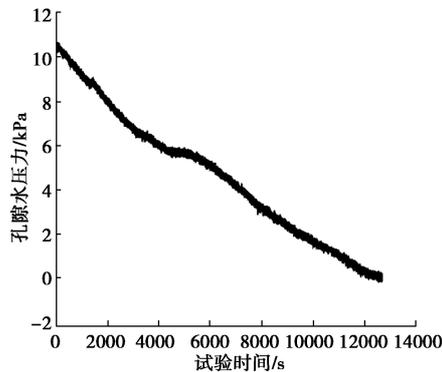


图 7 三轴固结过程中孔隙水压力与试验时间关系曲线

Fig. 7 Relation curve between pore water pressure and test time during triaxial consolidation

如图 8，根据初始最大剪应力与完全重塑后的残余最大剪应力，可得试验黏土的灵敏度为

$$S_t = \frac{\tau_0}{\tau_{rem}} \quad (7)$$

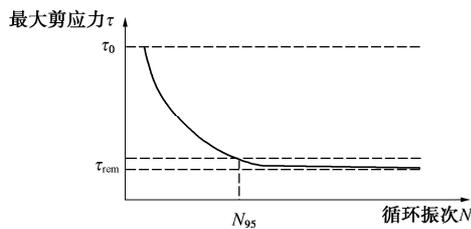


图 8 动三轴试验参数确定示意图

Fig. 8 Diagram of parameter determination for dynamic triaxial tests

由图 8 可以确定软黏土试样发生 95% 重塑时对应的循环振次  $N_{95}$ ，进而通过下式确定黏土试样发生 95% 重塑时的累积塑性应变  $\xi_{95}$ ：

$$\xi_{95} = 2 \times N_{95} \times \varepsilon_{cyc} \quad (8)$$

式中， $\varepsilon_{cyc}$  为试验中施加的循环动应变幅值。

### 2.2 试验结果分析

图 9 为黏土试样最大剪应力随轴向应变变化的关系曲线，应力应变形成的滞回圈呈现内缩的现象，并随振次的增加，滞回圈内缩的程度越来越低并最终保持稳定，试样达到完全重塑状态。图 10 为最大剪应力随时间的变化曲线，可见随时间的增加，最大剪应力下降程度逐渐减小，并趋于平缓，最终残余最大剪应力为 4 kPa，如图中红实线所示，得出该黏土试样的灵敏度  $S_t = 6$ ， $\xi_{95} = 11$ 。

## 3 数值模型验证

### 3.1 E-R 软土强度演化模型简介

E-R 模型综合考虑应变软化（使土体不排水抗剪强度降低）与应变率效应（使土体不排水抗剪强度升高）的影响，其与 Tresca 模型相结合可描述软土不排水抗剪强度的演化规律。Xiao 等<sup>[17]</sup>通过 ABAQUS 中的 USDFLD 子程序，二次开发将 E-R 模型应用到有限元数值计算中，本文采用 Xiao 等<sup>[17]</sup>提出的方法进行数值模拟。E-R 模型具体形式为

$$s_u = \beta_s \beta_r s_{u0} \quad (9)$$

式中， $s_{u0}$  为土体初始不排水抗剪强度， $\beta_s$  与  $\beta_r$  分别为应变软化效应与应变率效应系数，如下所示：

$$\beta_s = \delta_{rem} + (1 - \delta_{rem}) e^{-3\xi/\xi_{95}} \quad (10)$$

$$\beta_r = 1 + \mu \lg \left( \frac{\max(|\dot{\gamma}_{max}|, \dot{\gamma}_{ref})}{\dot{\gamma}_{ref}} \right) \quad (11)$$

式中， $\delta_{rem}$  为灵敏度  $S_t$  的倒数， $\xi$  为当前累积塑性应变， $\dot{\gamma}_{max}$  为当前增量步的最大剪应变率， $\dot{\gamma}_{ref}$  为参考剪应变率，通常取值为  $3 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ， $\mu$  表示土体每 10 a 强度增长率，建议取值为 0.05~0.2<sup>[23-25]</sup>。

