

吸力式基础离心模型试验的动力加载设备

林小静¹ 张建红¹ 孙国亮¹ 鲁晓兵²

(1. 清华大学水利水电工程系 2. 中国科学院力学研究所)

摘要

离心模型试验是进行海洋工程研究的一种新型技术, 具有广泛的应用前景。本文主要介绍了清华大学研制开发的电磁式激振器, 该激振器用于吸力式基础离心模型试验中对模型施加水平动荷载。该激振器最大的技术难点是在100g(g为重力加速度)离心加速度下, 对吸力式桶基施加高频率的循环荷载。

关键词: 电磁式激振器, 离心模型试验, 水平动加载, 吸力式基础

(一) 引言

目前, 吸力式基础广泛应用于深海的海洋平台中。吸力式基础一般是顶端封闭, 底端开口的圆桶, 主要由钢或混凝土制成。一般直径较大, 长细比较小。它是通过顶端的抽气口用真空泵抽出圆桶中的气、土和水, 在圆桶中形成负压(主动吸力), 利用桶内外的压力差将桶压入土中直到桶中被土充满。吸力式基础在抗拔过程中, 由于直径大, 很容易在桶中形成负压, 从而提高抗拔力。当在桶中充气形成正压时, 即可将桶拔出, 重复使用。吸力式基础安装方便, 成本低廉, 且能够承受很大的水平荷载, 因此对其的承载力的研究一直备受人们的关注。

模型试验是进行岩土工程研究的基本方法之一。吸力式基础离心模型试验的研究始于1976年^[1]。Murff^[2]指出, 离心机在近海工程研究中具有良好的应用前景。在动荷载作用和不排水的条件下, 基础土中产生很高的超静孔隙水压力, 从而降低土的抗剪强度甚至使基础土液化, 需要探明吸力式基础的工作原理和破坏机理。在安装过程中, 基础的贯入阻力受包括真空泵抽气气压、圆桶直径、圆桶壁厚以及贯入深度等因素的影响^{[3][4]}。Waston和Randolph^[5]在Western Australia大学40g-t离心机上进行了正常固结石灰质沉积土的基础抗拔力试验。除了平台和基础的自重外, 吸力式基础承受的主要静荷载是海洋平台的浮力。离心试验的结果表明吸力式基础的抵抗竖直方向荷载的抗拔力较强^{[1][6][7][8][9]}。Clukey^[10]针对美国墨西哥湾深海土层进行了张力腿平台吸力式沉井的动抗拔试验。试验结果表明, 吸力式基础的抗拔力主要来自于圆桶中的被动吸力。基础在粘性土中的抗拔力可以按照反向承载力(reverse end bearing capacity)来计算。吸力式基础所受的荷载包括静荷载和水平方向的动荷载, 静荷载主要是平台自重和浮力, 动荷载包括风、流、波浪、潮汐。在风暴过程中高频率动荷载会对海洋平台的安全构成很大的威胁。Allersma^[11]进行了吸力式基础的水平静承载力的离心模型试验。试验中采用干砂试样。Randolph^[12]进行了重塑土中吸力式基础水平动承载力试验, 土样是取自澳大利亚和印尼之间Timor Sea海底的石灰质淤泥。

在离心模型试验中, 水平动载的频率和振幅的相似比分别为N和1/N²。N为离心加速度与重力加速度的比值。在过去的若干年里, 许多学者对动力加载设备有了一定的研究。Craig^[13]、Hjortnaes-Pedersen和Nelissen^[14]介绍了用于浅基础的加载设备, 荷载频率在10 Hz到300 Hz之间。Tan^[15]采用伺服阀和定时机构控制的气压千斤顶施加水平荷载, 最高频率为1 Hz。Dean^[16]利用电动伺服马达驱动一个螺纹架前后移动施加水平动荷载, 荷载频率为3 Hz。Ng^[17]研制了一个电液伺服控制加载系统, 可以对浅基础施加0.1 Hz~10 Hz的水平荷载。

十五期间,我国将在渤海建造 50 座海洋平台,图 1 是渤海海域油气田分布示意图,吸力式基础将广泛应用于这一地区的海洋油气开发。但吸力式基础是一种新的基础型式,目前国内对于渤海地区吸力式基础的研究还不是很透彻。同时渤海海域的地质环境条件较为特殊,不能照搬国外已有的研究成果。

