

DOI: 10.11779/CJGE2015S2024

# 砂土中沉井加桩复合基础水平静力及循环模型试验

张 勋<sup>1, 2</sup>, 黄茂松<sup>\*1, 2</sup>

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

**摘 要:** 采用自主设计的水平循环加载装置进行模型试验研究, 探讨了水平静力及循环加载下单体沉井及沉井加桩复合基础承载变形性能。试验研究表明: 与单体沉井基础相比, 沉井加桩复合基础的水平刚度耦合了沉井及群桩刚度, 改善了水平荷载作用下基础的位移响应模式, 其水平承载力明显高于单体沉井基础。水平双向对称循环加载后, 基础的水平刚度、承载力均有所提高, 并且循环加载后沉井加桩复合基础的承载力高于单体沉井基础。因此, 针对水平循环加载而言, 沉井加桩复合基础是一种更为有效的基础形式。

**关键词:** 模型试验; 沉井加桩复合基础; 水平循环加载; 砂土

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2015)S2-0121-04

**作者简介:** 张 勋(1984-), 男, 博士研究生, 主要从桩基工程方面的研究。E-mail: zhangxunok@126.com。

## Model tests on a caisson-pile composite foundation in sand subjected to lateral static and cyclic loadings

ZHANG Xun<sup>1, 2</sup>, HUANG Mao-song<sup>1, 2</sup>

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Model tests are carried out using a lateral cyclic loading rig developed by the authors in order to investigate the bearing capacity and deformation characteristics of a simple caisson foundation and a caisson-pile composite foundation in sand under lateral static and cyclic loadings. Test results reveal that the lateral stiffness of the caisson-pile composite foundation couples the stiffnesses of caisson and group piles compared with that of the simple caisson foundation, and it improves the deformation response of the foundation under lateral loading. The bearing capacity of the caisson-pile composite foundations is significantly higher than that of the simple caisson foundation. Meanwhile, the lateral stiffness and bearing capacity of foundation increase after the application of lateral bidirectional and symmetric cyclic loading, and the bearing capacity of the caisson-pile composite foundations is higher than that of the simple caisson foundation after cyclic loading. The caisson-pile composite foundation is a more effective solution to increase the capability of the foundation in resisting the lateral cyclic loading.

**Key words:** model test; caisson-pile composite foundation; lateral cyclic loading; sand

## 0 引 言

沉井是深水基础的重要形式之一, 但施工中常出现难沉、超沉等问题, 在保证承载力满足的前提下降低下沉深度就非常重要, 故可以采用沉井加桩复合基础, 井底设置基桩不仅可以分担部分荷载, 减小沉井入土深度, 还增加了基础的埋置深度, 有利于发挥深部土体承载能力, 从而提高了基础水平承载力。

对于海上基础工程, 长期承受风、波浪等具有明显周期性的循环荷载的作用, 会产生水平循环累积位移, 导致基础倾斜, 甚至倾覆<sup>[1]</sup>, 影响整个结构的服役。因此, 沉井及沉井加桩复合基础的水平循环特性是工程设计关心的重要问题之一。现有研究<sup>[2-5]</sup>多为施

工过程中沉井静承载特性的探讨, Zhang 和 Lee 等<sup>[6]</sup>模拟波浪循环荷载对沉箱防波堤的作用进行离心模型试验, 分析了沉箱变位和孔隙水压力的变化特征, 显然, 关于沉井及沉井加桩复合基础水平循环特性的研究还很少。

海上波浪及风荷载具有作用频率低、周期长的特点, 因此, 可以采用干砂模拟排水条件下饱和砂土的力学特性, 本文利用同济大学自主设计的长期水平循

基金项目: 国家“973”计划课题(2013CB036304)

收稿日期: 2015-03-26

\*通讯作者

环加载装置, 采用干砂进行模型试验, 对沉井及沉井加桩复合基础水平静力及循环特性进行初步分析。

## 1 模型试验简介

### 1.1 试验用土物理力学特性

试验采用干中砂, 干砂颗粒均匀, 粒径大小连续, 级配不良, 干砂的基本指标见表 1。

表 1 干砂基本指标

Table 1 Parameters of dry sand in tests

干密度 ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	地基土 孔隙比	比重	不均匀 系数	曲率 系数	相对密 实度
1.456	0.820	2.65	2.87	1.22	25%

