

文章编号: 1001- 4500(2004)06- 0007- 05

水平动载下桶型基础周围土体软化的离心机模拟

鲁晓兵¹, 张建红², 王淑云¹, 孙国亮², 时忠民³

(1. 中国科学院力学研究所, 北京 100080; 2 清华大学, 北京 100084;

3 中国海洋石油总公司研究中心, 北京 100027)

摘 要: 为了探讨海洋平台桶形基础在水平动载荷下的响应特性, 为实际工程设计提供依据, 本文以等效动冰载作用为例, 对饱和砂土地基上桶形基础的动力响应进行了离心机实验研究。通过实验发现, 沿深度方向, 孔隙水压力从土体表层到土体下部逐渐减小, 当土体表层已液化, 下部土体(桶底面高程位置)的孔隙水压力增加还很小, 桶的总承载力降低约 17%。; 沿水平方向, 孔隙水压力发展从桶壁近区到远处逐渐衰减, 在离桶壁 3% 桶直径处, 液化指数(孔隙水压力除以初始有效应力)已为 1.0, 在离桶壁 23% 桶直径处, 液化指数为 0.4。随载荷幅值增加, 土体软化、液化发展加快; 在实验范围内, 随压重增加, 上部土体影响增加; 在桶直径一定条件下, 土体响应随桶高的减小而增加。

关键词: 等效动冰载; 饱和土; 液化; 桶形基础

中图分类号: P642

文献标识码: A

0 引言

随着海洋石油工业的发展, 海洋平台不断应用于复杂海况和复杂的地质条件, 要求设计精度越来越高。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^[1-5]。土的变形和强度都决定于有效自重应力, 1g 条件下的小模型实验因模型的自重应力远较原型的低, 不能真实地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^[6-8]。

我国渤海地区针对海洋平台的控制载荷是冰载, 目前对动冰载引起的平台响应研究较少^[9]。故本文用离心机实验对海洋平台在动冰载条件下桶形基础周围土体的孔隙水压力变化进行了实验研究, 以分析液化或软化的发展过程及对承载力的影响, 考察了不同长径比、不同结构重等因素的影响。

1 离心模型制备

离心模型试验是在清华大学 50g-t 土工离心机上进行, 该离心机的最大离心加速度为 250g。100g 离心加速度下允许最大载重 300kg。试验所采用的模型箱内缘尺寸 600mm × 350 mm × 350 mm。所采用的地基土为粉质砂土, 比重为 2.69, 平均粒径为 0.14mm, 渗透系数为 5×10^{-4} cm/s, 颗粒级配曲线见图 1。离心模型布置如图 2 所示。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 60mm 和 62mm, 桶内净深分别为 90cm, 72mm, 48cm, 顶厚 2mm。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^[10]。

十个从英国 DRUCK 公司进口的 PDCR 81 型孔隙水压力传感器在制备土样过程中埋设在土中(不固

收稿日期: 2004-07-26

作者简介: 鲁晓兵, 男, 博士, 从事岩土工程研究。

基金项目: 中科院、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”和自然科学基金(No. 10202024)资助。

