

# 水平动载下桶形基础变形的离心机实验研究

鲁晓兵<sup>1</sup>, 王义华<sup>1</sup>, 张建红<sup>2</sup>, 孙国亮<sup>2</sup>, 时忠民<sup>3</sup>

(1. 中国科学院力学所, 北京 100080; 2. 清华大学水利系, 北京 100084; 3. 中海油研究中心, 北京 100027)

**摘要:**通过离心机实验研究发现,在等效动冰载作用下,桶周围砂土地基发生软化或液化。当载荷幅值超过一定值时,在激振过程中桶产生了明显的沉降,桶的沉降较远处土体明显地快。由于从桶近区到远区的沉降差别,导致离桶一定距离处出现一个环状裂纹。随着载荷幅值的增加、结构重的增加和桶高的减小(桶直径相同),桶的沉降增加。

**关键词:**饱和土;离心机实验;沉降;动冰载

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2005)07-0789-03

作者简介: 鲁晓兵(1968-),男,副研究员,从事岩土力学及海洋工程研究。

## Centrifuge test on the deformation of bucket foundation under horizontal vibration load

LU Xiao-bing<sup>1</sup>, WANG Yi-hua<sup>1</sup>, ZHANG Jian-hong<sup>2</sup>, SUN Guo-liang<sup>2</sup>, SHI Zhong-min<sup>3</sup>

(1. Institute of mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China; 2. Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua

University, Beijing 100080, China; 3. Research Centre, China Ocean Oil Co., Beijing 100027, China)

**Abstract:** The centrifuge test results show that the sand layer around the bucket foundation softens or liquefies under equivalent dynamic ice-induced load. When the load amplitude is above a critical value, the bucket settles obviously during the dynamic loading. The settlement of the bucket is larger than the sand layer far away from the bucket side wall. There exist cyclical cracks in the sand layer because the differential settlements. The settlement of the bucket increases with the increase of load amplitude and the weight of structure and the decrease of the bucket height (with the same bucket diameter).

**Key words:** saturated sand; centrifuge experiments; settlement; dynamic ice-induced loading

## 0 引言

随海洋石油工业的发展,海洋平台不断应用于复杂的海况和地质条件,设计精度越来越高。由于问题的复杂性,理论和数值计算较困难且很难得到准确结果<sup>[1~5]</sup>。土的变形和强度都决定于有效自重应力,室内 1 g 条件下的小模型实验因不能模拟重力效应,不能反映原型的受力状态,而原型观测和足尺模型实验费用高、时间长。要使在小比尺条件下与原型相应点上的有效自重应力相同,可行的办法就是采用离心机实验,这也是国内外大量开展离心机实验研究的原因<sup>[6~8]</sup>。

渤海地区海洋平台承受的控制载荷是冰载,目前对动冰载引起的平台响应研究较少<sup>[9]</sup>。故本文用离心机实验对动冰载条件下桶型基础及周围土体的变形进行了实验研究,并分析对承载力的影响,考察了不同长径比、不同结构重和不同载荷幅值等因素的影响。

## 1 离心模型制备

离心模型试验在清华大学 50 g-t 土工离心机上进

行,该离心机的最大离心加速度为 250 g。100 g 离心加速度下允许最大载重 300 kg。试验所采用的模型箱内缘尺寸为 600 mm×350 mm×350 mm。地基土为粉质砂土,比重为 2.69,平均粒径为 0.14 mm,渗透系数为  $5 \times 10^{-4}$  cm/s,颗粒级配曲线见图 1。离心模型布置见图 2。吸力式桶形基础由埋入土中的薄壁钢制中空圆桶和焊接在桶顶的细钢管组成。桶内外径分别为 60 mm 和 62 mm,桶内净深分别为 90, 72, 48 mm,顶厚 2 mm。由于与激振器连接的激振杆的高度是固定的,故在细钢管上固定一薄壁滑槽,激振杆与桶顶钢管相连的一端有一钢球,钢球可以在滑槽内上下移动,且可以绕水平轴在垂直面内转动,这样,当基础沉降时,激振杆就不会被卡住。在桶基顶部分别布置一个水平和一个竖直位移传感器,同时在桶外泥面上布置两个垂向位移传感器量测不同点处的沉降<sup>[10]</sup>。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(10202024);中国科学院、海洋石油总公司联合重大项目“新型海洋平台关键技术研究”  
收稿日期:2004-07-26

