

DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640X.2017.03.009

蒋建平, 陈文杰, 杨栓. 局部冲刷对部分埋入单桩水平承载性状的影响[J]. 水利水运工程学报, 2017(3): 64-70. (JIANG Jianping, CHEN Wenjie, YANG Shuan. Impacts of local scour on lateral bearing behavior of partially embedded single piles[J]. Hydro-Science and Engineering, 2017(3): 64-70. (in Chinese))

局部冲刷对部分埋入单桩水平承载性状的影响

蒋建平¹, 陈文杰^{1,2}, 杨 栓¹

(1. 上海海事大学 海洋科学与工程学院, 上海 201306; 2. 广东明阳风电产业集团有限公司, 广东 中山 528437)

摘要: 为分析局部冲刷对部分埋入桩水平承载性状的影响, 利用有限元软件 ABAQUS 模拟水平荷载作用下部分埋入单桩的受力。根据实际工况建立了部分埋入水平受荷桩的三维有限元计算模型, 并将计算结果与现场试验结果进行对比, 验证了所建模型的正确性。然后, 通过算例分析了冲刷角度、深度、桩直径、桩顶约束条件和桩自由段长度对部分埋入桩水平承载性状的影响。分析结果表明: 局部冲刷深度比冲刷角度对部分埋入桩的水平承载性状影响更大, 局部冲刷对直径较大的桩体承载能力影响也更大, 自由段长度的增大减小了桩体水平承载力, 因此, 在研究冲刷对桩基水平承载性状的影响时, 应结合桩顶约束条件综合考虑。

关 键 词: 部分埋入桩; 水平承载性状; 局部冲刷; 双层地基; 约束条件

中图分类号: TU473

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2017)03-0064-07

桩基础作为深基础形式之一, 已广泛应用于港口、桥梁及近海工程中^[1-2]。浅水区域的水动力环境复杂, 部分埋入桩基常常承受风、波浪及水流等复杂荷载的作用。桩基由于水流冲刷引起周围土体流失形成局部冲刷坑, 导致桩水平承载力下降甚至破坏。桩基冲刷问题已引起一些学者的关注, 但主要集中在水流对桩基础的侵蚀作用^[3]、确定冲刷深度和范围^[4]等方面的研究。由于工程修建前不能对冲刷作用进行准确判断, 实际工程中往往更加关心冲刷后桩基承载性状的变化。亦有一些学者运用有限元方法模拟冲刷作用前后桩基承载性状的变化, Yasser 等^[5]基于 Plaxis 软件和 LPILE 软件分析黏土地基和砂土地基中单桩水平承载力的变化, 并将两种软件计算结果进行对比分析; Lin 等^[6]在分析桩基承载性状变化时考虑了土体应力历史的影响; 马殿滨等^[7]则考虑了冲刷前后土体物理特性的变化; 胡丹等^[8]基于模型试验进行单桩数值模拟, 分析冲刷作用。这一类文献的研究大多基于单层地基展开, 有的则没有考虑桩顶的约束条件。然而, 港口、桥梁及近海工程中, 地基一般呈现成层性, 层间土体特性差异明显, 且由于影响桩身水平承载性状的主要是浅层土, 故在水平受荷桩的研究中, 地基大多可视为双层地基^[9-10]。另外, 由于受到承台或上部结构的约束作用, 桩顶并非完全处于自由状态。

本文利用 ABAQUS 软件对水平荷载作用下部分埋入单桩的受力进行数值模拟, 将数值模拟计算结果与现场试验结果进行对比, 验证建模方法的有效性和准确性。然后, 设置工况分析局部冲刷角度、冲刷深度、桩直径、桩顶约束条件和桩自由段长度对双层地基中部分埋入单桩水平承载性状的影响, 为类似研究提供一定的参考。

收稿日期: 2016-05-08

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41372319); 上海市教委科研创新项目(14YZ101); 上海市研究生教育创新计划实施项目(水利工程博士点培育)(20131129); 上海市教委一流学科建设项目