### 1.2 试验装置及加载路径

试验采用与 Leblanc 等<sup>[7]</sup>及 Zhu 等<sup>[8]</sup>类似的循环加载装置, 可以实现不同循环幅值的双向对称循环加载路径, 并通过钢绞线将循环加载装置与基础模型连接, 基础模型及位移传感器 (LVDT) 在模型箱中的布置见图 1, 其中, 模型箱长 1.3 m, 宽 1.0 m, 高 0.72 m。

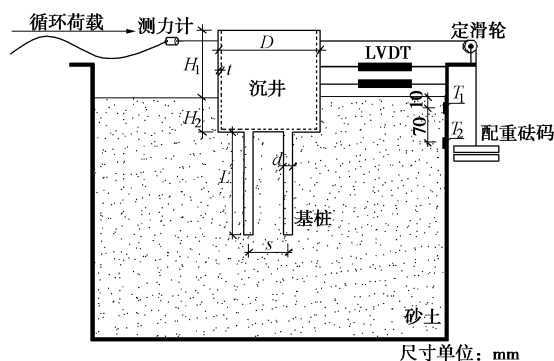


图 1 模型箱布置图

Fig. 1 Arrangement of model box

试验分别采用 DataTaker 数据采集系列 DT80G 及 YE2539 静态应变测试仪进行沉井侧壁位移及土压力测试。试验前对各传感器进行标定, 试验后按标定公式对采集数据进行处理分析。

### 1.3 试验基础模型

在竖向承载力等效的情况下, 试验设计了单体沉井及沉井加桩复合基础模型, 模型与原型的几何相似比为 1:100, 单体沉井地表以上高度  $H_1=170$  mm, 入土深度  $H_2=230$  mm, 沉井外径  $D=300$  mm, 沉井壁厚  $t=10$  mm, 沉井加桩复合基础对应的沉井部分除入土深度为  $H_2=130$  mm 外, 其它参数与单体沉井相同, 但在井底对称布置了 4 根基桩, 基桩桩长  $L=300$  mm, 桩间距  $s=120$  mm, 桩外径  $d=30$  mm, 桩内径  $d_0=25$  mm, 以上各参数见图 1 中示意。

试验中, 沉井井壁距离边界 500 mm, 模型尺寸相对较大, 为分析边界效应的影响, 在模型箱边界处

地表下布置土压力观测点  $T_1$ 、 $T_2$ , 测试边界效应, 见图 1。测试结果表明, 水平静力荷载达到 120 N, 位移约为 11 mm 时, 边界处地面以下 1 cm、8 cm 的土压力变化量分别在 0.2 N 和 0.1 N 以内, 因此, 沉井井壁距离边界 500 mm 时, 可忽略边界效应。

### 1.4 试验方案

试验设计了水平静力及双向对称循环加载路径下的基础模型试验, 其中, 水平静力加载试验采用慢速维持荷载法, 并根据静力加载试验结果, 进行了循环幅值为 40 N、80 N 及 120 N 的水平循环加载对比试验, 试验加载频率采用 0.1 Hz, 为保证波形的采集, 测试装置采样频率选用 2 Hz。

## 2 水平静力试验结果分析

图 2 为单体沉井及沉井加桩复合基础水平静力试验荷载位移曲线。

由图 2 可见, 水平荷载作用下单体沉井与沉井加桩复合基础的位移响应模式明显不同, 单体沉井基础水平荷载位移曲线呈陡降型, 沉井加桩复合基础水平荷载位移曲线明显变缓, 并且沉井加桩复合基础的水平承载力明显高于单体沉井基础, 例如, 水平位移为 5 mm 时, 单体沉井、沉井加桩基础对应的水平承载力分别为 110 N、163 N, 沉井加桩复合基础相对单体沉井基础水平承载力提高了 48.2%。

