

# 动载下桶形基础的沉陷\*

王义华<sup>1</sup> 鲁晓兵<sup>1</sup> 王淑云<sup>1</sup> 时钟民<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>中国科学院力学研究所 北京 100080) (<sup>2</sup>中国海洋石油研究中心 北京 100027)

**摘要** 对水平动载下桶形基础的响应进行了试验研究。考察了均匀土层情况下的沉陷现象。结果表明,由于动载的作用,桶周围土体逐渐软化甚至液化,土体强度降低,桶逐渐下沉。根据试验结果提出了 1 个简单的分析方法,并与试验结果进行了对比。

**关键词** 土力学,桶形基础,饱和土,液化,沉陷

**分类号** TU 473.1

**文献标识码** A

**文章编号** 1000-6915(2004)增 1-4558-04

## SUBSIDENCE OF BUCKET FOUNDATION UNDER HORIZONTAL DYNAMIC LOAD

Wang Yihua<sup>1</sup>, Lu Xiaobing<sup>1</sup>, Wang Shuyun<sup>1</sup>, Shi Zhongmin<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>*Institute of Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080 China*)

(<sup>2</sup>*Research Center, Chinese Ocean Oil Co., Beijing 100027 China*)

**Abstract** Physical model tests are carried out to study the responses of the bucket foundation under horizontal dynamic load. The subsidence of the bucket foundation and the uniform soil layers is investigated. It is shown that the soils around the bucket softens or even liquefies under the dynamic load. The strength of the soils degrades and the bucket sinks gradually.

**Key words** soil mechanics, bucket foundation, saturated soils, liquefaction, subsidence

## 1 引言

现今的海洋油气资源开发已经有了很大的发展,越来越多的海洋石油平台将要修建。因为可以节省费用和重复利用等优点,桶型基础是近年来石油生产部门十分关注的一种基础形式。到目前为止,对桶形基础的承载特性,尤其是动载下的承载特性和稳定性,还缺乏了解,而海洋平台的稳定性是安全生产的重要环节。因此,迫切需要开展这方面的研究。海洋平台基础很多都坐落在饱和砂土地基上或含有饱和砂土夹层的地基中,波浪、冰载等动载

直接作用于平台上部结构,然后通过平台基础传递到周围土体,引起土体的动态响应,这是典型的结构物与土体的耦合作用问题。在动载作用下,饱和砂土中的孔隙水压力可能逐渐积累,有效应力逐渐减小,甚至发生液化。随着土体强度的降低和孔隙水的排出,桶及土体逐渐沉陷。所以,研究桶形基础在侧向载荷作用下的动力响应对海洋平台的安全生产具有重要的意义<sup>[1-12]</sup>。以往的研究当中,比较多的是针对液化产生过程中的孔压和有效应力随时间的发展进行分析,即材料液化的发展过程,对软化和液化后的沉陷研究较少。鉴于此,通过试验和理论分析,本文重点探讨桶形基础在水平动载下的

2004 年 4 月 10 日收到初稿,2004 年 6 月 8 日收到修改稿。

\* 国家自然科学基金杰出青年基金(40025103)和国家自然科学基金(10202024)资助项目。

作者 王义华 简介:男,1979 年生,现为中国科学院力学研究所硕士研究生,主要从事岩石力学试验方面的研究工作。

沉陷。

## 2 试验简介

模型试验是在长 × 宽 × 高 = 50 cm × 50 cm × 50 cm 的模型槽中进行的，模型槽中心部分安置钢圆筒模拟桶形基础。桶形基础模型的结构尺寸为：桶径为 10 cm，对应桶内的净高为 10 cm；上端封闭，底部敞口，顶盖厚 1 cm，桶壁厚 2 mm；顶部留小孔便于桶基下沉过程中排水，下沉完毕后密封。试验材料采用饱和粉细砂，内摩擦角 37°。颗粒级配曲线如图 1 所示。制样时控制干密度为 1.60 g/cm<sup>3</sup>，首先均匀撒砂，分层击实，然后在模型槽内注水，制成饱和砂地基模型，上部保持砂面上有约 1 cm 厚的水层，使砂始终处于饱和状态。

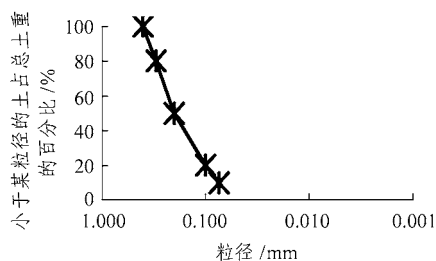


图 1 颗粒曲线

Fig.1 Grading curve of particle size

采用电液加载系统来对桶施加载荷。仪器布置如图 2。加载系统能施加的载荷值为 0 ~ 800 N，频率为 1 ~ 5 Hz，加载器的最大许可位移为 50 mm(施加的力和位移响应见图 3, 4)。试验时，将水平循环载荷施加到桶基础上，频率取 1 Hz，载荷在 5 ~ 15 N 间变化。载荷作用最长时间为 5 h。当沉陷基本停止时，终止加载。加载过程中测量土中孔隙压力、桶的水平位移、垂直位移、孔隙压力和施加到桶上的水平力。