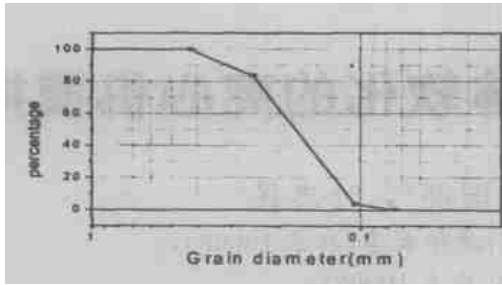


图 1 模型土的颗粒级配曲线

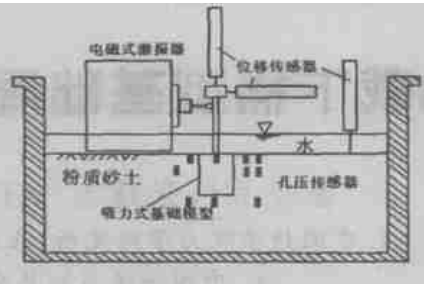


图 2 模型布置

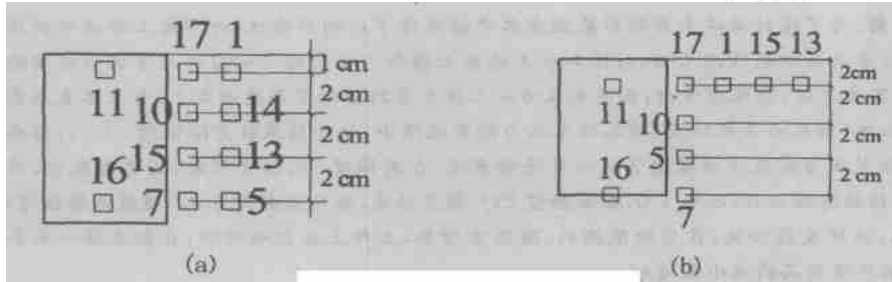


图 3 孔压计的两种布置形式

定, 可以随土体变形而变形), 其布置如图 3 所示, 每个 PPT 的垂直和水平间隔为 1cm。距离桶侧壁最近的孔压传感器头部与侧壁的距离为 2mm。泥面以上水深 1cm, 17 和 1 号 PPT 在水面下 2cm, 17、10、15 和 7 距桶壁 2mm, 每两个水平孔压传感器的距离为 5mm, 垂直孔压传感器之间的距离为 2cm, 11 和 16 孔压传感器分别在水位以下 4cm 和 8cm。两种形式的布置是为了能测出孔隙水压力随深度和沿水平方向的变化。

为了保证模型有较好的重复性及均匀性, 21cm 模型粉质砂土分 5 层铺, 每层用手轻拍击实, 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。当土样铺完且水面超过土表面后, 采用真空泵抽真空饱和, 连续抽气饱和 38 小时。经测试, 饱和度可以达到 95%。

在离心机中制备冰并驱使其移动而与平台发生作用是极其困难的, 因此, 在本实验中, 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的现有平台在动冰载作用下的响应频率一般在 0.8~1.2Hz, 故实验中取等效动冰载的频率为 1Hz。由于该研究的目的是为了得到动冰载下的桶基响应规律, 并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, 采用与现场上部地层接近的粉质砂土。激振器加载位置在固结前距桶顶 6.5cm, 这个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 4 是加载开始阶段和最后阶段的施加在桶基上的作用力。可以看出, 当土体上部液化后, 桶承载力降低约 17%。

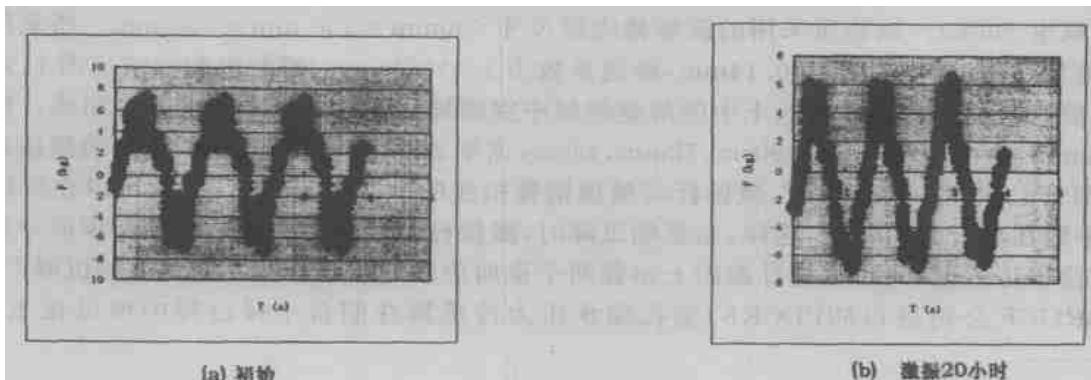


图 4 施加在桶上的荷载

2 实验重复性

实验中采用 80g 离心加速度, 原型桶径为 4.8m, 冰荷载的频率为 0.8Hz(以后如无特别说明, 数据均对原型)。当离心加速度达到 80g 后, 首先固结 178 天; 紧接着施加 24 小时左右的动载荷。为保证实验的可靠性, 对每种工况进行两到三次重复实验。图 5 中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 16cm 处孔压沿深度变化的结果对比。该实验中, 载荷幅值 60N, 频率 1Hz, 桶内径 6cm, 桶净高 7.2cm, 顶部不加模拟结构重的铁块。可以看到, 实验的重复性较好, 固结沉降误差小于 5%, 最大孔隙水压力也较一致。

