

# 尺寸效应下单桩水平受荷特性数值研究

潘华林<sup>1</sup>, 刘睿<sup>2,3,4</sup>, 张宝龙<sup>1\*</sup>

(1. 浙江省能源集团有限公司, 浙江 杭州 310007; 2. 浙江大学海南研究院, 海南 三亚 572025;  
3. 浙江大学海洋学院, 浙江 舟山 316021; 4. 香港城市大学 建筑学与土木工程系, 香港 999077)

**摘要:** 目前钢管单桩基础广泛应用于海上风电, 随着单桩直径增大, 单桩水平受荷响应表现出明显的尺寸效应。但针对尺寸效应下单桩水平受荷特性, 尤其是土抗力对应的水平承载贡献研究较少。本文基于 ABAQUS 建立了柔性桩、半刚性桩及刚性桩的水平受荷分析数值模型, 并通过离心机试验验证了模型的可靠性。随后结合尺寸效应下桩周土体位移场, 评估不同土抗力对单桩水平受荷的承载贡献值, 并揭示了水平土抗力的空间分布规律。研究表明, 在抵抗水平受荷过程中, 水平土抗力提供的承载贡献最高, 桩外侧摩阻力其次, 基底抗力和桩内侧摩阻力贡献最低。并且随着桩身响应逐渐变为刚性, 侧摩阻力和基底抗力的贡献随之增大, 桩身浅层土体和深层土体都将被充分调动, 从而提供显著抗力矩。研究结果可为设计和优化水平受荷单桩提供一定的参考。

**关键词:** 尺寸效应; 水平受荷桩; 承载贡献; 空间分布; 数值模拟

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2025)01-0043-08

## Numerical analysis of load-bearing behavior of laterally loaded monopile considering diameter effect

PAN Hualin<sup>1</sup>, LIU Rui<sup>2,3,4</sup>, ZHANG Baolong<sup>1\*</sup>

(1. Zhejiang Provincial Energy Group Company Ltd., Hangzhou 310007, Zhejiang, China;

2. Hainan institute, Zhejiang University, Sanya 572025, Hainan, China;

3. Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan 316021, Zhejiang, China;

4. Department of Architecture and Civil Engineering, City University of Hong Kong, Hong Kong 999077, China)

**Abstract:** At present, steel pipe monopile foundation is widely used in offshore wind power. As the diameter of the monopile increases, the horizontal load response of the monopile shows a significant diameter effect. However, there is relatively little research on the horizontal load characteristics of monopile under diameter effect, especially the horizontal bearing contribution corresponding to soil resistance. In this paper, various numerical models of monopile with different pile-soil relative stiffness were established by ABAQUS and then validated by several centrifuge experiments. Subsequently, combined with the displacement field of soil around the pile under diameter effect, the contribution values of different soil resistance to the horizontal load bearing of monopile were evaluated, and the spatial distribution law of horizontal soil resistance was revealed. The results show that in the process of resisting horizontal loads, the horizontal soil resistance provides the highest bearing contribution, followed by the external friction resistance, and the base resistance and the inner friction resistance contribute the least. As the response of pile body gradually becomes rigid, the contribution of side friction resistance and base resistance will increase, and both shallow soil and deep soil of pile body will be fully mobilized to provide significant resistance moment. The research results can provide some reference for the design and optimization of horizontal load monopile.

**Key words:** diameter effect; laterally loaded monopile; bearing contribution; spatial distribution; numerical analysis

## 0 引言

海上风电作为绿色清洁能源, 具有储能大、可

持续性强、占用耕地面积少等诸多优点, 是实现“3060”目标的重要手段<sup>[1]</sup>。但海上风电属于高耸结构, 上部结构会承受来自海上环境中风、浪、流

收稿日期: 2023-08-08; 修回日期: 2023-10-16; 录用日期: 2023-11-01

作者简介: 潘华林 (1970—), 男, 浙江台州人, 硕士, 正高级工程师, 主要从事海上风电方面的研究。E-mail: 1583952869@qq.com。

\*通信作者: 张宝龙 (1978—), 男, 甘肃镇原人, 硕士, 高级工程师, 主要从事风力发电等新能源工作。E-mail: 36950703@qq.com。

等产生的水平荷载,随后将倾覆荷载传递给底部基础。因此,海上风电基础的水平受荷特性一直是研究的重点和热点。钢管单桩基础由于具有制作便捷、安装高效和承载性能优良等特点,已经被广泛应用于国内外海上风电项目的开发建设中<sup>[2]</sup>。据统计,在海上风电总成本中,基础成本占比可达11.4%以上,故而风电基础设计的优化能够带来的降本潜力巨大,可以有效提高海上风电项目的经济性和降低海上风电项目的平均能源成本(LCOE)<sup>[3]</sup>。