渤海每年有三个月的冰冻期,冰层破裂后,将对平台产生极强的冲击和激振,激振频率 1Hz 左右,冰荷载的峰值约为 3000KN。周期性的冰荷载使基础土中产生很高的孔隙水压力,严重威胁基础的稳定。中国海洋石油总公司和中国科学院力学所针对渤海海域吸力式基础的承载力设立了专项研究计划,并拟在清华大学 50g-t 离心机上进行吸力式基础的离心模型试验,目的是研究在海洋复杂的荷载环境下基础的稳定性和砂土的液化问题。

本论文主要介绍由清华大学研制开发用于离心模型试验的电磁式激振器以及在水平动载下吸力式基础离心模型试验的前期研究工作。在 100g 的离心加速度下,该激振器能够有效地模拟高频率的水平动载。



图 1 渤海海域油气田分布图

(二) 电磁式激振器

图 2 是由清华大学研制的电磁式激振器。它由永磁铁和动线圈组成,永磁铁提供强磁场,动线圈用银质电阻线缠绕成空心薄壁圆筒以减轻自重。为了保证动圈能够在 100g 下正常工作(动圈自重 0.5kg,在 100g 离心加速度下变为 50kg),在动圈的两端设置圆形薄片弹簧,起导向作用,并限制动圈在离心力方向的变形。动圈连接激振杆,两者之间安装力传感器。力传感器通过电流放大器控制。通以交流电时,动圈产生电磁力,并通过激振杆对模型施加振动力;或通直流电,产生大小方向不变的恒力。激振器总质量 14kg。

在离心加速度 100g 的离心模型试验中,动载峰值 98N,频率 100Hz,优势频率 100~120Hz。相应原型的荷载峰值 980KN,频率 1Hz。表 1 是电磁式激振器的技术参数。

表 1 电磁式激振器技术参数

直径 (mm)	长 (mm)	重量 (kg)	优势频率 (Hz)	激振力峰值 (N)
150	260	14	80-120	98

图 3 是激振器加载控制系统示意图。信号发生器产生电信号,通过功率放大器放大为激振电流。动圈通过激振电流后,产生电磁力,对激振杆施加一定频率和振幅的振动力。力传感器和位移传感器监测振动力的大小和振幅,将监测信息反馈到功率放大器以调整输入信号,将误差限制在试验允许的范围之内。