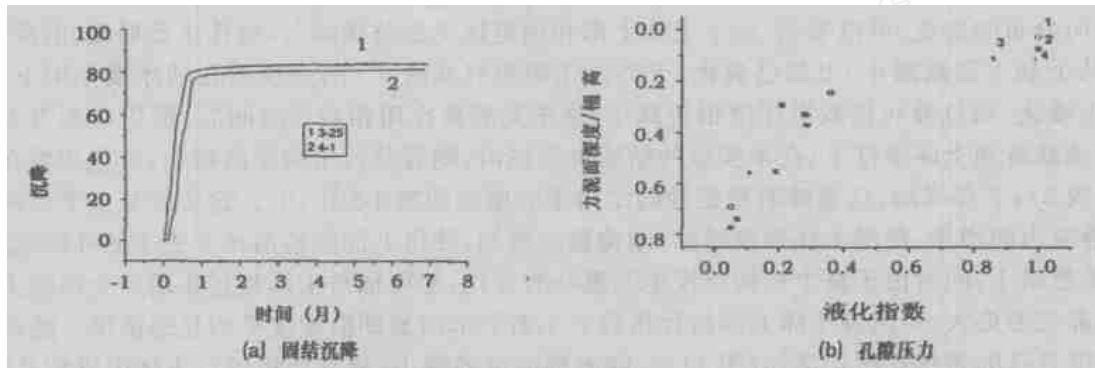


图 5 重复实验的固结沉降和液化指数对比

3 孔隙压力发展

3.1 随时间的变化

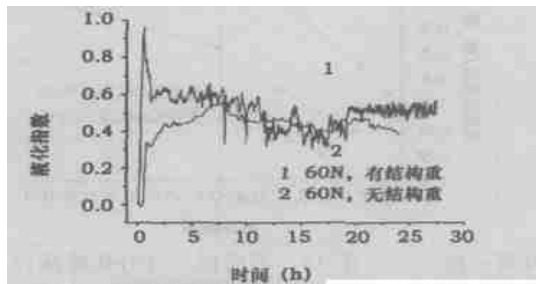


图 6 不同压重时上部孔隙压力随时间变化

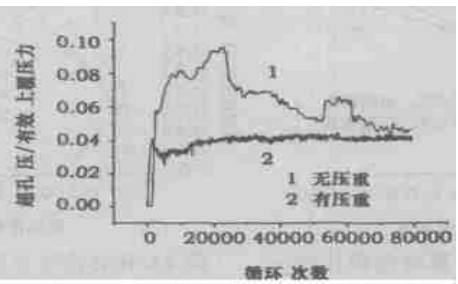


图 7 不同压重时下部孔隙压力随时间变化

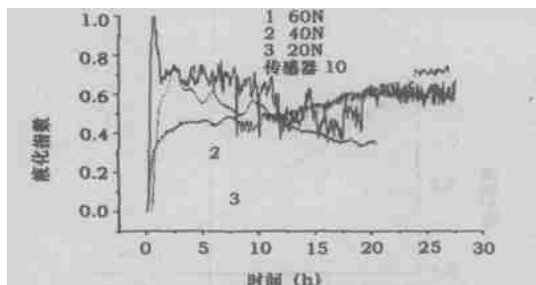


图 8 NO. 10PPT 位置荷载变化时孔隙压力随时间变化

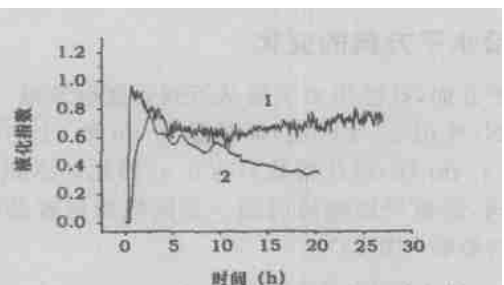


图 9 NO. 1PPT 位置桶尺寸变化时孔隙压力随时间变化

实验结果显示, 在动载作用下, 孔隙水压力先上升, 然后缓慢下降, 图 6~ 9 中给出了土体中不同深度处的孔压计记录数据都显示出这一特性。这是因为在载荷施加的前期, 排水慢, 导致孔压累积而上升; 但随孔压上升, 土体强度逐渐下降甚至液化, 渗流加快, 土体逐渐下沉固结, 孔隙水逐渐排出, 导致孔压下降。图 6 中的数据为细圆管顶放置一个 90g(相当于原型 46 t)重的铁块, 及不放该结构的最上层离土面约 1m 处的孔

