

负压桶形基础地基水平承载力研究^{*}

Research on the horizontal bearing capacity of bucket foundations

刘振纹¹, 王建华¹, 秦崇仁¹, 袁中立², 陈国祥²

(1. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300072; 2. 中国石油天然气总公司 工程技术研究院, 天津 300451)

摘要: 通过模型试验和有限元计算, 分析了单桶基础的地基极限水平承载力, 基础主动区与被动区的土压力分布; 建议了计算单桶基础水平极限承载力的关系式。进一步, 分析了双桶基础的地基水平承载力, 给出了相应的估算方法。

关键词: 负压桶形基础; 地基承载力; 海洋平台

中图分类号: TU 753. 6

文献标识码: A

文章编号: 1000- 4548(2000) 06- 0691- 05

作者简介: 刘振纹, 男, 1968年生, 天津大学建筑工程学院岩土所博士研究生。

LIU Zhenwen¹, WANG Jianhua¹, QIN Chongren¹, YUAN Zhongli², CHEN Guoxiang²

(1. Civil Engineering School of Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Research Institute of Petroleum Engineering Technology, Tianjin 300451, China)

Abstract: The horizontal limit bearing capacity of bucket foundations and the distribution of the active and passive earth pressure are studied by means of model tests and finite element method. The formula for evaluating the horizontal limit bearing capacity is suggested. Finally, the horizontal bearing capacity of double buckets foundation is investigated and a means to estimate the bearing capacity of the double buckets foundations is given.

Key words: bucket foundations; bearing capacity of foundation; ocean platform

1 前言^{*}

1994年, 在挪威北海70 m水深地区成功安装了带有桶形基础的导管架平台^[1]。与传统的桩基相比, 桶形基础具有造价低, 便于运输安装, 能重复使用等特点。由于这种基础在安装时, 主要依靠抽取桶中的空气形成内外压力差来把圆桶驱入土中, 并且这种压差有助于提高基础的稳定性, 故也称为负压桶形基础。该基础一般由多个圆桶组成, 其地基的稳定性与地基土性、桶的组合方式有关。工作运行中, 除受上部结构引起的竖向荷载, 还受波浪、流、冰产生的水平荷载作用。因此, 研究单桶基础的地基水平破坏模式以及计算水平承载力的方法, 分析单桶、多桶基础的地基水平承载力之间的关系, 对评价多桶基础地基的稳定性就显得极为重要。本文通过模型试验与有限元计算对此问题进行了研究。

2 模型试验

2.1 试验简介

单桶模型试验在中国石油天然气总公司工程技术研究院的浅海滩涂试验场地进行。模型为钢制圆桶, 桶径0.5 m, 桶高0.5 m, 壁厚5 mm, 水平作用力距地面0.25 m。试验地基土主要物理力学指标为: 浮容重 $\gamma' = 7.5 \text{ kN/m}^3$, 不排水抗剪强度 $S_u = 3.75 \text{ kPa}$, $\varphi \approx 0$ 。施加水平荷载采用单循环连续加载法, 每级加载量为

预估极限荷载的1/10, 约为0.1 kN, 每级荷载维持20 min, 基础侧面地表出现明显裂缝或隆起时终止试验。试验时, 在加力轴线的桶体主动区与被动区沿深度方向各布置4个土压力盒, 在桶顶被动区距地面5 cm高处设一个位移量测仪, 见图1。

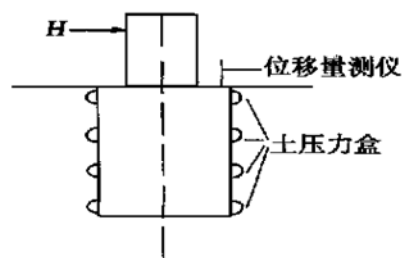


图1 模型试验简图

Fig. 1 Testing model

2.2 试验结果分析

图2(a), (b)分别为不同水平力作用强度时, 桶体外侧主动区、被动区土压力的分布图(用水平力与桶体在水平向的投影面积之比表示水平荷载的强度)。从图2可以看出, 在地基变形过程中, 主动区桶壁受到的土压力很小, 而被动区一侧桶壁的土压力很大。而且被动土压力随深度增加先是增大, 而后又逐渐减小, 其分布可近似为二次抛物线。模型试验还显示, 桶体的变形以转动为主, 在加载过程中, 主动区外侧土体逐渐与桶壁之间产生分离, 并随荷载的增加, 分离部分加宽、加深。