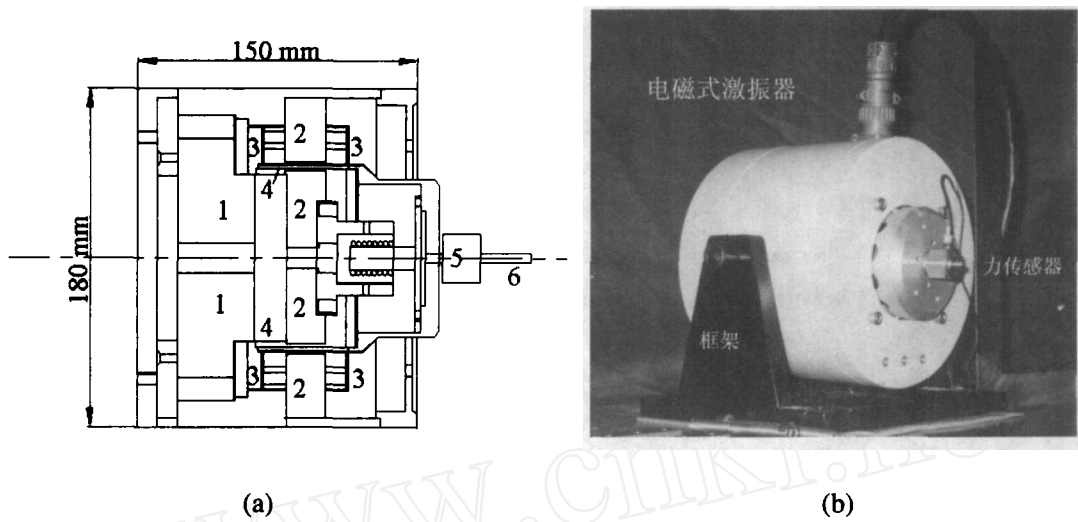


图2 (a)电磁式激振器纵剖面图 (b)电磁式激振器实物图

1 永磁铁 2 磁体 3 片簧 4 动圈 5 力传感器 6 激振杆

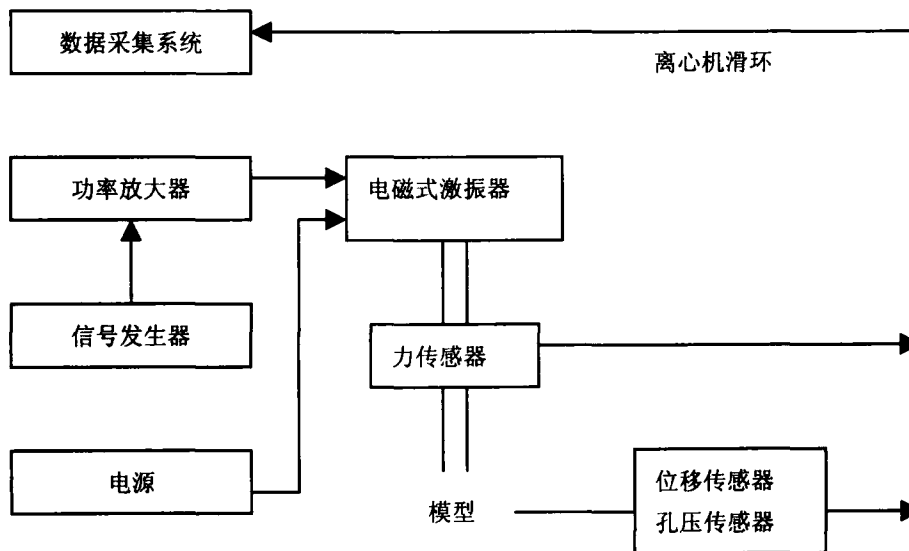


图3 激振器加载控制示意图

(三) 土工离心模型试验

清华大学土工离心机容量 50g-t, 属中型离心机。最大离心加速度 250g, 最大载重 200kg。100g 离心加速度下允许最大载重 300kg。离心机吊斗的净空为 700 mm×700 mm×700mm, 如图 4。模型箱内缘尺寸 600mm×350 mm×350 mm。一侧为透明的丙烯酸板, 可用以观测模型箱内部的情况。动力加载设备被安装在模型箱一侧, 在模型箱小窗上安装一个摄像头, 监测土样的变形。另一个摄像头安装在离心机的转臂上, 从模型箱上方监测桩和土样的变形和位移。用于模型试验的土样是中密粉砂,

水深 10cm。基础直径 6cm，贯入深度 6~12cm。土中埋置若干孔压传感器(PPT)以测量基底土在动载下产生的孔压。位移传感器安装在基础桩上，测量水平和垂直方向位移。离心模型试验装备如图 5 所示。

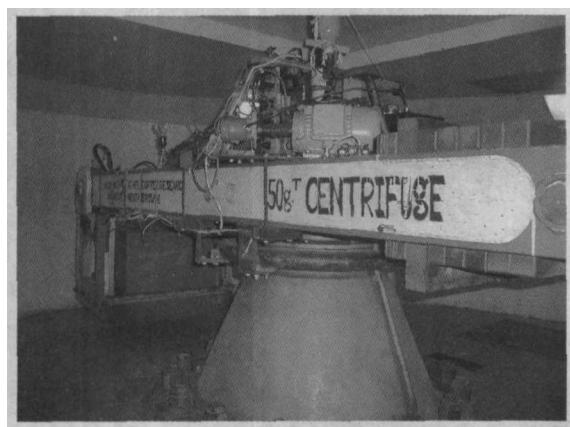


图 4 清华大学 50g-t 土工离心机

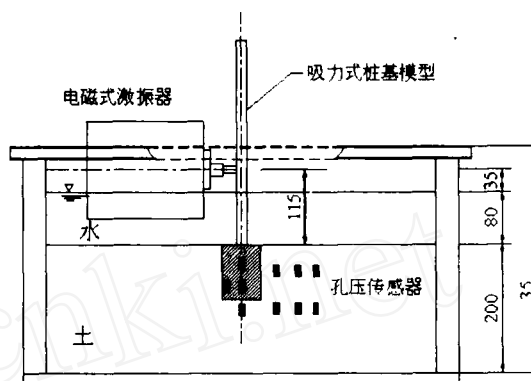


图 5 离心模型及加载装备

(四) 总 结

离心模型试验中所需要的模拟冰载的水平动载设备电磁式激振器已由清华大学研制成功，在 100g 重力加速度下频率可达到 100Hz。这一设备将用于渤海海域海洋平台的研究中。有关电磁式激振器的进一步调试工作目前仍然在进行中。