而桩-土相互作用又是评估单桩基础承载力的关键。目前单桩基础水平受荷的分析包括 $p-y$ 曲线法、极限态分析法、地基反力法和数值分析法等。其中, $p-y$ 曲线法将非线性的桩-土相互作用离散为一系列土弹簧,桩-土相互作用完全由土弹簧描述, $p-y$ 曲线法计算简便,参数明确,具有较好的计算精度,目前已被API规范以及DNV规范推荐,并广泛应用于实际工程设计中。但规范中常用的 $p-y$ 曲线公式是由Matlock及Reese依据大量的小尺寸柔性单桩试验拟合而来,该公式随后也经过大量学者不断改进发展。随着单桩直径的进一步增大, $p-y$ 曲线法在计算大直径或超大直径单桩的内力和变形响应时已被发现具有明显的局限性,即单靠反映水平土抗力的 $p-y$ 曲线描述桩-土相互作用会产生明显的“尺寸效应”,大直径单桩基础桩侧提供的侧摩阻力和基底位置的剪力与阻力对单桩水平承载力的贡献不可忽视<sup>[4]</sup>。为了克服 $p-y$ 曲线法的局限性与保守性,PISA项目<sup>[5]</sup>充分考虑了单桩水平受荷作用下受到不同阻抗的作用,即水平土抗力( $p-y$ 弹簧)、侧摩阻力( $z-\psi$ 弹簧)、基底剪力( $H_B-V_B$ 弹簧)和桩端阻力( $M_B-\psi_B$ 弹簧),并采用圆锥函数拟合数值分析得到的阻抗与桩身挠度或转角关系。WANG等<sup>[6]</sup>从桩土变形和破坏机制出发,考虑了水平土抗力、基底剪力和桩端阻力的贡献,认为转动点桩-土相互作用以水平土抗力为主,用 $p-y$ 弹簧描述,而转动点以下部位提供的基底剪力和桩端阻力等抗力统一用 $M-\theta$ 弹簧表示,并提出了软黏土中计算不同桩-土相对刚度单桩的双弹簧“ $p-y+M-\theta$ ”模型(见图1)。

针对尺寸效应,尽管诸多学者提出了不同的多弹簧模型,但是目前对水平受荷单桩的不同桩周土抗力对应的承载贡献缺乏研究,本文通过对典型长径比下柔性桩、半刚性桩和刚性桩开展数值分析,探究桩周不同抗力的承载贡献,为研究水平受荷单桩的桩-土相互作用奠定基础。

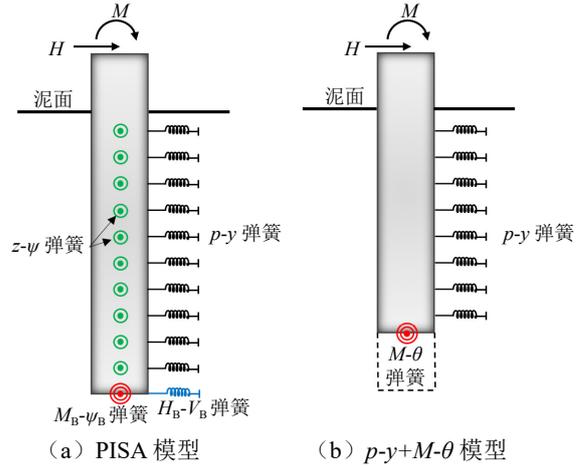


图1 单桩分析模型: PISA模型和 $p-y+M-\theta$ 模型

Fig. 1 Soil spring model for monopile: PISA model and  $p-y+M-\theta$  model

## 1 单桩数值模型

研究选用商业有限元软件ABAQUS,以此对水平受荷单桩及桩-土相互作用开展数值模拟。相关研究表明<sup>[7]</sup>,单桩安装方式对水平受荷桩的受荷特性影响较小,因此本文忽略单桩安装过程,假设模拟的单桩基础是预先安装到位的,采用“wish-in-place”的模拟方法<sup>[8]</sup>。

为了能对应实际海上风电单桩基础的长径比尺寸,本研究参照WANG等<sup>[9]</sup>开展的不同长径比对砂土中单桩横向响应影响的数值研究(该研究中单桩尺寸为入土深度 $L$ 固定为30 m,长径比 $L/D=3\sim 7.5$ ),建立了单桩直径分别为1 m、5 m和10 m,埋深为30 m的单桩数值分析模型,壁厚统一设置为0.06 m,单桩弹性模量取210 GPa,材料密度为7850 kg/m<sup>3</sup>,泊松比为0.3。桩周土体设置为高岭土黏土,不排水条件下的高岭土黏土可以由Tresca模型<sup>[10]</sup>模拟,土体参数按照LAI等<sup>[11]</sup>开展的黏土中单桩水平受荷离心机试验设置。其中有效重度设为6 kN/m<sup>3</sup>,泊松比设为0.49,以满足土体不排水条件。离心机试验中测定高岭土的不排水抗剪强度随深度线性增加:

$$S_u = kz \quad (1)$$

式中: $S_u$ 为不同深度处的不排水抗剪强度,kPa; $k=1.54$ ,为不排水强度 $S_u$ 随土体深度 $z$ 变化的梯度。土体弹性模量一般取 $200S_u\sim 800S_u$ ,根据LAI等<sup>[11]</sup>的建议,本次数值研究取 $E_s=400S_u$ 。POULOS和HULL<sup>[12]</sup>提出相对刚度 $K_R$ ,可以判断单桩数值模型的桩-土相对刚度:

$$K_R = \frac{E_p I_p}{E_s L^4} \begin{cases} > 0.208, & \text{刚性桩} \\ < 0.0025, & \text{柔性桩} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $E_p I_p$  代表桩的抗弯刚度;  $E_s$  代表桩周土体弹性模量;  $L$  为单桩的嵌固埋深。因此数值计算定义的直径 1 m、5 m 和 10 m 单桩的相对刚度  $K_R$  分别为 0.001、0.080 和 0.649, 分别对应了柔性桩、半刚性桩和刚性桩, 确保计算模型能够涵盖单桩的不同尺寸效应。桩-土相互作用中切向行为采用库伦摩擦模型模拟, 摩擦系数  $\mu$  取为 0.31<sup>[6,13]</sup>, 正向接触采用硬接触, 计算过程中桩-土接触面允许分离。

水平荷载施加在泥面以上 1 m 处的桩顶中心参考点上, 该参考点耦合约束到桩身。此外, 为了避免边界效应, 计算模型 (图 2) 中土体域直径取  $20D$ , 桩端底部距离土体域边界  $2.5D$ , 土体域侧面约束了水平方向变形, 土体域底部固定, 对称面采用对称约束<sup>[11]</sup>。土体和单桩均采用八节点六面体线性减缩积分单元 (C3D8R) 模拟, 桩周附近和底部  $1.0D$  范围内土体均进行了网格加密处理, 网格尺寸经过敏感性分析, 保证了数值计算结果的收敛性。

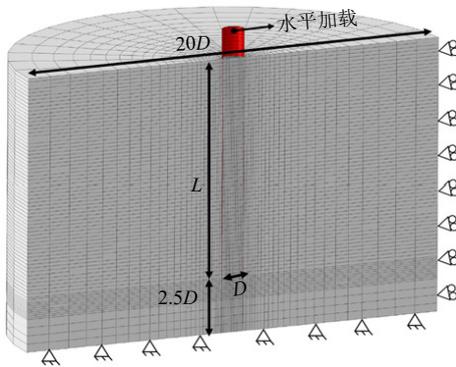


图 2 典型单桩数值分析模型  
Fig. 2 Typical numerical model for monopile

## 2 水平受荷试验验证

为了验证水平受荷单桩数值分析模型的准确性和可靠性, 按照 LAI 等<sup>[11]</sup> 开展的单桩水平加载离心机模型试验中对应的原型桩尺寸 (埋深  $L=60$  m, 直径  $D=4$  m 和 6 m, 分别对应柔性桩和半刚性桩) 建立 1:1 的数值分析模型, 数值模型参数均按第一章描述进行设置, 通过该数值模型获得了不同原型单桩对应试验工况下的荷载-位移曲线。

图 3 (a) 和图 3 (b) 分别对比了直径 4 m 的柔性桩和直径 6 m 的半刚性桩的单桩数值模型和

离心机试验获得的桩头荷载-位移响应。可以发现, 数值模型数据在初始阶段和离心机试验数据拟合较好, 随着桩头水平加载至 1.5 m 时, 数值模型计算值与离心机试验实测值误差均小于 5%。

总体来看, 不论是柔性桩还是半刚性桩, 数值模型和离心机试验计算得到的桩头水平受荷响应规律基本一致, 该有限元模型能够很好地反映水平受荷作用下的桩身响应, 也证明了采用该数值分析模型进一步开展尺寸效应下的单桩水平受荷特性研究是合理可靠的。

