

# 水平循环荷载作用下单桩桩顶 位移变化模型试验研究

刘阳, 任青, 张良

(上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093)

**摘要:** 为了探究海上桩基础在长期受到水平循环荷载作用下的变形规律, 选取典型的中砂作为试验土体, 开展砂土中单桩水平荷载作用下的模型试验。获得了高次循环荷载下不同加载力及不同频率作用下的桩顶位移循环弱化的变化规律。试验结果表明: 循环次数及加载力对桩顶位移变化影响显著, 在水平循环荷载作用下, 相同频率, 加载力越大位移越大; 而频率的改变对桩顶位移的影响不大; 桩顶滞回圈的变化主要集中在前1万次并随后达到桩土相对稳定状态。研究成果为保证海上桩基的可靠性提供了具有价值的参考。

**关键词:** 模型试验; 水平循环荷载; 桩顶位移; 滞回圈

中图分类号: TU323.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2016)03-0200-05

## Model test of pile – top displacement variation under effect of horizontal cyclic load

LIU Yang, REN Qing, ZHANG Liang

(School Of Environment & Architecture, University Of Shanghai For Science And Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** To explore the deformation law of offshore pile foundation under long – term horizontal circulating load, the paper chose medium sand as test soil and carried out model test under effect of horizontal circulating load, and got the circulation weakening law of pile top displacement cycle under effect of different load forces and frequencies of high order circulating load. The results show that the impact of cyclic times and loading forces on displacement variation is obvious. When the frequency is not changed, the more the loading force, the more is its displacement under effect of horizontal circulating load. The change of frequency has little influence on pile – top displacement. The change of hysteresis loop of pile top mainly occurs in the first 10,000 rounds of cyclic loading and then gets stable. The results can provide valuable reference for ensuring the reliability of offshore pile foundation.

**Key words:** model test; horizontal cyclic load; pile – top displacement; hysteresis loop

## 1 研究背景

随着港口码头、水上桥梁、高层建筑、近海石油钻探平台、深基坑支护和抗震建筑等一系列工程建设的快速发展, 对于工程桩基的研究也显得越来越重要。这些工程中桩要承受来自水平向的风荷载、波浪冲击力、桩侧土抗力和地震作用等荷载, 因此桩基的受力情况更加复杂<sup>[1]</sup>。目前国内外研究静载及竖向荷载下单(群)桩桩身的特性及桩身位移的变化有很多, 而且从很多方面都给出相关的理论与

试验结果<sup>[2-6]</sup>。自国外学者 Reese 等<sup>[7]</sup>在砂土中采用钢管桩进行水平荷载试验, 给出了砂土中  $p - y$  曲线求解方式以后, 桩基动力试验广泛被各国学者所采纳和应用。而近些年来, 国内外学者们更加重视桩在水平循环荷载作用下的侧向位移的发展规律。Byrne 等<sup>[8]</sup>和 Peng 等<sup>[9]</sup>在 1 g 条件下, 开展了砂土中侧向循环受载桩的离心试验。试验研究循环次数、不同桩径、荷载大小以及砂土密实度对模型桩侧向位移的发展。杨克己等<sup>[10]</sup>单(群)桩单向及双向循环的模型试验研究, 但未考虑循环次数的影响因

收稿日期: 2015-09-18; 修回日期: 2015-12-28

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(51008194)

作者简介: 刘阳(1991-), 男, 安徽合肥人, 在读研究生, 主要从事桩土相互作用研究。

素。汪传顺等<sup>[11]</sup>研究了加载频率、循环次数对水平循环荷载下的砂土中桩的工作性状的影响。唐永胜等<sup>[12]</sup>分析了加载频率、循环次数以及桩的埋入深度对桩基变形的影响。朱斌等<sup>[13]</sup>采用海洋软土中的现场试验,得到桩顶荷载位移曲线、变形、弯矩以及桩侧土压力分布。并绘制出对应的  $p-y$  曲线。国内外学者针对桩受水平循环荷载作用下的研究成果显示:桩对水平方向循环荷载的响应特性必须考虑循环荷载的衰减和加速度的增加。并认为当荷载循环次数增多时,桩的位移有所增大受到两种原因影响:(1)桩在土体中会由于循环次数的增多而积累导致自身有残余变形;(2)土体在循环荷载作用下慢慢减弱自身的压缩性和受力强度,这种现象可以被称为“土退化”。

