

## 考虑长径比及冲刷的单桩基础侧向承载特性分析

张融圣, 刘寒秋, 朱嵘华, 田振亚, 孙香

### Analysis of lateral bearing behaviors of scoured monopile foundations considering the influence of length-to-diameter ratio

ZHANG Rongsheng, LIU Hanqiu, ZHU Ronghua, TIAN Zhenya, SUN Xiang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12170/20220419001>

#### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

##### 局部冲刷对部分埋入单桩水平承载性状的影响

Impacts of local scour on lateral bearing behavior of partially embedded single piles

水利水运工程学报. 2017(3): 64 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2017.03.009>

##### 基于桩筒复合基础海上风机振动特性分析

Analysis of vibration characteristics of offshore wind turbine with pile-tube composite foundation

水利水运工程学报. 2017(5): 103 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2017.05.015>

##### 跨海桥梁基础冲刷特征研究

Scour features of sea-crossing bridge piers

水利水运工程学报. 2021(4): 131 <https://doi.org/10.12170/20210105002>

##### 天然河道丁坝群局部冲刷三维数值模拟

Three-dimensional numerical simulation of local scour based on spur dikes in a natural river

水利水运工程学报. 2020(1): 59 <https://doi.org/10.12170/20180920001>

##### 波流作用下淹没圆柱局部冲深影响因素分析

Research on the influencing factors of scour depth around submerged cylinder under combined action of wave and current

水利水运工程学报. 2019(6): 69 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.06.008>

##### 考虑土性参数空间变异性的单桩竖向承载力分析

Analysis of vertical bearing capacity of single pile foundations considering spatial variability of soil parameters

水利水运工程学报. 2019(5): 85 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.05.011>



扫码进入官网，阅读更多精彩内容

关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI:10.12170/20220419001

张融圣, 刘寒秋, 朱嵘华, 等. 考虑长径比及冲刷的单桩基础侧向承载特性分析 [J]. 水利水运工程学报, 2023(5): 95-104. (ZHANG Rongsheng, LIU Hanqiu, ZHU Ronghua, et al. Analysis of lateral bearing behaviors of scoured monopile foundations considering the influence of length-to-diameter ratio[J]. Hydro-Science and Engineering, 2023(5): 95-104. (in Chinese))

# 考虑长径比及冲刷的单桩基础侧向承载特性分析

张融圣<sup>1</sup>, 刘寒秋<sup>1</sup>, 朱嵘华<sup>1,2</sup>, 田振亚<sup>2</sup>, 孙 香<sup>2</sup>

(1. 浙江大学 海洋学院, 浙江 舟山 316021; 2. 阳江海上风电实验室, 广东 阳江 529500)

**摘要:** 冲刷是海上风电单桩基础设计中需要考虑的重要因素, 然而计算时通常忽略局部冲刷坑的几何形状及桩基入土段长径比( $L/D$ )的影响, 导致设计偏于保守。针对这一问题, 建立考虑局部冲刷坑形态的海上风电桩基础三维有限元模型, 研究冲刷作用下不同长径比桩基础的侧向承载特性变化规律, 提出适用于受局部冲刷小长径比单桩基础的简化梁-弹簧分析模型并进行验证。研究表明: 小长径比单桩基础的侧向响应对局部冲刷深度较为敏感。随着冲刷深度的增大, 基底反力和桩侧垂向摩阻力等土反力分量对桩基水平承载力的贡献也随之增大, 仅考虑桩侧土反力的传统 API  $p-y$  曲线方法难以适用受冲刷单桩基础的计算分析, 须考虑基底效应的影响。研究结果可为海上风电基础设计分析提供参考。

**关键词:** 局部冲刷; 海上风电; 单桩基础; 长径比

中图分类号: TU473; P751

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2023)05-0095-10

基础冲刷是导致海工结构物破坏的主要原因之一<sup>[1-2]</sup>。海上风电支撑结构基础大多采用单桩型式, 冲刷会掏蚀桩基附近土体, 削弱地基承载力<sup>[3]</sup>, 最终影响机组的正常运行甚至导致支撑结构发生整体失稳倾覆。因此, 开展冲刷作用下海上风电单桩基础的分析方法及响应变化预测研究具有重要意义。工程实践中, 一般采用国内外规范<sup>[4-5]</sup> 普遍推荐使用的  $p-y$  曲线法(以下简称为 API 方法)来模拟海上风电桩基础的侧向桩土相互作用。但规范中并未给出考虑冲刷坑几何形态的水平受荷桩计算方法, 故工程设计中常将局部冲刷直接简化为整体冲刷, 造成桩基设计偏于保守<sup>[6]</sup>。针对上述问题, 国内外学者普遍基于三维数值仿真及物理模型试验等研究手段开展了受局部冲刷单桩的研究。漆文刚等<sup>[7-8]</sup> 基于 ABAQUS 建立大直径单桩基础有限元计算模型, 探讨了局部冲刷对水平承载桩基的桩土相互作用机理的影响; Qi 等<sup>[9-11]</sup> 通过离心机试验, 分析了整体冲刷和局部冲刷对砂土地基中的桩基水平承载力和  $p-y$  曲线的影响; Liang 等<sup>[12-13]</sup> 通过理论公式推导, 研究了黏性土中由于桩周土体冲刷而导致的地基土应力历史变化对桩基水平承载力的影响, 提出了相应的  $p-y$  曲线修正模型。

桩基入土段长度与外径之比( $L/D$ )是控制桩基水平承载特性的关键参数<sup>[14]</sup>, 海上风电单桩基础大多属于大直径短桩,  $L/D$  通常小于 10。根据小直径柔性长桩( $L/D$  相对较大)现场试验<sup>[15-16]</sup> 提出的 API 方法由于忽略了由桩基长径比减小而产生的尺寸效应, 往往低估了单桩基础的承载力<sup>[17-18]</sup>。海床冲刷会导致桩基入土段长径比进一步减小, 使得尺寸效应对小长径比单桩基础的影响愈发突出, API 方法可能难以适用。然而, 现有针对受冲刷桩基分析方面的研究, 大多忽略了由冲刷引起的入土段长径比减小而带来的侧向承载特性变化, 较少针对长径比对局部冲刷后桩基剩余承载力的影响开展定量分析。