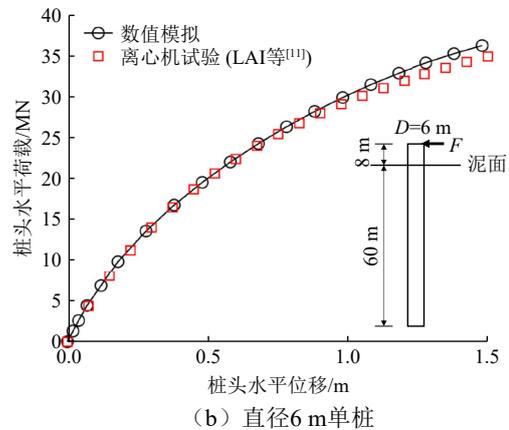
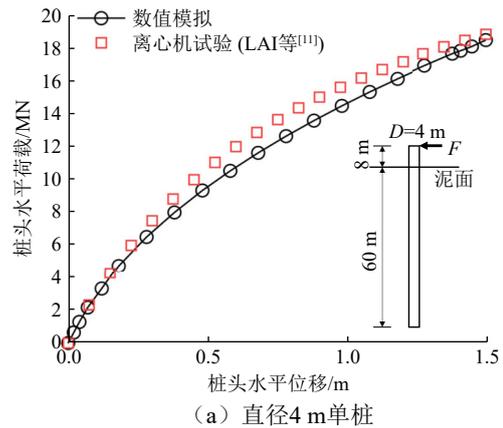


图 3 数值模拟和离心机试验获取的荷载-位移曲线对比  
Fig. 3 Comparison of load-displacement curves between numerical models and centrifuge tests

## 3 水平承载贡献分析

### 3.1 单桩荷载-位移曲线及极限承载力

本节利用建立的数值分析模型, 分析了水平受荷过程中不同桩-土相对刚度单桩的荷载-位移曲线及极限承载力。

图 4 呈现了直径为 1 m、5 m 和 10 m 的单桩基础泥面处的荷载-位移曲线, 其中横轴位移为无量纲处理后的泥面水平位移 (即  $y/D$ )。通常来说, 海上风电单桩基础的设计对单桩基础的水平变形有

着严格的控制，因此可以取单桩泥面水平位移为  $10\%D$  所对应的水平荷载作为水平极限承载力<sup>[8]</sup>。根据图4可以发现：无论是单桩的初始刚度响应还是水平承载力大小均随着单桩直径的增大而增大。3根单桩对应的水平极限承载力分别为 0.28 MN、4.04 MN 和 8.42 MN，随着直径的增大，水平极限承载力和单桩受荷响应均具有较为明显的尺寸效应。

### 3.2 不同桩-土相对刚度单桩的桩周土体位移场

研究表明，水平受荷单桩基础的水平承载力和桩周土体的破坏模式紧密相关<sup>[14]</sup>，为此，图5绘制了不同桩-土相对刚度单桩基础极限状态下（泥面位移  $10\%D$ ）的土体位移场。可以发现，直径为 1 m 时，单桩水平受荷下桩周土体的变形趋势主要由浅层土体的楔形破坏流动区域和深处的绕桩水平流动区域组成；直径为 5 m 时，单桩水平受荷下桩周土体的流动出现三区模式，即浅层土体的楔形破坏流动区域、中部的绕桩水平流动区域以及底部的圆形转动区域，半刚性桩水平受荷时不仅由浅层土体提供抗力，也会受到来自深部土体所提供的土抗

力；直径为 10 m 时，单桩水平受荷下桩周土体的流动出现两区模式，即上层土体楔形破坏流动区域和底部的圆形转动区域，分界点为刚性转动的转动中心。刚性桩在水平受荷时会调动整个桩身范围的所有土体，反馈在单桩水平承载力上会发现明显的尺寸效应，此时 10 m 单桩对应的水平极限承载力明显提升。

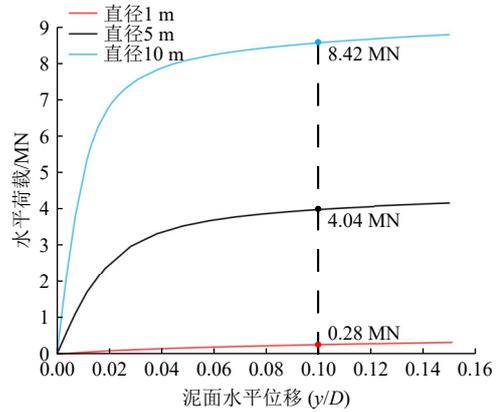


图4 数值模型单桩泥面处荷载-位移曲线  
Fig. 4 Load-displacement curves at mudline based on numerical models

