

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.04.017

冲刷作用下两种不同直径的单桩基础循环加载特性*

于 锋^{1,2}, 张陈蓉^{1,2}, 黄茂松^{1,2}

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 海上风电大直径单桩基础长期承受来自环境效应的循环荷载以及海床的冲刷作用, 冲刷条件下的水平受荷单桩的循环加载特性是海上风电桩基础设计关注的内容。开展了砂土中大直径和小直径单桩基础冲刷条件下长期循环加载的模型试验, 探讨了冲刷深度和循环加载幅值对两种基础形式长期承载变形特性的影响。试验研究表明: 砂土中循环加载提高了循环后的单桩承载力, 其中小直径桩循环后的水平承载力提高更为显著。冲刷导致循环后的单桩承载力下降, 随着冲刷深度增加该效果越明显。在循环加载初期, 小直径桩残余累积变形的增加速度小于大直径桩。循环次数大于1 000次冲刷深度为2倍桩径条件下, 小直径桩的累积变形趋于稳定, 大直径桩的累积变形仍继续发展。通过在无量纲循环加载幅值参数中引入冲刷深度对承载力的影响, 建立了冲刷条件下两种不同直径桩基的水平循环累积位移计算模型, 适用于考虑冲刷影响的单桩长期水平循环累积变形预测。

关键词: 单桩基础; 冲刷; 模型试验; 水平循环加载; 累积变形

中图分类号: TU473.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2020)04-0623-10

Comparison of Cyclic Loading Behavior of Two Piles with Different Dimeters under Scouring

YU Feng^{1,2}, ZHANG Chenrong^{1,2}, HUANG Maosong^{1,2}

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The monopile for offshore wind turbine sustains long-term cyclic load due to environment and scouring in the seabed. The long-term cyclic loading behavior of the pile foundation under scouring is an important problem in the design of monopile for an offshore wind turbine. Laboratory model tests were conducted to investigate the performance of a large diameter pile and a small diameter pile in sand subjected to scouring and long term lateral cyclic loadings, in which the influence of scour depth and cyclic loading amplitude on the long-term behavior of the two foundations was discussed. The test results show that the applied cyclic loading improves the post-cyclic capacity of single pile, especially for the small diameter pile. Scour leads to the reduction of post-cyclic capacity of single pile, the effect of which increases with the scour depth. Comparing with the large diameter pile, the increment of re-

* 收稿日期: 2019-12-26; 修回日期: 2020-04-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(51779175)、上海市科委科研计划项目(18DZ1202104)资助

作者简介: 于 锋(1988-), 男, 博士研究生。主要从事基础工程方面的研究。Email: 15801786702@163.com

通讯作者: 张陈蓉(1982-), 女, 副研究员, 博士。主要从事桩基工程的教学与科研。Email: zcrong33@tongji.edu.cn

sidual cumulative deformation of the small diameter pile is smaller in early cyclic loading stage. When the cycle number is larger than 1000 and the scouring depth is twice of the pile diameter, the development of the cumulative deformation of the small diameter pile approaches to be stable, while a further development of deformation appears in the large diameter pile. By bringing the scour affected capacity into the dimensionless cyclic loading amplitude parameters, the lateral cyclic cumulative displacement calculation model of the two kinds of piles under scouring is established, which is applicable to the prediction of long-term lateral cyclic cumulative deformation of single pile considering scouring.

Keywords: single pile foundation; scour; model test; cyclic lateral loading; accumulative deformation

引言

单桩基础因结构简单、安装方便,成为目前海上风电基础中应用最普遍的形式,海上风电基础中75%是单桩基础。海上风电单桩基础在其服役期内,长期承受风荷载、波浪荷载等水平循环荷载的作用,循环次数高达千万次以上^[1]。海洋工程水流作用导致的冲刷坑,对单桩基础的承载变形以及长期循环加载特性产生较大影响^[2]。考虑海上风电基础长期疲劳特性,冲刷作用下桩基循环加载问题值得关注。

针对水平循环受荷桩的承载变形特性问题,胡安峰等^[3]基于砂土室内动三轴试验数据和土体刚度衰减模型,研究了风机桩基础在长期风浪荷载作用下的累积侧向位移,认为存在某一特定荷载频率使得钢管桩的侧向位移发展十分迅速。张勋等^[4]在砂土地基中完成了单桩模型试验,基于经验公式法对单桩水平循环累积位移预测模型进行了参数分析。张宇等^[5]针对饱和密砂地基进行了双向水平循环位移加载下刚性单桩基础的离心模型实验,研究认为桩端反力随荷载循环次数的增加而增加,桩体转动中心最终稳定在2/3埋深附近。朱斌等^[6]通过离心模型试验研究了砂性土中大直径单桩在水平循环荷载作用下的受力和变形特性,提出了循环应力比相关的循环弱化因子以及桩基变形累积和内力变化分析方法。陈仁朋等^[7]在饱和粉土地基中完成了单桩的水平循环加载试验,并基于 p - y 曲线法引入循环效应系数以考虑荷载循环的影响。

针对水平受荷桩的冲刷响应问题,胡丹等^[8]进行了不同冲刷深度下的桩基室内模型试验,认为当冲刷深度在2~8倍桩径范围,水平极限承载力受冲刷影响较大。杨少磊等^[9]根据DNV规范进行了考虑冲刷的海上风电单桩基础的优化分析,研究表明