收稿日期: 2022-04-19

基金项目: 广东省重点领域研发计划项目(2021B0707030001); 广东省科技专项资金引进重大科技创新资源项目(SDZX2020001)

作者简介: 张融圣(1997—), 男, 云南昆明人, 硕士研究生, 主要从事海上风电支撑结构研究。

E-mail: jeremyzrs@zju.edu.cn 通信作者: 朱嵘华(E-mail: zhu.richard@zju.edu.cn)

本文建立考虑局部冲刷坑形态的海上风电桩基础三维有限元模型,对比不同长径比桩基受冲刷后的侧向响应,定量分析局部冲刷工况下小长径比单桩基础各土反力分量对水平承载力贡献的变化规律,并探讨 API 方法的适用性及冲刷深度对土反力曲线的影响。最后基于前文讨论结果,提出考虑基底效应的受局部冲刷海上风电单桩基础简化梁-弹簧计算模型,并通过与三维有限元计算结果的对比,验证该模型预测结果的合理性。

## 1 考虑局部冲刷坑形态的三维有限元模型

采用有限元分析软件 ABAQUS 建立考虑冲刷坑形态的三维桩土相互作用数值模型,如图 1 所示。桩基与土体模型均采用三维八节点的缩减积分单元 C3D8R,在桩土接触面附近应力较大的区域适当加密网格以保证计算精度。土体侧边界约束水平位移,底边界约束  $z$  向位移。此外,为减少边界效应对计算结果的影响,土体模型的直径取为  $20D$ ,桩基底部以下土层厚度取为  $5D$ 。桩土接触面的法向设为硬接触以避免穿透,切向则设置为罚函数,摩擦系数  $\mu = \tan(2\varphi/3)$ , $\varphi$  为土体的内摩擦角。桩周的局部冲刷坑为倒圆台形,坑底直径固定为 1 倍桩径,其几何形状由冲刷坑坡角  $\beta$  与冲刷深度  $S_d$  共同确定。

地基土和桩基的输入参数取值参考文献 [9]。土体为硅质砂土,采用工程中常用的 M-C 模型描述其塑性,剪切模量为  $1.9 \text{ MPa}$ ,内摩擦角为  $34.9^\circ$ ,浮重度为  $10.28 \text{ kN/m}^3$ ,泊松比为  $0.35$ 。桩基直径  $D = 2.75 \text{ m}$ ,壁厚  $56 \text{ mm}$ ,无冲刷时桩基顶部自由段长度  $e$  为  $2D$ ,截面抗弯刚度为  $88.1 \text{ GN}\cdot\text{m}^2$ 。

基于所建立的有限元模型,对入土深度为  $31.25 \text{ m}$  的单桩基础在局部冲刷深度分别为  $0$ 、 $5.0$  和  $7.5 \text{ m}$  共 3 个试验工况下的响应开展数值仿真,在桩顶逐级施加水平力,并提取桩顶的载荷-位移曲线。图 2 为仿真计算值(图中实线)与相同条件下的试验结果<sup>[9]</sup>(图中点划线)的对比。定性来看,对于同一冲刷工况,桩顶位移相同时,桩顶位移的有限元值与试验值较为贴合,但各级荷载下的偏移程度有所不同。为进一步定量评价有限元模型预测效果,引入 Burd 等<sup>[9]</sup>提出的评价因子  $\eta$ :

$$\eta = (A_{\text{ref}} - A_{\text{diff}}) / A_{\text{ref}} \quad (1)$$

式中: $A_{\text{ref}}$ 为图 2 中曲线 2 与  $x$  轴所围面积; $A_{\text{diff}}$ 为图 2 中曲线 1 与曲线 2 所围面积。 $\eta$ 越趋于 1 表明两条曲线重合程度越高。计算得到 3 个对比工况的  $\eta$  分别为  $0.95$ 、 $0.97$  和  $0.96$ ,说明本文所建立的三维有限元模型能够较好地反映受局部冲刷桩基的水平承载能力变化过程。

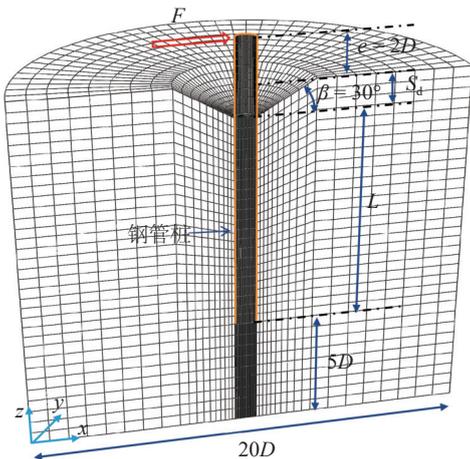


图 1 有限元模型

Fig. 1 Finite element model

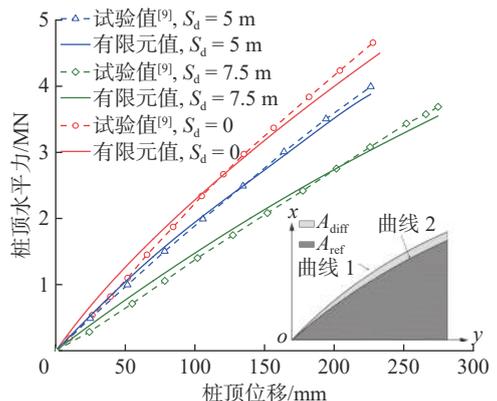


图 2 桩顶荷载-位移曲线对比

Fig. 2 Comparison of pile head load-displacement curves predicted by FE model and centrifuge test

## 2 不同长径比与冲刷工况的设置

由于控制单桩基础水平承载特性的参数往往是长径比而非桩径<sup>[17]</sup>, 故本文研究对象的桩基外径及壁厚与前文已验证的模型保持一致。根据以往设计经验, 海上风电大直径单桩基础的入土段长径比通常为 6~8, 因此, 相应设置了具有不同长径比的 3 个单桩模型 PILE2、PILE3 和 PILE4(表 1)。桩基在水平力作用下的变形刚柔特性与地基土和桩基的相对刚度有关, Poulos 等<sup>[20]</sup> 给出了如下定义:

$$4.8 < E_s L^4 / E_p I_p < 388.6 \quad (2)$$

式中:  $E_s$  为地基土压缩模量;  $L$  为桩基入土深度;  $E_p I_p$  为桩基截面模量; 4.8 与 388.6 分别为刚性桩上界和柔性桩下界。根据式(2)可以计算得到上述 3 个模型桩基的土/桩刚度比分别为 23.66、13.87 和 7.49, 均位于刚性桩与柔性桩之间, 但更接近于刚性(下称偏刚性桩)。为进一步分析入土段长径比对受冲刷桩基水平承载特性的影响, 另外设置  $L/D$  为 16.4 的柔性长桩 PILE1 作为对比。