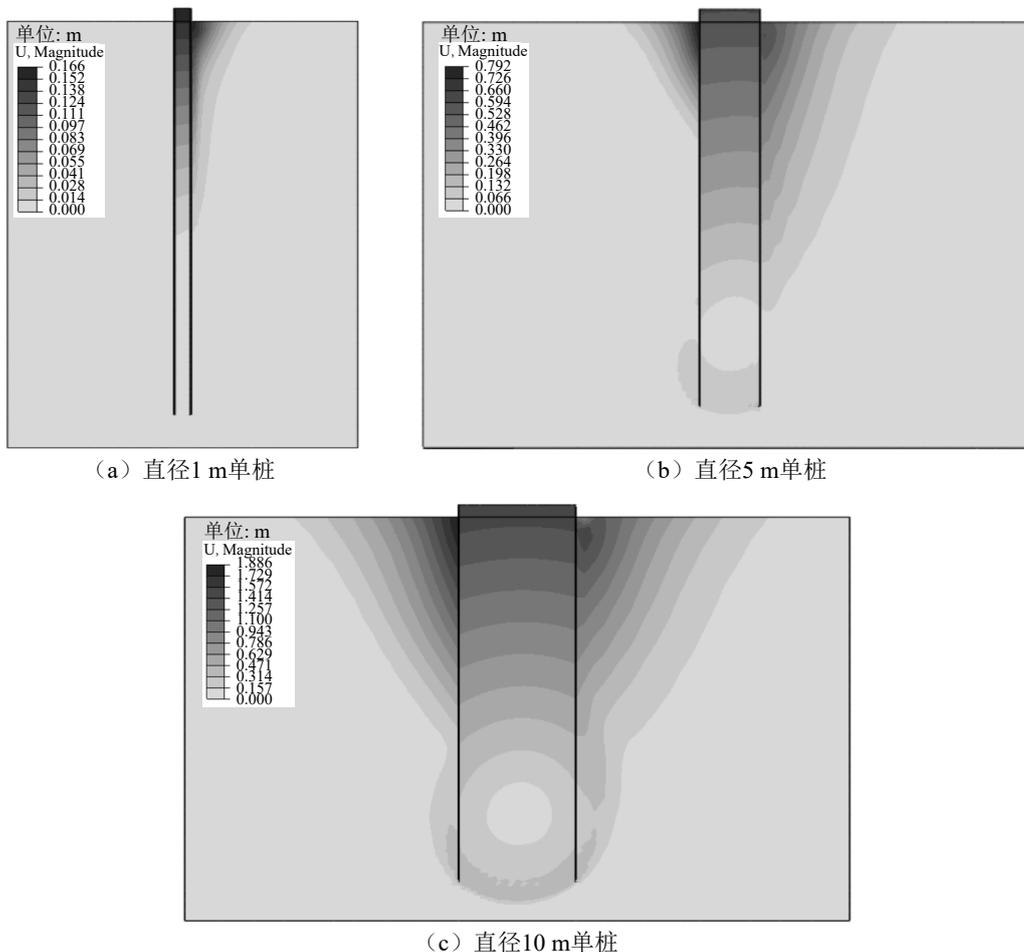


图5 不同桩-土相对刚度单桩基础极限状态下的土体位移场

Fig. 5 Soil displacement field under ultimate state of monopile foundation with different pile-soil relative stiffness

结合 3.1 节的荷载-位移响应分析, 可以发现尺寸效应下单桩的桩周土体变形存在差异, 水平受荷下调动的土体范围和破坏模式也不尽相同。当直径增大后, 单桩水平受荷响应逐渐由柔性桩转变为刚性桩, 对应的水平承载力也随之增大。并且随着直径的增大, 单桩抗力的提供逐渐由浅层土体向深层扩展, 当直径增大为 10 m 时, 此时单桩基础已经呈刚性转动, 桩身深度范围内的土体均被调动起来抵抗水平荷载的作用, 这是导致尺寸效应产生的主要原因。

### 3.3 单桩抵抗水平承载贡献宏观分析

为了定量分析尺寸效应下单桩基础的不同抗力作用, 本节以泥面处荷载-位移曲线为表征, 从宏观上定量研究不同土抗力对单桩基础水平承载力的具体贡献。

为了便于分析侧摩阻力和基底抗力(基底剪力与弯矩)的承载贡献, 在先前建立单桩有限元数值分析模型的基础上, 每个数值分析模型再增设 3 个对照的试验组别, 如图 6 所示。对照试验包括了组 1、组 2 和组 3。其中组 1 将数值模型桩内壁接触面设置为无摩擦, 模拟桩内壁无侧摩阻力工况; 组 2 将数值模型外壁接触面设置为无摩擦, 模拟桩外壁无侧摩阻力工况; 组 3 移除桩内的土塞(同时移除桩底以下 1 倍直径的土塞), 主要模拟无基底抗力工况。为了保证土塞移除后数值模型计算的收敛性, 约束移除土塞后空腔底面的法向位移。