在离心机中制备冰并驱使其移动而与平台发生作用是极困难的，因此实验中将采用等效动冰载施加于桶形基础上。现场实测的渤海地区现有平台受动冰载作用时的响应频率为 0.8~1.2 Hz，故实验中取等效动冰载的频率为 0.8 Hz(原型频率)。因该研究是为得到动冰载下桶基响应规律，为理论和数值分析提供参考，而不是模拟实际某处的具体情况，故实验中施加的是正弦波载荷。固结前激振器的加载位置距桶顶 6.5 cm，此相对位置会随桶的下沉而增加。在钢管顶部放置不同质量的钢块，模拟平台结构重的影响。图 3 是加载开始和最后阶段的施加在桶基上的作用力。可看出，当土体上部液化后，桶基础水平承载力降低约 17%。

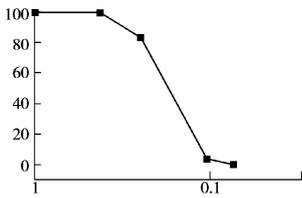


图 1 颗粒级配

Fig. 1 The grain size distribution

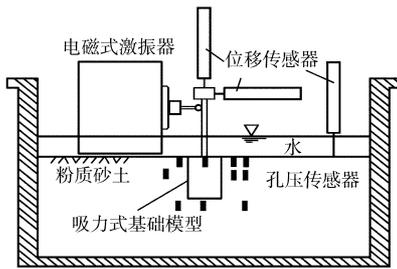


图 2 模型布置

Fig. 2 The arrangement of the model test

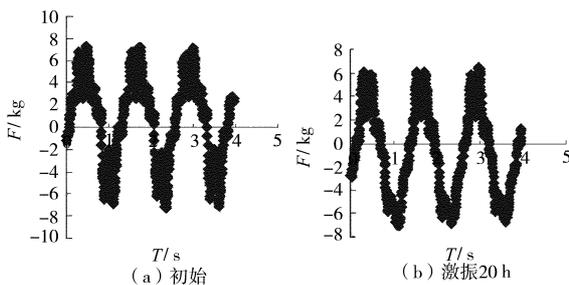


图 3 荷载特性

Fig. 3 The characteristics of loading

10 个从英国 DRUCK 公司进口的 PDCR81 型孔隙水压力传感器在制备土样过程中埋设在土中(不固定，可以随土体变形而变形)，记录初始埋设的位置和实验后所在的位置(图 4)。每个 PPT 的垂直和水平间隔为 1 cm。距离桶侧壁最近的孔压传感器头部的微型陶瓷板与侧壁的距离为 2 mm。泥面以上水深 1 cm，#17 和 #1PPT 在水位下 2 cm，#17、#10、#15 和 #7 距桶壁 2 mm，每两个水平孔压传感器之间的距离为 5 mm，垂直孔压传感器之间的距离为 2 cm，#11 和 #16 孔压传感器分

别在水位以下 4 cm 和 8 cm。两种形式的布置是为了能测出孔隙压力随深度和沿水平方向的变化。

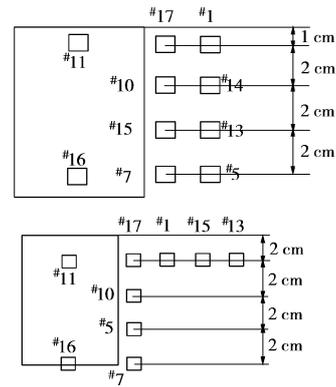


图 4 孔压计的两种布置形式

Fig. 4 The layouts of PPT

为保证模型有较好的重复性和均匀性，约 20 cm 厚的模型粉质砂土分 5 层铺，每层轻拍击实，由于密度控制。试样的饱和是通过从模型底部向上缓慢渗水来进行。水面超过土表面后，采用真空泵抽真空饱和，连续抽气饱和 38 h。经测试饱和度可达到 95% 以上。

