

文章编号: 1000-7598 (2011) 05-1596-05

离心场中风力电机桩基复杂加载测试设备的研制

荣 冰, 张 嘎, 王富强

(清华大学 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084)

摘 要: 桩基础是近海风力发电中经常采用的基础形式, 承受着包括低频风循环荷载在内的复杂荷载组合。为了采用离心模型试验来研究风机桩基础特性, 研制了离心场中风机桩基础复杂加载测试设备。该套设备除了可以施加水平向和竖向静力荷载外, 还实现了离心场中长时间低频率的水平循环加载, 并能够实现多种荷载同时或者先后施加。通过一系列测试试验, 验证了该套设备的有效性, 满足离心模型试验中对模拟风机桩基础的复杂荷载要求。初步试验结果表明, 桩顶水平位移随着水平荷载循环周数的增加而增大, 但增长速率逐渐减小, 至一定周数后, 桩顶位移趋于稳定, 土体变形主要集中在桩周一定区域内。

关 键 词: 风力电机; 桩基础; 离心模型试验; 复杂荷载

中图分类号: TU 473.1

文献标识码: A

Complicated loading device for pile foundation of wind-driven generator in centrifugal field

RONG Bing, ZHANG Ga, WANG Fu-qiang

(State Key Laboratory of Hydrosiences and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Piles are widely used as a foundation for the offshore wind power generation and undergoing a complex combination of loads including the low-frequency cyclic wind loading. A new device has been developed to simulate the complicated loads on the piles during the centrifuge model tests. Apart from the horizontal and vertical static loads, this device can also realize a long-time and low-frequency cyclic load, with a combination of other types of loads that are applied simultaneously or successively. The validity of this device, that it can meet the requirement for simulating the complicated loads that the pile undergoes, is preliminarily verified via a series of tests. The test results show that the displacement of pile top increases with increasing number of cycles of horizontal cyclic loads; but the growth rate gradually decreased with the displacement tending to stabilize after a certain cycles; and the deformation of soils concentrates in a certain region near the pile.

Key words: wind driven generator; pile foundation; centrifuge model test; complicated loads

1 引 言

海上风力发电机由于其特殊的地理位置和用途, 承受结构自重、风荷载、波浪等多种荷载, 而且对位移有严格要求^[1]。根据国内外工程经验, 桩基础是近海风机最常采用的基础形式^[2], 有必要针对复杂荷载作用下近海风机桩基础的特性及其与周围土体的相互作用展开深入研究。土工离心模型试验因其在小尺寸模型中再现原型应力场特性等优点, 在桩土相互作用研究中得到了广泛应用^[3-4]。

现有的离心模型试验中已经实现了对多种动荷载的模拟, 包括地震荷载^[5]、动冰荷载等。其中较

早采用的动力加载设备是气动千斤顶, 采用换向阀门控制往复运动, 对结构施加竖向和横向循环荷载。这类设备施加荷载频率较低, 大致在 1 Hz^[6-7], 操作比较复杂, 且不宜长时间施加。近年来多采用液压伺服激振器, 可以对结构施加 0.001~10 Hz 的循环荷载, 如离心机振动台等。不过, 这类设备激振时间较短^[8]。张建红等^[9]研制了可用于离心模型试验的电磁式激振器, 实现了一个长历时、高频率的循环水平荷载。

目前, 针对近海风机的荷载特点研制的离心场加载设备还不多见。笔者研制了一种离心场中风机桩基础的复杂加载设备, 能够实现低频风荷载等条

收稿日期: 2010-02-02

基金项目: 中国水利水电科学研究院开放研究基金项目: 973 课题 (No. 2007CB714108)。

第一作者简介: 荣冰, 男, 1987 年生, 硕士研究生, 主要从事岩土工程方面的研究工作。E-mail: rblneboy@163.com

件下的模拟，并通过试验验证了设备的有效性。

2 加载测试设备的研制

本套设备包括加载设备和测量系统两部分，依托于清华大学岩土工程研究所的 TH-50 g-tons 土工离心机。该离心机有效半径为 2 m，最大土样尺寸为 0.7 m×0.6 m×0.7 m。当在最大离心加速度 250 g 下运行时，其最大设计负载为 0.2 t。