作者简介: 蒋建平(1966—), 男, 湖南邵阳人, 教授, 主要从事港航工程、地基基础学方面的教学和研究工作。

E-mail: jjpwx@163.com

1 水平荷载作用下部分埋入单桩三维有限元分析

1.1 模型参数选取

参照文献[11]选取土体参数(表1)。该模型采用钢管桩进行模拟,其中桩径 1.016 m,桩长 27.6 m,埋深 26.6 m。桩体弹性模量为 2×10^5 MPa,泊松比为 0.2,采用线弹性模型模拟。海洋黏土 1、海洋黏土 2、淤泥、残积土采用 Mohr-Coulomb 本构模型模拟,风化岩石与软岩石采用线弹性模型模拟。数值模型尺寸沿桩周径向取 24 m,桩底下土层厚度取 30 m,即模型深度取 56 m。

表 1 土体参数

Tab. 1 Properties of soil mass

土层	厚度/m	弹性模量/MPa	泊松比	黏聚力/kPa	摩擦角/(°)	重度/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)
海洋黏土 1	6.3	5	0.49	15	0	17.5
海洋黏土 2	10.2	15	0.49	30	0	17.5
淤泥	5.5	27	0.49	70	24	17.8
残积土	2.0	35	0.49	70	34	18.0
风化岩石	3.4	110	0.25	—	32	20.2
软岩石	—	200	0.25	—	—	20.5

1.2 模型处理

桩侧面与桩周土体的接触采用库伦摩擦模型进行模拟,切向接触的摩擦系数采用 $0.8 \tan \phi$,其中 ϕ 是土层的内摩擦角;法向接触采用硬接触,即接触后允许分离。为保证桩土间相互作用力传递的合理性,桩底与桩底土体采用绑定约束(tie)。

考虑到水平受荷桩的变形主要发生于力作用的位置以及受力方向,为了充分利用计算机资源及提高计算效率,靠近桩体的区域网格加密,远离桩体的区域逐渐变疏。模型共划分 32 960 个实体单元,有限元模型网格划分见图 1。土体外侧边界需约束两个水平向位移(由于模型为圆柱形,故需约束两个水平向位移),模型底部只约束竖向位移。

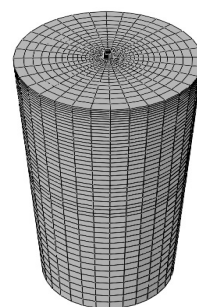


图 1 模型网格划分

Fig. 1 Mesh division of numerical model

1.3 模型加载及验证

有限元计算分析中,土体初始地应力对计算结果影响很大,故模型建立后首先要进行地应力平衡计算。地应力平衡后,往桩顶分别施加 200 kN 和 600 kN 的力进行分析计算。建立的 ABAQUS 分析模型计算的桩身位移和弯矩与现场实测值的比较见图 2,计算值与实测值较吻合,这验证了所建有限元模型分析部分埋入单桩的可行性。

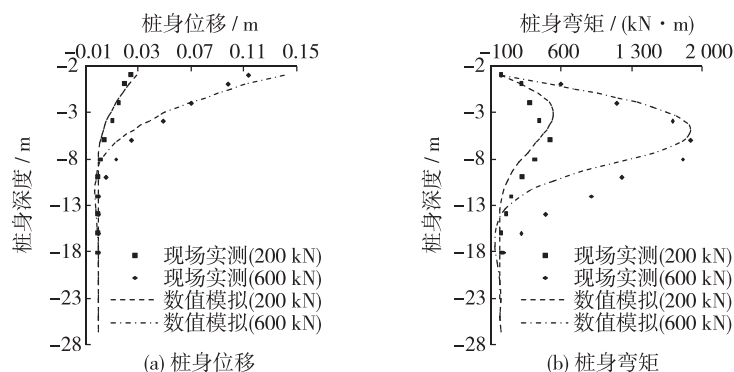


图 2 桩身位移及弯矩验证

Fig. 2 Comparison of pile displacement and bending moment

2 算例分析

2.1 数值建模

建立双层地基中部分埋入单桩的三维有限元模型,桩土参数见表 2。桩体埋深 20 m,桩头露出地面 L ,采用桩体直径 $D = 0.6$ m 和 $D = 0.8$ m 两种桩直径设置工况分析冲刷作用的影响。有限元分析中,ABAQUS 提供生死单元分析功能,可通过将桩周一定范围和深度内的土体运用生死单元分析方法移除来模拟局部冲刷的过程。图 3 为部分埋入单桩的局部冲刷,其中 D_s 为冲刷深度, α 为冲刷角度, D 为桩体直径。基于 ABAQUS 的有限元分析模型中,均以冲刷深度比 $N = D_s/D$ 表示冲刷深度的变化量值。