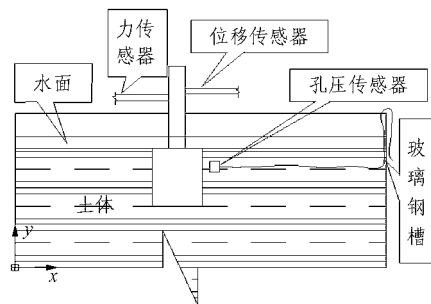


图 2 仪器布置

Fig.2 Layout of the test apparatus

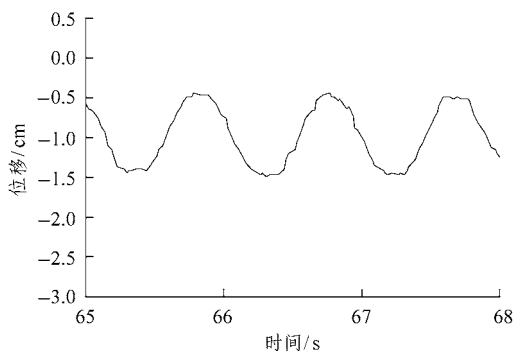


图 3 位移响应

Fig.3 Responses of displacement

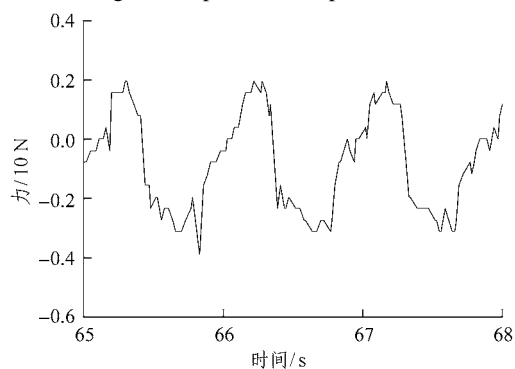


图 4 施加在桶上的力

Fig.4 Force applied on the bucket

## 3 试验结果

在试验中观察到，在载荷幅值较小时，没有液化现象，桶基周围的砂土不断沉陷而形成 1 个马鞍型的坑，沿载荷作用方向坑的范围大，逐渐发展到一种稳态情况；当载荷超过一定值时，桶周围砂土液化，随着载荷的作用，桶周围沿载荷作用方向约占桶径 40% 的区域软化，其中 20% 的区域液化；坑的大小及表面沉降见图 5，垂直于作用方向 20% 的区域软化和液化，桶逐渐下沉，这是由于桶周和桶底土体的液化和软化导致的。随着桶的下沉，桶周围土体的嵌固作用逐渐增加，土体的变形逐渐减小。当载荷较大，使土体产生较大的位移时，土体内产生明显的滑移面，滑移面上砂土剪胀，产生裂缝(这些现象是将桶放在模型箱内壁处观察的)。液化后的土被挤出去，挤出量开始较多，然后在桶周围一定范围内，土体液化区域不再扩展，液化的土体随周期载荷的作用而周期性地升降，不再被挤出；土体逐渐沉陷，逐渐发展到一种稳态情况如图 6 所示。图中，x 坐标与载荷方向平行，y 坐标与载荷方向垂直，曲线 1 为试验前泥面线，曲线 2 为试验后泥面线。桶周沿载荷方向被挤出去的砂土多，形成的坑

