

文章编号:1001-5485(2012)01-0069-05

# 海洋平台地基基础变形破坏离心模拟和极限分析

张建红<sup>1</sup> 林小静<sup>2</sup> 熊中生<sup>1</sup> 鲁晓兵<sup>3</sup>

(1. 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; 2. 广州市设计院,广州 510620;  
3. 中国科学院 力学研究所,北京 100080)

**摘要:**吸力式基础是海洋平台的一种新型基础形式,具有承载力高、成本低、可重复使用和适应各种复杂的海洋荷载环境等优点,在近海滩涂和深海石油开发中有广泛的应用。针对中国近海地质条件和海洋环境开展吸力式基础承载特性的研究,研制了离心机上电磁式、长历时、大负载、宽频率范围激振器,实现了对结构施加循环水平动荷载。进行了一系列海洋平台吸力式基础离心模型试验,揭示了结构振动荷载作用下基础变形失稳机理,得到了荷载强度和结构刚度对基础稳定性的影响。提出了能够考虑竖向荷载、水平荷载和弯矩联合作用、基于塑性力学上限定理的桶基-地基的三维极限分析方法。

**关键词:**吸力式基础;离心机;孔隙水压力  
中图分类号:TU411.5 文献标志码:A

## 1 工程背景

海洋石油开发是高科技、高风险、高投入的业务,海洋油气勘探开发最大的风险就是施工风险。海洋平台结构复杂、体积庞大、造价昂贵。与陆地相比,海洋环境十分复杂,风、波浪、洋流、海冰和潮汐时时作用于结构,同时还受到地震作用的威胁。在这样的环境条件下,环境腐蚀、海生物附着、地基土冲刷和基础动力软化、材料老化、构件缺陷和机械疲劳以及损伤累积等不利因素都将导致平台结构构件和整体抗力的衰减,影响结构的安全度和耐久性。历史上曾有过多次海洋平台的事故,造成了重大的经济损失和不良的社会影响。例如,1965年英国北海的海上钻石号钻井平台支柱拉杆脆性断裂,导致平台沉没;1968年罗兰角号钻井平台事故;1969年我国渤海2号平台被海冰推倒,造成直接经济损失2000多万元;1997年渤海4号烽火平台倒塌;1980年北海 Ekofisk 油田的 Alexander L. Kielland 号五腿钻井平台发生倾覆,导致122人死亡;2001年巴西油田的 P-36 平台发生倾覆。这些惨痛的教训给海洋资源开发以很大的风险警示,同时也促使国内外石油部门更加努力研究海洋平台安全的技术和管理的关键问题<sup>[1]</sup>。

渤海湾每年大约有3~4个月的冰冻期,冰荷载

对海洋平台的作用是基础设计的重要考虑因素。1969年我国渤海2号平台被海冰推倒,造成直接经济损失2000多万元<sup>[1]</sup>。这次事故和随后出现的海冰剪断导管架钢管等事故引起了工程界对冰荷载的关注。冰荷载对平台的作用可以分为2类:一类是分布在海面上的具有一定厚度的大块冰排挤压平台结构,表现出的是静荷载;另一类是挤压导致冰排破碎和受波浪等影响对平台结构产生的动荷载。为了研究这一动荷载对桶形基础的影响,清华大学和中国科学院力学研究所结合近海海洋油气平台的重大关键技术问题研究,合作开展了一系列大圆筒基础在水平和竖向静载和循环动荷载作用下的离心模型试验。

本文介绍不同循环荷载强度下大圆筒基础和地基的动力响应特征(鲁晓兵等<sup>[2-5]</sup>、张建红等<sup>[6-9]</sup>)。

## 2 循环荷载加载设备

中国科学院力学所和清华大学联合研制了用于离心机中的电磁式激振器,并在100g下的离心模型试验中得到了应用。通过对渤海湾的冰荷载的分析表明,施加在吸力式基础上的动冰荷载峰值为980kN,频率为1Hz。根据离心模型相似律,100g下激振器对吸力式基础要施加一个幅值为98N、频率为100Hz的水平动荷载。图1为长历时、大负载的电磁式

收稿日期:2011-11-07

基金项目:国家自然科学基金重点项目(51038007)

作者简介:张建红(1967-),女,河南信阳人,副教授,主要从事近海工程的研究。(电话)010-62792984(电子信箱)cezhangjh@tsinghua.edu.cn。