考虑冲刷时,适当增加桩径和壁厚比直接增加桩长更经济合理。杨晓峰等^[10]将冲刷坑底以上土体有效自重作用等效为竖向荷载,得到砂土中单桩基础冲刷的修正应变楔计算方法。戴国亮等^[11]基于修正的 p - y 曲线进行砂土中冲刷条件下单桩水平承载力的理论推导,分析表明冲刷深度、冲刷坡角和冲刷宽度三者的影响程度依次下降。蒋建平^[12]基于数值模拟得到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的结论。漆文刚等^[13]基于数值模拟和模型试验认为冲刷所致的桩基埋深变化可导致桩基变形向刚性桩模式转变, p - y 曲线法所预测的桩基变形偏大。Y.S.Kuo等^[14-15]三维有限元模拟表明,冲刷作用下大直径单桩的水平位移和转角显著增加,需增加桩长以降低冲刷造成的不良影响。梁发云等^[16]通过模型试验对单桩基础进行静载试验和循环加载试验,探讨了不同冲刷深度下单桩循环累积沉降和动位移幅值的发展规律。

海上风电的大直径单桩基础长期处于冲刷和水平循环加载的使用环境下,结合已有成果,开展了砂土中冲刷条件下长期水平循环受荷大直径和小直径单桩基础的对比1g模型试验,讨论了基础的承载变形规律以及冲刷深度和荷载幅值等因素对其长期累积变形的影响,并在对试验结果回归分析基础上建立水平循环累积位移预测模型。

1 试验方案

试验研发了砂雨设备以保证每组试验的砂土地基一致性,开发了电机式闭环伺服循环加载装置,以实现循环加载条件的精确控制。在此基础上开展砂土中大直径和小直径水平受荷单桩在冲刷和长期循环加载条件下的承载力和累积残余变形行为差异的对比1g模型试验。

1.1 砂土地基的制备和物理特性

试验用砂为丰浦砂 (Toyoura sand), 基本物理指标为 $d_{50} = 0.16 \text{ mm}$, 相对密度 $G_s = 2.645$, 不均匀系数 $c_u = 1.6$, 最大孔隙比为 0.916, 最小孔隙比为 0.609。颗粒级配如图 1 所示, 丰浦砂为细砂, 颗粒均匀, 级配不良。

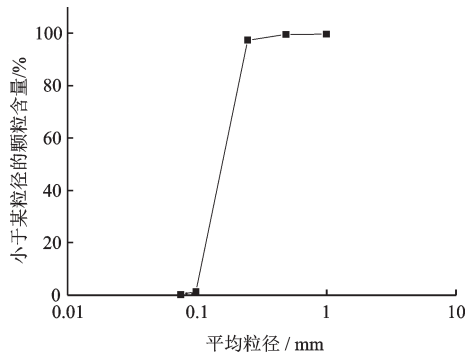


图1 丰浦砂的颗粒级配曲线

Fig.1 Particle size distribution curve of Toyoura sand

砂土地基的制备采用砂雨法实现(图2)。本试验的撒砂设备可以严格控制撒砂的高度和速度, 制成的砂土地基具有很好的均匀性和可重复性。试验采用的干砂地基, 砂土密度为 1.51 g/cm^3 , 土体孔隙比为 0.746, 对应的砂土相对密度为 55.3%。

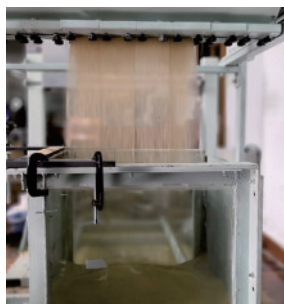


图2 砂雨法

Fig.2 Sand pourer method

1.2 模型桩

模型桩由铝合金空心管加工而成, 铝合金材料弹性模量为 71 GPa, 泊松比为 0.33, 桩端用圆锥形铝块封闭, 为闭口管桩。模型桩桩径分别是 40 和 20 mm, 前者为大直径桩, 后者为小直径桩。模型桩实物如图 3(a) 所示。关于冲刷的条件设置, 一般有完全冲刷(冲刷后为水平地表)和局部冲刷(存在冲刷坑)两种^[11]。鉴于 1g 模型地应力场太小, 完全冲

刷仅能模拟埋深的改变, 不能考虑应力卸载变化对桩周土体参数的影响, 故本文试验模拟的是局部圆锥冲刷坑, 冲刷坑角度为 30° 。人工用工具铲实现, 用卷尺核验冲刷深度, 具体如图 3(b) 所示。

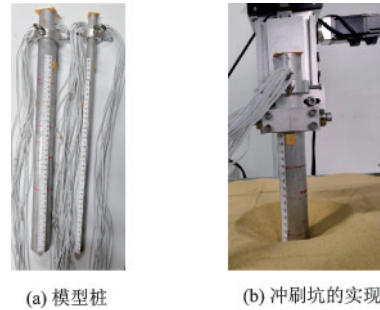


图3 模型桩

Fig.3 Prototype piles

模型桩与原型桩几何相似比为 1:80, 两种模型桩与原型桩之间的参数对应见表 1。

H.G.Poulos 等^[17]给出了基于桩土相对刚度来判定刚性桩和柔性桩的方法:

$$4.8 < \frac{E_s L^4}{E_p I_p} < 388.6 \quad (1)$$

式中, E_s 为土体模量, L 为桩的埋置深度, E_p 和 I_p 为桩身弹性模量、截面惯性矩。4.8 和 388.6 为完全刚性和无限长柔性桩的界限值。

试验桩基埋深中点处的土体模量近似取 3.06 MPa, 得到大直径和小直径桩的相对刚度分别为 8.31 和 77.4, 相对刚度比值相差近 10 倍。

表1 模型桩与原型桩参数

Table 1 Parameters of model and prototype piles

	模型尺寸		原型尺寸	
	大直径	小直径	大直径	小直径
桩径/m	0.04	0.02	3.2	1.6
壁厚/m	0.002	0.002	0.096	0.086
埋深/m	0.3	0.3	24	24
抗弯刚度/(N·m ²)	2 980	320	122×10^9	13.1×10^9