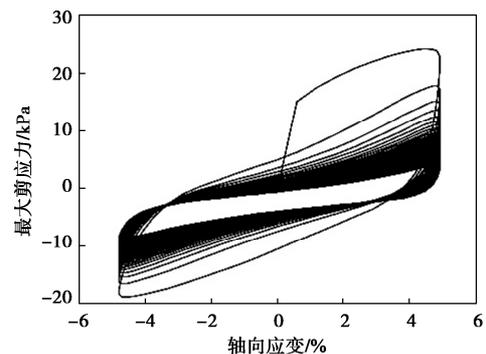


图 9 轴向应变与最大剪应力关系曲线

Fig. 9 Relationship between axial strain and maximum shear stress

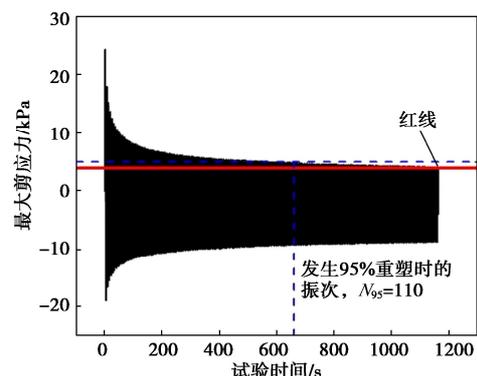


图 10 最大剪应力随时间的变化曲线

Fig. 10 Relationship between test time and maximum shear stress

### 3.2 动三轴试验有限元数值验证

建立土单元应变控制式动三轴试验数值模型，如图 11，数值模型与试验土单元尺寸完全一致。试样为高 80 mm，直径 39.1 mm 的圆柱。土单元模型下表面进行 X, Y, Z 方向的约束，对土单元上表面施加幅值为 4 mm，即幅值为 5% 的应变，采用正弦波形，周

期为 6 s, 单元类型为 C3D8。土体泊松比  $\nu=0.49$ ; 初始不排水抗剪强度  $c_{u0}=15$  kPa, 弹性模量  $E$  与不排水抗剪强度  $s_u$  之比保持为定值, 取  $E/c_u=200$ ; 土发生 95% 重塑时的累积塑性应变  $\xi_{95}=11$ , 土的每 10 年强度增长率  $\mu=0.05$ 。最终土单元的最大剪应力与试验时间的关系曲线如图 12 所示, 其中虚线为数值模拟的结果, 实线为试验结果。试验结果与数值模拟结果拟合程度高, 且满足该模型的建议取值<sup>[23-25]</sup>。

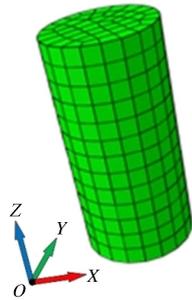


图 11 动三轴试验数值模型

Fig. 11 Numerical model for dynamic triaxial test

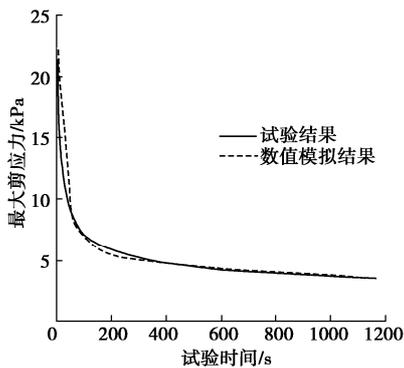


图 12 动三轴试验与数值计算结果对比

Fig. 12 Comparison between dynamic triaxial test and numerical results

### 3.3 单桩基础水平循环受荷有限元数值模型验证

由于竖直单桩的完全对称性, 并考虑到计算效率问题, 取一半单桩进行三维建模, 与 Zhang 等<sup>[12]</sup>进行的离心机试验结果进行对比。离心机试验重力加速度为 50g。在 ABAQUS 中建立的数值模型中单桩尺寸与离心机试验对应的单桩原尺寸完全相同, 土体的参数与离心机试验所用土样参数完全相同, 具体数值如下。

模型尺寸: 单桩高 4.5 m, 直径为 0.6 m, 入土深度为 3 m。数值模型中单桩外侧距离土体边界 24 m, 土体区域足够大, 可以避免边界效应的影响。数值模型中坐标轴  $Y$  方向为半模型对称面的法线方向, 对称面限制  $Y$  方向位移以满足对称性; 土体侧向边界约束  $X$  与  $Z$  方向位移; 土体底部约束 3 个方向的平移。