激振器和其输入及输出波形。激振器总质量为 14 kg。激振器主要是由永磁铁和银质薄壁线圈构成的动圈组成。动圈处于永磁铁形成的强磁场中,当通以交流电时,动圈因受到不断变化的电磁力而在磁场中往复运动,并通过动圈上的激振杆将惯性力施加到模型上。解决了高离心加速度场中激振杆卡阻的难题。

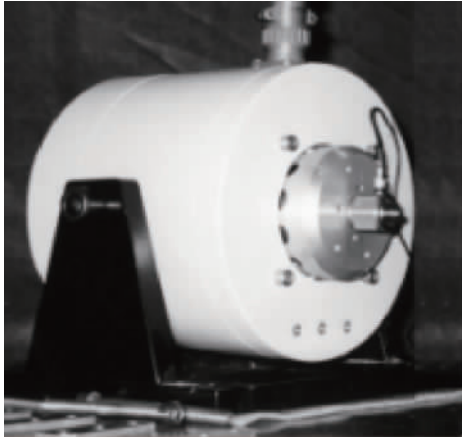


图 1 电磁式激振器  
Fig. 1 Electromagnetic actuator

### 3 试验模型

图 2 为简化的桶形基础上的海洋平台,图 3 为离心模型试验系统示意图。模型箱净空为 35 cm×60 cm×35 cm。试验中采用的模型筒直径 6 cm,高 7.2 cm。离心加速度采用 80 g。根据相似比尺,原型筒径为 4.8 m,筒高为 5.76 m。圆筒采用钢制薄壁中空圆筒,筒顶有可以闭合的小孔。外径为 8 mm 的钢管焊接在筒顶,用于模拟钢制导管或者张力腿等结构。为了解决动态离心模型试验中的渗流和动力问题时间比尺的矛盾,采用一种渗透性约为原型 1/40 的粉质砂土,表 1 列出了土的物理力学特性。动态试验中孔压消散的速度是孔压增长速度的 80 倍,因此本试验所测得的累积孔隙水压力偏低。

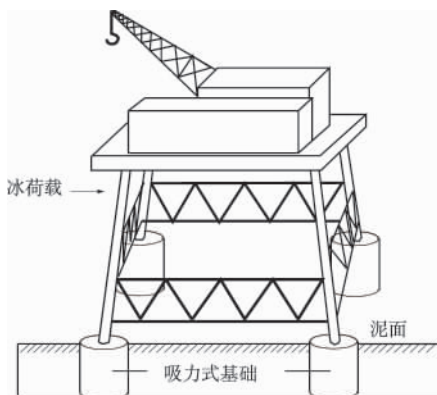


图 2 简化的桶形基础上的海洋平台  
Fig. 2 A simplified offshore platform founded on buckets

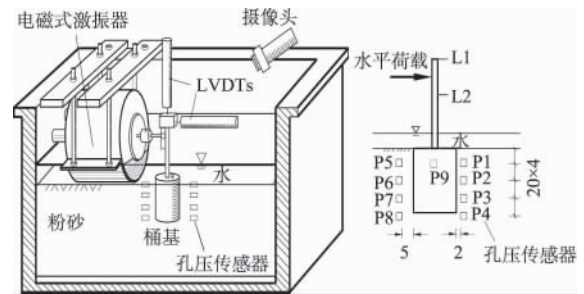


图 3 离心模型孔隙水压力传感器布置示意图  
Fig. 3 The placement of sensors for pore water pressure in the centrifuge model

表 1 地基粉砂土性参数

Table 1 Parameters of silt foundation

$d_{60}/$ mm	$d_{10}/$ mm	相对 密度	塑性指数 ( $I_p$ )	干密度/ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	渗透系数/ ( $cm \cdot s^{-1}$ )	$c'/$ kPa	$\varphi'/$ ( $^\circ$ )
0.15	0.035	2.69	8.7	1.6	$2 \times 10^{-4}$	0	35

