

水平循环加载下冲刷对沉井加桩基础的影响^{*}

唐华威¹, 张陈蓉¹, 高博雷²

(1. 同济大学 a.岩土及地下工程教育部重点实验室, b.地下建筑与工程系, 上海 200092;
2. 招商局蛇口工业区控股股份有限公司, 广东 深圳 518080)

摘 要:沉井加桩基础作为深水地区大型桥梁常用的基础形式,其稳定性直接关系到桥梁的安全。为分析砂土中水平循环加载条件下冲刷对基础水平承载力和滞回圈刚度的影响,本文对沉井加桩复合基础进行了冲刷条件下的静载和循环后静载模型试验,得到了基础的水平荷载位移曲线和循环滞回圈。试验结果表明:冲刷对沉井加桩复合基础的水平承载力削弱严重。试验在中密砂、低围压条件下,循环加载会提高基础的水平承载力。对比循环后的静载曲线得知,无冲刷条件下的循环后基础水平承载力高于有冲刷条件下的该值。比较循环加载中的荷载位移曲线得到,无冲刷时滞回圈水平刚度高于有冲刷时的水平刚度,随着循环荷载次数的增加,滞回圈的水平刚度有所提高,但趋势减缓,并逐步稳定。

关键词:模型试验;冲刷;水平循环加载;沉井加桩复合基础;砂土

中图分类号:TU473

文献标识码:A

文章编号:1673-0836(2017)03-0619-05

The influences of Scouring on the Caisson-piles Composite Foundation under Lateral Cyclic Loading

Tang Huawei¹, Zhang Chenrong¹, Gao Bolei²

(1a. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of the Education, b. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, P.R. China; 2. China Merchants Shekou Industrial Zone Holdings Co., Ltd, Shenzhen 518080, P.R. China)

Abstract: As the common foundation of the large bridge in deep water area, the stability of caisson-piles composite foundation is directly related to the safety of the bridge. To investigate the influences of scouring on the lateral bearing capacity and the horizontal stiffness of hysteresis loop of the composite foundation in sand under cyclic loading, the static loading test and post-cyclic test were carried out for the caisson-piles composite foundation. Finally, lateral load-displacement curves and cyclic hysteresis loops were obtained from the test. The test results show that scouring obviously reduces the lateral loading capacity of the foundation. For the current sand with intermediate density and low confining pressure, cyclic loading can increase the lateral loading capacity of the foundation. By comparing the post-cyclic load-displacement curves, the lateral bearing capacity under scouring is less than that free of scour. For cyclic curves, the horizontal stiffness of hysteresis loop under scouring is less than that free of scour, which grows slowly with increased cyclic number, and gradually becomes stabilized.

Keywords: model test; scour; cyclic lateral loading; caisson-piles composite foundation; sand

^{*} 收稿日期:2016-11-10(修改稿)

作者简介:唐华威(1993-),男,黑龙江佳木斯人,硕士生,主要从事桩基工程方面的研究。

E-mail:1431942tanghua@tongji.edu.cn

基金项目:国家973计划课题(2013CB036304);国家自然科学基金(51378392)

0 引言

沉井加桩基础是深水基础的重要形式之一。采用沉井加桩基础的优点在于:用浮式钢沉井代替管桩基础中的钢板桩围堰,可以解决围堰过高、抽水太深和桥墩位移超限等问题;用管桩代替部分沉井以减小沉井高度,可以解决缺乏深沉手段等问题。

现有研究多为关于施工过程中沉井静承载特性的探讨。例如,高子坤^[1]根据静力平衡条件建立沉井基础的数学模型,计算得到高承台沉井在水平荷载作用下的水平位移、内力分布等计算结果。邵国建等^[2]以泰州长江公路大桥南锚碇基础为背景,采用有限元数值模拟方法,基于锚碇基础的变形、基底反力、土体塑性区的分布规律,分析了不同形状下锚碇沉井基础的承载性能。岳齐贤等^[3]结合南京南站电缆隧道工程,利用有限元方法分析了沉井施工对邻近高铁桥基的影响,以及沉井的长宽比、面积和下沉深度对邻近高铁桥基的影响规律。关战伟等^[4]通过对大直径平行顶管工程中沉井后背土体的内力和位移变化特征进行监测和分析,得出后背土体的临界破坏点,实时了解后背土体的稳定状态。张立奎等^[5]采用慢速维持荷载法测试出根式沉井基础和普通沉井的水平承载力。龚维明等^[6]在马鞍山长江大桥现场开展了两期根式基础水平静载试验,得到了普通沉井和根式沉井的水平临界荷载、水平极限荷载等成果。殷永高等^[7]通过现场荷载试验,总结了根式基础的竖向和水平向承载特性。陈晓平等^[8]对海口某大桥主墩的沉井基础进行实时监测,分析了沉井基础下沉过程中的受力特性。黄挺等^[9]通过水平静载荷试验,分析了沉井和根式沉井的水平承载力、沉井变形等变化。Zeinoddini 等^[10]在饱和粉土中进行了沉井基础的 1g 模型实验,研究了沉井基础的抗拔能力。Varun^[11]采用动力有限元求解了沉井阻抗,反算确定了动力文克尔参数,并结合傅立叶变换对沉井基础的地震响应进行了研究。但针对沉井加桩基础水平承载特性受冲刷和水平循环荷载影响的研究还很少。

