维普资讯 http://www.cqvip.com

第24卷 第7期
2005年4月
岩石力学与工程学报
Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering
Vol.24 No.7
April, 2005

桶形基础极限承载力特性研究

张金来[1]，鲁晓兵[1]，王淑云[1]，时忠民[2]，张建红[3]

(1. 中国科学院 力学研究所，北京 100080；2. 中国海洋石油总公司研究中心，北京 100027；3. 清华大学 水利水电工程系，北京 100084)

摘要：通过有限元计算，分析了不同长径比下横向和竖向承载力、载荷位移曲线以及耦合载荷作用下的极限承载力特性，并与实验结果进行了对照。结果表明：当竖向压力小于某临界值时，基础的横向极限承载力随着竖向压力的增加而增加；但是当竖向压力增大到超过该临界值以后，横向极限承载力反而会随竖向压力的增大而降低。随着长径比的增加，基础承载力，特别是横向承载力有比较明显的提高。

关键词：岩土力学；有限元法；长径比；耦合载荷

中图分类号：TP 183　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1000－6915(2005)07－1169－04

THE CHARACTERISTICS OF THE BEARING CAPACITY OF BUCKET FOUNDATION

ZHANG Jin-lai[1], LU Xiao-bing[1], WANG Shu-yun[1], SHI Zhong-min[2], ZHANG Jian-hong[3]

(1. *Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100080, *China*;
2. *Research Center of Chinese Ocean Oil Company, Beijing* 100027, *China*;
3. *Department of Hydraulic and Hydropower Engineering, Tsinghua University, Beijing* 100084, *China*)

Abstract: The finite element software(ABAQUS) was used to simulate the bearing capacity of the bucket foundations with different height-to-diameter ratios. The characteristics of the bearing capacity of the foundations under the vertical loading, the horizontal loading and the coupling loadings were analyzed. The numerical results were compared with that of experiments. It is shown that under a critical vertical loading, the horizontal bearing capacity increases with the increase of the vertical loading, but decreases with the increase of the vertical loading when the latter is larger than the critical loading. The bearing capacity, especially the horizontal bearing capacity, increase obviously with the increase of the height-to-diameter.

Key words: rock and soil mechanics; FEM; height-to-diameter ratio; coupling loading

1 引 言

桶形基础(简称桶基)的概念最早见于国外20世纪60年代[1, 2]，从70年代初开始对其进行了大量的实验研究，80年代后期开始受到石油公司的重视并逐渐运用到海洋平台建设中。1994年桶基被成功地应用于Eurapiple16/11平台，被称为“导管架基础工程技术新时代的曙光”[1]。在今后一段时期内，由于渤海地区的油气资源将加大开发力度，因此，需要建设大批的海上石油平台。而桶形基础以其多方面的优点成为该地区石油平台基础的重要选择。

当前对桶形基础的研究，主要是围绕以下几个方面展开：一是在负压作用下的吸力式基础的沉贯阻力和安装稳定性；二是在各种内外载荷作用下的基础稳定性以及冲刷破坏等；三是能否拔出来以及

收稿日期：2003－07－17；**修回日期：**2003－09－18
基金项目：中国科学院知识创新重大项目(KJCX2－SW－L03－01)
作者简介：张金来(1978－)，男，硕士，2003年于中国科学院力学研究所获硕士学位，主要从事岩石力学试验方面的研究工作。E-mail: jinlai_zhang@imech.ac.cn。

维普资讯 http://www.cqvip.com

拔出力大小的估计[3~11]。

到目前为止，已建成的桶形基础还比较少，还没有得到足够的设计数据和形成成熟的技术和经验。有鉴于此，本文重点分析桶基长径比对基础承载力的影响以及竖向和横向耦合载荷作用下的极限承载力特性，为桶形基础的稳定性设计提供参考。

2 计算模型

采用 ABAQUS 软件对饱和砂土中桶基的承载力特性进行数值模拟并与实验结果对比。在计算中，用实体单元划分砂土和桶基，桶体材料为钢。由于结构和载荷的对称性，采用模型的一半进行计算，近桶区域网格划分细，从近到远网格尺寸按 1∶1.05 的比例逐渐增加(图 1)。在与实验结果对比计算时，计算区域沿径向取 5 倍桶半径，沿深度取 10 倍桶高(对 5 cm 高的桶)或 5 倍桶高(对 10 cm 高的桶)，使计算区域与实验情况基本相同。在其他计算中，沿径向取 10 倍桶半径，沿深度取 10 倍桶高，使边界影响基本被消除。桶与土之间采用 ABAQUS 软件中具有的接触对来模拟接触面的连接。除土体顶部为自由外，其他面均采用法向固定约束。对砂土采用 Dancun-Chang 模型。通过三轴实验，由模型实验砂确定的本构参数分别为：$c=0$，$\varphi=40°$，$K=550$，$R_f=0.93$，$n=0.68$，$d=0.3$，$G=0.36$，$F=0.243$。其中，c 为粘聚力，φ 为内摩擦角，R_f 为破坏比，K，n，d，G，F 为实验常数。桶土间接触面的摩擦系数取为 0.2。桶体为普通钢材，弹性模量和泊松比分别取为 200 GPa 和 0.17。载荷按 1 kg 逐级施加，直到变形大且不停止，中止计算。