在模型箱中,按照干密度  $1.52 g/cm^3$  将粉砂压实,将筒压入土中至筒顶与土面相平。将模型箱用厚有机玻璃板密封,保持 740 ~ 760 mm 汞柱的真空度对模型箱抽真空,并从模型箱底部缓慢通无气水直至水面高于土层表面 1 cm。经测试土样饱和度可达 97% 以上。地基在离心加速度 80 g 下固结 6 个月,原型固结沉降约 80 cm。固结后粉砂的干密度为  $1.6 g/cm^3$ ,属于中密状态。固结完成后封闭筒顶小孔,实施加载。采用电磁式激振器施加动载(张建红等<sup>[7]</sup>)。动载频率为 64 Hz,历时 20 min(原型频率 0.8 Hz,历时 26.7 h)。在距离筒壁 5 mm 和 3 mm 处(原型 40 cm, 24 cm)沿深度埋设 2 列孔压传感器以监测土层中的孔压变化。筒顶的位移传感器用于记录激振沉降。文中采用原型数据。

### 4 试验结果

为考察冰荷载强度对承载特性的影响,对基础施加频率为 0.8 Hz,强度为 384 kN(大于临界静承载力)和 128 kN 的动荷载,历时 26.7 h。这里荷载强度指的是半波峰值,试验结果均换算为原型数值。

图 4 为距筒壁 24 cm 的孔压传感器 P1 至 P4 测出的孔压时程曲线。从图 4(a)中可以看出,当动荷载强度(384 kPa)超过临界承载力时,浅层土体中的超静孔隙水压力先随时间增加达到一个峰值,然后随时间减小;1.5 m 以下土中的孔隙水压力虽有增长,但是比较平稳,并逐渐达到一个稳定值,激振的第一个小时内,孔压迅速上升。当荷载强度(128 kPa)较小时,超静孔隙水压力增长比较平稳,没有出现突然的变化。

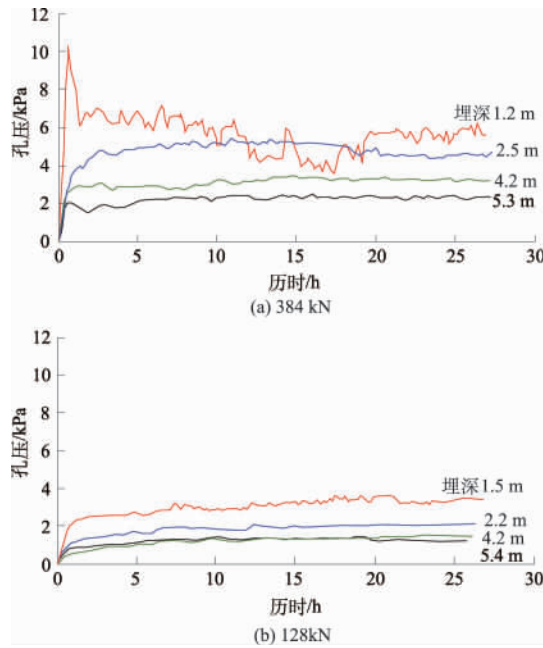


图 4 动荷载强度为 384 kN 和 128 kN 土体中孔隙水压力

Fig. 4 Pore water pressures under dynamic load of 384 kN and 128 kN

将各曲线上孔压最大值与传感器埋深的关系显示在图 5 (a) 中,并将动孔压比(孔压与初始竖向有效应力之比)与传感器埋深的关系显示在图 5 (b) 中。图 5 (c) 是激振过程中筒基的沉降曲线。相应的动孔压比接近 1,如图 5 (b) 所示,液化的可能性非常大。深层土体或荷载强度比较低时,孔压基本上随时间增加。说明高荷载强度时浅层土体容易发生剪胀,而深层土体或荷载强度较低时,土体主要发生剪缩。

由图 5 (b) 可见,孔压最大值出现在土面以下 1~2 m 之间,浅层土体容易发生液化,而后孔压随埋深降低。2~4 m 之间,曲线有一拐点或极值点,说明基础在振动过程中,以土面以下 2~4 m 之间某一点为转动中心,该点的振动幅度相对较小,所以周围土体的孔压增长较小。动载时基础转动中心比受同等大小静载时略为靠下,说明了基础的动载效应。

与孔压规律相似,沉降主要发生在加载初期,而后随时间增长曲线趋于平缓,如图 5 (c) 所示。经过 26.7 h 的激振后,基础周围土体被振密,并产生沉降,沉降区域沿激振方向成椭圆状。基础内保持了完整的土塞,由于筒内土体孔压累积,靠近筒顶的土塞松软且含水量较大,而靠近筒底处则较密实。综合孔压变化和基础沉降规律分析基础有 2 种可能的破坏模式:振动最初 1~2 h 内的液化破坏和长时间激振后沉降引发的问题。