深水基础周边土体会因为冲刷而流失,另外还承受波浪荷载等长期循环荷载作用,使沉井基础出现转动甚至失稳,对结构整体稳定性影响巨大。因

此,研究砂土中循环加载条件下冲刷对沉井加桩基础水平承载特性的影响有重要意义。

1 模型试验简介

1.1 试验用土物理力学特性

将河沙晾晒后过筛,去除粒径 1 mm 以上颗粒杂物。采用落雨法制备土样,试验完成后取土样测定基本参数,测定结果如表 1,为中密砂。

表 1 干砂基本指标

Table 1 Parameters of dry sand					
内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa	相对密实度	天然孔隙比	最大干密度/(g·cm ⁻³)	最小干密度/(g·cm ⁻³)
32	0	60%	0.727	1.573	1.322

1.2 试验装置及尺寸

如图 1 所示,沉井加桩复合基础在井底对称布置了 8 根基桩,基桩桩长 $L=300$ mm,桩径 $d=30$ mm,沉井外径 $D=300$ mm,沉井壁厚 $t=10$ mm。原型是钢材,弹性模量为 210 GPa,试验模型采用铝合金制作,弹性模量为 70 GPa,几何相似比为 1:300。具体参数如表 2。

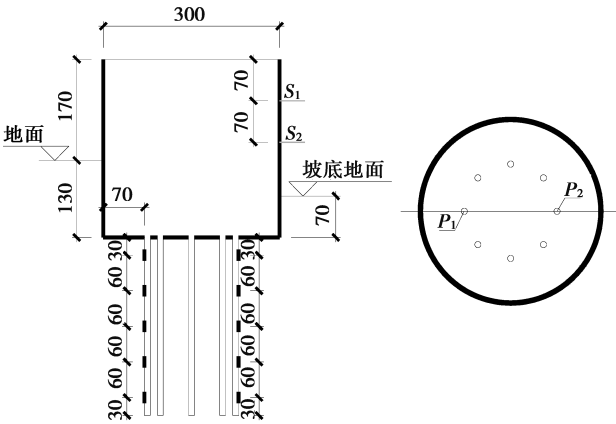


图 1 沉井加桩模型示意图

Fig.1 Caisson-piles composite foundation model

表 2 沉井加桩基础参数 单位:mm

Table 2 Parameters of caisson-piles composite foundation unit:mm						
项目	沉井直径	井壁厚	沉井高度	桩径	桩长	桩壁厚
原型	90 000	3 000	90 000	3 000	90 000	300
模型	300	10	300	10	300	1

1.3 试验布置与加载

无冲刷条件下,沉井加桩基础地表以上高度为170 mm,入土深度为430 mm;有冲刷条件下,沉井加桩基础地表以上高度为230 mm,入土深度为370 mm。为避免边界效应的影响,在宽度方向,沉井两侧距离边界30 cm以上;在长度方向,保证足够的冲刷坑空间;在深度方向,保证桩底到模型箱底部的距离大于8倍桩径。最终设计模型箱长1.3 m,宽1 m,高0.7 m,如图2所示。