本文设置了无冲刷、局部冲刷及整体冲刷为代表的 3 种冲刷形态。冲刷深度往往与桩径、水文条件及海床土类型直接相关, 如砂质海床的 Scroby Sands 风场的 4.2 m 直径桩基在安装 5 个月后桩周形成深 1.38D 的冲坑, 而黏土质海床的 Kentish Flats 风场的 5 m 直径桩基的最大冲刷坑深度也达到了 0.46D<sup>[2]</sup>。在缺少实测数据时, API 规范<sup>[5]</sup> 建议桩周局部冲刷坑最大冲刷深度  $S_d$  取为 1.5D, 冲刷坑坡角  $\beta$  取为 30°。为不失研究的一般性, 本文中的局部冲刷和整体冲刷工况参考 API 规范各设置了 0.5D、1.0D 及 1.5D 共 3 种冲刷深度。冲刷工况见表 2, 与表 1 中所列的 4 种不同长径比桩基两两组合, 总计形成 28 组仿真工况。

表 1 仿真桩基参数

Tab. 1 Pile parameters used in FE model

桩基编号	入土深度/m	入土段长径比	土/桩刚度比	桩基属性
PILE1	45.00	16.4	414.25	柔性
PILE2	22.00	8.0	23.66	偏刚性
PILE3	19.25	7.0	13.87	偏刚性
PILE4	16.50	6.0	7.49	偏刚性

表 2 仿真冲刷工况设置

Tab. 2 Scour cases used in FE model

冲刷形态	工况编号	冲刷深度/m	冲刷坑坡度/(°)
无冲刷	N-1	0	0
	L-1	0.5D	
局部冲刷	L-2	1.0D	30
	L-3	1.5D	
	G-1	0.5D	
整体冲刷	G-2	1.0D	0
	G-3	1.5D	

## 3 冲刷对桩基承载特性的影响

### 3.1 冲刷形态对桩基响应的影响

冲刷坑形态对水平受荷桩基的桩身响应具有一定影响。图 3 对比了 PILE2( $L/D = 8$ ) 在不同冲刷工况下的桩顶载荷-位移曲线。从图 3 可见, 随着桩周冲刷坑深度的增大, 桩基的承载力随之下降。然而, 当冲刷深度相同时, 受整体冲刷桩基的承载力显著小于受局部冲刷的桩基, 这表明忽略局部冲刷坑形态将显著低估桩基水平承载力。

为进一步分析长径比对桩身响应的影响, 计算 PILE1 和 PILE4 在 3 MN 水平力作用下, 不同冲刷工况对应的桩身响应。从图 4 可见, PILE4 在水平力作用下绕转动中心  $O$  旋转, 呈现明显的刚性桩特征; 而 PILE1 的桩身位移曲线则出现竖向切线, 整体表现为柔性桩特征。虽然不同柔度桩基的桩身变形均随着冲刷深度增大而增大, 但也显然可见冲刷坑形态对偏刚性桩的桩身位移影响更大。当局部冲刷深度达到 1.5D 时, PILE4 的桩顶位移已经达到了未冲刷时的 2 倍, 而与之对应的 PILE1 则只增长了 30%, 这意味着小长径比桩基对冲刷坑形态更为敏感。

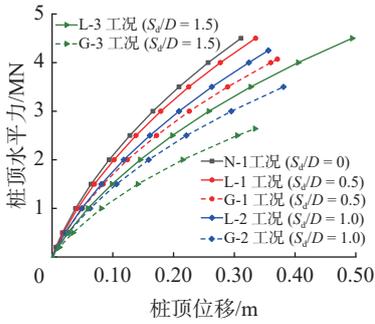
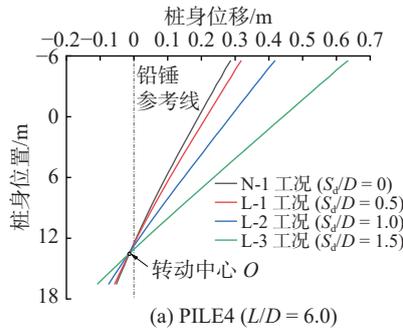
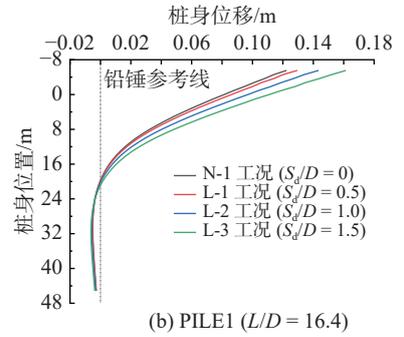


图 3 PILE2 桩顶荷载-位移曲线对比

Fig. 3 Comparison of pile head load-displacement curves of PILE2

(a) PILE4 ( $L/D = 6.0$ )(b) PILE1 ( $L/D = 16.4$ )图 4 不同冲刷坑形态对 PILE4 和 PILE1 桩身变形的影响 ( $F = 3 \text{ MN}$ )Fig. 4 Influences of different scour pit's shapes on deflection of PILE4 and PILE1 ( $F=3 \text{ MN}$ )

海上风电单桩基础一般为长径比小于 10 的偏刚性桩<sup>[21-22]</sup>, 水平承载特性接近于 PILE2 和 PILE4, 并以侧向承载为主; 导管架基础的桩基则因考虑抗拔性能而增大桩长, 大多属于柔性长桩, 桩基水平承载特性接近于 PILE1, 且通常以竖向承载为主<sup>[23-24]</sup>。结合上述对比结果看, 单桩基础比导管架基础在设计时更需要考虑冲刷坑形态的影响。