由于现场试验的昂贵因素,使得现场试验桩受循环荷载作用的次数不超过 200 次,相比较受力复杂的海上桩基础,这样的循环次数是远远不够的。本文基于室内模型做近似模拟,开展砂土中单桩水平荷载作用下的模型试验,考虑了循环次数、加载力、加载频率对桩顶位移影响,力求贴近于海上桩基的实际受力状态。

## 2 模型试验准备

### 2.1 模型材料

模型试验箱由钢及有机玻璃制成,尺寸为 120cm × 120cm × 150cm,如图 1 所示。在模型箱周围铺设 2 cm 厚的泡沫板,以消除边界反射。铝合金方桩模型桩长 80cm,刚度 70 GPa,边长为 3 cm,入土深度为 70 cm,模型试验采用天然风干的本地中细砂,保证砂土的干燥,以消除试验过程中因为含水量的改变对试验结果的影响。砂土重度为 16.2 kN/m<sup>3</sup>,有效内摩擦角 22.8°。

实验采用分层埋土的方式,即每次埋置定量的砂土,并用模板将其推平,使用相同质量的砝码置于木板上将土压实,用水平尺测量以保证土层水平,如此反复,将土层铺设完毕。激振器、力传感器、激光位移传感器及桩帽置于同一水平面。如图 2 所示。



图1 模型试验箱立面图



图2 试验装置布置图

### 2.2 试验仪器布置

试验过程中主要使用到的仪器有应变片、激光位移传感器、力传感器、激振器、应变仪、功率放大器、反力装置等。试验过程中的主要设备连线如图 3 所示,其中 1 - 功率放大器、2 - 数据分析采集仪、4 - 应变仪、5 - 激振器、6 - 力传感器、8 - 激光位移传感器。激振器、风机与功率放大器连接组成加载系统,完成试验激振器能量输出。通过 USB 线连接从而控制输出力的类型、大小以及激振频率。力传感器和激光位移传感器的导线同样经过数据采集与分析仪将数据直接存储在电脑上。

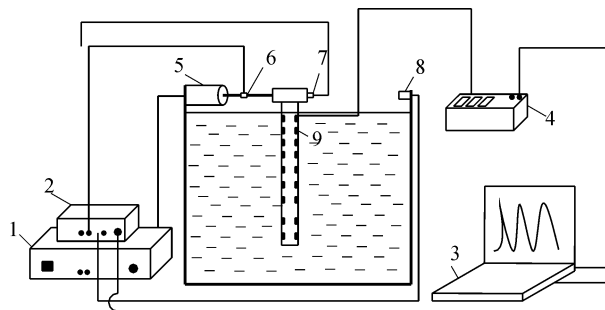


图3 试验装置示意图

## 3 试验过程

通过初步测试的桩侧土压力的结果,桩侧土体水平方向的极限土抗力统一分布理论<sup>[14]</sup>,根据极限抗力统一表达式,对于砂土中铝管桩建议采用如下表达式:

$$p_u = N_a \gamma_s d^{2-n} (a_0 + z)^n \quad (1)$$

$$N_a = 2K_p^2 \quad (2)$$

$$K_p = \tan^2 \beta \quad (3)$$

$$\beta = 45^\circ + \frac{1}{2}\varphi \quad (4)$$

式中:  $p_u$  为土体极限抗力, kN;  $\gamma_s$  为土体重度, kN/m<sup>3</sup>;  $\varphi$  为内摩擦角;  $d$  为桩径, mm;  $a_0$  反映地表处土体极限抗力大小的常数或等效土体深度, m;  $z$  为地面下的深度, m;  $n$  为  $a_0$  和  $z$  之和的指数, 反映土体极限抗力的形状; 对于砂土而言,  $a_0$  取为 0;  $n$  取