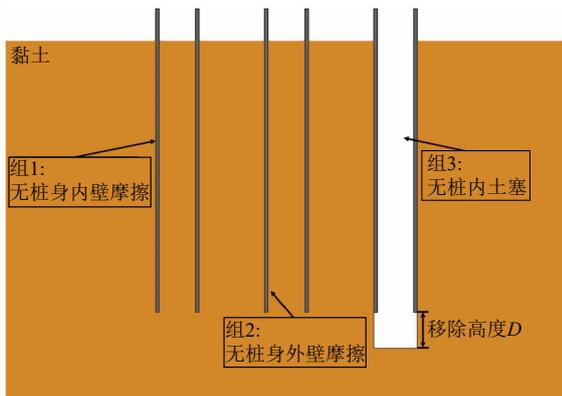
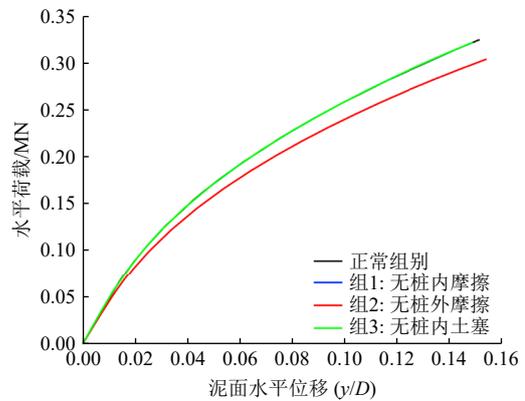


图 6 对比试验组示意图

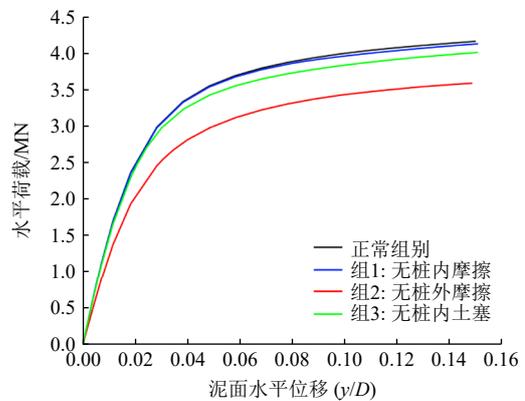
Fig. 6 Contrast test setup for numerical simulations

图 7 给出了实际工况和对照工况下单桩的泥面处荷载-位移曲线对比结果, 可以发现: 当忽略桩外侧摩阻力后, 柔性桩、半刚性桩和刚性桩的水平受荷响应均出现不同程度的下降, 1 m、5 m 和 10 m 直径单桩的极限承载力分别下降约 10%、14% 和 17%; 当忽略桩内侧摩阻力后, 柔性桩、半刚性桩和刚性桩的水平受荷响应几乎不变, 对应的单桩极限承载力下降均在 1% 左右; 当忽略桩内土塞

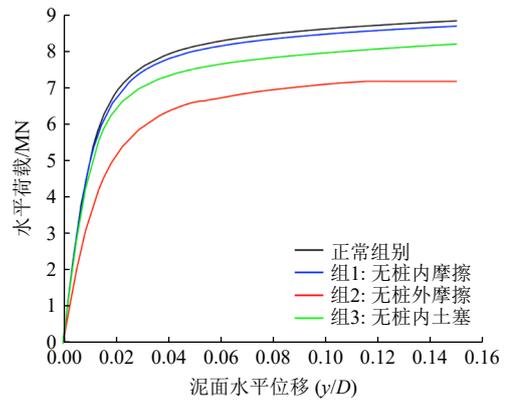
后, 柔性桩的水平受荷响应几乎不变, 而半刚性桩和刚性桩的响应有明显降低, 对应极限承载力分别下降约 4% 和 8%。



(a) 直径 1 m 单桩



(b) 直径 5 m 单桩



(c) 直径 10 m 单桩

图 7 泥面荷载-位移曲线对比

Fig. 7 Comparison of load-displacement curves at mudline

总体来看, 从宏观角度分析水平受荷单桩的水平承载力贡献: 水平土抗力提供的承载贡献最高, 桩外侧摩阻力其次, 基底抗力和桩内侧摩阻力最低。对于直径较小的柔性单桩而言, 侧摩阻力和基底抗力的贡献可以忽略, 这也是仅考虑水平向土抗力的  $p-y$  曲线法适用的原因, 但随着桩径的增大, 侧摩阻力和基底抗力的贡献也随之增大, 如果仅考虑水平土抗力, 会严重低估单桩的水平承载力, 造

成单桩基础设计优化阶段的保守。

### 4 桩周水平土抗力空间分布规律

第3章节计算结果表明，水平土抗力对水平承载贡献最大，侧摩阻力次之，桩内土塞和基底抗力的承载贡献偏小。因此，本节针对水平土抗力的空间分布开展进一步研究，利用数值模型计算并对比分析了水平受荷单桩的水平土抗力空间分布规律。

#### 4.1 柔性桩水平土抗力空间分布规律

图8呈现了水平极限承载状态时柔性单桩的桩周水平土抗力空间分布情况。可以发现：对于柔性单桩而言，提供水平抗力矩的区域主要集中在浅层土体，即0~14 m深度，桩后土体(0°~90°)则由于桩-土相互作用接触的减弱处于主动状态，桩前土体(90°~180°)由于桩-土相互作用接触的增强处于被动状态，从而形成抵抗水平荷载的力矩。当深度大于14 m后，柔性桩桩身变形较小，水平土抗力所能提供的抗力矩也相对较小。