### 3.2 长径比对受局部冲刷桩基承载力组成的影响

文献 [17] 在分析了于欧洲北海沿岸开展的大直径单桩基础现场试验数据后, 认为大直径单桩基础的水平承载力由桩侧土反力、基底水平力与力矩及桩侧垂向摩阻力共同组成, 其受力分析如图 5 所示。传统 API 方法仅考虑了桩侧土反力, 忽略了其余分量的贡献, 可能会低估小长径比单桩基础冲刷后的承载力。因此, 有必要定量分析海上风电单桩基础在冲刷前后各土反力分量在承载力中占比的变化, 以此进一步讨论 API 方法的适用性。

从有限元计算结果中提取桩身指定截面的剪力值, 利用 Python 编写程序拟合桩身的剪力分布, 并对其求一阶导数得到桩侧土反力  $p$  的分布表达式。并从有限元模型中导出作用于桩基的其余土反力分量(基底水平力、力矩及桩侧垂向摩阻力)。根据图 5, 水平受荷桩的静力平衡条件有:

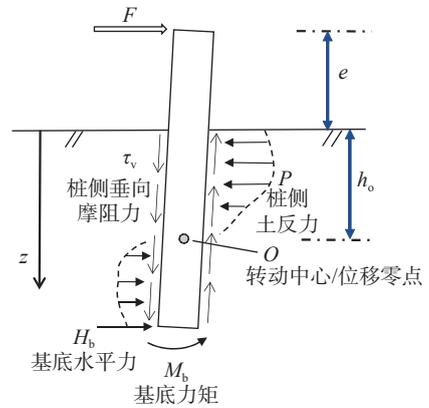


图 5 水平受荷桩受力分析

Fig. 5 Free-body diagram of lateral loaded pile

$$\int_0^L p dz + H_b + F = 0 \quad (3)$$

$$\int_0^L p(z - h_0) dz + \int_0^L \tau_v D dz + H_b(L - h_0) - F(e + h_0) = 0 \quad (4)$$

式中:  $h_0$  为桩基转动中心  $O$  (或位移零点) 到泥面距离;  $e$  为桩顶水平加载点到泥面距离;  $L$  为桩基入土深度;  $F$  为水平作用力, 其余符号物理意义参见图 5。根据上述平衡方程, 对所获取的桩基土反力值进行校核, 等式两侧误差小于 5% 时表明提取值合理。

为定量研究不同土反力分量对水平受荷桩抗倾覆能力的贡献, 参考 Wang 等<sup>[25]</sup> 的计算方法, 将各土反力分量  $i$  对点  $O$  取矩得到  $M_{s,i}$ , 并把其与外力矩  $F(e + h_0)$  之比作为水平承载力贡献占比  $R_{s,i}$ , 计算式为:

$$R_{s,i} = M_{s,i} / (F(e + h_0)) \quad (5)$$

图 6 为不同局部冲刷工况下, PILE2 ( $L/D = 8.0$ ) 的基底水平力、力矩与桩侧竖向摩阻力对桩基承载力的占比。从整体变化趋势看, 随着局部冲刷深度的增大, 桩基入土段长径比也逐步减小, 桩基水平承载特性向刚性桩过渡, 基底水平力、力矩及桩侧摩阻力对桩基承载力的贡献随之增大。其中, 基底水平力占比最高达到 9%, 紧随其后的是基底力矩。但桩侧垂向摩阻力相比前两项(二者总和约为 10%)依然较小, 不足 1%, 对桩基响应计算结果影响较小(与文献 [25] 结论一致), 故下文将其忽略。

图 7 为不同长径比桩基的基底效应随局部冲刷深度的变化曲线。达到最大冲刷深度时, 柔性桩 ( $L/D = 16.4$ ) 基底效应对承载力的贡献仅占 1.5%, 而长径比 6~8 的偏刚性桩却已经达到 10% 左右, 基底效应对桩基水平承载力的影响不能被忽略。传统的 API 曲线方法由于只构建了桩侧土反力弹簧, 会低估偏刚性桩的水平承载力, 尤其在考虑局部冲刷后, 桩基入土段长径比进一步减小, 导致 API 法难以准确预测局部冲刷后海上风电单桩基础水平承载能力。

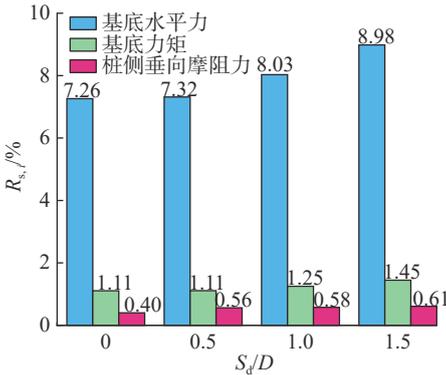


图 6 不同冲刷工况下  $H_b$ 、 $M_b$  与  $\tau_v$  对 PILE2 水平承载力贡献  
Fig. 6 The contributions of  $H_b$ 、 $M_b$  and  $\tau_v$  to the lateral bearing capacity of PILE2 under various scour cases

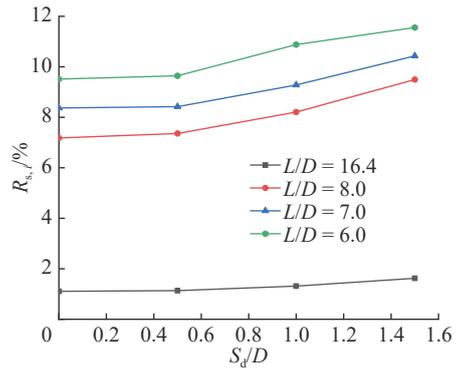


图 7 不同长径比桩基基底效应对桩基水平承载力的贡献  
Fig. 7 Variation of proportions of pile base effects to the horizontal bearing capacity of pile

### 3.3 局部冲刷对土反力曲线的影响

土反力曲线是桩基计算的重要边界条件, 只有定量分析冲刷对土反力曲线的影响, 才能合理预测冲刷后的桩身响应。有学者<sup>[26-27]</sup>认为: 局部冲刷坑形成后, 由于坑底泥线以上覆土层的存在, 土体破坏模式发生了改变, 桩前待推动的地基土楔形体体积增大, 进而导致局部冲刷时的侧向土反力相对整体冲刷增大。Lin 等<sup>[28]</sup>、Qi 等<sup>[9]</sup>分别基于理论分析和离心机试验研究了冲刷坑形态对  $p$ - $y$  曲线的影响, 引入了等效深度  $z_e$  代替原有的相对深度  $z'$  代入  $p$ - $y$  曲线计算公式中, 得到考虑局部冲刷修正后的  $p$ - $y$  曲线, 相应的等效深度  $z_e$  曲线如图 8 所示。