为 1.7;  $z$  取为 5  $d$ 。

根据本次试验桩在砂土中的最大土体极限抗力, 分别在土体中达到土体极限抗力的 0.1、0.2 和 0.3 倍下的加载力的大小作为分组试验标准, 而加载频率控制为 1、5 和 10 Hz。为了得到高次循环加载下的桩顶位移及滞回圈的变化方式, 试验的循环加载次数均为 4 万次, 试验分组情况如表 1 所示。

## 4 试验结果分析

### 4.1 桩顶位移变化规律

由设在距离桩水平面约 20 cm 处的激光位移传感器记录桩顶在受到水平循环荷载作用下位移的变化(见图 2 所示), 得到不同加载力及加载频率下的桩

顶位移极值  $S_{\max}$  (mm) 与循环次数  $N$  之间的关系。

表 1 试验分组情况

试验组号	桩径/cm	加载频率/Hz	土体极限抗力大小	激振次数
1	3	1	0.1	40000
2	3	1	0.1	40000
3	3	1	0.1	40000
4	3	5	0.2	40000
5	3	5	0.2	40000
6	3	5	0.2	40000
7	3	10	0.3	40000
8	3	10	0.3	40000
9	3	10	0.3	40000

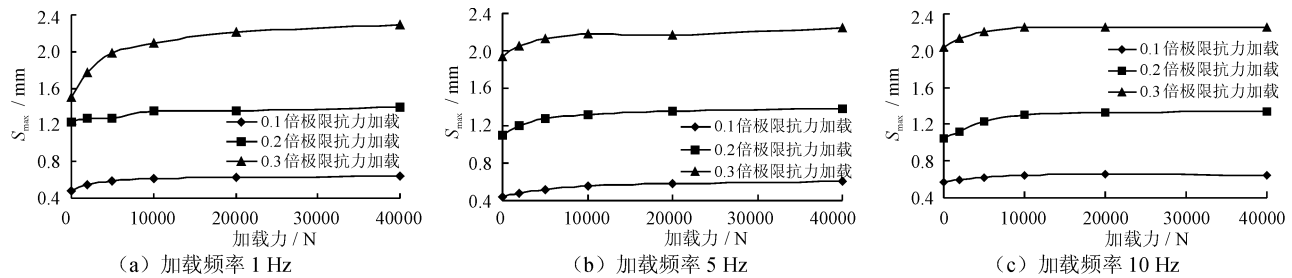


图 4 桩顶位移极值随加载力的变化曲线

从图 4(a) 可以看出: (1) 在加载频率固定为 1 Hz 的情况下, 桩顶位移极值  $S_{\max}$  随着加载力的变大而慢慢变大。(2) 在循环 0 ~ 10000 次之间,  $S_{\max}$  变化较为明显, 在 1 万次以后  $S_{\max}$  逐渐趋于平稳; 此规律在图 4(b)、4(c) 均有所体现, 不再赘述。

对比图 4(b)、4(c) 可以得到: 在相同的分级加载条件下, 桩顶位移  $S_{\max}$  并没有明显变化, 说明频率的变化对桩顶位移没有太大的影响。

综合图 4 所呈现的试验规律: 在水平循环荷载的作用下, 桩顶位移  $S_{\max}$  先增大, 后慢慢趋于稳定。笔者认为, 这是由于桩周土体的强度经历了先减小后慢慢趋于稳定的阶段(即土体弱化), 而在整个试验阶段, 可以近似认为桩本身的抗弯刚度没有变化。