1.3 试验装置

模型箱尺寸长为 0.5 m, 宽为 0.4 m, 高为 0.5 m, 无冲刷时单桩埋深为 0.3 m, 加载高度在地表以上为 0.1 m, 单桩与箱壁、桩端与箱底距离尺寸足够, 可忽略边界效应。自行设计了电机驱动单桩循环伺服加载系统, 实现在水平方向上对模型桩施加低频率的循环荷载, 加载系统为闭环控制, 以保证施

加载的精度。加载环上通过铰接方式的设计,控制水平荷载的加载方向,而不产生额外的弯矩。在加载点处布置LVDT传感器和力传感器,以测量单桩的水平荷载及水平变形。试验系统具体如图4所示。模拟海洋环境长期风载条件,水平循环荷载的加载频率为0.1 Hz,数据采集仪采样频率为2.0 Hz。

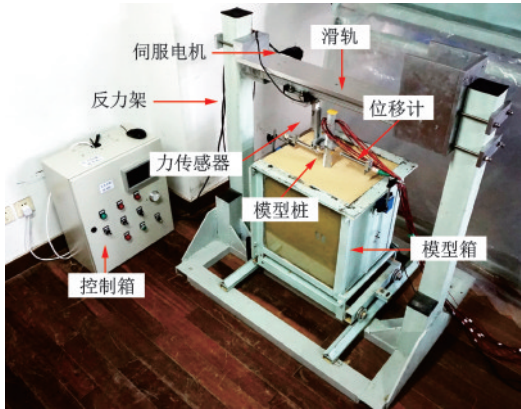


图4 循环伺服加载系统

Fig.4 Cyclic servo loading system

1.4 试验安排

试验加载有3种方式:直接静力加载、循环加载、循环后的静力加载。无冲刷条件下的静力加载作为基准试验,用以确定循环加载的幅值。

Y.S.Kuo等^[14]认为对于单桩,冲刷深度 s_d 一般取值范围为1.3~2.5倍桩径,并建议常规设计取值 $1.5D$ (D 为桩径)。如图5所示,本试验针对冲刷条件考虑的冲刷坑深度为: $0D$ (无冲刷)、 $1D$ 、 $2D$ 。

参考C.LebLANC等^[18]的研究,采用两个独立的参数来描述循环加载条件的特征,分别为:

$$\eta_b = \frac{P_{\max}}{P_u} \quad (2)$$

$$\eta_c = \frac{P_{\min}}{P_{\max}} \quad (3)$$

式中, P_{\max} 和 P_{\min} 为循环加载的最大值和最小值; P_u 为单桩的极限抗力。

近些年有不少论文^[4,18]对 η_c 取值即单向、双向循环加载路径对水平受荷基础长期循环累积效应的问题进行了试验研究。而冲刷坑的存在首先就是改变了单桩的水平极限抗力,故本试验仅进行了 $\eta_c = 0$ 的单向循环加载试验,加载形式为正弦曲线,循环幅值分别为0.4和0.6倍的单桩水平极限承载力,即 $\eta_b = 0.4, 0.6$ 。后文试验结果可以看到,本文的加载点处荷载位移曲线没有明显的转折点,参考

文献[19]的做法,水平极限承载力取值对应加载点处水平位移为 $0.1D$ 桩径。本试验的试验方案具体如图5所示。

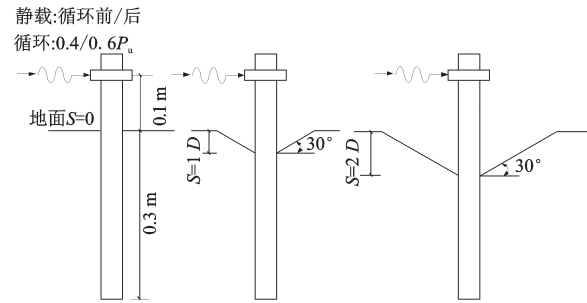


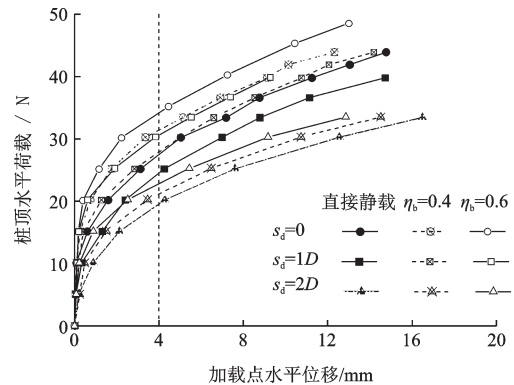
图5 试验方案示意

Fig.5 Diagram of test programs

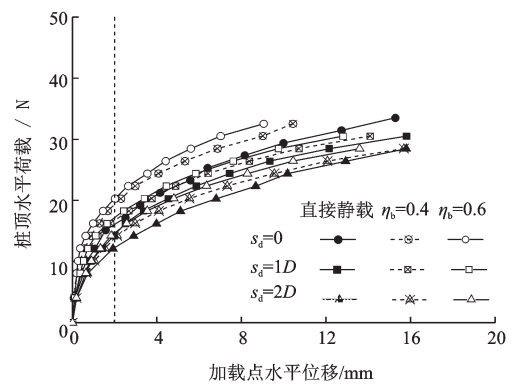
2 试验结果与分析

2.1 水平静载和循环后的静载试验

图6为大直径和小直径的单桩基础在循环加载前后的水平静载条件下的荷载位移曲线。由图可



(a) 大直径桩



(b) 小直径桩

图6 循环前后荷载—水平位移曲线

Fig.6 Load—lateral displacement curves before and after cyclic loadings

见,直接静载加载曲线的整体刚度及承载力随着冲刷深度增加而降低,小直径桩基础的刚度要明显小于大直径桩。无论是大直径还是小直径单桩基础,荷载位移曲线均未出现明显的拐点或者转折点,说明整体响应为加工硬化型。对比循环加载前后的静载位移曲线($\eta_b = 0.4, 0.6$ 对应的曲线为循环后的静载位移曲线)可以看到,循环加载后单桩基础的整体刚度及承载力均比循环加载前有提高,并且随着循环荷载幅值的增加,效果越明显,进一步观察发现循环加载引起了桩周浅层土体的密化。