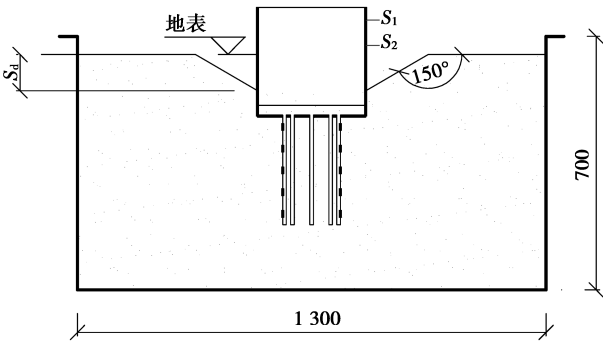


图2 模型箱布置图
Fig. 2 Model box arrangement

试验采用的循环加载装置与Zhu等^[12]及Leblanc等^[13]类似,用钢绞线将循环加载装置与基础模型连接起来,实现双向对称循环加载路径。在基础顶部S₁、S₂位置处放置LVDT位移传感器,测量基础顶部水平位移。

1.4 试验方案

为考虑冲刷和循环荷载对沉井加桩复合基础水平承载性能的影响,共进行了4组试验,分组情况见表3。在循环加载试验中,循环荷载幅值为80 N,频率为0.1 Hz,次数为500次。循环加载后将循环加载配重砝码换成加载砝码,补充了循环后静载试验。冲刷深度 S_d 取为沉井外径的1/5,即60 mm。冲刷坡度按照接近休止角的原则选取,取为30°。

试验时,先将沉井加桩模型放置在模型箱内指定位置。然后分层填砂,每3 cm填筑一层砂土并压实,直至填到试验所需高度。对于有冲刷的工况,按照冲刷参数预留冲刷坑。从后侧撑住模型,放置配重砝码,调节平衡砝码实现加载装置平衡。放置LVDT位移传感器,将位移传感器与DT80数据采集仪连接,同时打开电脑测试数据,检查连接

是否正常。循环加载试验时,调整加载频率,开启电机施加循环荷载,及时保存试验数据。循环加载结束后,关闭电机,卸除配重砝码。静载试验时,1.53 kg砝码为一级,共15级,每级荷载停留5 min,记录对应的LVDT数据。

表3 试验分组
Table 3 Test groups

组别	冲刷条件	加载模式
1	无冲刷	静载
2		循环加载
3	有冲刷	静载
4		循环加载

2 水平承载力试验结果分析

2.1 静载下冲刷对基础水平承载力的影响

本次试验结果均针对模型尺寸。图3中,曲线1、3分别为无冲刷及有冲刷条件下沉井加桩基础静载的桩顶水平荷载位移曲线。对比可知,相同荷载条件下,有冲刷时基础水平位移明显更大。针对本次模型试验60 mm的冲刷深度,冲刷后基础顶部最终位移是无冲刷的2.5倍。当水平荷载较小时,有无冲刷两种情况下的基础水平位移变化速率比较接近,随着水平荷载的增大,有冲刷时基础水平位移增大速率明显更大。

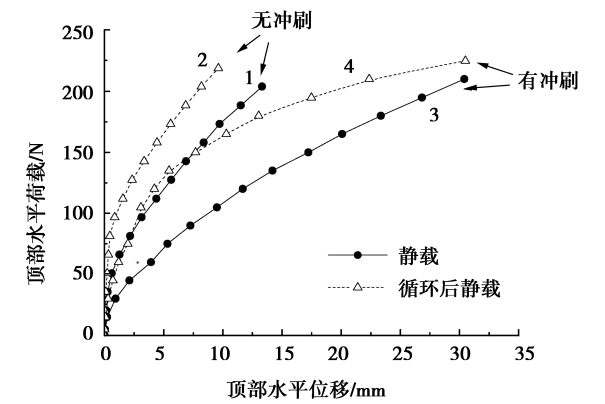


图3 水平荷载位移曲线
Fig. 3 Lateral load-displacement curves

2.2 循环加载后冲刷对基础水平承载力的影响

图3中,曲线2、4分别对应80 N水平循环加载后基础的水平荷载位移曲线。与静载试验相似,相同荷载条件下,循环加载后有冲刷的基础水平位

移比无冲刷情况要大。循环加载后基础的水平承载力无论有无冲刷均有所提高,有冲刷条件的提高更多。如图 4 所示,对应水平位移为 10 mm,静载时无冲刷和有冲刷条件下基础顶部荷载分别为 173 N、105 N,循环加载后分别为 219 N、165 N,分别提高了 26.6 %、57.1 %。这是因为在本文试验中密砂低围压的条件下,循环加载对土体起到了挤密的作用,提高了土体刚度,从而提高了基础水平承载力。同时,循环加载会绕土体与基础接触的位置产生附加弯矩,冲刷条件下附加弯矩更大,承载力提高也更多。