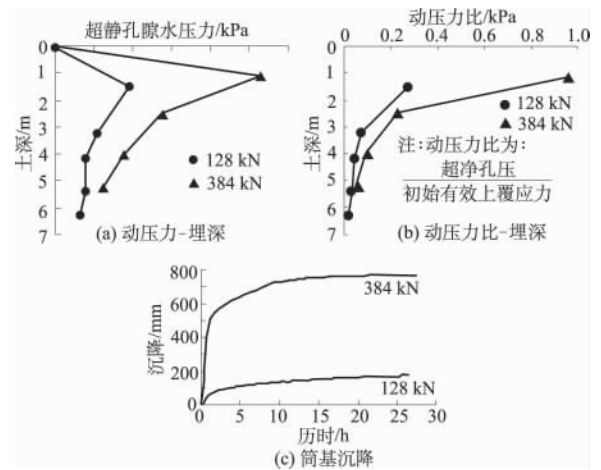


图 5 2 种荷载强度下的动孔压与埋深、动孔压比与埋深、筒基沉降曲线

Fig. 5 Curves of dynamic pore pressure and its ratio versus soil depth, and settlement curves of the bucket foundation under two loading intensities

### 5 基于上限定理的极限分析方法

图 6 所示为离心机中水平静载作用下桶基破坏的形态。基础的破坏模式主要为转动失稳,同时伴随少量整体水平位移。试验后的桶体内留下了较完整的土塞。



图 6 水平静载下单桶离心模型试验结果和基础内的土塞 Fig. 6 Result of centrifuge model test and the soil plugs in the foundation

图 7 为通过水平荷载和位移梯度三折线关系曲线,得到第 2 个转折点,这一点后,荷载增加产生的位移梯度最大,并由此可得极限承载力。直径为 4.8 m,高为 5.76 m 的单桶基础在水平荷载作用下的极限承载力为 513 kN(如图 7),即在这一荷载下,地基-基础达到了极限状态,安全系数接近 1.0。

基于塑性力学上限定理的三维极限分析方法<sup>[10-11]</sup>根据多块体的滑动模式计算多块体破坏模式协调的速度场和能量耗散,再代入简化后的类似于虚功原理的能量方程,就得到了隐含安全系数的等式,可通过迭代求解安全系数。

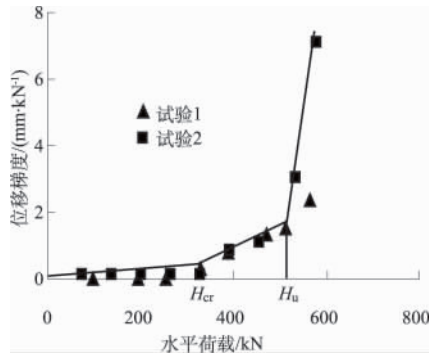


图7 单桶基础在水平静荷载作用下  
位移梯度-水平荷载关系曲线  
Fig.7 Displacement gradient vs. horizontal load of  
a single-bucket under horizontal static load

为了考虑水平荷载、竖直荷载和弯矩的作用,假设如图8的模型。在泥面以上至水平荷载作用平面之间假设一层重度和强度均为零的虚土,如图9为分析单筒基础-地基极限状态的模型。图9(a)为模型俯视图,虚线为圆筒所在位置。图9(b),(c),(d)为剖面A,B,C的纵剖面图,因所剖位置不同而剖面大小不同。图10为生成的三维模型透视图。基于陈祖煜的EMU3D进行分析。将离心模型试验中得到的极限荷载513 kN作为初始条件,得到地基-基础系统的安全系数为0.9,基本符合离心模型试验结果。