压。可以看到, 放置该结构时, 最大孔压较不放时大, 但下部的则相反(图 7), 这说明当增加上部结构重时, 质量集中在上部, 作用力也向上部偏移, 使得上部土体受到扰动大。随着载荷幅值的增加, 在不同的位置处, 孔隙压力最大值增加; 载荷幅值越大, 孔隙压力上升越快(图 8)。桶尺寸变化对土体中同一相对位置孔压的增长有明显影响(图 9), 由于孔隙压力计是自由放置在土体中, 固结后在土体中的位置发生了变化, 使得不同实验中有些初始位置一样的孔隙压力计在固结完后初始静孔隙压力值有区别, 在图 6~ 9 中的孔压为减去初始孔压的孔隙压力值。

3.2 沿深度的变化

图 10, 11, 12 给出了不同结构重、不同载荷幅值、不同桶尺寸条件下的液化指数(累积孔压/垂直向有效应力)沿深度方向分布的变化。可以看到, 由于土体上部和桶近区受到的扰动大, 故孔压发展快。沿深度方向, 孔隙压力发展从上到下逐渐减小, 上部已液化, 下部液化指数只有约 0.08, 这说明在动冰载作用下, 只有桶上部土体会发生液化, 而且液化指数沿深度很快减小, 这正是载荷作用相当长时间后, 桶仍有相当大承载力的原因。在同样动载荷和土体条件下, 在本实验的结构重范围内, 随着载荷结构重的增加, 液化指数在土体上部减少(图中曲线 2), 下部增加, 这意味着稳定性随结构重的增加而减小(图 10)。这可能是由于结构重的增加导致土体中静应力的增加, 使得土体强度增加; 结构重的增加, 使得上部惯性消耗了更多的外载能量, 导致传入土体中的能量减小, 同时由于整个结构惯性矩及重心的变化, 使得桶与土体相互作用产生的应力沿深度分布有变化, 下部变形更大, 而出现土体上部液化指数变小而下部增加即沿深度平均化的情况。随着载荷幅值的增加, 沿深度各点的累积孔压均增加(图 11)。随着桶高度的减小(桶直径相同), 土体中累积孔压增加, 这是因为桶高度减小, 桶重就减小, 与土的接触面也减小, 同样载荷下, 引起的土体变形就大, 累积孔压就较快上升(图 12)。

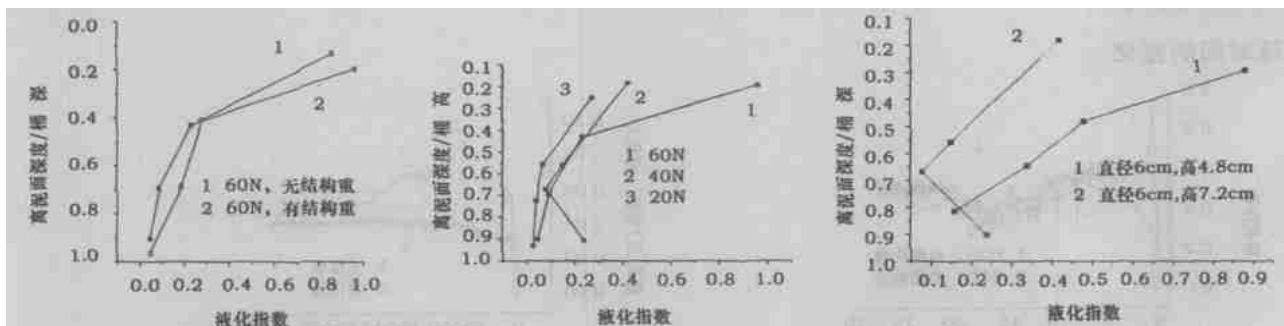


图 10 不同结构重时孔隙压力随深度的变化

图 11 有结构重不同载荷幅值时第一排 PPT 沿深度变化

图 12 不同桶尺寸时孔隙压力随深度的变化

4 孔压沿水平方向的变化

沿水平方向, 孔隙压力发展从近到远逐渐衰减。在载荷幅值 60N, 作用 23 小时后, 离桶壁 0.2m 处, 土体已液化, 离桶壁 1.4m 处, 液化指数只有 0.4。因此动冰载与地震载荷不同, 前者只影响桶周围一定区域而后者是整个区域均受到影响(图 13)。