从图 5(a) 中可以得到: (1) 在加载力固定的情

况下, 随着频率的增大, 桩顶位移极值  $S_{\max}$  出现了先增大后减小的现象。即  $S_{\max}(10 \text{ Hz}) \geq S_{\max}(1 \text{ Hz}) \geq S_{\max}(5 \text{ Hz})$ ; (2) 在循环 0 ~ 10000 次之间,  $S_{\max}$  变化较为明显, 在 1 万次以后  $S_{\max}$  逐渐趋于平稳。此规律在图 5(b)、5(c) 均有所体现, 不再赘述。结合图 5 所呈现的规律: 在相同的分级加载条件下, 桩顶位移极值与加载频率并没有明显的相关性。

### 4.2 单桩桩顶滞回圈变化规律

由力传感器和激光位移传感器分别得到桩顶力  $F$  (N) 和位移  $S$  (mm) 时程曲线, 将二者结合, 即得到桩顶滞回圈曲线, 见图 6 ~ 8。单桩桩顶滞回圈可以直接反映单桩的受力变化, 其面积的变化反映着桩 - 土体系能量衰减。

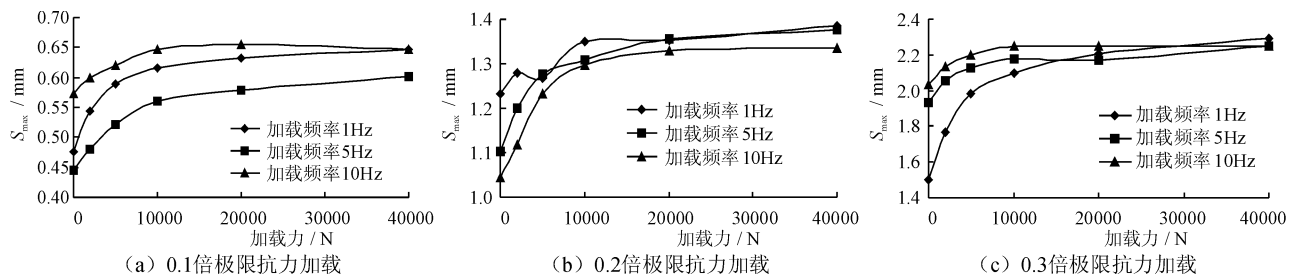


图 5 桩顶位移极值随加载频率的变化曲线

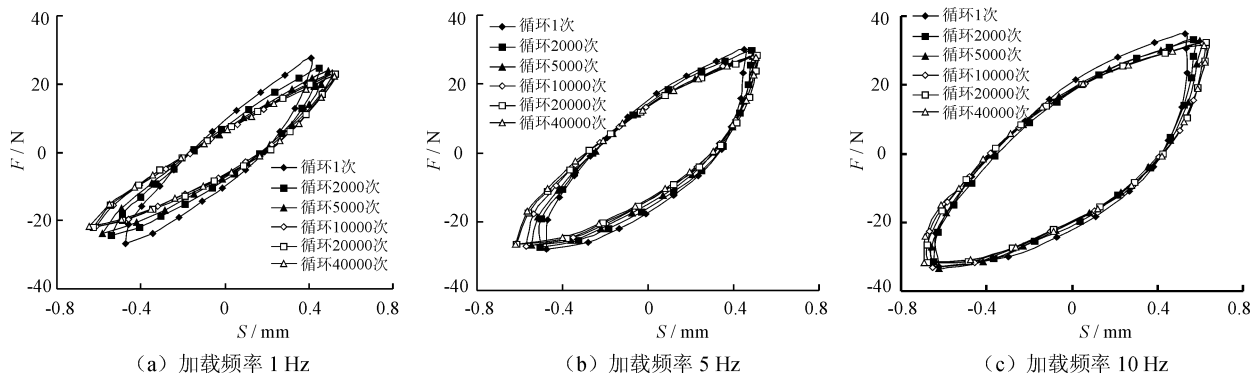


图 6 0.1 倍极限抗力加载下桩顶滞回圈的变化曲线

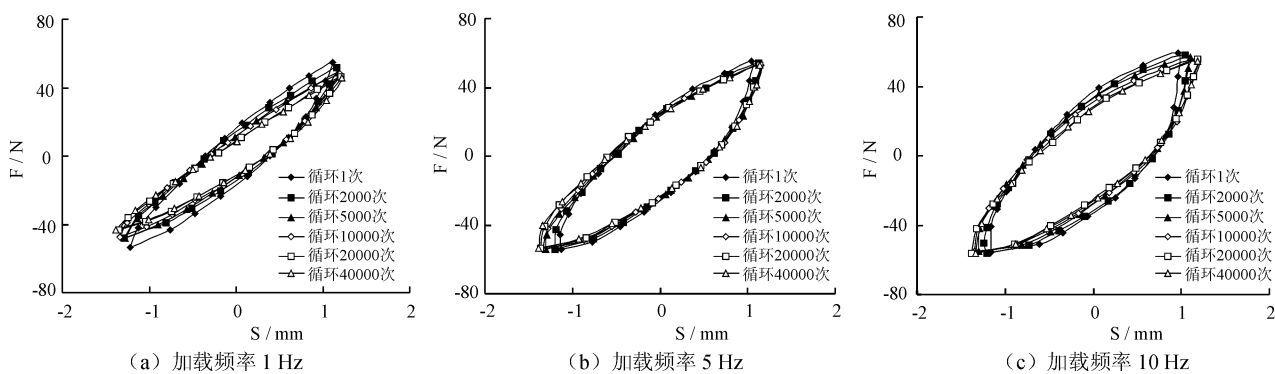


图 7 0.2 倍极限抗力加载下桩顶滞回圈的变化曲线

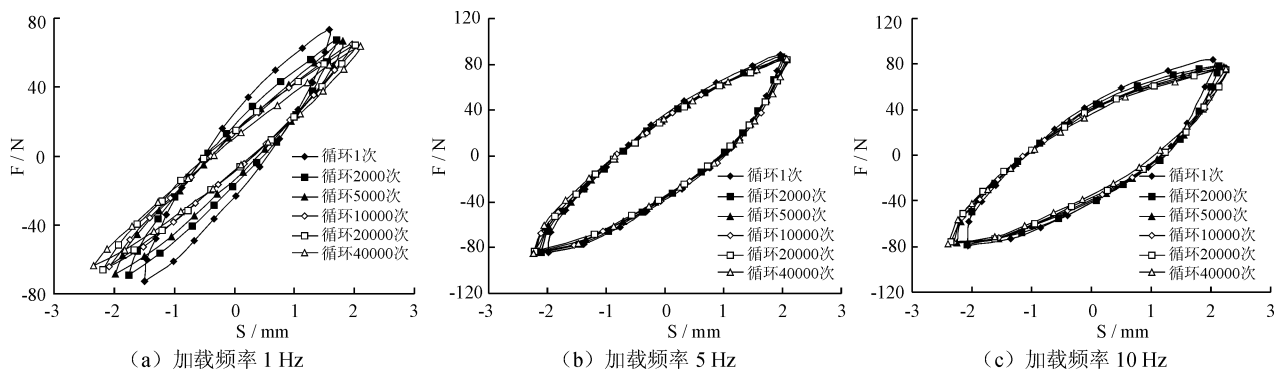


图 8 0.3 倍极限抗力加载下桩顶滞回圈的变化曲线

结合图 6~8 可以发现:

- (1) 随着激振循环次数的增加,桩顶位移也逐渐增大,并最终达到稳定状态;
- (2) 加载频率越小,桩顶滞回圈的变化速率越大;
- (3) 滞回圈向右慢慢倾斜,其所围成的面积也慢慢变小,但在循环 1 万次左右滞回圈所围成的面积保持不变。