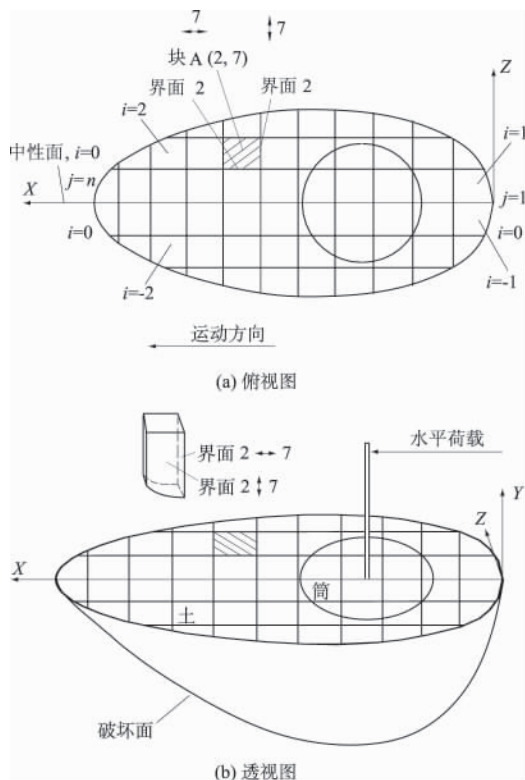


图8 三维地基基础模型  
Fig.8 The 3D numerical model of the foundation

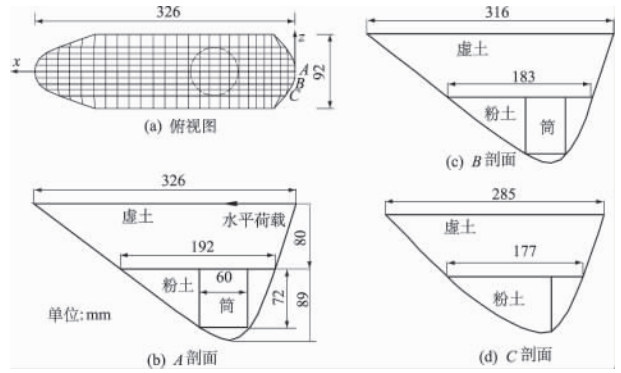


图9 单筒基础-地基极限状态模型  
Fig.9 The single bucket foundation model  
under limit state

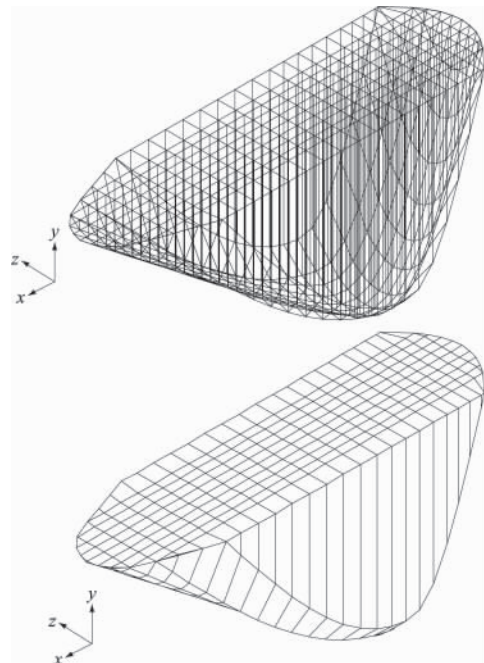


图10 基础-地基数值模型透视图  
Fig.10 The perspective view of numerical model

## 6 结语

本文介绍了大圆筒基础在循环动荷载作用下的离心模型试验结果。研究在动荷载作用下大圆筒基础的动力响应,并比较了荷载强度和基础刚度对基础动力响应的影响。

综合孔压变化和基础沉降规律分析基础有2种可能的破坏模式:振动最初1~2 h内的液化破坏和长时间激振后沉降过大引发的问题。

将单筒连接成多筒基础,增大基础刚度,在相同动载强度下,周围孔压增长和激振沉降均小于承受相同荷载条件的单筒基础。

基于塑性力学上限定理进行了水平静荷载作用下桶型基础的三维极限分析。通过对地基和桶基的破坏模式的分析,得到了单桶基础的极限承载力。极限分析的结果与离心模型试验比较一致。