近海风机桩基础需要考虑的荷载主要包括自重、风机荷载、波浪力、潮流力、船舶（或漂浮物）撞击力等，这些荷载可以进一步简化为竖向荷载、水平静力荷载、水平循环荷载和弯矩荷载等简单荷载的组合（图 1）。通过这些荷载的组合可以模拟风机桩基础各种工况下的荷载条件。

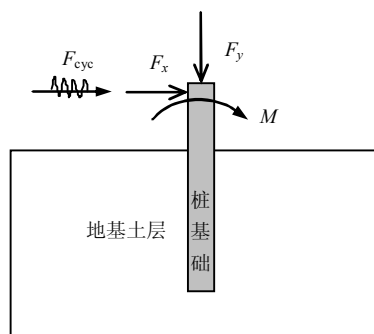


图 1 近海风机桩基础承受荷载简化图

Fig.1 Simplified loads on pile foundation

2.1 加载设备

图 2 给出了加载设备的总体结构示意图。试验模型箱采用内空间为 600 mm×200 mm×535 mm 的钢制方箱，一侧为有机玻璃面，如图 3 所示。为方便布置各类加载装置，在模型箱上设计了一块水平承台，首先将承台固定在模型箱上，然后将所有固定加载设备的装置布置在水平承台上。

2.1.1 竖向偏心加载

竖向加载设备采用气缸来施加。利用气缸加载具有出力可通过气压控制、并且不随桩位移而改变的优点。本试验采用的是北京肇庆方大气动元件总厂生产的 10A-5 FA80B100 气缸，内径为 80 mm，最大出力 4 860 N，最大行程为 100 mm。

竖向加载采用偏心加载，相当于施加竖向静力和弯矩组合荷载。加载中心距桩截面中心为 110 mm。如图 2 所示，竖向偏心加载部分由（2）、（8）、（11）和（12）组成。

2.1.2 水平静力加载

水平静力加载设备也采用气缸来实现。本试验

中水平静力加载设备采用的是北京肇庆方大气动元件总厂生产的 10A—5 FA32B80 气缸，内径为 32 mm，最大出力 777 N，最大行程可达 80 mm。如图 2 中，水平静力加载部分由（1）、（9）、（10）和（11）组成。

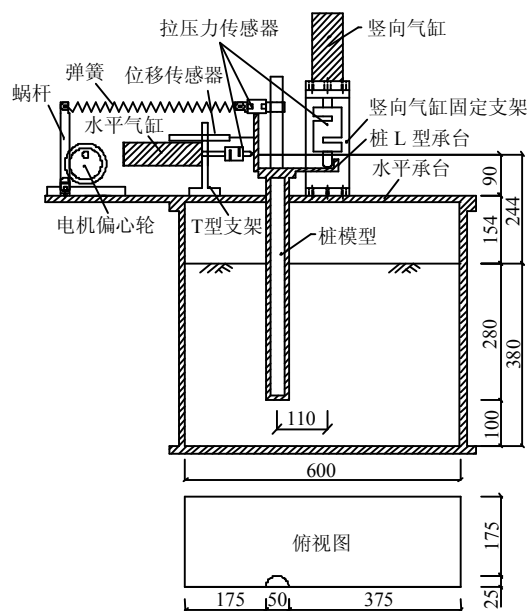


图 2 离心场中复杂荷载加载设备设计布置图（单位：mm）

Fig.2 Schematic view of loading device (unit: mm)



图 3 试验模型箱

Fig.3 Model container for tests

2.1.3 水平循环加载

水平循环加载系统用来模拟低频风荷载，需要满足以下要求：实现与风荷载具有离心模型频率比尺的加载、具有稳定的加载频率、较稳定的加载峰值和幅度。

水平循环加载采用电机驱动偏心轮通过传动蜗杆带动弹簧来回振动来实现。弹簧末端连接拉压力传感器，并通过套环构件与焊接在桩顶的钢管相连接，从而对桩施加水平循环荷载。图 4 为水平循环加载系统的实物图。图 2 中水平循环系统由（3）、（7）、（6）、（11）等部分组成。