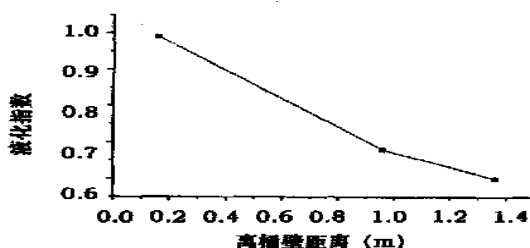


图 12 最大累计孔隙压力沿水平面的分布

5 结语

在一定幅值的等效动冰载作用下, 桶周围上部土体发生液化。当上部土体液化后, 下部土体孔压发展很小, 这正是载荷作用相当长时间后, 桶仍有相当大承载力的原因, 桶形基础总承载力降低约 17%。沿水平方向, 孔隙压力发展从近到远逐渐衰减。随载荷幅值增加, 土体软化、液化发展越快; 在实验范围内, 随压重增加, 上部土体影响增加; 在桶直径一定条件下, 土体响应随桶

高的减小而增加。

影响桶形基础动承载力的因素较多,而目前本文的实验只考虑了其中的三个:载荷幅值、上部压重和桶尺寸,对其他如载荷频率、土体密度、土体渗透性、分层土地基等因素的影响,还需要作进一步的研究。

参考文献

- [1] Dyme W, Houlsby G T. Drained behavior of suction caisson on very dense sand[C]. OTC10994, 1998: 765~ 782
- [2] Aas P M, Andersen K H. Skirted foundation for offshore structure[C]. In: 9th Offshore South East Asia Conf., Singapore, 1992. Singapore: World Trade Center Singapore, 1992: 1~ 7.
- [3] Senpere D, Auvergne G A. Suction anchor piles- a proven alternative to driving or drilling[C]. OTC4206, 1982: 483 ~ 493
- [4] Tjelstada T L, Hemstad J, Andenaes E. The skirt piled gullfaks c platform installtion[C]. OTC6473, 1990: 453~ 462
- [5] Bye A, Erbrich C, Earl K, Wright, et al. Geotechnical design of bucket foundation[C]. OTC7793, 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于分析[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. 离心机震动冰载的模拟[J]. 岩土工程学报(待刊).

EXPERIMENTAL STUDY OF CENTRIFUGE ON THE SOFTENING OF SAND AROUND BUCKET FOUNDATION UNDER ICE- INDUCED VIBRATION LOADING

LU Xiaobing¹, ZHANG Jianhong², WANG Shuyun¹, SUN Guoliang², SHI Zongmin³

(1. Institute of mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100080

2 Hydraulic Department of Tsinghua University, Beijing, 100080

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

Abstract: The centrifuge experiments have been processed in which the equivalent dynamic ice- induced loading is adopted to investigate the responses of buckets foundations under horizontal dynamic loadings. We expect some references may be provided for the practical design based on these experiments.

Key words: Equivalent dynamic ice-induced loading, saturated soil, liquefaction, bucket foundation.

(上接第 14 页)

- [7] Ding H Y, Qi L, Du X Z. Estimating soil liquefaction in ice-induced vibration of bucket foundation[J]. Cold Reg Eng, 2003, 17 (2): 60-67
- [8] 鲁晓兵,郑哲敏,张京来. 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

THE RESPONSES OF THE BUCKET FOUNDATION UNDER EQUIVALENT DYNAMIC ICE- INDUCED LOADING

WANG Yihua¹, LU Xiaobing¹, WANG Shuyun¹, SHI Zhongmin²

(1. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100080)

2 Research Center, Chinese Ocean Oil Co., Beijing, 100027)

Abstract: In order to provide some references for the design of bucket foundation in Bohai Bay. The responses of the bucket foundation on saturated sand under equivalent dynamic ice-induced loading are investigated experimentally. The deformation and the affected zone are mainly studied. The bearing characteristics under this type loading are analyzed.

Key words: bucket foundation, saturated sand, liquefaction.