### 2 实验重复性

离心模型模拟了约 17 m 厚的均匀粉质砂土地基，该地基在 80 g 离心加速度下的离心机运转过程中完成固结，固结时间为 6 个月(原型)。后面数据如无注明，均表示原型数值。固结前后土的干密度分别为 1.52 g/cm<sup>3</sup> 和 1.6 g/cm<sup>3</sup>。土的浮重为  $\gamma = 0.971 \text{ kg/m}^3$ 。固结沉降为 80 cm。为保证实验的可靠性，对每种工况进行 2~3 次实验。图 5 给出了其中两次重复实验中土体固结沉降、多次重复实验中离桶壁 16 cm 处孔压沿深度变化的结果对比。该实验中，载荷幅值为 38.4 t，载荷频率为 1 Hz，桶内径为 4.8 m，桶净高为 5.76 m，顶部不加模拟结构重的铁块。可看到，实验的重复性较好，固结沉降误差小于 5%，最大孔隙压力较一致。

### 3 激振过程中桶的位移

在激振过程中，当载荷幅值超过一定值时，发生沉降。桶顶部的沉降在激振过程中随时间的变化过程见图 6。可看出在激振过程中当载荷幅值为 38.4 t 25.6 t 时桶产生了较大沉降；载荷为 12.8 t 时，发生较小的沉降，当载荷为 6.4 t 时，没有沉降，没在图中画出。

图 7 给出了载荷幅值 38.4 t，桶高和直径分别为 4.8 m 和 5.76 m 时，桶本身，离桶 4.8 m 和 20 m 处土体在激振过程中沉降的发展过程。可看到桶的沉降较远处土体明显地快，前者最大沉降量是 4.8 m 处的一倍多，20 m 处沉降可忽略。因从桶近区到远区的沉降差别，导致离桶一定距离处出现一个环状裂纹(图 8)。

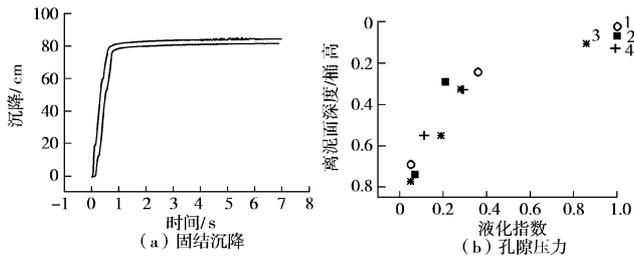


图 5 重复实验的固结沉降和孔隙压力对比

Fig. 5 The consolidation settlement and pore pressure distribution in repetitive tests