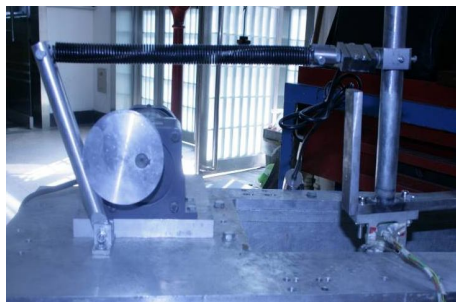


图 4 水平循环加载设备

Fig.4 Photo of horizontal cyclic loading device

电机的转动频率即为循环加载的频率,电机转动频率为 1 Hz,风频一般约为 0.02 Hz,保证了 50 g 条件下循环荷载频率比尺,而电机的稳定转动频率保证了加载频率的稳定。加载峰值和幅度的大小取决于弹簧的劲度系数和伸缩量,本套设备中,偏心轮设计如图 5 所示,弹簧设计伸缩量为 100 mm。由于桩顶变形较小,一般在 10 mm 以内,弹簧的伸缩量变化较小,基本能够保证较稳定的加载峰值。加载峰值和幅度的调节可通过采用不同劲度系数的弹簧来实现。

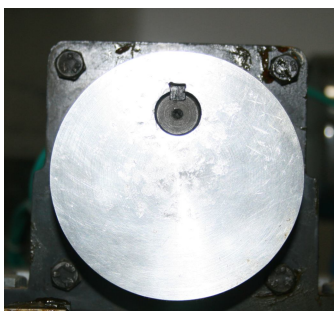


图 5 偏心轮

Fig.5 Photo of eccentric wheel

2.2 测量系统

桩土系统中位移、加速度、孔压等变量由相应传感器量测,再由固定于离心机上的解调器进行放大并转换成模拟信号,然后通过电滑环或光纤滑环传至控制室中的计算机。数据采集系统由离心机配套使用的两台 DDS16/32 数采仪、DdsXp2 数据采集记录软件组成。DdsXp2 数据采集记录软件采样率最高可达 10 kHz,满足在本试验中的要求。

试验中各类荷载和位移均通过荷载传感器和位移传感器测量,其布置如图 2 所示。其中,荷载传感器采用北京正开仪器有限公司生产的 MCL-S0/S2 系列拉压力传感器。位移传感器采用北京大恒科海科技有限公司生产的 ZK 高精度回弹式位移传感器。

试验中为得到桩身的弯矩情况,在桩身内两侧布置 7 对应变片以量测桩体应变(见图 6)。

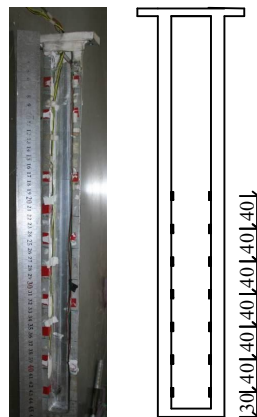


图 6 桩内侧应变片布置图(单位: mm)

Fig.6 Layout of strain gauges inside the pile (unit: mm)

3 有效性测试

为了验证设备的有效性,进行了离心模型试验条件下各类加载试验。图 7、8 分别给出了 50 g 条件下水平静力加载和竖向加载的测试曲线,施加荷载通过调节气压阀来控制,荷载大小由相应拉压力传感器通道获取。从图中可以看出,本设备能够稳定地施加水平向和竖向静力荷载。