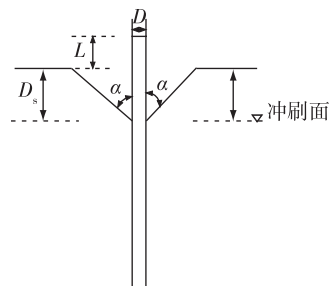


图 3 部分埋入单桩局部冲刷

Fig. 3 Partially embedded single pile under local scour

表 2 模型桩土参数

Tab. 2 Parameters of pile and soil for numerical model

类别	弹性模量/MPa	泊松比	黏聚力/kPa	摩擦角/(°)	重度/(kN · m ⁻³)	厚度/m
桩	200 000	0.167	—	—	50.0	—
第 1 层土	7	0.490	32	24	17.5	10
第 2 层土	30	0.300	48	34	20.5	15

2.2 冲刷角度对部分埋入单桩水平承载性状的影响

为探讨冲刷角度对部分埋入桩水平承载性状的影响,设置以下 5 种工况:其中冲刷角度 α 分别为 15°, 30°, 45°, 60° 和 75°;其余参数为 $N=2$, $D=0.8$ m, 桩顶自由, $L=1$ m。各工况分别施加 200, 400, 600 和 800 kN 的桩顶荷载。

如图 4 所示,不同的冲刷角度对桩顶水平位移和桩身最大弯矩的影响不明显,此规律与文献[8]的研究结论一致。实际工程中,为简便计算,可设置 45° 冲刷角对冲刷影响进行研究。

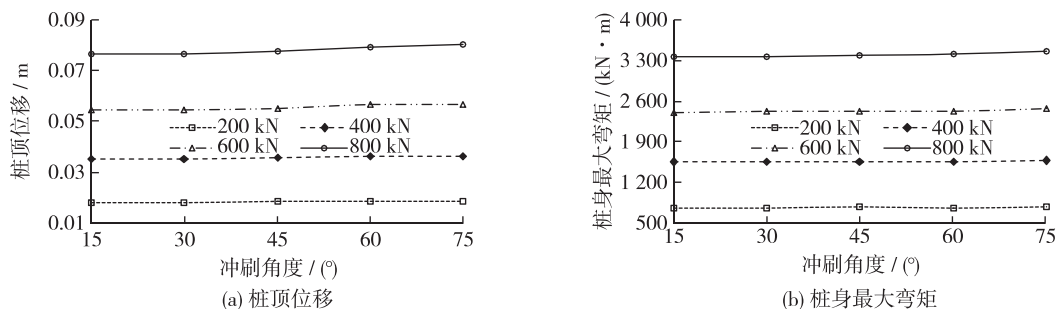


图 4 冲刷角度对桩顶位移和桩身最大弯矩的影响

Fig. 4 Effects of scour slope on pile head displacement and maximum moment of pile

2.3 冲刷深度对部分埋入单桩水平承载性状的影响

为探讨冲刷深度影响,设置以下 5 种工况进行计算:其中冲刷深度比 N 分别为 0, 1, 2, 3, 4(对应工况 6~10);其余参数为 $\alpha=45^\circ$, $D=0.8$ m, 桩顶自由, $L=1$ m。每种工况分别施加 200, 400, 600 和 800 kN 四种大小的桩顶荷载。

如图 5 所示,随着冲刷深度的增大,桩顶位移和桩身弯矩迅速增大,这主要是因为冲刷导致地表桩周土体流失,减弱了桩抵抗侧向变形的能力。另外,随着桩顶荷载的增大,桩顶位移和桩身最大弯矩的增大幅度