## 参考文献:

- [1] 贾琇明,岳来群,韦子亮. 有关我国深海油气资源勘探开发的几点思考[J]. 国土资源情报, 2005, (7): 5-7. (JIA Xiu-ming, YUE Lai-qun, WEI Zi-liang. Oil and Gas Exploitation in Deep Ocean[J]. Land and Resources Information, 2005, (7): 5-7. (in Chinese))
- [2] 鲁晓兵,张建红,王淑云,等. 水平动载下筒型基础周围土体软化的离心机模拟[J]. 中国海洋平台, 2004, 19(6): 7-11. (LU Xiao-bing, ZHANG Jian-hong, WANG Shu-yun, et al. Experimental Study of Centrifuge on the Softening of Sand Around Bucket Foundation Under Ice-Induced Vibration Loading[J]. China Offshore Platform, 2004, 19(6): 7-11. (in Chinese))
- [3] LU X B, WANG S Y, ZHANG J H, et al. Experimental Study of Pore Pressure and Deformation of Suction Bucket Foundations Under Horizontal Dynamic Loading[J]. China Ocean Engineering, 2005, 19(4): 671-680.
- [4] 鲁晓兵,王义华,张建红,等. 水平动载下筒型基础变形的离心机试验研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(7): 789-791. (LU Xiao-bing, WANG Yi-hua, ZHANG Jian-hong, et al. Centrifuge Test on the Deformation of Bucket Foundation Under Horizontal Vibration Load[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(7): 789-791. (in Chinese))
- [5] LU X B, ZHANG J H, SUN G L, et al. Simulation of Dynamic Loading in Centrifuge for Suction Bucket Foundation[C]// Proceedings of the 15th International Offshore and Polar Engineering Conference & Exhibition, Seoul, Korea, June 19-24, 2005: 423-430.
- [6] 张建红,孙国亮,严冬,等. 海洋平台大圆筒基础的土工离心模拟研究与分析[J]. 海洋工程, 2004, 22(2): 90-97. (ZHANG Jian-hong, SUN Guo-liang, YAN Dong, et al. Geotechnical Centrifuge Modeling on Suction Caissons in Offshore Engineering[J]. The Ocean Engineering, 2004, 22(2): 90-97. (in Chinese))
- [7] 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. (in Chinese))
- [8] 张建红,林小静,鲁晓兵. 水平荷载作用下张力腿平台大圆筒基础的物理模拟[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(1): 77-81. (ZHANG Jian-hong, LIN Xiao-jing, LU Xiao-bing. Physical Modeling of Suction Foundations of TLPs Under Horizontal Load[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(1): 77-81. (in Chinese))
- [9] ZHANG J H, ZHANG L M, LU X B. Centrifuge Modeling of Suction Bucket Foundations under Ice-sheet Induced Cyclic Lateral Loadings[J]. Ocean Engineering, 2007, 34(8-9): 1069-1079.
- [10] ZHANG J H, CHEN Z Y, LI F. Three Dimensional Limit Analysis of Suction Bucket Foundations[J]. Ocean Engineering, 2010, 37(6): 790-799.
- [11] 陈祖煜. 岩质边坡稳定分析——原理、方法、程序[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005. (CHEN Zu-yu. Rock Slope Stability Analysis—Theory, Methods and Programs [M]. Beijing: China Water Power Press, 2005. (in Chinese))
- [12] 弥宏亮. 边坡稳定三维极限平衡分析——方法、推广、应用[D]. 北京: 清华大学, 2003. (MI Hong-liang. Three-Dimensional Slope Stability Analysis—Methods, Extensions and Applications [D]. Beijing: Tsinghua University, 2003. (in Chinese))

(编辑: 王 慰)

## Failure Mechanism of Suction Foundation of Offshore Platform Based on Centrifuge Modeling and Limit Analysis

ZHANG Jian-hong<sup>1</sup>, LIN Xiao-jing<sup>2</sup>, XIONG Zhong-sheng<sup>1</sup>, LU Xiao-bing<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydro-science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Guangzhou Design Institute, Guangzhou 510620, China; 3. Institute of Mechanics,

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract:** The paper presents the results of centrifuge model tests performed to study the failure mechanism of suction bucket foundation of offshore platform under cyclic lateral vibration loads. Electromagnetic actuator with wide frequency range and heavy load used in the tests was developed in light of China's offshore geological conditions and ocean environments. Two failure modes might happen: liquefaction in the early excitation and settlement-induced problem after long-term excitation. However, with increased stiffness of the large diameter cylinders, the pore pressures and the induced settlement decrease. A three dimensional limit analysis method by which the joint effect of lateral load, horizontal load and bending moment could be considered was proposed based on upper boundary theorem of plastic mechanics to simulate the soil-foundation system. The results of numerical analysis were basically in agreement with the centrifuge modeling results.

**Key words:** suction foundation; centrifuge; pore water pressure