模型参数: 饱和不排水黏土假定为理想弹塑性材料, 满足 Tresca 屈服准则, 泊松比  $\nu=0.49$ 。离心机试验前土体经过 100g 重力加速度固结 4 d 后, 经过

T-bar 贯入测得土体的不排水抗剪强度  $s_u$  满足:

$$s_{u,z} = 2.2 + 3.3z^{0.9} \quad (12)$$

式中  $z$  为距离土体上表面的深度 (m);  $s_{u,z}$  为距土表以下  $z$  深度土的不排水抗剪强度 (kPa)。土体刚度系数  $E/s_u=95$ ; 土体灵敏度  $S_l=2.5$ 。根据文献[16]提出的方法确定所使用的黏土  $\xi_{95}=25$ 。

对桩头施加幅值为 0.075 m、周期为 300 s 的双向循环位移, 共计 20 次。提取桩头反力进行无量纲化处理并与离心机试验结果对比, 比较吻合, 如图 13 所示。

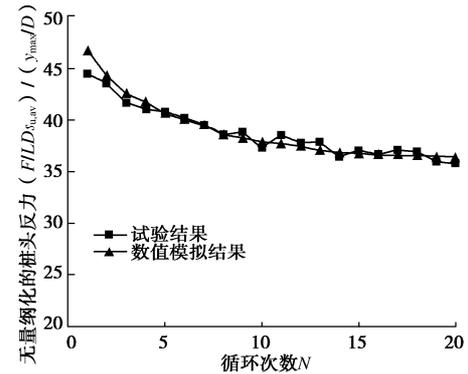


图 13 单桩离心机试验与数值模拟结果对比

Fig. 13 Comparison between single pile centrifuge test and numerical results

## 4 单桩受水平循环加载数值计算

针对界面剪切试验与动三轴试验所获得的天津滨海淤泥质软黏土参数, 结合 E-R 模型, 对于柔性桩受水平循环荷载进行有限元三维建模。

模型尺寸: 桩外壁直径  $D$  为 1.114 m, 壁厚为 0.095 m, 总长度为 21.6 m, 埋置长度为 18.24 m。桩外壁至模型边界的距离为 20 倍的桩的外直径长度; 桩底部至模型下边界的距离为 10 倍的桩外直径长度。

边界条件: 土体竖向外边界施加  $X$  与  $Y$  水平方向约束, 对称边界施加  $Y$  方向 (垂直于对称面方向) 的水平方向约束, 土体下表面施加  $Z$  方向 (竖直方向) 约束。空心桩对称边界施加  $Y$  方向的水平方向约束。在桩头上表面几何中心位置设置加载点。使用 sectionprint 指令设置桩截面并输出截面弯矩。

接触条件: 采用主-从接触算法, 以刚度较大的桩外壁为主面, 与其直接接触的土为从面。法向接触行为设置允许分离, 切向接触行为设置为库仑摩擦模型, 桩土界面摩擦系数由界面剪切试验确定为 0.2。

模型参数: 土体不排水抗剪强度  $c_u=5+2z$ ; 弹性模量  $E/c_u=200$ ; 泊松比  $\nu=0.49$ ; 浮重度  $\gamma'=8.9$  kN/m<sup>3</sup>; 灵敏度  $S_l=6$ ; 每 10 a 强度增长率  $\mu=0.05$ ; 土发生 95% 重塑时的累积塑性应变  $\xi_{95}=11$ ; 参考剪应变速率  $\dot{\gamma}_{ref}=3 \times 10^{-6} s^{-1}$ 。