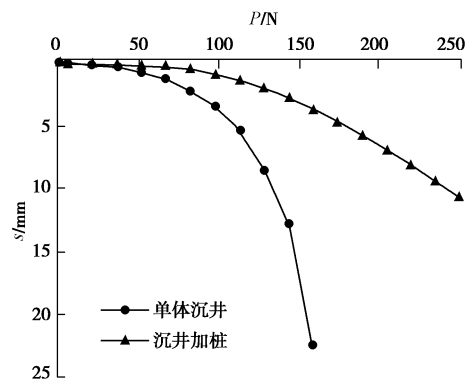


图 2 水平静力试验荷载位移曲线

Fig. 2 Load-displacement curves for lateral static loading tests

同时, 水平荷载较小时, 单体沉井与沉井加桩复合基础水平位移速率比较接近, 随着水平荷载的增大, 单体沉井基础水平位移增大速率明显大于沉井加桩复合基础。相对单体沉井基础, 沉井加桩复合基础减小了沉井的入土深度, 在井底下增设基桩, 增加了基础的埋置深度, 使得水平荷载作用下基础的转动中心下移, 发挥了基础深部持力层的承载力, 减小了基础的水平位移, 并且沉井加桩复合基础的水平刚度耦合了沉井及群桩刚度, 当水平荷载较大时, 荷载传递到了基础的下部, 沉井底群桩提供的反力, 显著提高了基础抵抗水平变位的能力。

### 3 水平循环加载试验结果分析

#### 3.1 循环加载对基础水平刚度的影响

图 3 为单体沉井及沉井加桩复合基础水平循环荷载位移曲线。其中, 可取荷载位移滞回曲线两个端点对应位移值差值的平均值得到水平位移幅值, 可定义循环幅值与水平位移幅值之比为基础水平割线刚度 (简称水平刚度)。

由图 3 可见, 不同循环幅值作用下, 单体沉井及沉井加桩基础第  $N$  次循环加载水平刚度均高于第 1 次循环加载的水平刚度, 例如,  $P_c=40$  N, 第 1 次循环时, 单体沉井及沉井加桩基础的水平刚度分别为 458.6 kN/m、386.4 kN/m, 第 1000 次循环时, 其水平刚度分别为 664.6 kN/m、545.4 kN/m, 单体沉井及沉井加桩基础的水平刚度分别提高了 44.9%、41.1%, 这与 Leblanc 等<sup>[7]</sup>模型试验中单桩水平刚度随循环次数的增大而增大的结论类似, 但与习惯认为的循环加载导致基础刚度退化的结论相反。

由图 3 (a), (b) 可见, 在  $P_c=40$  N 和  $P_c=80$  N 时, 第 1 次与第  $N$  次循环加载, 单体沉井基础均较沉井加桩复合基础的水平刚度高, 这是因为单体沉井基础部分的水平刚度大于沉井加桩复合基础沉井部分的水平刚度, 小幅值循环加载时, 基础水平循环位移较小, 主要是基础上部刚度发挥主要作用, 而沉井加桩复合基础底群桩刚度还没有发挥较大作用导致的。