令加载点处位移为0.1倍桩径时所对应的水平荷载为单桩的承载力。大直径和小直径单桩基础的承载力与冲刷深度和循环加载的变化比例关系如图7。图7(a)为考虑冲刷深度影响的承载力变化损失,图中显示桩基础的刚度以及循环加载的幅值对其影响变化范围均不大,可近似认为承载力的损失随冲刷深度呈线性降低。图7(b~d)为循环加载引起的承载力的变化。由图可见,循环加载幅值增加引起的循环加载后静载承载力提高,小直径桩对其响应的敏感性要高于大直径桩。图7的分析结果说明,冲刷深度对水平受荷桩承载力的降低影响比例关系不受单桩刚度和循环加载条件影响,近似与静载相等。而循环加载对小直径桩的循环后静载响应,从比例关系上来说会比大直径桩更敏感。

2.2 单向循环加载试验

图8为单桩在水平循环加载条件下的桩顶累积位移与循环次数的示意图。如图所示,针对试验的完全单向循环加载,本文研究的单桩水平累积位移 y_N 为循环周期桩顶荷载卸荷至0所对应的位移。

图9为试验中大直径以及小直径单桩基础的水平循环累积位移随循环次数的发展规律。图中虚线为对应静载条件下,水平受荷桩的静载位移。可以看到,在循环次数很小的情况下(大部分小于30次),累积残余位移就已经达到对应的静载位移。随着冲刷深度的增加,该临界循环次数值越小,表明残余累积位移的发展速度明显加快。