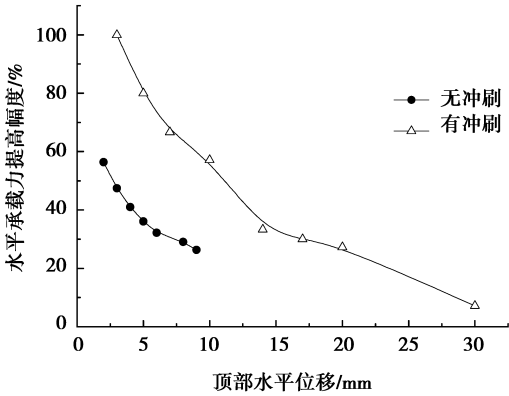


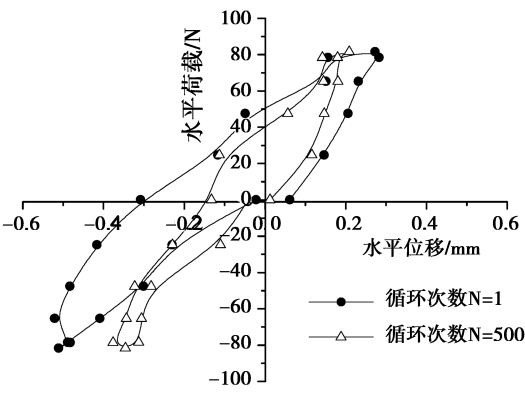
图 4 基础水平承载力提高幅度曲线

Fig. 4 Increased degree of the lateral bearing capacity of foundation

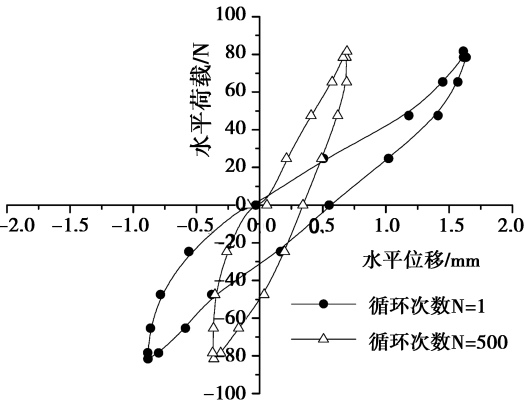
3 水平刚度试验结果分析

图 5 为无冲刷及有冲刷情况下基础顶部第一次和最后一次循环所对应的水平循环荷载位移滞回圈。其中,可选择滞回曲线的两个端点所对应位移值差值的平均值作为水平位移幅值,定义循环荷载幅值与水平位移幅值之比为基础的水平割线刚度,简称水平刚度。沉井加桩基础第 500 次循环加载水平刚度高于第 1 次循环加载的水平刚度,这与前文关于循环后的静载曲线是一致的,即循环荷载效应对低围压砂土基础的水平向变形受力是有利的。第 1 次循环时,无冲刷、有冲刷对应的基础水平刚度分别为 199.0 kN/m、63.2 kN/m;第 500 次循环时,分别为 333.6 kN/m、152.4 kN/m,相应提高了 67.6 %、141.1 %。

图 6 为基础水平刚度随循环次数变化曲线,其中曲线 1、3 为试验曲线。对比可知,从第 1 次循



(a) 无冲刷



(b) 有冲刷

图 5 水平循环加载期间荷载位移曲线

Fig. 5 Load-displacement curves during lateral cyclic loading

环加载开始到第 N 次循环加载结束,无冲刷条件的基础水平刚度始终较高。这是因为无冲刷情况下沉井因周边土体约束,基础抵抗外力的能力较强,基础水平刚度较高。Leblanc 等^[13]以海上风力发电机单桩基础为研究对象,对砂土中刚性单桩进行水平循环加载模型试验,循环次数为 60 000 次。根据试验结果,通过引入无量纲参数 A 计算桩身刚度变化,其表达式如下:

$$k_N = k_0 + A \ln(N) \tag{1}$$

式中: k_N 为第 N 次循环加载时的基础刚度; k_0 为基础初始刚度; A 为与土体的相对密实度及基础所受水平荷载有关的参数; N 为循环次数。

针对本次试验中冲刷深度为沉井外径的 1/5,冲刷坡度为砂土的自然休止角的情况,无冲刷时 k_0 取 199.00 kN/m, A 取 20.97;有冲刷时 k_0 取 63.24 kN/m, A 取 12.10。拟合曲线为图 6 中的曲