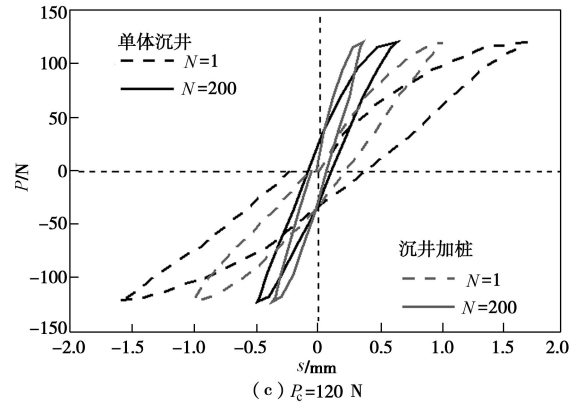
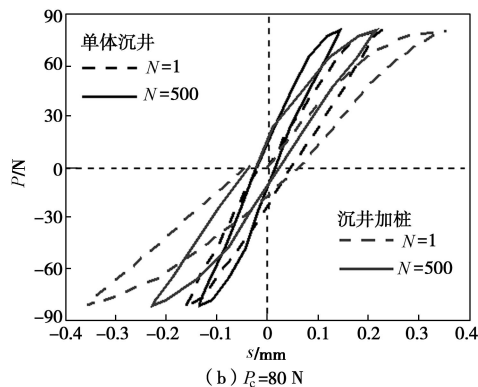
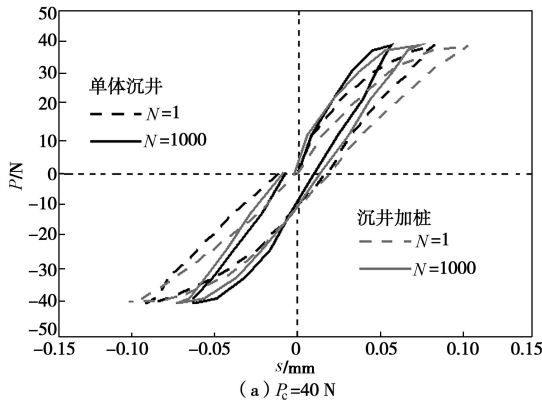


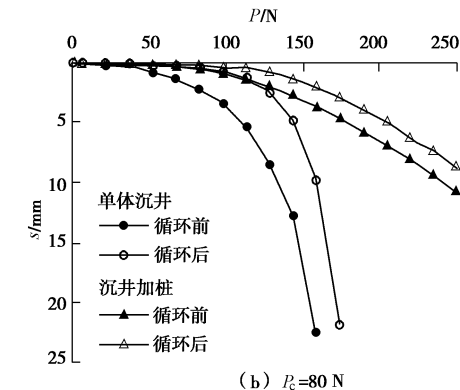
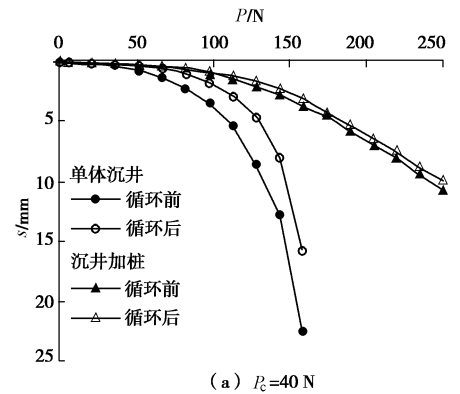
图 3 水平循环加载期间荷载位移曲线

Fig. 3 Load-displacement curves during lateral cyclic loading

由图 3 (c) 可见, 在  $P_c=120$  N 时, 第 1 次与第  $N$  次循环加载, 沉井加桩复合基础水平刚度均大于单体沉井基础。例如,  $P_c=120$  N 时, 第 200 次循环时, 单体沉井及沉井加桩复合基础的水平刚度分别为 212.7 kN/m、328.2 kN/m, 沉井加桩复合基础相对单体沉井基础水平刚度增大了 54.3%。显然, 在大循环幅值作用下, 水平荷载的作用传递到了基础下部, 沉井加桩复合基础的沉井与群桩耦合刚度发挥作用, 减小了水平位移幅值, 提高了基础水平刚度。