### 4.1 单桩在低水平位移循环工况下的响应

荷载条件: 对桩头施加 0.02 m 的双向循环位移, 加载过程保持匀速, 周期为 80 s, 循环次数 400 次。图 14 为 400 次水平循环加载过程中, 桩头的位移与反力关系曲线。从图 14 中可以看出, 由于水平位移幅度较小 (0.02 倍桩直径), 桩头水平位移与反力的滞回关系并不明显, 但仍可以看出随着循环振次的增加, 桩头反力呈现出先下降后逐渐趋于一稳定值的趋势。图 15 为循环振次与桩身截面弯矩的关系曲线。桩身最大弯矩出现在桩头以下 7 m 处, 即泥面以下 3.84 m 处。在前 100 振次中桩身截面最大弯矩增长幅度较高, 100 次以后随循环振次发展, 桩身界面弯矩将趋于稳定。图 16 为单桩受到 400 次水平循环荷载后, 桩周围土体变形与软化区域的发展, 软化区域由式 (10) 中的应变软化系数  $\beta_s$  确定, 可见土体变形与软化区域分布以整体中心为轴呈两侧对称分布, 软化区域边缘 (即软化系数为 0.9 时, 也即图中红色区域) 距离单桩外壁  $0.5D$ , 从土表向下沿深度发展约  $4D$ , 软化程度最高的区域 (即软化系数为 0.1 时, 也即图中深蓝色区域) 位于紧靠单桩外壁土表以下  $D$  的区域。

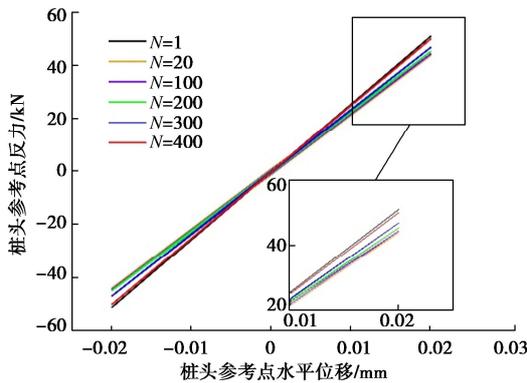


图 14 低水平位移循环工况下参考点水平位移与反力关系曲线  
Fig. 14 Relationship between horizontal displacement and reaction force of reference point under low horizontal displacement cyclic loading

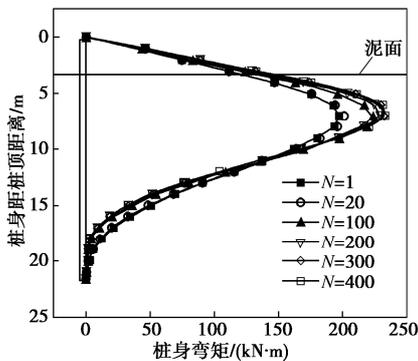


图 15 低水平位移循环工况下桩身截面弯矩分布曲线  
Fig. 15 Distribution curves of bending moment of pile section under low horizontal displacement cyclic loading

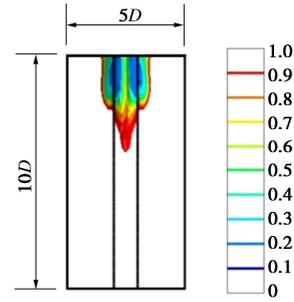


图 16 单桩在低水平位移循环工况下土体软化系数  
Fig. 16 Soil softening coefficient of single pile under low horizontal displacement cyclic loading

### 4.2 单桩在高水平位移循环工况下的响应

荷载条件: 对桩头施加 0.1 m 的双向循环位移, 加载过程保持匀速, 周期为 160 s, 循环次数 100 次。图 17 为第 100 次循环过程中桩头位移达到最大时土体区域的位移场与应力场, 可见数值模型所选用的土体区域足够大, 可避免边界效应的影响。图 18 为循环荷载作用下桩头水平位移与反力关系曲线, 可见桩头水平位移与反力在循环荷载作用初期呈明显的滞回关系, 随着振次的增加这种滞回关系逐渐消失, 而桩头反力稍有下降。图 19 为循环振次与桩身截面弯矩的关系曲线。桩身最大弯矩在桩头以下 9 m 处。在前 25 振次中桩身截面最大弯矩增长幅度较高, 之后该增长趋势逐渐放缓。