线2、4。

图7为基础水平刚度强化的归一化曲线。随着循环加载的进行,基础的水平刚度在不断增加,增加的幅度在不断变缓,最后趋于定值。表4为6组有代表的基础刚度比。可见,在循环加载初始阶段,刚度涨幅约为初始刚度的一半,加载到200次之后,刚度增长缓慢且稳定。同时,有冲刷条件下,基础水平刚度的涨幅要更加明显,且始终大于无冲刷条件下的涨幅。

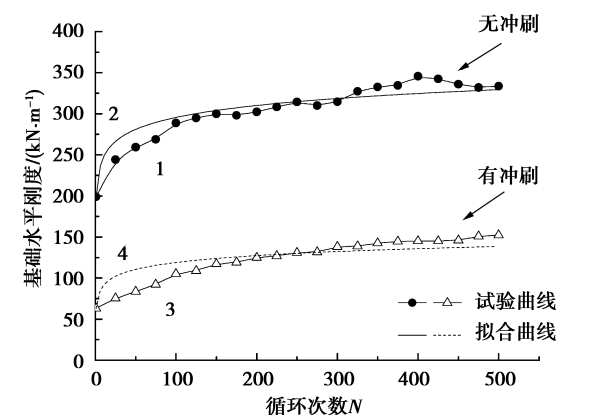


图6 基础水平刚度变化曲线

Fig. 6 Horizontal stiffness variation curves of foundation

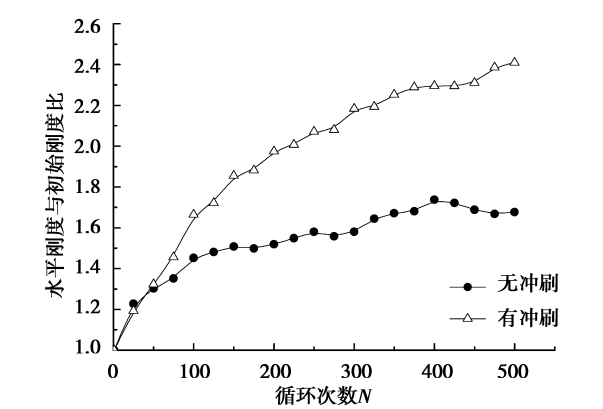


图7 基础水平刚度归一化曲线

Fig. 7 Normalized stiffness curves of foundation

表4 基础水平刚度与初始刚度比

Table 4 Ratio of cyclic horizontal stiffness to initial stiffness							
		循环次数 N	1	100	200	300	400
刚度比	无冲刷	1	1.45	1.52	1.58	1.73	1.68
	有冲刷	1	1.66	1.98	2.19	2.30	2.41

4 结论

通过开展1g模型试验,研究冲刷和双向循环荷载对沉井加桩基础水平承载特性的影响。初步结论与建议如下:

(1)冲刷对沉井加桩基础的水平承载力削弱作用明显,当冲刷深度为沉井外径的1/5、冲刷坡度为砂土的自然休止角时,冲刷后沉井顶部位移大约是冲刷前沉井顶部位移的2.5倍。

(2)针对本试验砂土为中密砂、基础所受围压较低的情况,水平循环荷载作用会使基础的水平承载力有所提高。

(3)在水平循环加载作用下,无冲刷条件下基础水平刚度始终大于有冲刷的基础水平刚度。水平循环加载作用能够提高沉井加桩复合基础的水平刚度,但对于有冲刷的基础刚度提高更为明显。随着循环加载的不断进行,基础水平刚度趋于稳定。

参考文献 (References)

[1] 高子坤. 水下沉井地基基础相互作用力学模型与解答[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(2): 382-387. (Gao Zikun. Analyses of mechanical model and solutions based on interaction between ground and foundation of underwater open caisson [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(2): 382-387. (in Chinese))

[2] 邵国建, 潘辉, 胡丰. 深厚覆盖层下锚碇沉井基础选型的量化对比分析[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(增2): 1996-2001. (Shao Guojian, Pan Hui, Hu Feng. The quantitative comparison and analysis of the anchorage's open caisson foundation in deep covering layer region [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9 (Supp. 2): 1996-2001. (in Chinese))

[3] 岳齐贤, 赵建立, 沈水龙. 泥岩地区沉井施工对土体及高铁桥基影响研究[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(4): 878-883. (Yue Qixian, Zhao Jianli, Shen Shuilong. Study on deformation of soil and bridge foundation of nearby high-speed railway during caisson construction in muddy-sandstone region [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(4): 878-883. (in Chinese))