图 1 有限元网格划分

Fig.1 The mesh for the computing

由于 ABAQUS 软件本身没有 Dancun-Chang 模型，因此，另外编制了 Dancun-Chang 模型的接口程序[12]。

3 实验验证

为了对所建的有限元模型和参数进行验证，将计算结果与模型实验结果进行了对比。

3.1 实验情况简介

模型实验是在长×宽×高 = 50 cm×50 cm×45 cm 的模型槽中进行的，模型槽中心部分安置普通钢(弹性模量和泊松比见节 3.2)圆筒模拟桶形基础。采用的 2 个模型的结构尺寸情况为：桶径为 10 cm，对应桶内的净高分别为 10 和 5 cm，即长径比分别为 1∶1 和 1∶2，上端封闭，底部敞口，顶盖厚 1 cm，桶壁厚 2 mm；顶部留小孔以便于桶基下沉过程中的排水，下沉完毕后密封。竖向载荷通过在桶顶预制的竖向加载凹槽由液压器施加，以 1 mm/s 的下降速度使桶下沉，并通过力传感器记录作用于桶上的力的大小。横向载荷通过拉索套孔由砝码施加，按 1 kg 逐级施加，直到桶被拉出土体为止。实验材料采用饱和漳州砂，内摩擦角为 40°，控制干密度为 1.58 g/cm^3(图 2)。实验中，首先在模型槽内注水，再均匀撒砂，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。在确定砂土本构模型参数时，以该干密度和应力水平进行三轴实验，具体数据见节 3.2。分 2 种工况进行实验：(1) 桶基在竖向载荷作用下的承载力情况(无横向载荷)；(2) 桶基在横向载荷作用下的承载力情况(无竖向载荷)。载荷由小到大施加，当载荷位移曲线趋向水平后，实验停止[13]。在下面的验证计算中，只选用其中水平和横向作用力各一种情况。

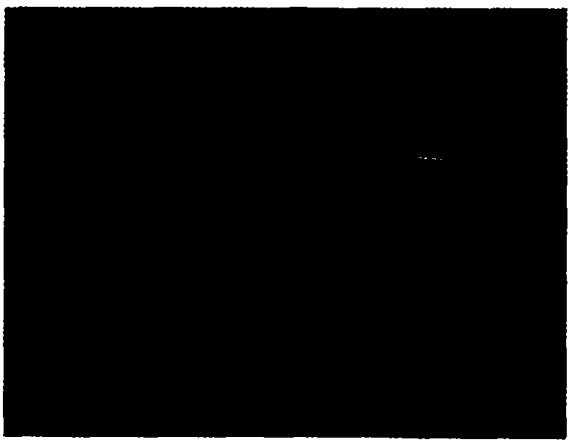

图 2 实验装置

Fig.2 The setting of experiment

维普资讯 http://www.cqvip.com

3.2 实验结果与计算结果比较

在横向载荷作用下，在实验前期，随着载荷的增加，桶基模型的位移很小，在砂基的受压区表面没有明显的变形迹象。随载荷的进一步增加，桶基的模型将产生1个小的转角，然后基础瞬间失稳倾覆。计算中采用与实验模型相同的桶结构、砂土材料与几何尺寸。从图3中的实验和计算结果对比可以看出，计算和实验得到的极限承载力结果相近，计算结果比实验结果略高，两者之间的误差不超过10%，可以认为两者的结果是相近的。

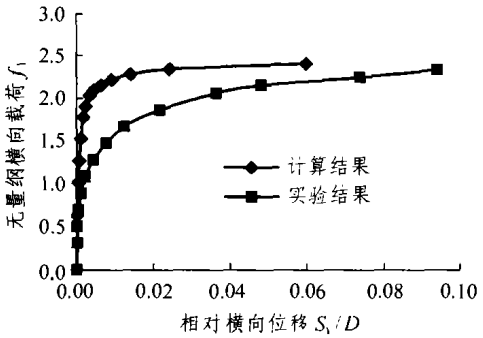

图3 桶横向载荷-位移曲线对比

Fig.3 The comparison of load-displacement curves under horizontal force

在竖向载荷作用下，随着模型桶被压入，可以看到在距桶壁较近的砂面上有轻微的隆起，当桶的顶部没入砂中时，轻微的隆起随砂向中间塌陷而消失。从总体来看，计算与实验结果都较为吻合(图4)。