更加显著。当桩顶荷载达到 800 kN 时,随着冲刷深度的逐级增大,桩顶位移分别增加 11%, 32%, 57%, 86%, 桩身最大弯矩分别增加了 11%, 28%, 47% 和 67%。

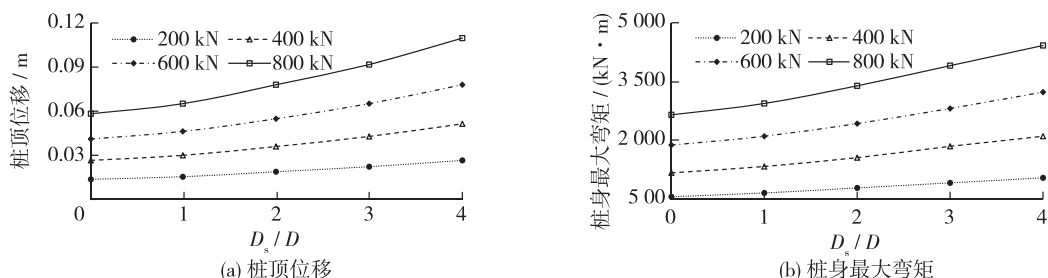


图5 冲刷深度对桩顶位移和桩身最大弯矩的影响

Fig. 5 Effect of scour depth on pile head displacement and maximum moment of pile

2.4 桩直径对部分埋入单桩水平承载性状的影响

为探讨桩直径的影响,在工况 6~10 的基础上,增加以下 $D=0.6 \text{ m}$ 共 5 种工况进行计算,其余参数同工况 6~10。同时,为计算出两种桩直径的水平承载力,每种工况施加 600 kN 的桩顶荷载外,分别施加荷载至泥面处桩身位移达到 $0.2D$ 。Borms^[12] 提出了黏土地基水平极限承载力的标准,当土地地表处产生的桩体水平位移等于 $0.2D$ 时对应的荷载即可认为是水平极限承载力。

如图 6 所示,两种冲刷条件下 $D=0.8 \text{ m}$ 的桩体均比 $D=0.6 \text{ m}$ 的桩体位移小,但承受着更大的弯矩,且 $N=4$ 时最大弯矩比 $D=0.6 \text{ m}$ 的桩体增大了 18%,最大弯矩发生的位置亦较 $D=0.6 \text{ m}$ 的桩体稍往下移。

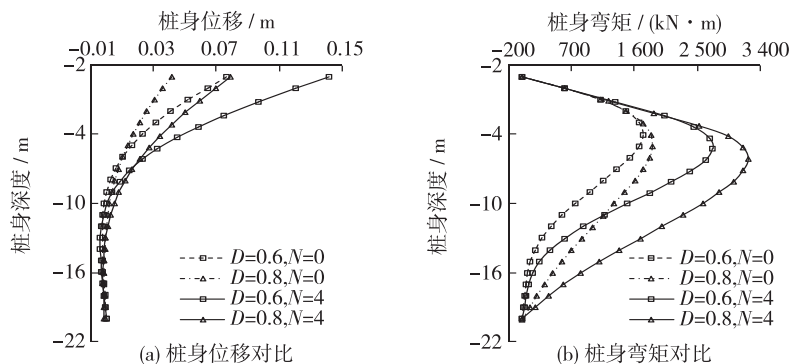


图6 不同桩直径时桩身位移和弯矩对比

Fig. 6 Comparison of pile displacement and bending moment with different pile diameters

另外,如图 7 所示,在相同的冲刷条件下, $D=0.8 \text{ m}$ 的桩体比 $D=0.6 \text{ m}$ 的桩体承载能力更大,同时,冲刷深度对于 $D=0.8 \text{ m}$ 的桩体水平承载能力影响更大。随着冲刷深度增大,两种桩径($D=0.6 \text{ m}$ 和 $D=0.8 \text{ m}$)比不发生冲刷时的极限承载能力分别减少了 6%, 13%, 24%, 33% 和 7%, 16%, 27%, 37%。实际工程中,应当更关注冲刷对直径较大桩体的承载力影响。