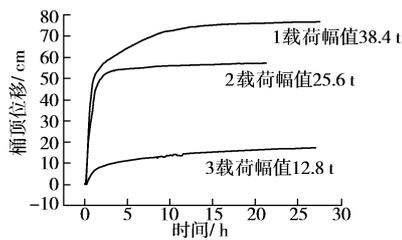


图 6 桶基竖向沉降随载荷幅值变化

Fig. 6 The settlement of bucket versus the load amplitude

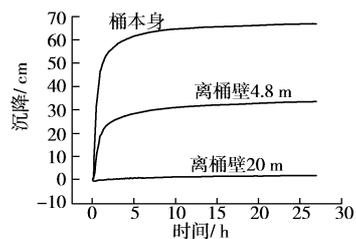


图 7 桶基与周围土体沉降

Fig. 7 The settlement of the bucket and the surrounding soils

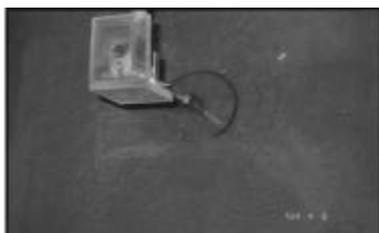


图 8 破坏后的环状裂纹

Fig. 8 The circular cracks after failure

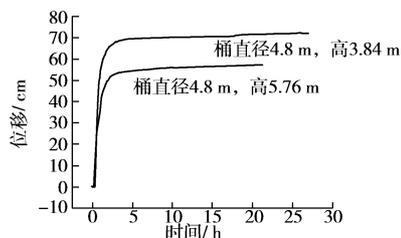


图 9 不同桶尺寸时的桶沉降

Fig. 9 The settlement of bucket versus the size of the bucket

当其他条件不变, 随着桶高的减小, 沉降量增加 (图 9)。这是因为, 桶高减小, 桶与土体接触面减小, 提供的反力也就减小。换句话说, 同样载荷下, 土体

受到的相对扰动就大, 软化越严重, 变形越大。当圆管顶放置 46 t 重物和不放置情况的对比 (图 10), 可以看到, 随着结构重的增加, 桶的沉降量增加。这是因为随着结构重的增加, 作用于土体的附加力增加, 当振动载荷引起土体软化或液化后, 桶的沉降就增加。

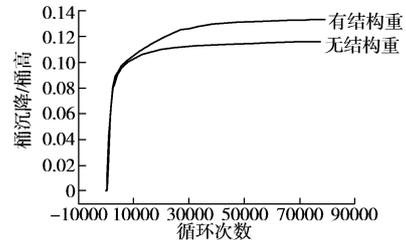


图 10 不同结构重时的沉降

Fig. 10 The settlement of bucket versus the weight of structure

## 4 结 语

在等效动冰载作用下, 桶周围土体发生液化。在激振过程中桶产生了较大的沉降, 桶的沉降较远处土体明显地快, 前者的最大沉降量是后者的一倍多。由于从桶近区到远区的沉降差别, 导致离桶一定距离处出现一个环状裂纹。

## 参考文献:

- [1] Dyme W, Houlsby G T. Drained behavior of suction caisson on very dense sand[A]. OTC10994[C]. 1998. 765 – 782.
- [2] Aas P M, Andersen K H. Skirted foundation for offshore structure[A]. 9th Offshore South East Asia Conf[C]. Singapore, 1992. 1 – 7.
- [3] Senpere D, Auvergne G A. Suction anchore piles-a proven alternative to driving or drilling[A]. OTC4206[C]. 1982. 483 – 493.
- [4] Tjelta T L, Hermstad J, Andenaes E. The skirt piled gullfaks c platform installtion[A]. OTC6473[C]. 1990. 453 – 462.
- [5] Bye A, Erbrich C, Earl K, Wright, et al. Geotechnical design of bucket foundation[A]. OTC7793[C]. 1995. 869 – 883.
- [6] 张建红, 孙国亮, 严冬, 鲁晓兵. 海洋平台吸力式基础的土工离心模拟研究与分析[J]. 海洋工程, 2004, 22(2): 90 – 97.
- [7] 鲁晓兵, 郑哲敏, 张金来. 海洋平台吸力式基础的研究与进展[J]. 力学进展, 2003, 33(1): 27 – 40.
- [8] 鲁晓兵, 张金来. 离心机在海洋平台基础实验研究中的应用进展[J]. 中国海洋平台, 2003, 18(6), 1 – 6.
- [9] Ding H Y, Qi L, Du X Z. Estimating soil liquefaction in ice-induced vibration of bucket foundation[J]. J Cold Reg. Eng, 2003, 17(2): 60 – 67.
- [10] 张建红, 孙国亮, 鲁晓兵. 离心机中动冰载的模拟[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(4): 474 – 477.