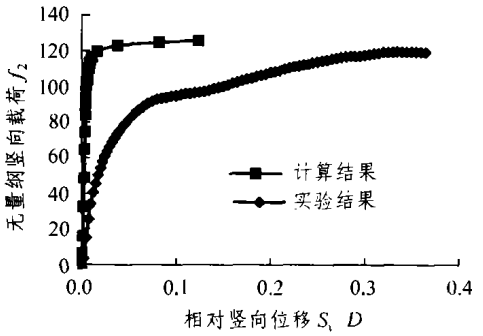

图4 桶竖向载荷-位移曲线对比

Fig.4 The comparison of load-displacement curves under vertical force

4 计算结果分析

下面对桶基在水平载荷、垂直载荷、二者耦合作用下的承载力特性及其长径比对桶基承载力的影响进行计算。在结果分析中，取无量纲横向载荷 $f_1 = F_h / \rho g D^3$、竖向载荷 $f_2 = F_v / \rho g D^3$、极限承载力 $f_{max} = F_{max} / \rho g D^3$ 进行讨论。ρ 为砂的密度，取1 580 kg/m^3；D 为桶基模型直径，取0.1 m；g 为重力加速度。

4.1 耦合载荷作用下的极限承载力研究

一般情况下，海上石油平台受到的载荷经常都是横向和竖向载荷同时作用。在本节中将对这种情况进行计算分析。计算选用长径比为1∶1的模型，在桶基模型顶部施加不同大小的竖向压力，对每一竖向压力，逐渐增大横向拉力，分别计算在相应情况下的横向载荷位移曲线，计算过程中，当载荷位移曲线逐渐上升到趋近于水平时结束计算。图5中各点为达到极限承载力状态时横向及竖向载荷的组合。可以看出，桶基在横向和竖向载荷共同作用下，在竖向载荷小于某值时，水平极限承载力随着顶部竖向载荷的增加而增加；但是当竖向载荷超过该值以后，水平极限承载力随着载荷的增加反而减小。桶基的这种承载力特性就要求在基础的运行过程中施加合理的上部压重。工程设计时应将载荷组合控制在该曲线以内，以保证结构的安全。

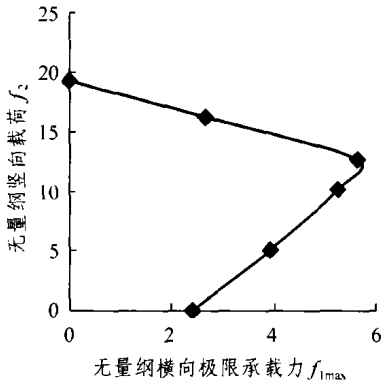

图5 耦合载荷承载力规律

Fig.5 The characteristics of bearing capacity under coupling loading

4.2 不同的长径比对极限承载力的影响

在本节中，对长径比分别为0.5，1，1.5和2的桶基模型，分别计算各自在竖向和横向载荷作用下的承载力，并分析极限承载力与桶基长径比之间的关系。计算结果分析表明(图4～7)，桶基长径比的增加对提高桶基的承载力，特别是横向承载力有明显的作用。在桶基的设计中，增加桶基的长径比是提高平台和桶基运行安全性的一个有效的途径。但是，由于平台结构所受力的多样性，桶基的破坏形式也多种多样，除了静载作用下的塑性大变形、软化破坏等形式外，还有可能是冰载、地震等动载荷引起的液化破坏等形式，所以，应该综合考虑多种因素的共同作用，并结合经济方面的考虑，选择合适的长径比。

维普资讯 http://www.cqvip.com

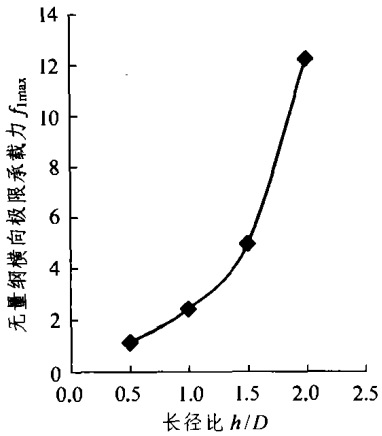

图 6 横向承载力与长径比的关系

Fig.6 The relation between height-to-diameter radio and horizontal bearing capacity