根据图 8 可得出: 考虑上覆土层存在的修正  $p$ - $y$  曲线的等效深度  $z_e$  满足  $z_e \leq z' + S_d = z$ , 即计算点冲刷后的等效深度  $z_e$  始终不大于冲刷前的深度  $z$ 。但当局部冲刷深度为  $1.5D$  时, Qi<sup>[9]</sup> 给出的  $p$ - $y$  曲线受冲刷影响的深度为  $1.5D$  左右, 而 Lin<sup>[28]</sup> 给出的则达到了  $7.0D$ , 二者相差较大。事实上, 由于 Lin<sup>[28]</sup> 采用的布氏解是以集中荷载作用于半无限空间弹性体表面为条件得到的, 忽略了土体的塑性, 表层土中竖向有效应力的计算值相较于实测值往往偏小<sup>[29]</sup>, 故相较于 Qi<sup>[9]</sup> 的试验结

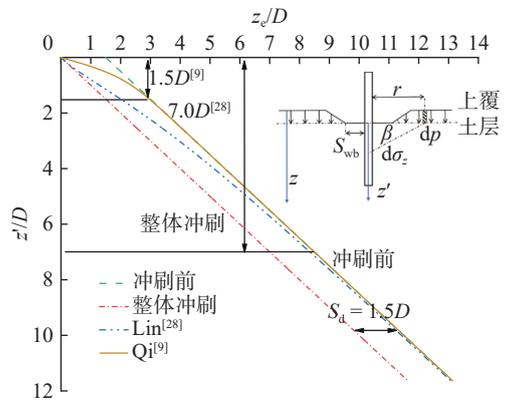


图 8 等效深度概念图示

Fig. 8 Schematic sketch of equivalent depth

果给出了更为保守的冲刷影响范围。

为确定冲刷对海上风电单桩基础  $p$ - $y$  曲线影响的深度范围, 根据前文从有限元中导出的结果, 选取 PILE3(半刚性桩)和 PILE1(柔性桩)在局部冲刷工况 L-1、L-2 下  $z'$  深度处与无冲刷工况 N-1 下  $z' + S_d(z)$  深度处的  $p$ - $y$  曲线进行对比, 结果分别如图 9 和图 10 所示。可见, 随着  $z'$  的增大, 冲刷前  $z'$  深度处的  $p$ - $y$  曲线与冲刷后  $z'$  深度处的曲线趋于重合, 且在  $z'/D \leq 0.5$  的范围内, 二者相差也较小。故可以认为, 对于同一计算点可以继续沿用冲刷前的  $p$ - $y$  曲线作为局部冲刷后的  $p$ - $y$  曲线。

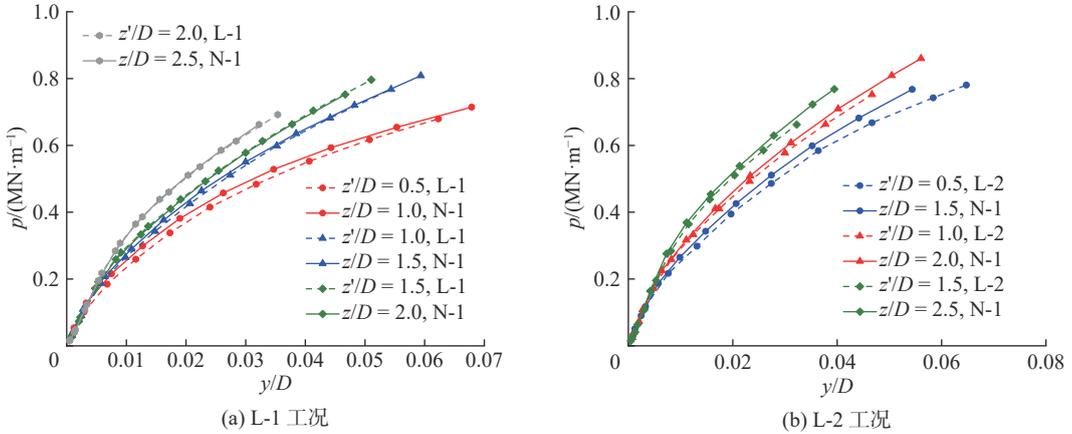


图 9 PILE3 冲刷前后同一深度处  $p$ - $y$  曲线对比

Fig. 9 Comparison of  $p$ - $y$  curves for PILE3 at the same depth before and after scour

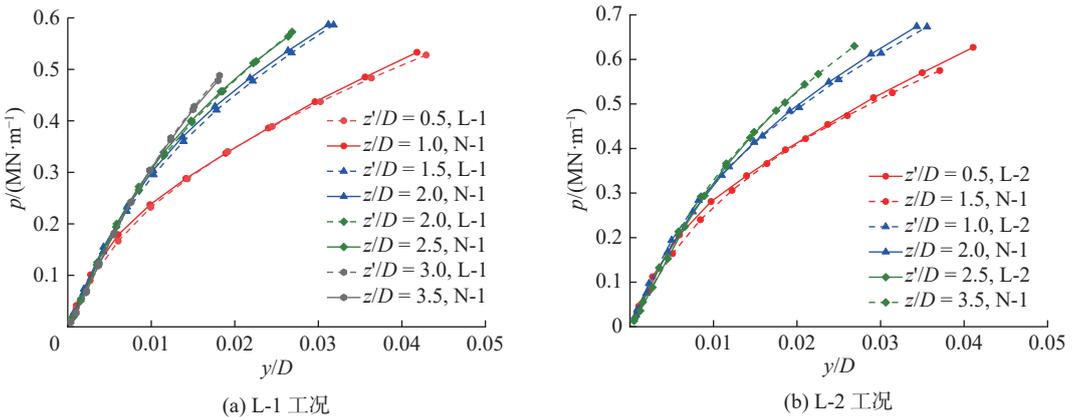


图 10 PILE1 冲刷前后同一深度处  $p$ - $y$  曲线对比

Fig. 10 Comparison of  $p$ - $y$  curves for PILE1 at the same depth before and after scour