基础的水平循环累积位移的发展呈现两个阶段,前期循环过程中,水平累积位移发展迅速,达到一定循环次数后,位移发展速率逐渐平缓。

很明显,小直径桩在前期随着循环次数的增加变化速率要比大直径桩慢。例如,循环荷载为 $0.4P_u$ 时,无冲刷、1D冲刷、2D冲刷条件下大直径桩的第

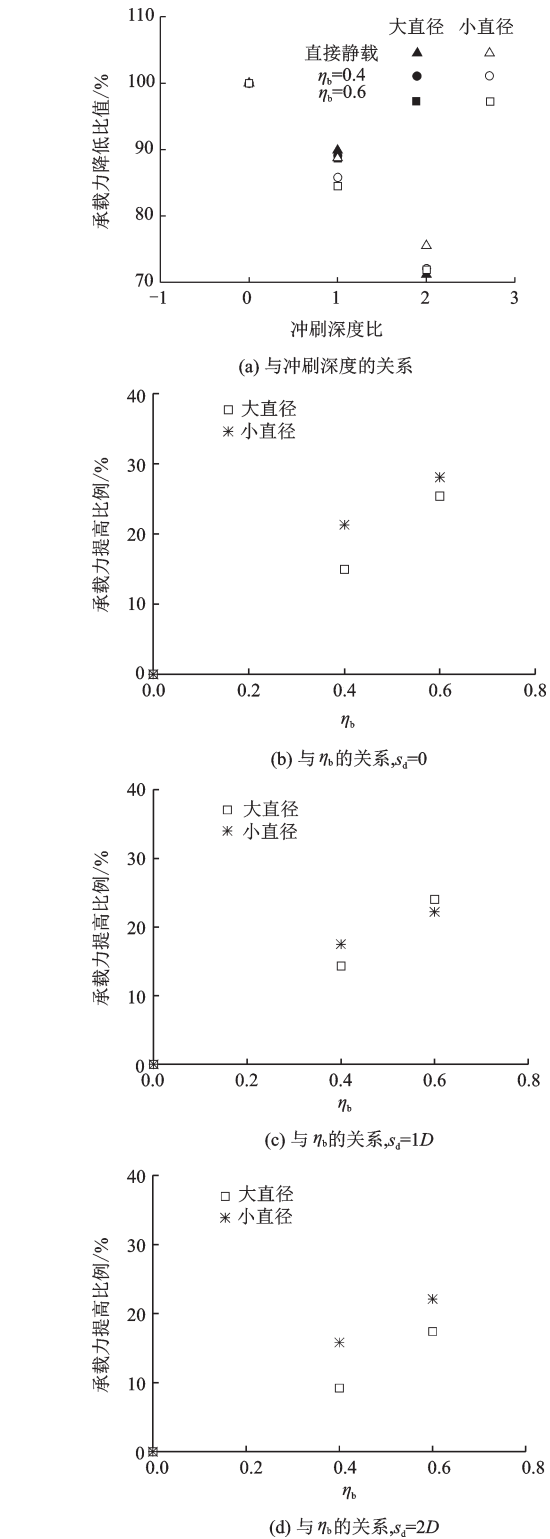


图7 桩基水平承载力的变化比例

Fig.7 Change ratio of lateral bearing capacity of pile foundation

10次循环加载桩顶残余累积位移与结束时累积位移的比例关系为45%,61%,73%,而小直径桩对应的比例关系分别为23%,39%,45%。冲刷深度对

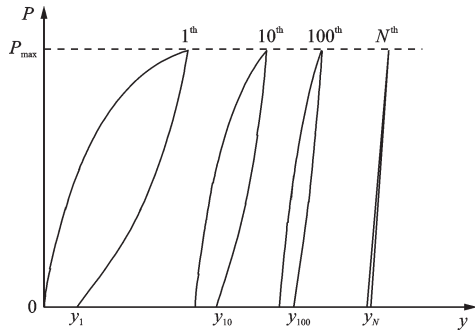


图8 累积位移示意

Fig.8 Diagram of cumulative displacement

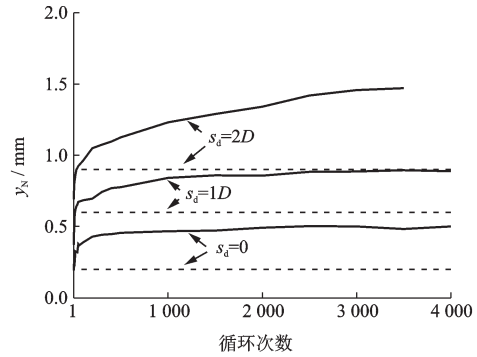
循环累积位移的影响,对于大直径桩和小直径桩也有明显的区别。在循环次数超过1000次以后,2D冲刷条件下的大直径桩仍然有比较明显的循环累积位移,具体体现为图9(a)和(c)的曲线斜率较大。而小直径桩的累积变形,如图9(b)和(d)所示,已经趋于稳定,近似为水平线。本文试验对应的大直径桩和小直径桩初始埋深一致,2D的冲刷坑深度条件下,对于大直径桩而言,实际埋深与桩径比值为5.5,而小直径桩的实际埋深与桩径比值为13,埋深的较少也意味着坑底以上悬臂段的增加,即加载点处水平荷载引起的坑底位置处的弯矩响应。相关的机理分析还需要进一步的理论工作。

需要注意的是,本试验的2D冲刷深度和 $0.6P_u$ 的循环加载条件是一个明显的转折点。图9(a)和图(b)显示两种桩型的水平循环受荷桩在 $0.4P_u$ 循环荷载条件下,在循环次数超过1000次以后,三条曲线间的距离近似相等,随着冲刷深度从0D增至1D和2D,长期累积位移随冲刷深度增加而线性增加。而图9(c)和(d)均表明,在 $0.6P_u$ 循环荷载条件下,长期累积位移在2D冲刷条件下,其长期累积变形的增量,相比冲刷深度从0D增至1D,有明显的增加趋势,进入不稳定状态。

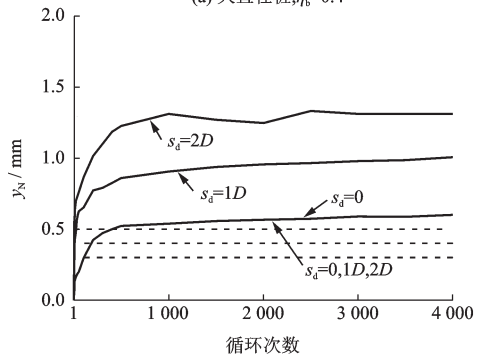
上述分析表明,冲刷深度的变化对累积变形随着循环次数的发展有明显的影。大直径和小直径桩的累积变形对循环加载以及冲刷深度的响应有明显的区别。

2.3 累积循环加载位移预测

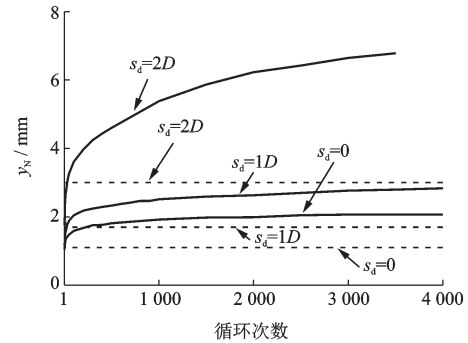
单桩基础在循环加载条件下的累积变形与循环次数的关系一般可以用 $\ln(N)$ 函数或者幂函数表示^[20-21]。而C.LebLANc等^[18]研究认为, $\ln(N)$ 函数仅适用于循环次数小于100的情况,对于大于500次的循环条件,结果偏小。相比较而言,幂函数对于长期大



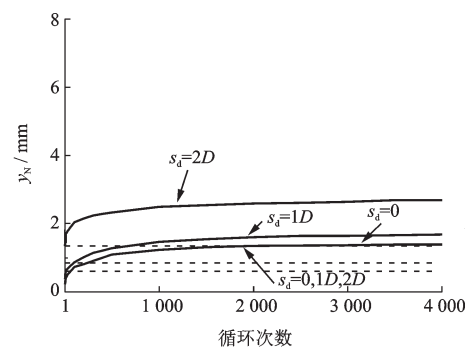
(a) 大直径桩, $\eta_b=0.4$



(b) 小直径桩, $\eta_b=0.4$



(c) 大直径桩, $\eta_b=0.6$



(d) 小直径桩, $\eta_b=0.6$

图9 水平循环累积位移试验结果

Fig.9 Test results of lateral cyclic cumulative displacement

数目的循环加载条件更为适用。具体表达式为:

$$y_N = y_1 N^\alpha \quad (4)$$

式中, y_1 为第1次水平循环累积位移; y_N 为第N次循环累积位移; α 为反映循环次数对水平循环累积位

移影响的参数。

将试验结果在双对数坐标中进行回归分析,大直径桩的结果如图10所示,小直径桩的结果如图11所示。采用平行直线对试验结果进行拟合,由图可见,冲刷深度和循环加载幅值对直线斜率影响不大。需要注意的是,冲刷深度 $2D$ 和循环加载 $0.6P_u$ 条件下的试验结果相对而言拟合效果较差。上文也提到,该条件属于明显转折点。直线的斜率 α 对于大直径桩和小直径桩而言,分别为0.093和0.165。