#### 3.2 循环加载对水平承载力的影响

图 4 为单体沉井及沉井加桩复合基础在不同循环幅值作用前后水平静力试验荷载位移对比曲线。



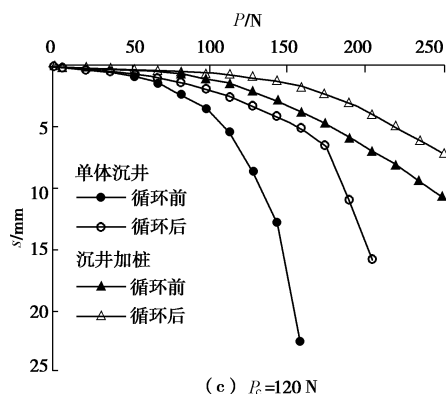


图4 水平荷载位移曲线

Fig. 4 Lateral load-displacement curves

由图4可见,水平循环荷载作用没有改变基础的水平荷载位移响应模式,例如,循环加载后单体沉井基础水平荷载位移曲线仍为陡降型,与循环加载前一致。但是,不同循环幅值加载后,单体沉井及沉井加桩基础的水平承载力均有所提高,并且循环后沉井加桩复合基础的水平承载力仍高于单体沉井基础。例如, $P_c=80\text{ N}$ ,水平位移为5 mm时,循环加载前单体沉井及沉井加桩复合基础的水平静承载力分别为109.2 N、178.1 N,循环加载后其水平承载力分别为143.2 N、204.8 N,循环后单体沉井及沉井加桩复合基础承载力分别提高了31.1%、15.0%。水平循环加载下基础周围砂土颗粒错动、致密化机理非常复杂,从以上试验结果可知,水平双向对称循环加载对基础水平承载力是有利的。

同时,虽然试验设计的不同幅值循环加载次数不一致,但是从图4(a),(b),(c)可以推知,随着循环幅值的增大,循环加载后单体沉井及沉井加桩复合基础的水平承载力提高幅度逐渐增大。

## 4 结论与建议

通过开展沉井及沉井加桩复合基础水平静力及循环加载模型试验,初步结论与建议如下:

(1) 单体沉井与沉井加桩复合基础在水平静力荷载作用下的位移响应模式明显不同。在沉井底部设置基桩,形成沉井与群桩复合基础,可以减小单体沉井入土深度,并增加复合基础的埋置深度,显著提高基础的水平承载力。

(2) 在水平循环加载作用下,单体沉井及沉井加桩复合基础的水平刚度均有所提高,同时,大循环幅值作用下,沉井加桩复合基础的沉井与群桩耦合刚度发挥作用,提高了基础水平刚度。

(3) 水平循环荷载作用没有改变单体沉井及沉井加桩复合基础的位移响应模式,但导致循环后单体沉井及沉井加桩复合基础的水平承载力均提高,并且随着循环幅值的增大,承载力提高的幅度越大,但不同循环幅值作用前后沉井加桩复合基础的承载力均较单体沉井基础大。

## 参考文献:

- [1] SEKIGUCHI H, OHMAKI S. Overturning of caissons by storm waves[J]. Soils and Foundations, 1992, 32(3): 144 - 155.
- [2] 陈晓平, 茜平一, 张志勇. 沉井基础下沉阻力分布特征研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(2): 148 - 152. (CHEN Xiao-ping, QIAN Ping-yi, ZHANG Zhi-yong. Study on penetration resistance distribution characteristic of sunk shaft foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(2): 148 - 152. (in Chinese))
- [3] 李伟雄. 基于被动土压力的沉井结构分析[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(11): 1341 - 1345. (LI Wei-xiong. Analysis of structure of passive earth pressure on open caisson[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(11): 1341 - 1345. (in Chinese))
- [4] 穆保岗, 朱建民, 牛亚洲. 南京长江四桥北锚碇沉井监控方案及成果分析[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(2): 269 - 274. (MU Bao-gang, ZHU Jian-min, NIU Ya-zhou. Monitoring and analysis of north anchorage caisson of Fourth Nanjing Yangtze River Bridge[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(2): 269 - 274. (in Chinese))
- [5] 王建, 刘杨, 张煜. 沉井侧壁摩阻力室内试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(3): 659 - 666. (WANG Jian, LIU Yang, ZHANG Yu. Model test on sidewall friction of open caisson[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(3): 659 - 666. (in Chinese))
- [6] ZHANG X Y, LEE F H, LEUNG C F. Response of caisson breakwater subjected to repeated impulsive loading[J]. Geotechnique, 2009, 59(1): 3 - 16.
- [7] 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.
- [8] ZHU B, BYRNE B W, HOULSBY G T. Long-term lateral cyclic response of suction caisson foundations in sand[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013, 139: 73 - 83.

(本文责编 明经平)