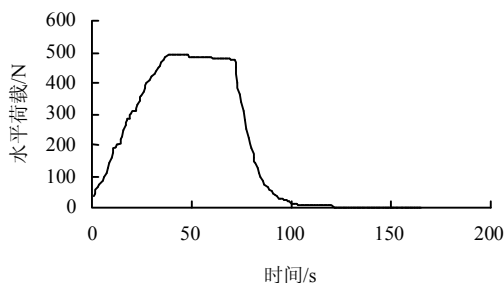


图 7 水平加载测试曲线

Fig.7 Curve of horizontal loading test

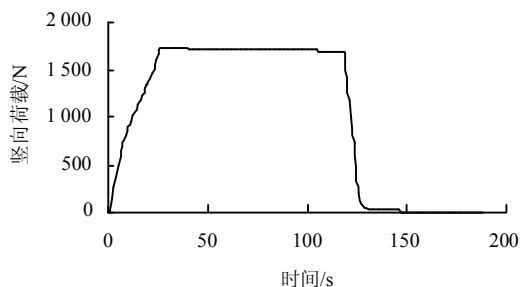


图 8 竖向加载测试曲线

Fig.8 Curve of vertical loading test

图 9 给出了施加水平循环荷载得到的测试曲线,其中加载频率为 1 Hz。可以看出,荷载的幅值

和幅度均比较稳定。

上述测试结果表明,该设备加载及其控制有效,能够满足离心模型试验中模拟风机桩基础复杂荷载的要求。

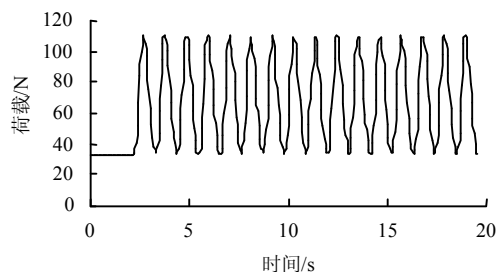


图9 水平循环加载测试曲线

Fig.9 Curve of horizontal cyclic loading test

4 典型试验结果

利用本设备已经进行了多个不同荷载组合条件下的风机桩基础离心模型加载试验。本文简要给出一个水平循环加载条件下的试验结果,均基于试验模型尺寸。

试验用地基厚度为 38 cm,采用北京地铁农展馆黏性土,该土颗粒相对密度为 2.71,塑性指数为 15。桩模型采用铝合金空心半圆柱体,尺寸为 $\phi 5 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$,重量轻且满足加载和观测的要求,桩入土深度为 28 cm,其他布置如图 2 所示。在离心机 50 g 条件下加载水平循环荷载,荷载为正弦曲线,幅值为 221 N,频率为 1 Hz,加载时间为 170 s。

图 10 给出了桩顶水平位移时程曲线。可以看出,桩顶水平位移随着循环周数的增加而有所增大,但增长速率逐渐减小,至 150 s 后基本稳定。

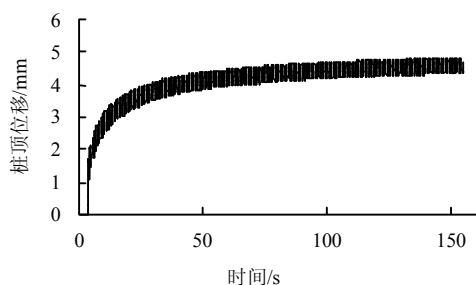


图10 水平循环荷载下桩顶变形时程曲线

Fig.10 Curve of displacement of pile top due to horizontal cyclic load

分析桩内侧布置的应变片数据,可以得到循环荷载下桩的弯矩峰值沿高程分布曲线(如图 11 所示)。桩身弯矩在埋深 5 cm 左右达到极大值,在埋深 17 cm 左右处达到极小值。

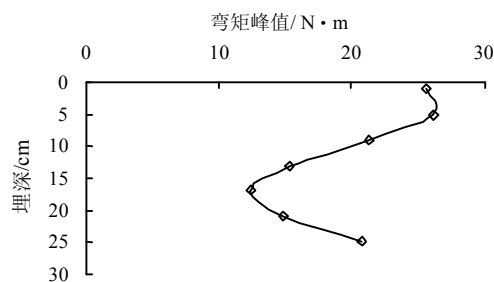


图11 水平循环荷载作用下桩体弯矩峰值曲线

Fig.11 Curve of peak bending moment of pile due to horizontal cyclic load

试验中采用了离心场非接触位移测量系统测得了土体的位移场,其精度为 $0.3 \text{ mm}^{[10]}$ 。图 12 给出了桩附近区域的土体位移等值线。由图可知,水平循环荷载条件下土体的变形主要集中在桩周一定区域内,随着离桩距离的增加而减小。

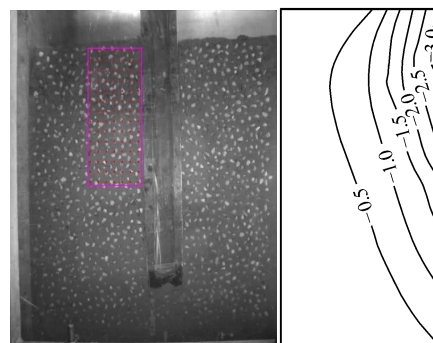


图12 水平循环荷载作用下挤压区的水平位移分布(单位: mm)