参 考 文 献

- [1] Helfrich S C, Brazil R L, Richards A F and Lehigh U. (1976): Pullout characteristics of a suction anchor in sand. Offshore Technology Conference. OTC2469, 1976, 501~506.
- [2] Murff J D. (1996): Geotechnical centrifuge in offshore engineering. Offshore Technology Conference, Annual Proceedings v 1 May 6-9. 1996. 675~689
- [3] Renzi R, Maggioni W, and Smith F. A (1991): Centrifugal Study on the Behavior of Suction Piles. Centrifuge 91, H. Y. Ko & F. G. Mclean(ed.), Balkema, Rotterdam, 1991, 169~176.
- [4] Allersma H G B, Plenevaux F J A and Wintgens J F. (1997): Simulation of suction pile installation in sand in a geocentrifuge. International Offshore and Polar Engineering Conference. 1997. 761~766.
- [5] Waston, P.G., and Randolph M.F. (1997): Vertical capacity of caisson foundations in calcareous sediments. Proceedings of the seventh (1997) International Offshore and Polar
- [6] Fuglsang L.D. Steensen-Bach J.O. (1991): Breakout Resistance of Suction Piles in Clay. Centrifuge 91, H Y Ko & F. G. Mclean (eds), Balkema, Rotterdam, 1991, 153~159
- [7] Clukey E.C. and Morrison M.J. (1993): A centrifuge and analytical study to evaluate suction caissons for TLP application in the Gulf of Mexico. Proc. ASCE Conference on Foundations, Dallas, TX. 1993. 141~156.
- [8] Morrison M J and Clukey E C (1994): Behavior of suction caissons under static uplift loading conditions. Centrifuge 94, Leung, Lee and Tan (eds) 1994. Balkema, Rotterdam. 823~828.
- [9] Allersma H G B and Jacobse J A. (2003): Centrifuge tests on pullout capacity of suction caissons with active suction. 13th International Conference on Offshore and Polar Engineering (ISOPE03), Honolulu, May 25~30, 2003.
- [10] Clukey E.C. and Morrison M.J. (1995): The response of suction caissons in Normally consolidated clays to cyclic TLP loading conditions. Offshore Technology Conference 7796, 1995. 909~915.

- [11] Allersma H G B, Kirstein A A and Brinkgreve R B J. (1999): Centrifuge and numerical modeling of horizontally loaded suction piles. 9th.Int.Offshore and Polar Engineering Conference. ISOPE99. 1999. Vol.1.pp.711~717.
- [12] Randolph M.F., O'Neill M.P., Stewart D.P., and Erblich C. Performance of suction anchors in fine-grained calcareous soil. Paper OTC8831, Proc. Offshore Technology Conference, Houston, USA. 1998.
- [13] Craig W.H. (1981): Cyclic loading equipment for offshore foundation model. Offshore Structures: The Use of Physical Models in Their Design, eds. Armer, G.S.T. and Garas, F.K. Construction Press. NY. 1981. 327~334.
- [14] Hjortnaes-Pedersen A.G.I. and Nelissen H.A.M. (1991): Application of hydraulic actuators in the Delft Geotechnics centrifuge. Centrifuge 91, H Y Ko & F G. Mclean (eds), Balkema, Rotterdam, 1991, 385~390.
- [15] Tan F S C. (1990): Centrifuge and theoretical modeling of conical footings on sand. Ph.D. Thesis, Cambridge University, Jan, 1990.
- [16] Dean E.T.R., Hsu Y.S., and Schofield A.N. (1993): Development of a new apparatus for centrifuge testing of offshore jackup platform models and data report for centrifuge test YSH1: 3-leg jackup model with flat spuds on dense watwe-saturated sand. Technical Report CUED/D-Soils/TR267. University of Cambridge, London. 1993.
- [17] Ng T.G., Lee F.H., Liaw C.Y., and Chan E.S. (1994): Development of a dynamic loading device for model foundation. Proc. of Int. Conference Centrifuge 94, Singapore/31 Aug.-2 Sept., 1994, 183~188.

A dynamic loading device for suction pile in centrifuge

LIN Xiao-jing¹ ZHANG Jian-hong¹ SUN Guo-liang¹ LU Xiao-bin²

(1.Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University

2 .Institute of China Academy of Science)

Abstract

Centrifuge modelling is a new technology and potential useful tool in the investigation of offshore structures. This paper describes an electromagnetic actuator that has been designed to apply cyclic horizontal loading on piles in centrifuge. With this device, the ice sheet induced cyclic horizontal force is reproduced in centrifuge at acceleration of 100 g.

Key Words: electromagnetic actuator, centrifuge, cyclic horizontal loading, suction pile

作者简介

林小静 女, 1982年10月, 硕士研究生。清华大学水利水电工程系, 岩土工程研究所。

张建红 女, 1967年4月生, 副教授。清华大学水利水电工程系, 岩土工程研究所。

孙国亮 男, 1979年11月生, 硕士研究生。清华大学水利水电工程系, 岩土工程研究所。

鲁晓兵 男, 1968年6月生, 副研究员。中国科学院力学研究所。