同样地, 为分析不同冲刷工况对偏刚性桩基底土反力曲线的影响, 图 11 对比了 PILE3 在局部冲刷坑深度 0 到  $1.5D$  范围内的  $H_b$ - $v_b$ (基底剪力-基底位移)及  $M_b$ - $\theta_b$ (基底弯矩-基底转角)曲线。图 11 表明, 考虑计算误差等因素在内的影响, 单桩基础的基底土反力曲线在本文所设置的冲刷深度范围内基本保持不变。这是由于局部冲刷仅显著削弱了表层土的土压力, 而桩底位置的深层土体受到影响较小<sup>[28]</sup>, 故深层  $p$ - $y$  曲线和基底土反力曲线在冲刷前后变化小。

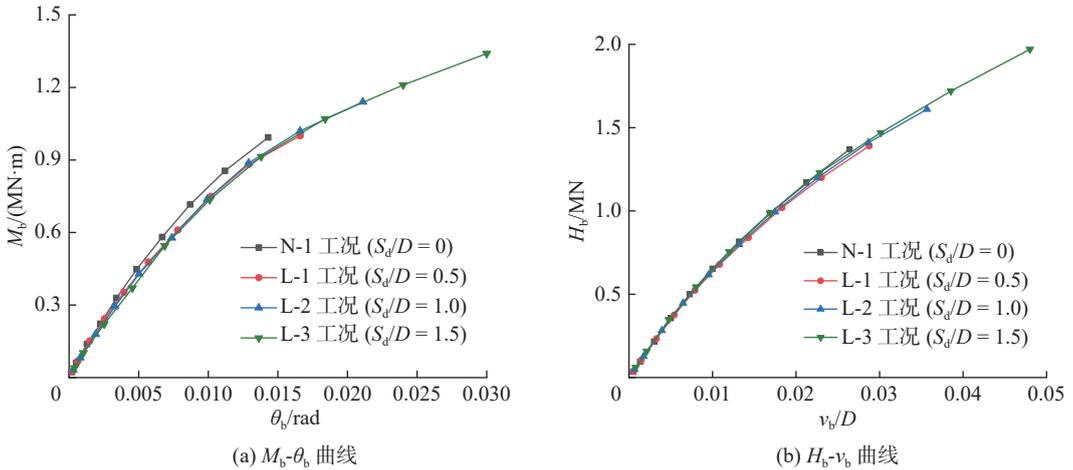


图 11 PILE3 基底土反力曲线

Fig. 11 Pile base soil resistance curves of PILE3

### 4 受局部冲刷海上风电单桩简化梁-弹簧模型

尽管 DNV 规范<sup>[4]</sup>推荐在设计中采用三维有限元分析,但其计算量通常较大,并不适用于实际工程中的早期评估和快速迭代设计。根据前文的讨论结果,本文参考 Byrne 等<sup>[17]</sup>基于 Winkler 假定(弹性地基梁模型)改进的四弹簧模型,建立如图 12 所示的受局部冲刷海上风电单桩基础简化梁-弹簧计算模型。在缺少实测数据时,采用无冲刷三维有限元模型中提取的土反力曲线作为各弹簧对应的刚度曲线,通过减少单元计算数量,对多种局部冲刷工况下的桩基响应实现快速预测。

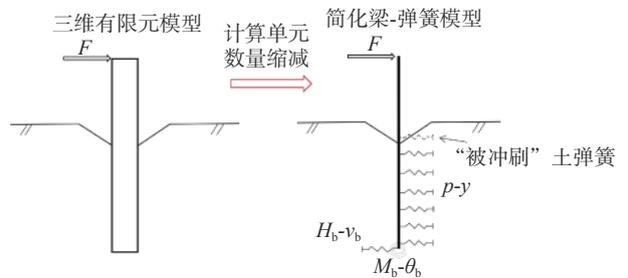


图 12 受局部冲刷海上风电单桩基础的简化梁-弹簧计算模型  
Fig. 12 The simplified beam-spring model for OWT monopile subjected to local scour

由于桩侧竖向摩阻力对承载力贡献很小,因此该桩土相互作用模型由其余 3 组土弹簧组成,分别是桩侧  $p-y$  弹簧、桩底  $H_b-v_b$  和  $M_b-\theta_b$  弹簧。当发生局部冲刷时,原始泥面以下  $S_d$  范围内不再建立桩侧  $p-y$  土弹簧单元。依照前文所述,由于局部冲刷对剩余土弹簧的影响较小,故其位置和刚度特性保持不变。

为验证本文中所提出模型的合理性,基于 ANSYS APDL 参数化语言建立受局部冲刷作用的海上风电单桩基础简化计算模型。桩身采用两节点的 BEAM 188 梁单元,土弹簧则采用能够描述非线性刚度的 COMBIN 39 单元,并通过修改关键字设置来定义一维扭转弹簧,从而模拟桩底土反力矩作用。

图 13 和图 14 分别给出了不同局部冲刷深度下,简化模型及三维有限元模型计算得到的 PILE3 桩顶荷载位移曲线和桩身响应曲线。此外,添加工程中常用的整体冲刷模型计算结果(图中虚线)作为对比,该模型忽略了冲刷坑形态并只计入侧向土反力对水平承载力的贡献。

由式(1)计算得到本文提出的简化模型相对于有限元模型在 L-1、L-2 和 L-3 共 3 个冲刷工况下,桩顶荷载-位移曲线的  $\eta$  值分别为 0.97、0.96 和 0.94,误差小于 10%,满足工程要求。因此,本文模型比较合理地反映了考虑局部冲刷后的单桩基础水平承载特性。但局部冲刷坑的深度较大时,由于长径比减小会导致桩侧垂向摩阻力占比增大,使简化模型所预测的桩基承载力相较于有限元结果略为偏低。

对比整体冲刷模型的计算结果也可发现,忽略上覆土层及基底效应的影响使桩身位移和桩身弯矩偏大,并且随着冲刷深度的增大有进一步扩大的趋势。冲刷深度达到  $1.5D$  时,桩基的水平承载力不足其余两模型预测值的  $1/3$ ,在  $3\text{ MN}$  水平力作用下已经失稳。因此,相较于本文提出的简化模型,工程中常用的整体冲刷模型偏于保守,不能合理反映局部冲刷后海上风电单桩基础的水平承载特性。