Fig.12 Distribution of horizontal displacement of soils due to horizontal cyclic load (unit: mm)

5 结论

(1) 文中所述新研制的离心场中风机桩基础的复杂加载测试设备,除了可施加水平向和竖向静力荷载外,还实现了离心场中长时间低频率的水平循环加载,并可以调整荷载的幅值和频率。

(2) 该设备能够实现多种荷载同时或者先后施加,从而可以模拟风机桩基础的工作荷载条件。

(3) 一系列测试试验结果表明,该设备能够满足离心模型试验中对模拟风机桩基础的复杂荷载要求。

(4) 初步试验表明,水平循环荷载条件下,桩顶水平位移随着循环周数的增加而增大,但增长速率逐渐减小,至 150 周后基本稳定,土体的变形主要集中在桩周一定区域内。

参考文献

- [1] 水电水利规划设计总院编. FD 003—2007 风电机组地基基础设计规定(试行)[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
- [2] 林毅峰, 李健英, 沈达, 等. 东海大桥海上风电场风机地基基础特性及设计[J]. 上海电力, 2007, 2: 153—157.
LIN Yi-feng, LI Jian-ying, SHEN Da, et al. Structure characteristics and design technique keys of wind turbine foundation in Shanghai Donghai-bridge offshore wind power farm[J]. **Shanghai Electric Power**, 2007, 2: 153—157.
- [3] 黄志全, 王思敬. 离心模型试验技术在我国的应用概况[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 2: 89—93.
HUANG Zhi-quan, WANG Si-jing. A survey of application of centrifugal model testing in China[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1998, 2: 89—93.
- [4] 曾友金, 章为民, 王年香, 等. 桩基模型试验研究现状[J]. 岩土力学, 2003, 24(增): 674—680.
ZENG You-jin, ZHANG Wei-min, WANG Nian-xiang, et al. Reviews of state-of-art of modeling simulation on pile foundations[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(Supp.): 674—680.
- [5] 于玉贞, 陈正发. 土工离心机振动台系统的发展研究[J]. 水利水电技术, 2005, 5: 19—21.
YU Yu-zhen, CHEN Zheng-fa. A Review on development of shaking table system for geotechnical centrifuge[J]. **Water Resources and Hydropower Engineering**, 2005, 5: 19—21.
- [6] CRAIG W H. Cyclic loading equipment for offshore foundation models[C]//ARMER G S T, GARAS F K: Offshore structures—The Use of Physical Models in Their Design. [S. l.]: [s. n.], 1981.
- [7] TAN F S C. Centrifuge and theoretical modeling of conical footing on sand[D]. Cambridge: Cambridge University, 1990.
- [8] NG T G, LEE F H, LIAW C Y, et al. Development of a dynamic loading device for model foundation[C]//Proc. of Int. Conference Centrifuge 94. Singapore: [s. n.], 1994.
- [9] 张建红, 孙国亮, 鲁晓兵. 离心机中动冰荷载的模拟[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(4): 474—477.
ZHANG Jian-hong, SUN Guo-liang, LU Xiao-bing. Centrifuge modeling of cyclic loading induced by ice sheet[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2005, 27(4): 474—477.
- [10] ZHANG G, HU Y, ZHANG J M. New image-analysis-based displacement-measurement system for centrifuge modeling tests[J]. **Measurement**, 2009, 42(1): 87—96.

2011 中国地下工程与隧道国际峰会

主题: 地下空间与隧道的安全可持续发展

时间: 2011年8月22-23日

地点: 上海

官方网站: <http://www.tunnel-congress.com/>

主办: 中国土木工程学会; 鸿与智工业媒体集团

官方支持: ITA国际隧道协会

同期活动: 第四届中国国际地下工程与隧道技术展览会 (<http://www.tunnel-expo.com/>)

会议议程:

日期	8 月 22 日	8 月 23 日
上午	积极应对地下空间与隧道在可持续发展与安全发面的挑战	优化管理 完善设备
下午	地下工程与隧道规划设计安全理念及其相关设备配置研究	地下工程与隧道装备产业、应用与施工 保障隧道各环节安全

会议总监: 周小慧

电话: +86 21 51015775-240

传真: +86 21 51013962

邮箱: tina.zhou@hnzmedia.com