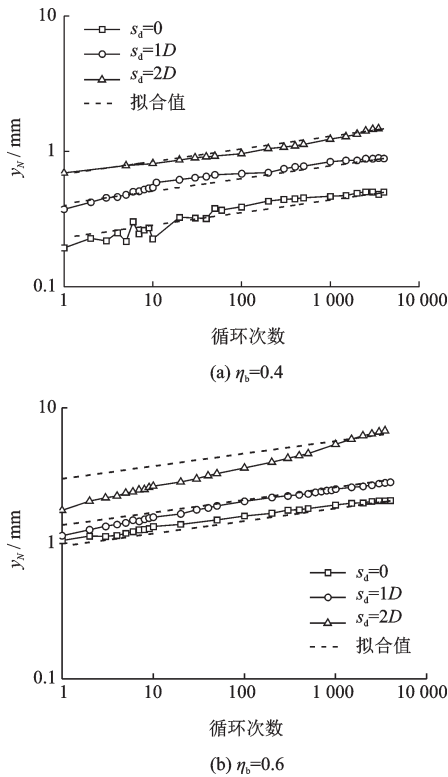


图10 大直径桩水平循环累积位移回归分析

Fig10 Regression analysis of lateral cyclic cumulative displacement of large diameter pile

下面讨论第一次水平循环累积位移。将拟合直线在纵轴的截距,对应值为拟合参数 y_1 ,与循环荷载参数 η_b 的关系表示如图12所示。第一次的累积位移随着循环幅值和冲刷深度的增加而增加。这样的表达方式显然无法对应单一表达式。

考虑到冲刷深度的存在导致单桩水平承载力的降低,对应不同的冲刷深度,尽管施加的循环荷载幅值大小是一样的,但其相对其水平极限承载力的无量纲参数 η_b 是不一样的,对 η_b 进行修正,以考虑冲刷深度的影响,具体表达式为:

$$\eta_b^* = P/P_u^* \quad (5)$$

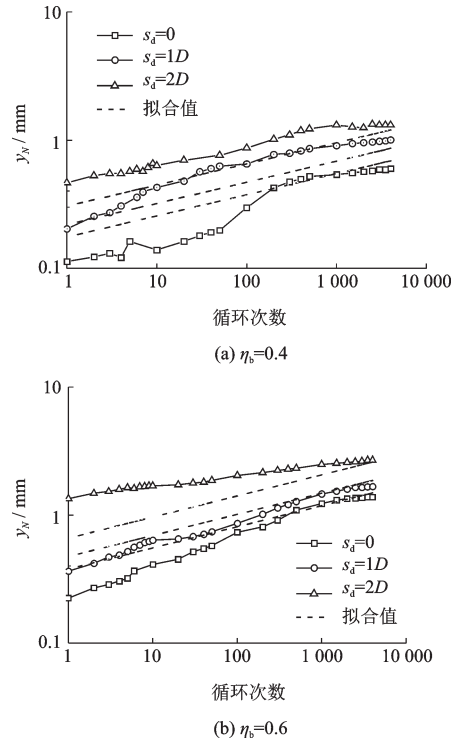


图11 小直径桩水平循环累积位移回归分析

Fig.11 Regression analysis of lateral cyclic cumulative displacement of small diameter pile

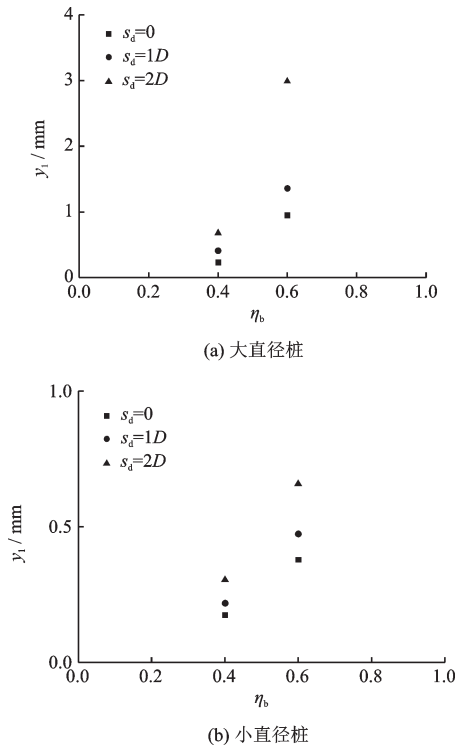
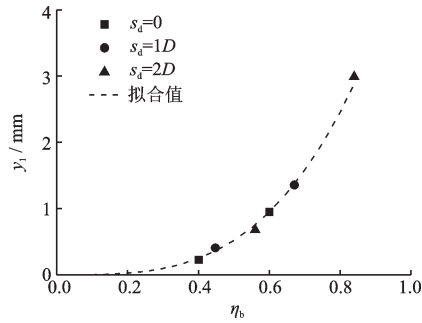


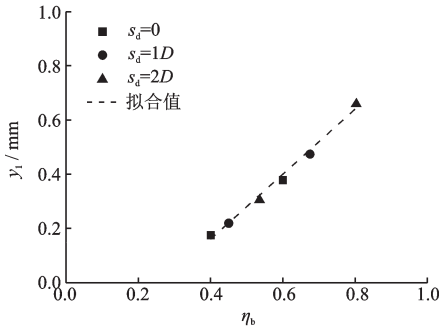
图12 第一次水平循环累积位移参数分析

Fig.12 Analysis on parameter of the cumulative displacement of the first lateral cycle

式中, P_u^* 为考虑冲刷效应的单桩静载水平承载力。第一次累积位移 y_1 与 η_b^* 的关系如图13所示。



(a) 大直径桩



(b) 小直径桩

图 13 第一次水平循环累积位移参数修正

Fig.13 Modification on parameter of the cumulative displacement of the first lateral cycle