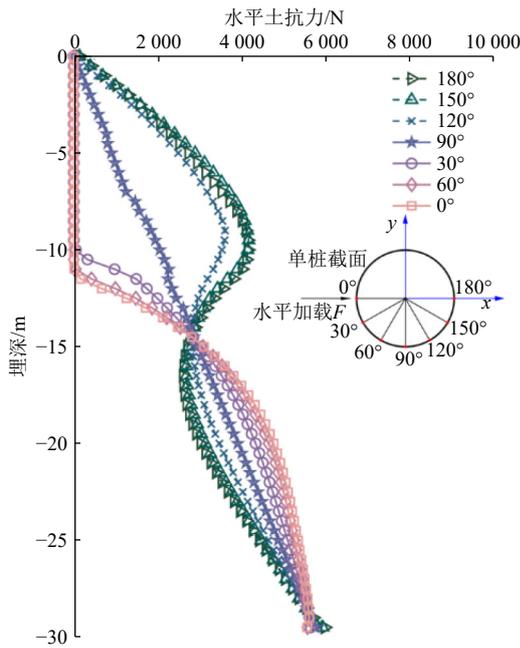


图8 柔性桩水平土抗力空间分布

Fig. 8 Distribution of horizontal soil resistance around flexible monopile

#### 4.2 半刚性桩水平土抗力空间分布规律

图9给出了半刚性桩的水平土抗力空间分布规律。可以发现，桩周土体分布以深度-24 m的旋转中心为界，浅层区域类似于柔性桩，该范围内的桩土接触加强区域的土体呈被动状态，桩土接触削弱区域的土体呈主动状态。但相较于柔性单桩，半刚性单桩的桩基础底部土体发生位移，出现“踢脚”现象，下部土体同样被调动，将为单桩抵抗水平荷载提供可观的承载贡献。

#### 4.3 刚性桩水平土抗力空间分布规律

图10给出了刚性桩的水平土抗力空间分布规律。可以明显发现，由于刚性桩的特性，单桩基础底部土体此时发生较大位移，出现明显的“踢脚”现象，整个单桩绕转动中心呈刚性转动，刚性单桩的整个桩身范围内的土体均被调动参与抵抗水平荷载的作用。无论是浅层区域，抑或是深层区域的土体均能够提供显著的抗力矩，这也是刚性桩水平极限承载力有效提升的主要原因之一。

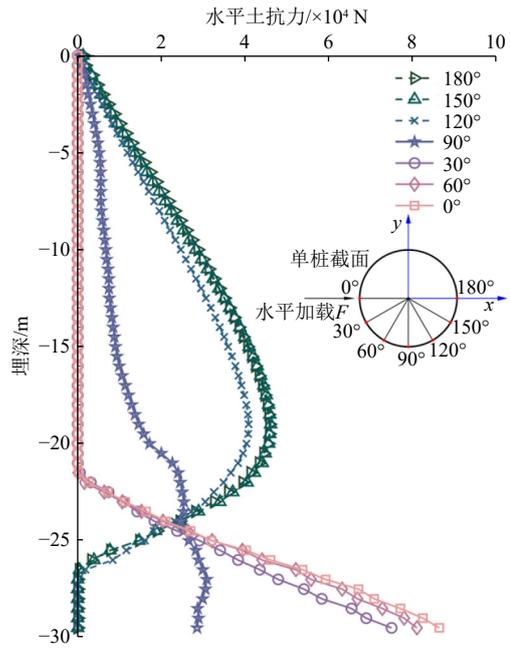


图9 半刚性桩水平土抗力空间分布

Fig. 9 Distribution of horizontal soil resistance around semi-rigid monopile

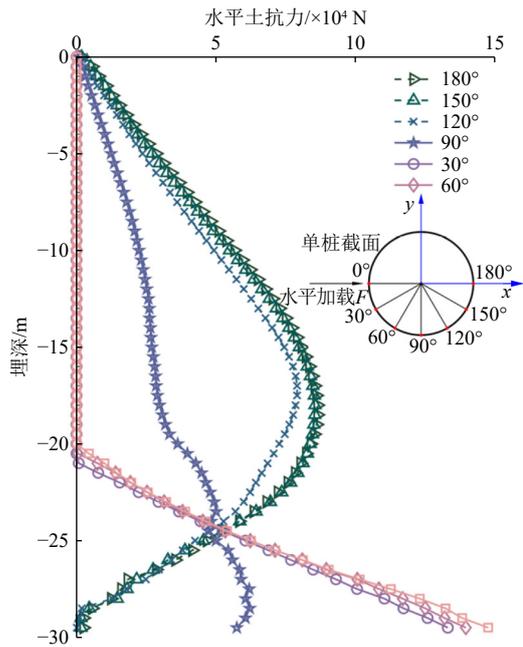


图10 刚性桩水平土抗力空间分布

Fig. 10 Distribution of horizontal soil resistance around rigid monopile

## 5 结 论

本文首先利用离心机试验验证了 ABAQUS 钢管单桩数值分析模型的有效性, 随后基于该模型对尺寸效应下水平受荷单桩的承载贡献开展了研究, 并进一步分析了尺寸效应下水平受荷单桩的水平土抗力空间分布规律。主要结论如下:

(1) 水平受荷单桩数值分析模型的结果与离心机试验的结果拟合较好, 验证了数值模型对应参数与设置的有效性。

(2) 尺寸效应下单桩的水平承载力贡献占比最高的是水平土抗力, 其次是桩外侧摩阻力(若忽略桩外侧摩阻力后, 1 m、5 m 和 10 m 直径单桩极限承载力分别下降 10%、14% 和 17%), 然后是基底抗力(当忽略桩内土塞后, 柔性桩的水平受荷响应几乎不变, 而半刚性桩和刚性桩的响应有明显降低, 对应极限承载力分别下降约 4% 和 8%), 最后是桩内侧摩阻力(当忽略桩内侧摩阻力后, 柔性桩、半刚性桩和刚性桩的水平受荷响应几乎不变, 对应的单桩极限承载力下降均在 1% 左右)。总体来看, 随着桩径的增大, 侧摩阻力和基底抗力的贡献随之增大, 如果设计时仅考虑水平土抗力的贡献, 会严重低估单桩的水平承载力。

(3) 随着单桩桩-土相对刚度的增大, 水平受荷桩调动的土体从浅层区域拓展为深层区域, 当桩身呈现完全刚性时, 桩身范围内的土体均会被调动参与抵抗水平荷载的作用, 浅层区域和深层区域的土体均能够提供显著的抗力矩。

## 参考文献

- [1] 王立忠, 洪义, 高洋洋, 等. 近海风电结构台风环境动力灾变与控制[J]. *力学学报*, 2023, 55(3): 567-587.  
WANG Lizhong, HONG Yi, GAO Yangyang, et al. Dynamic catastrophe and control of offshore wind power structures in typhoon environment[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2023, 55(3): 567-587.
- [2] 郭琼玲. 高压旋喷桩在海上风电桩周土加固中的应用[J]. *地基处理*, 2023, 5(1): 62-66.  
GUO Qionglin. Application of the high pressure jet grouting pile in soil reinforcement around offshore wind power pile[J]. *Journal of Ground Improvement*, 2023, 5(1): 62-66.
- [3] 赖踊卿. 软黏土地基海上风机大直径单桩水平受荷特性与分析模型[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.  
LAI Yongqing. Modelling of lateral behaviour of large-diameter monopiles supporting offshore wind turbines in soft clay[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021.
- [4] 竺明星, 卢红前, 戴国亮, 等. 基于侧阻硬化与软化模型的大直径桩基水平承载力研究[J]. *岩土工程学报*, 2018, 40(增刊 2): 132-136.  
ZHU Mingxing, LU Hongqian, DAI Guoliang, et al. Lateral bearing capacity of large-diameter pile foundation based on hardening and softening models of side resistance[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 40(S2): 132-136.
- [5] BYRNE B W, BURD H J, ZDRAVKOVIĆ, et al. PISA: new design methods for offshore wind turbine monopiles[J]. *Revue Française de Géotechnique*, 2019, 158: 3.
- [6] WANG L, LAI Y, HONG Y, et al. A unified lateral soil reaction model for monopiles in soft clay considering various length-to-diameter (L/D) ratios[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 212: 107492.
- [7] ANUSIC I, LEHANE B M, EIKSUND G R, et al. Influence of installation method on static lateral response of displacement piles in sand[J]. *Géotechnique Letters*, 2019, 9(3): 193-197.
- [8] 王欢. 砂土海床大直径单桩基础和桶形基础水平受荷特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.  
WANG Huan. Lateral behaviour of offshore monopile and buckets foundations in sand[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.
- [9] WANG H, WANG L Z, HONG Y, et al. Influence of pile diameter and aspect ratio on the lateral response of monopiles in sand with different relative densities[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2021, 9(6): 618.
- [10] HE B, JIANG J, CHENG J, et al. The capacities of tripod bucket foundation under uniaxial and combined loading[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 220: 108400.
- [11] LAI Y Q, WANG L Z, HONG Y, et al. Centrifuge modeling of the cyclic lateral behavior of large-diameter monopiles in soft clay: Effects of episodic cycling and reconsolidation[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 200: 107048.
- [12] POULOS H G, HULL T S. The role of analytical geome-