2.5 桩顶约束条件对部分埋入单桩水平承载性状的影响

为探讨桩顶约束条件的影响,设置以下 4 种工况,每种工况均施加 800 kN 的桩顶荷载。桩顶弹性约束是指桩顶设置线弹性侧移约束,弹性约束刚度为 6 000 kN/m,桩顶固定

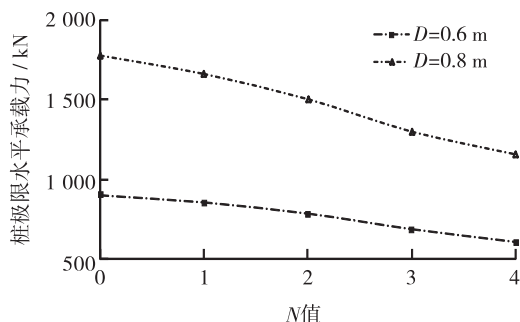


图7 两种桩直径的极限承载力

Fig. 7 Ultimate bearing capacity of different diameter piles

是指完全约束桩顶的转角。4 种工况具体为:桩顶固定, $N=2$ 和 4 各 1 组;桩顶弹性约束, $N=2$ 和 4 各 1 组;其余参数为 $\alpha = 45^\circ$, $D = 0.8 \text{ m}$, $L = 1 \text{ m}$ 。

在相同冲刷深度下,冲刷作用对桩顶自由桩基的影响要远大于桩顶固定以及桩顶受弹性约束的桩基(见图 8)。当 N 从 2 增至 4 时,桩顶自由时桩顶位移从 0.078 m 增至 0.11 m ,增幅约 41%;桩顶受弹性侧移约束时,桩顶位移从 0.047 m 增至 0.058 m ,增幅约 24%;而桩顶固定时桩顶位移从 0.027 m 增至 0.034 m ,增幅约 27%,但桩顶位移为三者最小。同时,当 N 从 2 增至 4 时,桩顶自由时最大弯矩从 $3\,395 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 增大到 $4\,417 \text{ kN} \cdot \text{m}$,增幅超 30%;侧向弹性约束时最大弯矩从 $2\,072 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 增大到 $2\,382 \text{ kN} \cdot \text{m}$,增幅为 15%;而桩顶固定时,最大弯矩从 $3\,805 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 增大到 $4\,398 \text{ kN} \cdot \text{m}$,增幅约为 16%。表明局部冲刷作用对桩顶自由的桩基水平承载性状影响效果更加显著,而对弹性侧移约束的影响最小,对桩顶固定的桩基影响效果居中。与桩顶自由以及桩顶弹性侧移约束的情况相比,桩顶固定约束会对桩顶施加力矩以阻止桩顶旋转,桩顶固定时最大弯矩发生在桩顶,而桩顶自由以及弹性侧移约束时最大弯矩发生在泥面下某处桩身,且最大弯矩发生的深度随冲刷深度的增大而变深。桩顶约束条件对桩基水平承载性状的影响显著,故在研究局部冲刷对桩基水平承载力的影响时必须考虑桩顶约束条件的影响。

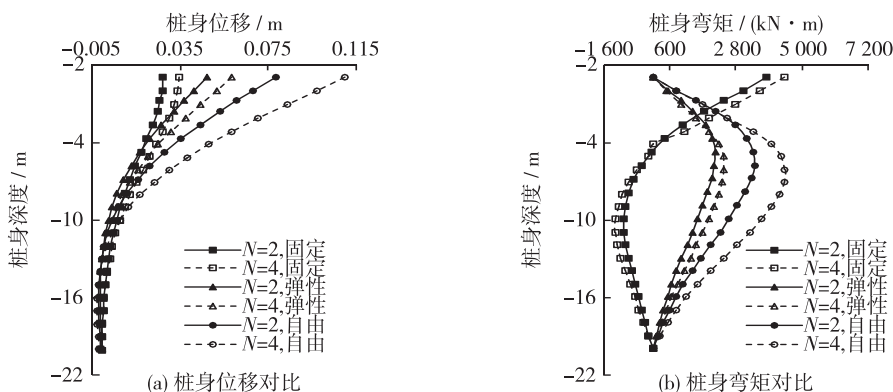


图 8 桩顶不同约束条件下桩身位移和桩身弯矩对比

Fig. 8 Comparison of pile displacement and bending moment under different constraint conditions of pile head