大直径桩的数据可以用多项式拟合,表达式为:

$$y_1 = 5.13\eta_b^{*3.3} \quad (6)$$

小直径桩的数据在本文的循环加载范围内可以用直线拟合,表达式为:

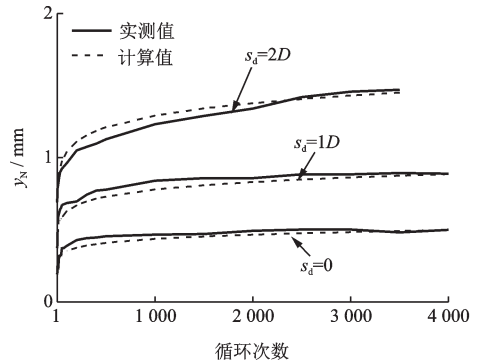
$$y_1 = 1.2\eta_b^* - 0.32 \quad (7)$$

上述两式中,计算结果单位均为 mm。

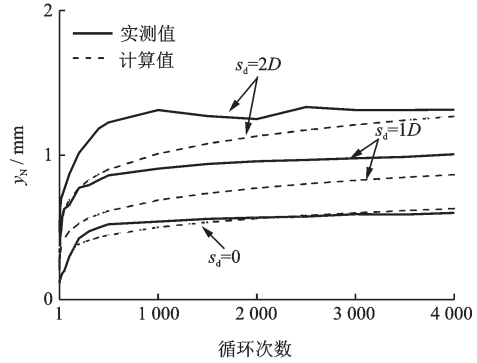
分别用公式(6)、(7)对本文试验的冲刷条件下大单桩和小直径水平受荷单桩基础的长期累积变形进行计算,计算结果与试验结果的对比如图 14 所示。由图可见,对无量纲循环加载循环参数进行考虑冲刷条件的修正,可以很好的模拟冲刷和循环加载条件对长期累积变形的影响。

2.4 讨论

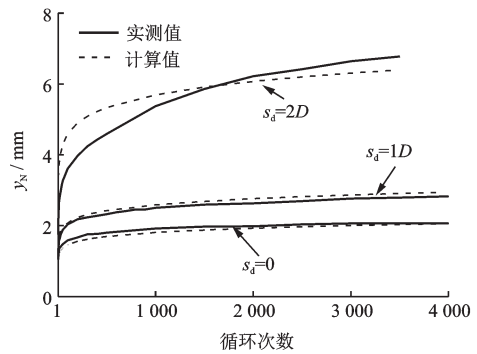
将 2.1 节循环后的静承载力提高与循环荷载幅值的关系也进行类似图 13 的处理,如图 15 所示。可以看到,在同一根桩和同一个循环幅值条件下,随着冲刷深度的增加,承载力提高比例降低,而不同组试验结果之间没有一致的规律。表明与 2.3 节所讨论的第一次残余累积变形不一样,对于承载力来说,冲刷深度的影响比循环加载幅值的影响要大



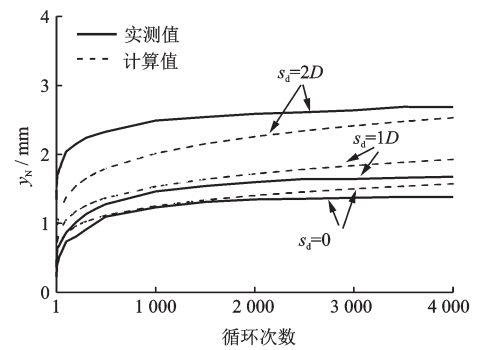
(a) 大直径桩, $\eta_b=0.4$



(b) 小直径桩, $\eta_b=0.4$



(c) 大直径桩, $\eta_b=0.6$



(d) 小直径桩, $\eta_b=0.6$

图 14 实测值与计算值的比较

Fig.14 Comparisons of measured and calculated values

很多,仅仅通过引入考虑冲刷影响的循环加载幅值无量纲参数 η_b^* ,无法表达其相关性。

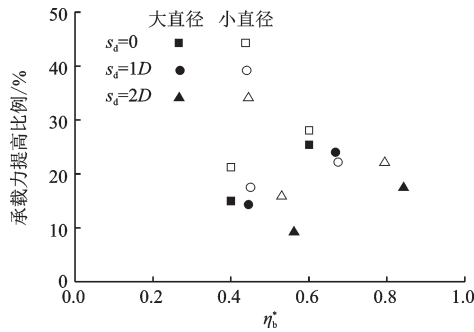


图 15 水平承载力的提高与 η_b^* 的关系

Fig.15 The relationship between the improvement of lateral bearing capacity and η_b^*

3 结 论

针对砂土中冲刷条件下的大直径和小直径水平受荷单桩基础的静载和长期循环加载特性开展了1g对比模型试验研究,探讨了冲刷深度和循环荷载幅值的影响。主要结论如下:

(1)冲刷深度对水平受荷桩承载力的降低影响比例关系不受单桩刚度和循环加载条件影响,近似与静载相等。而循环加载对小直径桩的循环后静载响应,从比例关系上来说会比大直径桩更敏感。

(2)小直径桩在前期随着循环次数的增加变化速率要比大直径桩慢。冲刷深度对循环累积位移的影响,在循环次数超过1000次以后,2D冲刷条件下的大直径桩仍然有比较明显的循环累积位移,而小直径桩的累积变形,已趋于稳定,近似为水平线。本试验的2D冲刷深度和 $0.6P_u$ 的循环加载条件是一个明显的转折点。

(3)通过对水平循环累积位移试验结果的回归分析得到,对归一化循环加载循环参数 η_b 进行考虑冲刷条件的修正,可以很好的模拟冲刷和循环加载条件对长期累积变形的影响。

(4)对于承载力来说,冲刷深度的影响比循环加载幅值的影响要大很多,仅仅通过引入考虑冲刷影响的循环加载幅值参数 η_b^* ,无法表达其相关性。

参考文献:

[1] Kim K, Nam B H, Youn H. Effect of cyclic loading on the lateral behavior of offshore monopiles using the strain wedge model [J]. Mathematical Problems in Engineering 2015: 1-12.