限于本文研究内容,该简化模型适用于冲刷坑形态固定为倒圆台形且冲刷坑深度不大于  $1.5D$  的砂土地基中大直径单桩基础的侧向承载力评估。在实际工程应用中,冲刷坑形态以及海床地质复杂多变,本文所提模型对不同冲刷坑尺寸及黏土地基条件下的大直径单桩计算的适用性,有待进一步研究。

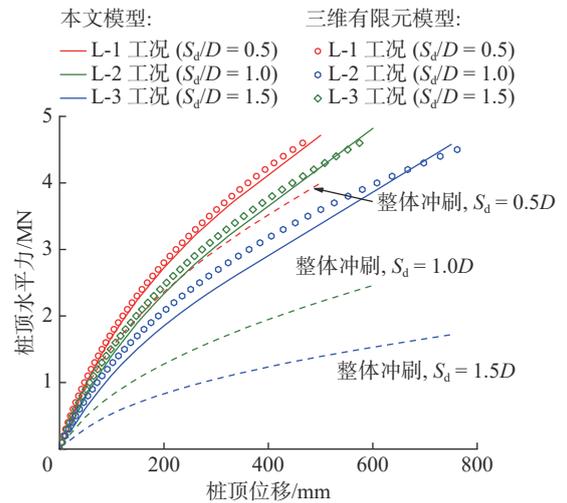


图 13 不同模型对 PILE3 桩顶载荷-位移曲线计算结果对比  
Fig. 13 Comparison of pile head load-displacement curves of PILE3 predicted by different models

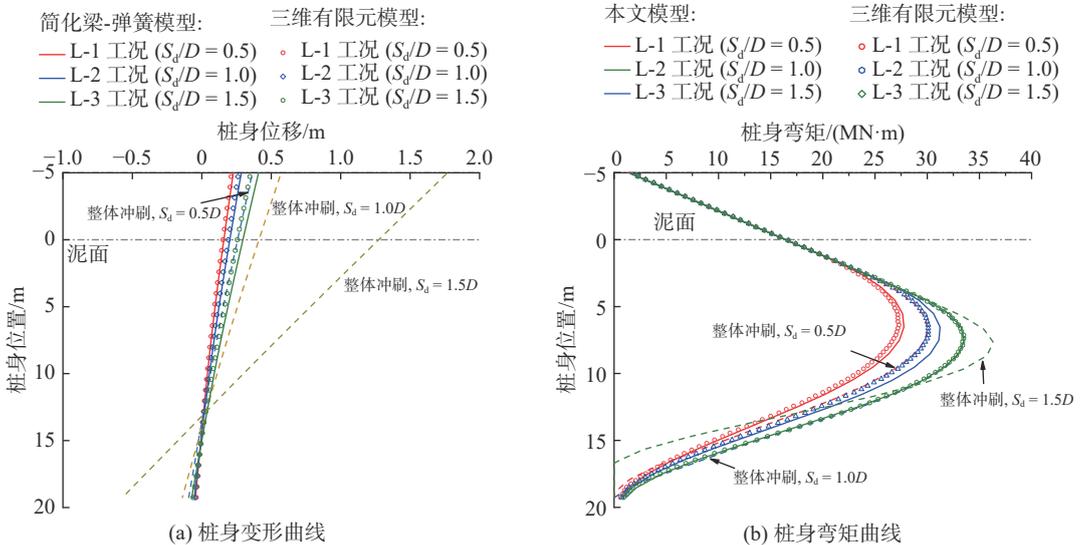


图 14 不同模型对 PILE3 桩身变形与弯矩计算结果对比( $F=3\text{ MN}$ )

Fig. 14 Comparison of deflection and moment along PILE3 predicted by different models ( $F=3\text{ MN}$ )

## 5 结 语

本文基于有限元软件 ABAQUS 建立了考虑冲刷坑形态的海上风电单桩基础三维有限元分析模型,研究了冲刷坑形态、桩基长径比等因素对海上风电单桩基础侧向响应的影响,提出了考虑基底效应的受局部冲刷单桩简化梁-弹簧模型,得到以下结论:

(1)小长径比水平受荷桩基的侧向响应对局部冲刷坑形态更为敏感。相较于采用柔性长桩的导管架基础,海上风电单桩基础大多为长径比较小的偏刚性桩,因此在设计时需重点考虑冲刷坑形态对单桩基础水平承载力的影响。

(2)对于偏刚性桩,局部冲刷会导致桩基入土段长径比显著减小,基底效应和桩侧垂向摩阻力在桩基水

平承载力中的占比将进一步提高,传统的API方法仅考虑了桩侧土反力的作用,难以准确预测局部冲刷工况下海上风电大直径单桩基础的水平承载能力。

(3)在确定了局部冲刷对深层地基的土反力曲线影响较小的规律后,提出了考虑基底效应的单桩基础简化梁-弹簧模型,通过与三维有限元计算结果的对比,验证了本文模型预测的准确性,而工程中常用的整体冲刷模型由于忽略了上覆土层和基底效应对桩基水平承载力的影响,预测结果偏于保守。