也深。坑的近桶壁侧坡度大，另一侧坡度小。从图 7 可以看到，桶的沉降随时间开始增加快，然后逐渐停止。

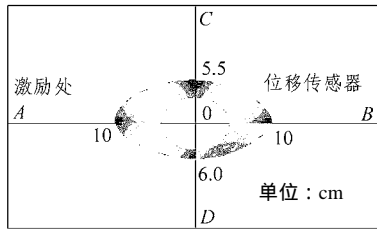


图 5 土体顶面的影响范围  
Fig.5 Area affected at the surface

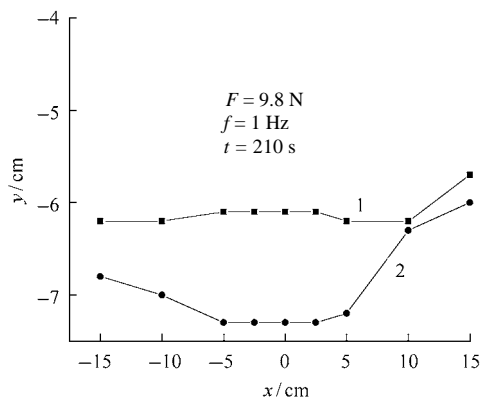


图 6 沿加载方向的沉降  
Fig.6 Subsidence along the loading direction

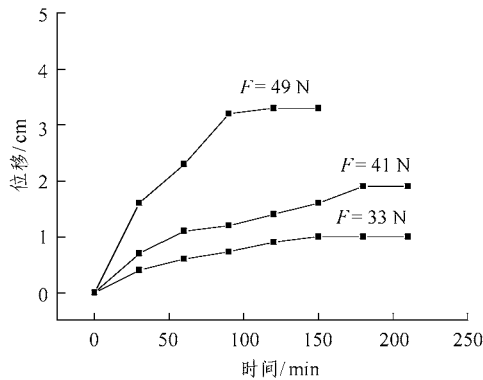


图 7 桶顶中心处的沉降  
Fig.7 Subsidence at the center of the bucket

### 4 分析

在动载作用下，试验中的松砂有剪缩趋势，而孔隙水来不及排出，桶周围土体内孔隙压力上升，土体软化甚至液化，强度大大降低，土体不能继续承受桶的自重而导致桶的下沉。同时由于超孔隙压

力增加，孔隙水在压差作用下排出，土体下沉，即土体发生动力固结。

简化分析方法为，桶周围饱和土体的沉降包括：(1) 孔隙压力增加，土体强度和刚度降低而产生沉降；(2) 孔隙水排出而产生沉降。本文分析完全液化后土体的沉降。

Florin 和 Ivanov 等认为，当沉降颗粒到达固体材料时，如果下面的非液化层或试验中的固壁，就逐渐堆积起来形成 1 个随时间增加的固化区。当固化前锋向上移动直到到达表面或非液化覆盖层时，则固化过程停止。经过分析，Florin 给出了固化区上移的速度为

$$\dot{z} = \frac{\rho}{\rho_w} \frac{1-n_1}{n_2-n_1} k \tag{1}$$

式中： $\rho = \rho_s - \rho_w$  为液化土的浮容重， $n_1$  为液化区土的孔隙率， $n_2$  为固化区土的孔隙率， $k$  为渗透率。从式(1)可以得到，土层中任一点固化或液化持续的时间为

$$t = \frac{\rho_w}{\rho} \frac{n_2 - n_1}{1 - n_1} \frac{h}{k} \tag{2}$$

式中： $h$  为任一点的位置高度。

土体表面最后的沉降为

$$\Delta L = \frac{n_0 - n_1}{1 + n_0} H \tag{3}$$

当为多层土情况下，可以采用上面的方法分别计算每层的变形，然后相加。下面将主要根据式(3)进行分析，对土体软化产生沉降的计算可参考有关动力固结的文献。

### 5 理论结果与试验结果的对比

在上面介绍的试验中，土的最大和最小孔隙比分别为 0.949 和 0.454，渗透系数为  $1 \times 10^{-5}$  m/s。这样计算后得到各位置的沉降如表 1 所示。

表 1 理论与试验值对比

Table 1 Comparison of the theoretical and experimental results				
位置	初始值	终值	试验沉降量	理论沉降量
- 5.0	- 3.90	- 5.9	2.0	2.17
0.0	- 3.90	- 5.9	2.0	2.17
5.0	- 3.45	- 5.3	2.0	2.17

## 参 考 文 献

- 1 Dyme W , Houlsby G T. Drained behavior of suction caisson on very dense sand[R]. OTC10994 , 1998 , 765 ~ 782
- 2 Aas P M , Andersen K H. Skirted foundation for offshore structure[A]. In :Proc. of 9th Offshore South East Asia Conf.[C]. Singapore :[s. n.] , 1992 , 1 ~ 7
- 3 Senpere D ,Auvergne G A. Suction anchor piles-a proven alternative to driving or drilling[R]. OTC4206 , 1982 , 483 ~ 493
- 4 Tjelta T L , Hermstad J , Andenaes E. The skirt piled gullfaks c platform installtion[R]. OTC6473 , 1990 , 453 ~ 462
- 5 Bye A , Erbrich C , Earl K , et al. Geotechnical design of bucket foundation[C]. OTC7793 , 1995 , 869 ~ 883
- 6 刘振纹 , 王建华 , 秦崇仁等. 负压桶形基础水平承载力研究[J]. 岩土工程学报 , 2000 , 22(6) : 691 ~ 695
- 7 鲁晓兵 , 郑哲敏 , 张京来等. 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 徐志英 , 沈珠江. 地震孔隙水压力产生、扩散和消散的有限单元法动力分析[J]. 水利学报 , 1981 , 9(4) : 1 ~ 16
- 9 鲁晓兵 , 谈庆明 , 俞善炳等. 垂向载荷下饱和砂土的液化发展的数值模拟[J]. 力学学报 , 2001 , 33(5) : 612 ~ 620
- 10 Biot M A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. I : low frequency range[J]. J. Acoust. Soc. Am. , 1956 , 28 : 50 ~ 62
- 11 Florin V A , Ivanov P L. Liquefaction of saturated sandy soils[A]. In : Proc. of 5th Int. Conf. on Soil Mech. Found. Engrg.[C]. Paris : [s. n.] , 1961 , 107 ~ 111
- 12 Scott R F. Solidification and consolidation of a liquefied sand column[J]. Soils and Foundations , 1986 , 26(4) : 23 ~ 31