笔者认为这是由于在循环初始阶段,桩侧土体对单桩的抗力逐渐减小,滞回圈面积衰减速度较快,桩-土体系处于不稳定阶段;而在 1 万次以后,桩顶位移不发生明显变化。滞回圈面积也慢慢趋于稳

定,桩-土体系处于稳定阶段。

## 5 结 论

通过室内模型试验,研究水平循环荷载作用下单桩的动力特性,主要考虑了 3 种不同的影响因素,包括加载力的大小、加载频率以及加载次数。得到不同因素影响下桩顶位移及桩顶滞回圈的循环变化规律。从而更好的理解和分析海上桩基础在长期受到波浪冲击力、风荷载等循环荷载作用下的安全稳定性。通过数据结果分析得到以下结论:

- (1) 在相同的加载频率下,加载力越大其桩顶位移极值越大。随着循环次数的不断增加,在循环

0~10000次之间,  $S_{\max}$  变化较为明显, 在1万次以后  $S_{\max}$  逐渐趋于平稳。

(2) 在相同的分级加载条件下,  $S_{\max}$  与加载频率并没有明显的相关性。而加载频率的变化影响着桩顶滞回圈的变化速率, 具体表现为: 加载频率越小, 桩顶滞回圈的变化速率越大。

(3) 桩顶滞回圈的变化主要集中在前1万次以内, 其反映了单桩受到桩侧土体抗力大小的变化, 桩侧土体对单桩的抗力逐渐减小, 滞回圈面积衰减速度较快, 桩-土体系处于不稳定阶段; 而在1万次以后, 桩顶位移不发生明显变化。滞回圈面积也慢慢趋于稳定, 桩-土体系处于稳定阶段。

### 参考文献:

- [1] 张建民, 王刚, 陈杨. 海岸岩土工程的物理与数值模拟方法[J]. 岩土力学, 2004, 25(S2): 61-74.
- [2] 章敏, 王星华, 杨光程, 等. 循环荷载作用下单桩动力模型试验与桩-土界面特性研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(4): 1037-1044.
- [3] 王富强, 荣冰, 张嘎, 等. 水平循环荷载作用下风电机组基础离心模型试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(7): 1926-1930.
- [4] 黄雨, 柏炯, 周国鸣, 等. 单向循环荷载作用下饱和砂土中单桩沉降模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(9): 1440-1444.
- [5] Achmus M, Thieken K. On the behavior of piles in non-cohesive soil under combined horizontal and vertical loading [J]. Acta Geotechnica, 2010, 5(3): 199-210.
- [6] 陈仁朋, 王书行, 孔令刚, 等. 不同水平偏心距下群桩内力变化规律试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(3): 603-609.
- [7] Reese L C, Cox W R, Koop F D. Analysis of laterally loaded piles in sand [C] // Offshore Technology Conference, Houston, 1974.
- [8] Byren B W, Leblanc C, Houlsby G T. Response of stiff piles in sand to long-term cyclic lateral loading [J]. Geotechnique, 2010, 60(2): 79-90.
- [9] Peng J, Clarke B, Rouainia M. Increasing the resistance of piles subject to cyclic lateral loading [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2011, 137(10): 977-982.
- [10] 杨克己, 李启新, 王福元. 水平力作用下群桩性状的研究[J]. 岩土工程学报, 1990, 12(3): 42-45.
- [11] 汪传顺, 韩理安. 水平循环荷载下桩土共同作用的试验研究[J]. 湖南交通科技, 2006, 32(1): 150-153.
- [12] 唐永胜, 张鸿文, 黄小明, 等. 水平循环荷载下饱和砂土中桩-土相互作用机理的试验研究[J]. 中国港湾建设, 2010, 168(4): 26-29.
- [13] 朱斌, 朱瑞燕, 罗军, 等. 海洋高桩基础水平大变位性状模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(4): 521-530.
- [14] 朱碧堂, 杨敏, GUO W D. 土体的极限抗力与侧向受荷桩性状[D]. 上海: 同济大学, 2005.