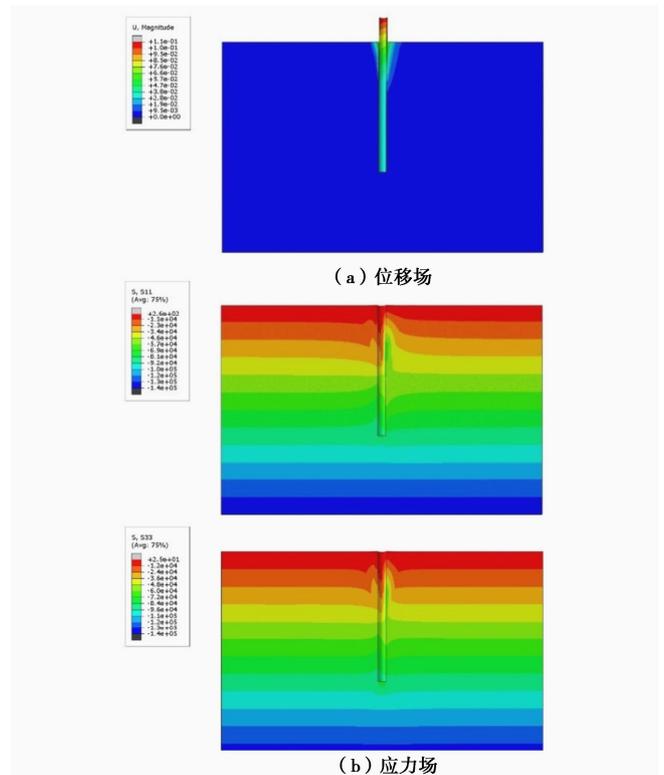


图 17 第 100 次循环时土体的位移场与应力场  
Fig. 17 Displacement field and stress field of soil at the 100th cycle

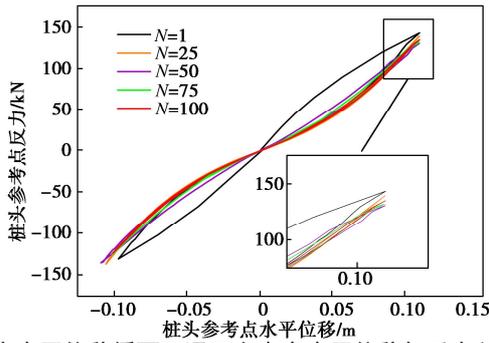


图 18 高水平位移循环工况下参考点水平位移与反力关系曲线  
 Fig. 18 Relationship between horizontal displacement and reaction force of reference point under high horizontal displacement cycle

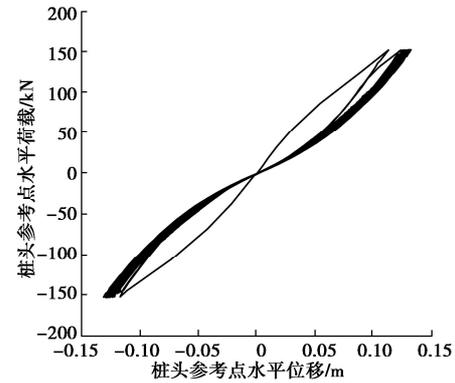


图 21 水平循环力工况下参考点水平位移与反力关系曲线  
 Fig. 21 Relationship between horizontal displacement and cyclic loading of reference point under horizontal cyclic force

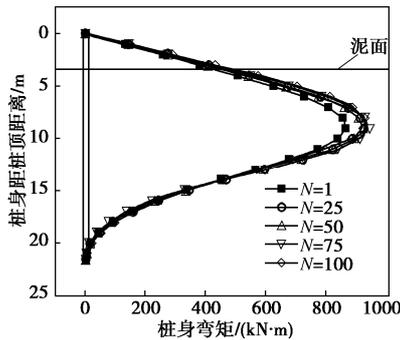


图 19 高水平位移循环工况下桩身截面弯矩分布曲线  
 Fig. 19 Distribution curves of bending moment of pile section under high horizontal displacement cycle

桩身沿深度分布的各截面弯矩随水平循环加载振次的变化曲线如图 22 所示,可见桩身峰值弯矩的截面出现在桩头下方 9 m 处,且峰值位置不随循环振次的增加而改变。在循环加载 25 振次前,桩身弯矩增加幅度较大,随循环振次增加而逐渐趋于稳定。图 23 为单桩受到 100 次水平循环荷载后,桩周围土体的软化系数分布,可见软化区域分布呈对称分布,土软化程度沿桩外壁向外侧呈逐渐减小的趋势,与高水平循环位移作用下结果较为相似。