[2] Prendergast L J, Gavin K. A review of bridge scour monitoring techniques [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2014, 6(2): 138-149.

[3] 胡安峰,张光建,贾玉帅,等. 刚度衰减模型在大直径桩累积侧向位移分析中的应用[J]. 浙江大学学报(工学版), 2014,48(4):721-726.
Hu A F, Zhang G J, Jia Y Sh, et al. Application of degradation stiffness model in analysis of cumulative lateral displacement of monopile foundation [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science) 2014, 48(4):721-726.(in Chinese)

[4] 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.
Zhang X, Huang M S, Hu Zh P. Model tests on cumulative deformation characteristics of a single pile subjected to lateral cyclic loading in sand [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019,40(3):933-941.(in Chinese)

[5] 张 宇,王忠涛,赵守正. 双向水平循环荷载下单桩承载力的离心模型实验[J]. 水利与建筑工程学报, 2014,12(4):27-31.
Zhang Y, Wang Zh T, Zhao Sh Zh. Centrifugal tests of single pile's bearing capacity subjected to bidirectional cyclic lateral loading [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2014, 12(4):27-31.(in Chinese)

[6] 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): 1 807-1 815.
Zhu B, Xiong G, Liu J Ch, et al. Centrifuge modelling of a large-diameter single pile under lateral loads in sand [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(10): 1 807-1 815.(in Chinese)

[7] 陈仁朋,顾 明,孔令刚,等. 水平循环荷载下高桩基础受力性状模型试验研究[J]. 岩土工程学报,2012, 34(11): 1 990-1 996.
Chen R P, Gu M, Kong L G, et al. Large-scale model tests on high-rise platform pile groups under cyclic lateral loads [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(11): 1 990-1 996. (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(增1): 271-274.
Hu D, Li F, Zhang K Y. Experiment on the lateral load capacity of single piles under scour conditions [J]. Shuili Xuebao, 2015(Sup 1):271-274.(in Chinese)

[9] 杨少磊,马宏旺. 考虑冲刷情况下海上风电单桩基础优化设计研究[J]. 海洋技术学报, 2018,37(1):74-80.
Yang Sh L, Ma H W. Study on the optimum geometry

- of offshore wind turbine monopiles unprotected against scour [J]. *Journal of Ocean Technology*, 2018, 37(1): 74-80.(in Chinese)
- [10] 杨晓峰, 张陈蓉, 黄茂松, 等. 砂土中单桩基础冲刷的修正应变楔计算[J]. *地震工程学报*, 2016, 38(4): 549-553.
Yang X F, Zhang Ch R, Huang M S, et al. Modified strain wedge calculation of single pile in sand under scour [J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2016, 38(4):549-553.(in Chinese)
- [11] 戴国亮, 代浩, 杨炎华, 等. 冲刷作用下水平承载单桩计算方法及承载特性[J]. *中国公路学报*, 2018, 31(8):104-112.
Dai G L, Dai H, Yang Y H, et al. Computation method and bearing characteristic of lateral bearing single pile foundation under scour condition [J]. *China Journal of Highway Transportation*, 2018, 31(8):104-112.(in Chinese)
- [12] 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 J P, Chen W J, Yang Sh. Impacts of local scour on lateral bearing behavior of partially embedded single piles [J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2017(3):64-70.(in Chinese)
- [13] 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):124710.
Qi W G, Gao F P. Effects of scour on horizontal bearing behavior of monopile foundations for offshore wind turbines [J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2016, 46(12):124710.(in Chinese)
- [14] Kuo Y S, Achmus M, Kao C S. Practical design considerations of monopile foundations with respect to scour [C]//*Proceedings of the 4th Global Wind Energy Conference and Beijing International Wind Energy Conference*. Beijing, China:[s.n.], 2008.
- [15] Achmus M, Kuo Y S, Abdel-Rahman K. Numerical investigation of scour effect on lateral resistance of wind-farm monopiles [C]//*The Twentieth International Offshore and Polar Engineering Conference*. International Society of Offshore and Polar Engineers, Beijing, China:[s.n.], 2010.
- [16] 梁发云, 李彦初, 陈海兵. 冲刷作用下单桩循环加载特性的模型试验[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2014, 42(10): 1 511-1 515.
Liang F Y, Li Y Ch, Cheng H B. Influence of scour depth on vertically cyclic behaviors of single pile with model tests [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2014, 42(10): 1 511-1 515.(in Chinese)
- [17] Poulos H G, Hull T. The role of analytical geomechanics in foundation engineering [C]//*Proceedings of the 1989 Foundation Engineering Conference*. Evanston, Illinois, 1989: 1 578-1 606.
- [18] Leblanc C, Houlsby G Y, Byrne B W. Response of stiff piles in sand to long-term cyclic lateral loading [J]. *Géotechnique*, 2010, 60(2): 79-90.
- [19] Zhu B, Li T, Xiong G, et al. Centrifuge model tests on laterally loaded piles in sand [J]. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 2016, 16(4): 160-172.
- [20] Long J, Vannestev G. Effects of cyclic lateral loads on piles in sand [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1994, 120(1): 225-244.
- [21] Lin S S, Liao J C. Permanent strains of piles in sand due to cyclic lateral loads [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1999, 125(9): 798-802.

(本文责编:周小潭)