2.6 桩自由段长度对部分埋入单桩水平承载性状的影响

为探讨部分埋入桩自由段长度的影响,设置以下 5 种工况:桩自由段长度 L 分别为 2, 4, 6, 8 和 10 cm;其余参数分别为 $N=2$, $\alpha = 45^\circ$, $D = 0.8 \text{ m}$, 桩顶固定。每种工况施加桩顶荷载 800 kN 。计算结果见图 9。

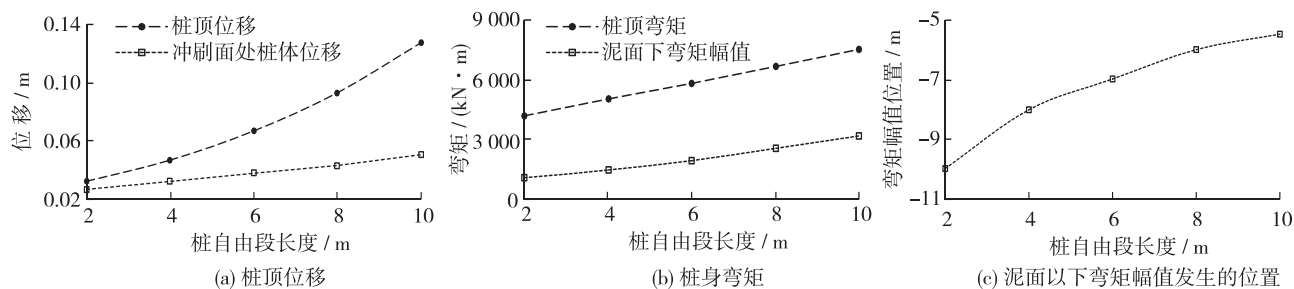


图 9 桩顶位移、桩身弯矩和泥面以下弯矩幅值发生的位置随自由段长度变化

Fig. 9 Changes of displacement at pile head, bending moment of pile and location of moment amplitudes of piles under ground with free length

从图 9 可见,与自由段长度为 2 m 的桩体相比,随着自由段长度的逐级增大,桩顶位移分别增加 44%,

106%, 186%, 290%, 冲刷面处桩体位移分别增加 18.5%, 40.7%, 59.6%, 85.9%; 同时, 桩顶弯矩分别增加 19.3%, 38.7%, 58.2%, 77.9%, 泥面以下桩身弯矩幅值亦发生变化, 增幅分别为 31.7%, 76.4%, 129.7%, 186.6%; 随着桩自由段长度的增大, 泥面以下弯矩幅值发生的位置深度逐渐变浅, 部分埋入桩的水平承载力降低。

3 结 语

采用经验证的三维有限元计算模型模拟了局部冲刷作用下部分埋入水平受荷桩的受力, 结果表明, 局部冲刷角度对部分埋入单桩水平承载性状影响不大。实际工程中, 为简便计算, 可设置 45° 冲刷角对冲刷影响进行研究。部分埋入桩的桩顶位移和桩身最大弯矩随着冲刷深度的增大而迅速增大, 且随着荷载水平的增大, 桩顶位移和桩身最大弯矩增大的幅度愈加明显。直径较大桩体的水平承载力更大, 且冲刷作用对其水平承载力影响亦更大。桩顶约束条件对桩水平承载性状的影响较大, 故研究冲刷作用对桩基水平承载力的影响时应结合桩顶的约束条件。随着桩自由段长度的增大, 部分埋入桩的水平承载力降低。

参 考 文 献:

- [1] 庄宁, 葛松, 方君华, 等. 洋山深水港区大直径砂桩加固优化分析[J]. 水利水运工程学报, 2013(3): 45-51. (ZHUANG Ning, GE Song, FANG Junhua, et al. Optimization analysis of foundation stabilization by large-diameter sand piles in Yangshan deep-water port area[J]. Hydro-Science and Engineering, 2013(3): 45-51. (in Chinese))
- [2] 杨燕伟, 关云飞, 李锦涛. 混凝土芯砂石桩复合地基固结计算[J]. 水利水运工程学报, 2016(3): 46-52. (YANG Yanwei, GUAN Yunfei, LI Jintao. A calculation method for consolidation of concrete core sand-gravel piles composite foundation under embankment[J]. Hydro-Science and Engineering, 2016(3): 46-52. (in Chinese))
- [3] AVENT R R, ALAWADY M. Bridge scour and substructure deterioration: case study[J]. Journal of Bridge Engineering, 2005, 10(3): 247-254.
- [4] SUMER B M, FREDSE J, CHRISTIANSEN N. Scour around a vertical pile in waves[J]. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 1992, 118(1): 15-31.
- [5] MOSTAFA Y E. Effect of local and global scour on lateral response of single piles in different soil conditions[J]. Engineering, 2012, 4(6): 297-306.
- [6] CHENG Lin, JIE Han, BENNETT C. Behavior of laterally loaded piles under scour conditions considering the stress history of undrained soft clay[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2014, 140(6): 971-984.
- [7] 马殿滨, 李志刚, 段梦兰, 等. 冲刷后地基土体特性及平台桩基承载力研究[J]. 石油机械, 2012, 40(6): 54-58. (MA Dianbin, LI Zhigang, DUAN Menglan, et al. Research on foundation soil mass property after erosion and bearing capacity of platform pile foundation[J]. China Petroleum Machinery, 2012, 40(6): 54-58. (in Chinese))
- [8] 胡丹, 李芬, 张开银. 冲刷作用下单桩水平承载特性试验研究及数值模拟[J]. 水利学报, 2015, 46(增刊1): 263-266. (HU Dan, LI Fen, ZHANG Kaiyin. Experiment on the lateral load capacity of single pile under scour condition[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(Suppl1): 263-266. (in Chinese))
- [9] 尹武先, 姚文娟, 程泽坤. 轴-横向荷载作用下超长桩数值模拟[J]. 水利水运工程学报, 2009(2): 15-20. (YIN Wuxian, YAO Wenjuan, CHENG Zekun. Numerical investigation on interaction of axial and lateral response for super-long pile[J]. Hydro-Science and Engineering, 2009(2): 15-20. (in Chinese))
- [10] 刘娟娟, 姚文娟. 双层土水平受荷超长桩承载性状数值模拟[J]. 水运工程, 2014(3): 161-167. (LIU Juanjuan, YAO Wenjuan. Lateral properties of super long pile in double-layered soil based on numerical simulation[J]. Port & Waterway Engineering, 2014(3): 161-167. (in Chinese))
- [11] KIM Y, JEONG S. Analysis of soil resistance on laterally loaded piles based on 3D soil-pile interaction[J]. Computer and Geotechnics, 2011, 38(2): 248-257.
- [12] BORMS B B. Lateral resistance of piles in cohesive soils[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, 1964, 90(3): 123-156.

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

JIANG Jianping¹, CHEN Wenjie^{1,2}, YANG Shuan¹

(1. *College of Ocean Science and Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China*; 2. *Guangdong Mingyang Wind Power Industry Group Limited Company, Zhongshan 528437, China*)

Abstract: In order to study the impacts of the local scour on the lateral bearing behavior of the partially embedded single piles, the software ABAQUS is used to simulate the response of a laterally loaded single pile. According to the application to engineering practices, a 3D finite element analytical model for the partially embedded piles under the conditions of lateral loads is established in this study. The validity of the numerical model is demonstrated by comparing the numerical results with the field experimental results. After then, some numerical examples are selected to investigate the influences of the scour slope, scour depth combined with pile diameter, constraint conditions at the pile head and the free length of piles on the lateral bearing behavior of the partially embedded piles. The analysis results show that the local scour depth has more significant influence than scour slope on the lateral bearing behavior. In addition, the scour conditions also have greater impacts on the lateral bearing capacity of the larger diameter piles, the increase in the free length of piles will result in the decrease in their lateral bearing capacity, and the constraint conditions at the pile head should be considered in the analysis of the impacts of scouring on the lateral bearing behavior of the pile foundations.

Key words: partially embedded piles; lateral bearing behavior; local scour; double-layered foundation; constraint conditions