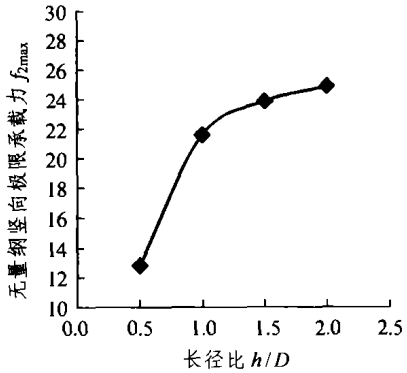

图 7 竖向承载力与长径比的关系

Fig.7 The relation between height-to-diameter ratio and vertical bearing capacity

5 结 论

(1) 计算结果表明，基础几何尺寸一定时，在竖向载荷小于某一临界值时，基础的横向极限承载力随着竖向压力的增加而增加，但是当竖向压力增大到一定程度以后，其横向极限承载力反而会随竖向压力的增大而降低。

(2) 随着长径比的增加，基础承载力，特别是横向承载力有比较明显的提高。为了提高桶基运行中的安全系数，增加桶基的长径比是一个有效的途径。

由于文章篇幅的限制，有关考虑力矩和水平力组合、力矩和垂直力组合以及力矩、水平力和垂直力组合作用时的承载力特性等将另文阐述。

参考文献(References)：

[1] Bye A，Erbric C. Geotechnical design of bucket foundations[A]. In：Proc. Offshore Tech. Conf.[C]. Houston：[s. n.]，1995. 869 - 883.

[2] 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.(Lu Xiaobing，Zheng Zhemin，Zhang Jinlai. Progress in the study on the bucket foundations of offshore platform[J]. Advances in Mechanics，2003，33(1)：27 - 40.(in Chinese))

[3] Randolph M F，O'Neil M P， Stewart D P. Performance of suction anchors in fine-grained calcareous soils[A]. In：Proc. Offshore Tech. Conf.[C]. Houston：[s. n.]，1998. 521 - 529.

[4] Dyme W，Houlsby G T. Drained behavior of suction caisson foundations on very dense sand[A]. In：Proc. Offshore Tech. Conf.[C]. Houston：[s. n.]，1998. 765 - 782.

[5] Aas P M，Andersen K H. Skirted foundation for offshore structure[A]. In：Proc. 9th Offshore South East Asia Conf.[C]. Singapore：World Trade Center Singapore，1992. 1 - 7.

[6] Senpere D，Auvergne G A. Suction anchore piles-a proven alternative to driving or drilling[A]. In：Proc. Offshore Tech. Conf.[C]. Houston：[s. n.]，1982. 483 - 493.

[7] Tjelta T L，Hermstad J，Andenaes E. The skirt piled gullfaks platform installation[A]. In：Proc. Offshore Tech. Conf.[C]. Houston：[s. n.]，1990. 453 - 462.

[8] Eide O，Andersen K H. Foundation engineering for gravity structure in the northern North Sea[J]. Norwegian Geotechnical Institute，1997，200：1 - 47.

[9] 刘振纹，王建华，袁中立等. 负压桶形基础竖向承载力研究[J]. 中国海洋平台，2001，16(2)：1 - 6.(Liu Zhenwen，Wang Jianhua，Yuan Zhongli，et al. Research on the vertical bearing capacity of bucket foundations[J]. China Offshore Platform，2001，16(2)：1 - 6.(in Chinese))

[10] 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.(Liu Zhenwen，Wang Jianhua，Qing Chongren，et al. Research on the horizontal bearing capacity of bucket foundations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering，2000，22(6)：691 - 695.(in Chinese))

[11] Allserma H G B，Brinkgreve R B J，Simon T. Centrifuge and numerical modeling of horizontally loaded suction piles[J]. Int. J. Offshore and Polar Engrg.，2000，10(3)：223 - 235.

[12] 张 宇. 桶形基础在静载作用下桶 - 土相互作用机理研究[硕士学位论文][D]. 北京：中国科学院力学研究所，2003.(Zhang Yu. Study on the interaction mechanism of the bucket foundations and the soils under static loading[M. S. Thesis][D]. Beijing：Institute of Mechanics，The Chinese Academy of Sciences，2003.(in Chinese))

[13] 张金来. 桶形基础承载特性研究[硕士学位论文][D]. 北京：中国科学院力学研究所，2003(Zhang Jinlai. Study on the bearing capacity of the bucket foundations[M. S. Thesis][D]. Beijing：Institute of Mechanics，The Chinese Academy of Sciences，2003. (in Chinese))