图 20 为土体软化区域发展局部放大图,在 100 次循环结束后,土体软化区域分布以整体中心为轴呈两侧对称分布,相对于低水平循环位移,高水平循环位移工况下土体强度下降速度更快。

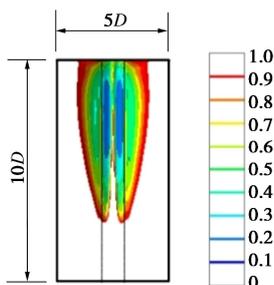


图 20 单桩在高水平循环位移工况下土体软化系数  
 Fig. 20 Soil softening coefficient of single pile under high horizontal displacement cyclic loading

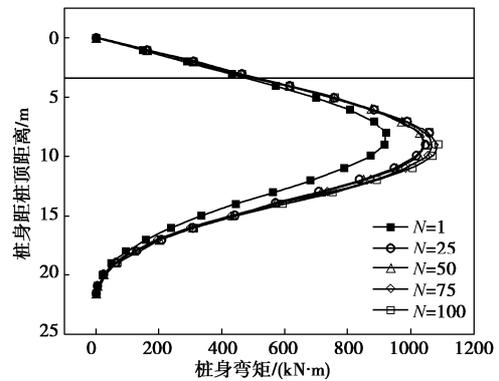


图 22 水平循环力工况下桩身截面弯矩分布曲线  
 Fig. 22 Distribution curves of bending moment of pile section under horizontal cyclic force

### 4.3 单桩在水平循环力工况下的响应

荷载条件:对桩头施加 153 kN 的双向循环荷载,周期为 160 s。图 21 为桩头的荷载位移曲线数值模拟结果,由于有限元数值模型为对称模型,荷载最终结果为数值模拟结果的两倍。结果表明水平循环加载初期,桩头产生幅度较大的双向水平位移,荷载-位移曲线显示出明显的循环滞回特性。随着循环次数逐渐增加,水平位移增量发展趋势逐渐变缓并趋于稳定,经过 100 次循环荷载作用后桩头水平位移达到 0.13 m。

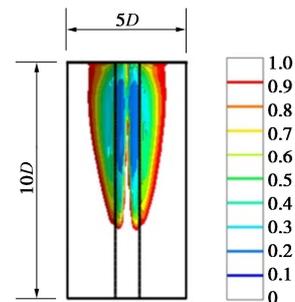


图 23 单桩在水平循环力工况下土体软化系数  
 Fig. 23 Soil softening coefficient of single pile under horizontal cyclic force

## 5 结 论

(1) 为了量化桩周软土循环软化特性和桩土间的界面循环摩擦特性对单桩基础水平循环承载特性的影响, 本文结合界面剪切试验, 应变控制式动三轴试验和可考虑软土应变软化效应的软土本构模型, 建立了可考虑软土应变软化效应和桩土间界面循环摩擦特性的单桩基础水平循环受荷模拟的有限元方法; 相较于现有单桩基础设计规范<sup>[6-7]</sup>, 该方法能考虑软土应变软化效应对单桩水平循环承载力的影响。