## 参 考 文 献:

- [1] LIN Y J, LIN C. Effects of scour-hole dimensions on lateral behavior of piles in sands[J]. *Computers and Geotechnics*, 2019, 111: 30-41.
- [2] WHITEHOUSE R J S, HARRIS J M, SUTHERLAND J, et al. The nature of scour development and scour protection at offshore windfarm foundations[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2011, 62(1): 73-88.
- [3] PEDER HYLDAL SØRENSEN S, BO IBSEN L. Assessment of foundation design for offshore monopiles unprotected against scour[J]. *Ocean Engineering*, 2013, 63: 17-25.
- [4] DNV GL AS. Support structures for wind turbines: DNV-GL-ST-0126[S]. Oslo: DNV GL AS, 2018.
- [5] RP A P I. Geotechnical and foundation design considerations[S]. Washington D. C.: API RP 2GEO. API, 2014.
- [6] LIN C, JIANG W Y. Evaluation of vertical effective stress and pile tension capacity in sands considering scour-hole dimensions[J]. *Computers and Geotechnics*, 2019, 105: 94-98.
- [7] 漆文刚, 高福平. 冲刷对海上风力机单桩基础水平承载特性的影响[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2016, 46(12): 83-92. (QI Wengang, GAO Fuping. Effects of scour on horizontal bearing behavior of monopile foundations for offshore wind turbines[J]. *Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica)*, 2016, 46(12): 83-92. (in Chinese))
- [8] 陈静, 田德, 闫肖蒙, 等. 局部冲刷作用下海上风电机组支撑结构响应[J]. 太阳能学报, 2019, 40(5): 1401-1407. (CHEN Jing, TIAN De, YAN Xiaomeng, et al. Support structure response of offshore wind turbines under local scour[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2019, 40(5): 1401-1407. (in Chinese))
- [9] QI W G, GAO F P, RANDOLPH M F, et al. Scour effects on p-y curves for shallowly embedded piles in sand[J]. *Géotechnique*, 2016, 66(8): 648-660.
- [10] BAYTON S M, BLACK J A. The effect of scour on monopile lateral behaviour[C]//XVII European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering-ECSMGE. Reykjavik: International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2019.
- [11] CHORTIS G, ASKARINEJAD A, PRENDERGAST L J, et al. Influence of scour depth and type on p-y curves for monopiles in sand under monotonic lateral loading in a geotechnical centrifuge[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 197: 106838.
- [12] LIANG F Y, ZHANG H, CHEN S L. Effect of vertical load on the lateral response of offshore piles considering scour-hole geometry and stress history in marine clay[J]. *Ocean Engineering*, 2018, 158: 64-77.
- [13] ZHANG H, CHEN S L, LIANG F Y. Effects of scour-hole dimensions and soil stress history on the behavior of laterally loaded piles in soft clay under scour conditions[J]. *Computers and Geotechnics*, 2017, 84: 198-209.
- [14] HONG Y, HE B, WANG L Z, et al. Cyclic lateral response and failure mechanisms of semi-rigid pile in soft clay: centrifuge tests and numerical modelling[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2017, 54(6): 806-824.
- [15] REESE L C, COX W R, KOOP F D. Analysis of laterally loaded piles in sand[C]//Offshore technology in civil engineering hall of fame papers from the early years. Houston, Texas: OnePetro, 1974: 95-105.
- [16] REESE L C, COX W R, KOOP F D. Field testing and analysis of laterally loaded piles on stiff clay[C]//Offshore Technology Conference. Houston, Texas: OnePetro, 1975.
- [17] BYRNE B W, BURD H J, ZDRAVKOVIĆ L, et al. PISA: new design methods for offshore wind turbine monopiles[J]. *Revue Française De Géotechnique*, 2019(158): 3.
- [18] BYRNE B, MCADAM R, BURD H, et al. New design methods for large diameter piles under lateral loading for offshore wind applications[M]//Frontiers in Offshore Geotechnics III. Florida: CRC Press, 2015: 705-710.
- [19] BURD H J, TABORDA D M G, ZDRAVKOVIĆ L, et al. PISA design model for monopiles for offshore wind turbines:

- application to a marine sand[J]. *Géotechnique*, 2020, 70(11): 1048-1066.
- [20] POULOS H G, HULL T S. The role of analytical geomechanics in foundation engineering[C]//*Foundation Engineering: Current Principles and Practices*. New York: ASCE, 1989: 1578-1606.
- [21] MURPHY G, IGOE D, DOHERTY P, et al. 3D FEM approach for laterally loaded monopile design[J]. *Computers and Geotechnics*, 2018, 100: 76-83.
- [22] 朱斌, 熊根, 刘晋超, 等. 砂土中大直径单桩水平受荷离心模型试验[J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(10): 1807-1815. (ZHU Bin, XIONG Gen, LIU Jinchao, et al. Centrifuge modelling of a large-diameter single pile under lateral loads in sand[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(10): 1807-1815. (in Chinese))
- [23] BHATTACHARYA S, NIKITAS G, ARANY L, et al. Soil-structure interactions(SSi) for offshore wind turbines[J]. *Engineering & Technology Reference*, 2017, 1(1): 24, 16.
- [24] WANG L Z, ZHOU W J, GUO Z, et al. Frequency change and accumulated inclination of offshore wind turbine jacket structure with piles in sand under cyclic loadings[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 217: 108045.
- [25] WANG L Z, LAI Y Q, 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.
- [26] LIN C, HAN J, BENNETT C, et al. Analysis of laterally loaded piles in soft clay considering scour-hole dimensions[J]. *Ocean Engineering*, 2016, 111: 461-470.
- [27] DAI S, HAN B, WANG B G, et al. Influence of soil scour on lateral behavior of large-diameter offshore wind-turbine monopile and corresponding scour monitoring method[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 239: 109809.
- [28] LIN C, WU R. Evaluation of vertical effective stress and pile lateral capacities considering scour-hole dimensions[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2019, 56(1): 135-143.
- [29] 龚晓南. 桩基工程手册[M]. 2版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016. (GONG Xiaonan. *Pile foundation engineering manual*[M]. 2nd ed. Beijing: China Construction Industry Press, 2016. (in Chinese))

## Analysis of lateral bearing behaviors of scoured monopile foundations considering the influence of length-to-diameter ratio

ZHANG Rongsheng<sup>1</sup>, LIU Hanqiu<sup>1</sup>, ZHU Ronghua<sup>1,2</sup>, TIAN Zhenya<sup>2</sup>, SUN Xiang<sup>2</sup>

(1. *Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan 316021, China*; 2. *Yangjiang Offshore Wind Laboratory, Yangjiang 529500, China*)

**Abstract:** Scour is one of the key factors that should be considered in the design process of offshore wind turbine (OWT) monopile foundations. However, the geometry of local scour pit and embedded length-to-diameter ratio of pile ( $L/D$ ) are always ignored in practice, which leads to a conservative design. A three-dimensional finite element model for OWT monopile considering the geometry of local scour pit and  $L/D$  was utilized to study its lateral bearing behaviors under the existence of local scour pit. Furthermore, a simplified beam-spring model for monopile with small  $L/D$  was proposed to predict the lateral responses of monopile under local scour and validation was also made. The results show that the lateral behaviors of monopile with low  $L/D$  are sensitive to the scour pit's depth. With the increment of scour depth, the contribution of soil resistance components such as base reaction force and vertical shaft shear force to the pile foundation's horizontal bearing capacity also increases. The typical API  $p$ - $y$  curve method that only considers lateral soil resistance will no longer apply to the analysis of scoured monopile foundation, and the influence of pile base effect shall be taken into account. The research results can provide reference in practice of OWT foundation design and analysis.

**Key words:** local scour; offshore wind turbine; monopile foundation; length-to-diameter ratio