(2) 饱和黏土的循环界面摩擦系数明显小于单调加载时的界面摩擦系数, 并且在第一周循环内就完成了由静摩擦向动摩擦的转变, 界面摩擦系数迅速降低。

(3) 单桩受水平循环荷载作用初期, 桩周围土体不排水抗剪强度下降程度较高, 随循环振次发展, 桩周围土体的不排水抗剪强度将逐渐趋于一稳定值。

(4) 桩身最大弯矩出现位置与桩周围土体软化区域发展范围相关, 随土体软化区域沿深度向下发展, 桩身最大弯矩出现位置也将下移。

### 参考文献:

- [1] MCCLELLAND B, FOCHT J. Soil modulus for laterally loaded piles[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1956, **82**(4): 1 - 22.
- [2] MATLOCK H. Correlation for design of laterally loaded piles in soft clay[C]// Proceeding of 2nd Offshore Technology Conference, 1970, Houston.
- [3] MOSS R E S, CALIENDO J A, ANDERSON L R. Investigation of a cyclic laterally loaded model pile group[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1998, **17**(7/8): 519 - 523.
- [4] 田 平, 王惠初. 黏土中横向周期性荷载桩的  $P - Y$  曲线统一法[J]. 河海大学学报, 1993, **21**(1): 9 - 14. (TIAN Ping, WANG Hui-chu. A unified method of  $P - Y$  curves for laterlly and periodically loaded piles in clay[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 1993, **21**(1): 9 - 14. (in Chinese))
- [5] 张陈蓉, 俞 剑, 黄茂松. 软黏土中水平循环荷载作用下刚性短桩的  $p - y$  曲线分析[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(增刊 2): 78 - 82. (ZHANG Chen-rong, YU Jian, HUANG Mao-song.  $P - y$  curve analyses of rigid short piles subjected to lateral cyclic load in soft clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(S2): 78 - 82. (in Chinese))
- [6] Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms-Working Stress Design: API RP-2A-WSD[S]. 2002.
- [7] 码头结构设计规范: JTS 167—2018[S]. 2018. (Design Code for Wharf Structures: JTS 167—2018[S]. 2018. (in Chinese))
- [8] 刘晓强, 赵 楠, 夏开文, 等. 循环荷载作用下桩周土体强度弱化特性试验研究[J]. 地震工程学报, 2014, **36**(4): 987 - 990. (LIU Xiao-qiang, ZHAO Nan, XIA Kai-wen, et al. Test and study on strength weakening behavior of soil around a pile under cyclic loading[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2014, **36**(4): 987 - 990. (in Chinese))
- [9] 李 森, 俞 剑, 黄茂松. 饱和黏土中不同刚度单桩水平循环加载离心试验[J]. 岩土工程学报, 2021, **43**(5): 948 - 954. (LI Sen, YU Jian, HUANG Mao-song. Centrifuge test on single pile with different rigidities in saturated clay under cyclic lateral loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, **43**(5): 948 - 954. (in Chinese))
- [10] 朱 斌, 杨永奎, 余振刚, 等. 海洋高桩基础水平单调及循环加载现场试验[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(6): 1028 - 1037. (ZHU Bin, YANG Yong-yao, YU Zhen-gang, et al. Field tests on lateral monotonic and cyclic loadings of offshore elevated piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(6): 1028 - 1037. (in Chinese))
- [11] 俞 剑, 黄茂松, 张陈蓉. 黏土中两种不同直径单桩水平循环加载模型试验与分析[J]. 岩土力学, 2016, **37**(4): 973 - 980. (YU Jian, HUANG Mao-song, ZHANG Chen-rong. Model tests and analysis of single piles with two different diameters subjected to cyclic lateral loadings in clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, **37**(4): 973 - 980. (in Chinese))
- [12] ZHANG C R, WHITE D, RANDOLPH M. Centrifuge modeling of the cyclic lateral response of a rigid pile in soft clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2011, **137**(7): 717 - 729.
- [13] 夏华盛, 张陈蓉, 俞 剑, 等. 海上风电桩基水平承载力循环衰减二维简化分析[J]. 岩土力学, 2012, **33**(增刊 1): 303 - 308. (XIA Hua-sheng, ZHANG Chen-rong, YU Jian, et al. 2D simplified analysis of cyclic degradation of lateral bearing capacity for the pile foundation of offshore wind turbine[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(S1): 303 - 308. (in Chinese))
- [14] 黄茂松, 马 昊, 李 森, 等. 软黏土中水平受荷桩的静力和循环  $p - y$  曲线[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(增刊 2):

- 9 - 12. (HUANG Mao-song, MA Hao, LI Sen, et al. Static and cyclic  $p$ - $y$  curves for laterally loaded piles in soft clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(S2): 9 - 12. (in Chinese))
- [15] RAJASHREE S S, SUNDARAVADIVELU R. Degradation model for one-way cyclic lateral load on piles in soft clay[J]. Computers and Geotechnics, 1996, **19**(4): 289 - 300.
- [16] EINAV I, RANDOLPH M F. Combining upper bound and strain path methods for evaluating penetration resistance[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2005, **63**(14): 1991 - 2016.
- [17] XIAO Z, TIAN Y H, GOURVENEC S. A practical method to evaluate failure envelopes of shallow foundations considering soil strain softening and rate effects[J]. Applied Ocean Research, 2016, **59**: 395 - 407.
- [18] ZHOU H, RANDOLPH M F. Numerical investigations into cycling of full-flow penetrometers in soft clay[J]. Géotechnique, 2009, **59**(10): 801 - 812.
- [19] CHEUK C Y, WHITE D J. Modelling the dynamic embedment of seabed pipelines[J]. Géotechnique, 2011, **61**(1): 39 - 57.
- [20] DONNA D A, FERRARI A, LALLOU L. Experimental investigations of the soil-concrete interface: physical mechanisms, cyclic mobilization, and behaviour at different temperatures[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2016, **53**(4): 659 - 672.
- [21] HAMMOUD F, BOUMKIK A. Experimental study of the behaviour of interfacial shearing between cohesive soils and solid materials at large displacement[J]. Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing), 2006, **7**(1): 63 - 80.
- [22] 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 2019. (Standard for Geotechnical Testing Method: GB/T 50123—2019[S]. 2019. (in Chinese))
- [23] DAYAL U, ALLEN J H. The effect of penetration rate on the strength of remolded clay and sand samples[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1975, **12**(3): 336 - 348.
- [24] GRAHAM J, CROOKS J H A, BELL A L. Time effects on the stress-strain behaviour of natural soft clays[J]. Géotechnique, 1983, **33**(3): 327 - 340.
- [25] CHANEY R C, DEMARS K R, BISCONTIN G, et al. Influence of peripheral velocity on vane shear strength of an artificial clay[J]. Geotechnical Testing Journal, 2001, **24**(4): 423 - 429.

## 《岩土工程学报》征订启事

《岩土工程学报》创办于1979年，是我国水利、土木、力学、建筑、水电、振动等六个全国性学会联合主办的学术性科技期刊。由南京水利科学研究院承办，国内外公开发行。主要刊登土力学、岩石力学领域中能代表当今先进理论和实践水平的科学研究和工程实践成果等。报道新理论、新技术、新仪器、新材料的研究和应用。欢迎国家自然科学基金项目及其他重要项目的研究成果向本刊投稿，倡导和鼓励有实践经验的作者撰稿，并优先刊用这些稿件。主要栏目有黄文熙讲座、综述、论文、短文、工程实录、焦点论坛、讨论和简讯等。

本刊被《中文核心期刊要目总览》连续多年确认为核心期刊，并在建筑类核心期刊中位于前列；本刊被科技部“中国科技论文统计源期刊”（中国科技核心期刊）及“中国科技论文与引文数据库”收录；本刊被中国科学院“中国科学引文数据库”收录；本刊被“中国知网”全文收录及“中国学术期刊综合评价数据库”收录；本刊被“工程索引 Ei Compendex 数据

库”和“日本科学技术振兴机构数据库 JST”等国际数据库收录。本刊网址（[www.cgejournal.com](http://www.cgejournal.com)）全文发布本刊所有刊载文章。

本刊读者对象为土木建筑、水利电力、交通运输、矿山冶金、工程地质等领域中从事岩土工程及相关专业的科研人员、设计人员、施工人员、监理人员和大专院校师生。

本刊为月刊，A4开，双栏排版，192页，每月中旬出版，每期定价40元，全年定价480元。

本刊国际标准刊号 ISSN 1000 - 4548，国内统一刊号 CN 32 - 1124/TU，国内发行代号 28 - 62，国外发行代号 MO 0520。欢迎广大读者在全国各地邮局订购，也可在编辑部订购（不另收邮费）。编辑部订购地址：南京虎踞关34号《岩土工程学报》编辑部；邮编：210024；联系电话：025-85829534，85829543，85829553，85829556；传真：025-85829555；E-mail: [ge@nhri.cn](mailto:ge@nhri.cn)。

（本刊编辑部）