^{*} 收稿日期: 2000- 04- 03

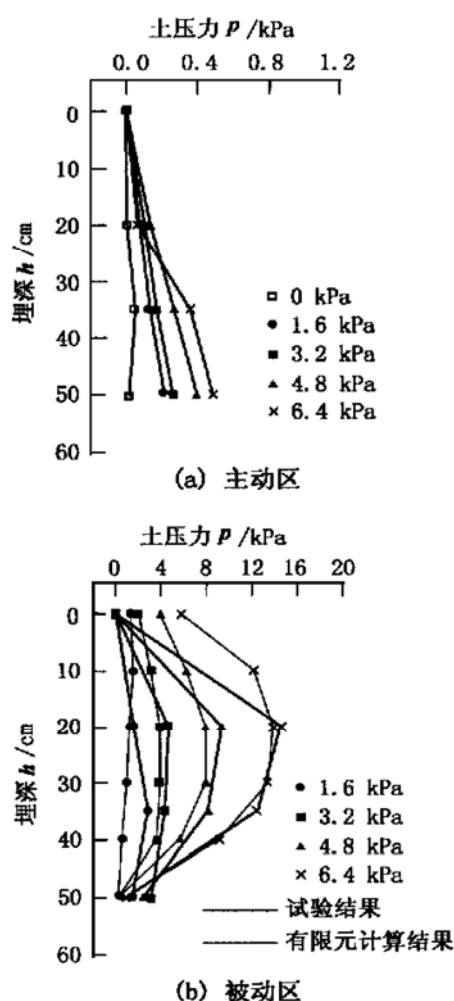


图 2 土压力分布图

Fig. 2 Earth pressure distribution

3 有限元计算模型

3.1 模型的选取

本文以桶形基础的试验模型为例,进行有限元计算分析。在确定有限元模型的计算尺寸时,参考已有的研究结果^[2],并通过计算比较,按下述原则确定地基有限元模型的计算范围:水平方向取桶径的 10 倍,桶底以下的竖直方向取桶径的 3 倍。模型的边界约束条件取为:两侧边界水平向约束,底部边界竖直向约束,上部为自由边界。

根据已有的研究,对于 $\varphi = 0$ 的软粘土地基,采用理想弹塑性模型,并依据 Mises 屈服准则分析基础安装后的地基极限承载力是比较恰当的^[2,3]。软粘土的变形模量 E_0 一般取不排水抗剪强度 S_u 的某一倍数,这里根据现场实测资料反算,取 $E_0 = 320S_u$,泊松比 $\mu = 0.45$ 。

由模型试验观察到的现象确定计算模型的接触边界。在主动侧,将桶壁与土体视为两个独立边界,以模拟随荷载增加桶壁与土体相互分离的特性;在被动侧,

将桶壁与土体处理为相互接触的边界。

3.2 网格划分粗细的影响

运用有限元方法计算地基极限承载力,单元网格划分得越小,计算误差就越小,越接近于真实值,但是计算所需时间就越长,计算量也就越大。通过计算比较,当基础附近网格的尺度小于基础宽度的 0.1 倍时,计算出的地基极限承载力变化已不明显。反之,随网格相对尺度增加,计算出的地基极限承载力也逐渐增加,从而使计算结果偏大。若按三维问题计算地基极限承载力,按目前所能达到的计算能力,网格的最小相对尺度远大于基础宽度的 0.1 倍,所以不能准确地模拟地基承载力特性。

4 地基水平承载力

4.1 单桶基础的地基水平承载力

图 3 是有限元计算得到的单桶基础地基破坏模式。结果表明,基础因产生大的刚体转动而失稳,同时伴随少量的整体水平滑移,即地基破坏时基础被动区的土体发生了大的剪切变形,主动侧的土体与桶体间发生分离,这些与模型试验结果相吻合,有限元计算结果显示出的主动区与被动区土压力分布规律与模型试验结果也很相近(见图 2(b))。又因为桶形基础插入土中的深度与基础的宽度(直径)相当,水平力作用下,桶形基础的失稳模式与刚性浅基础的失稳模式类似。

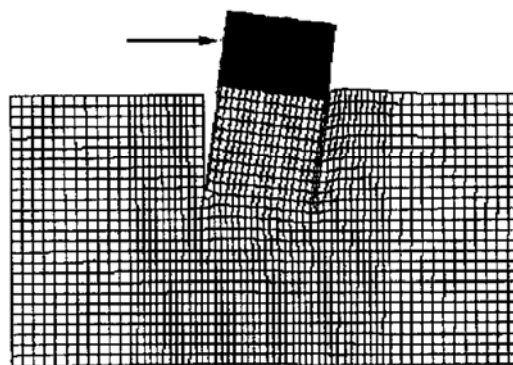


图 3 单桶基础地基的破坏模式

Fig. 3 Failure mode of single bucket footing

基于以上分析,下面建议一种单桶基础水平极限承载力的计算方法。参考极限平衡法中的 Engel 假设^[4],作出水平荷载作用下,单桶基础地基达到极限平衡时的受力分析,见图 4。图中, f 为基础底面受到的摩擦力。根据已有研究,软粘土地基的水平极限承载力的变化范围为 $8 \sim 12 S_u$ ^[4]。由于这里所研究的单桶基础埋深与桶径相当,并且埋深较浅,属于浅埋深基础,因此地基的最大水平极限承载力将小于 $8 \sim 12 S_u$ 。有限元计算结果显示出,被动区的最大土压力

为 $3 \sim 4 S_u$, 与模型试验测出的结果接近。因此将被动区的最大土压力取为 $3.5 S_u$, 即被动区桶体外侧受到的最大土体抗力为 $3.5 S_u$, 并用式 (1) 表示被动区的土压力分布。由于模型试验无法测得受水平荷载时的竖向地基反力, 依据有限元计算结果, 单桶基础破坏时的最大竖向地基反力大约为 $8 S_u$ 。用式 (2) 表示基础底面的地基反力分布。

$$p = -\frac{14S_u}{l^2}z(z-l) \tag{1}$$

$$q_z = \frac{16S_u}{b}y \tag{2}$$

式中 l 为基础埋深; S_u 为地基土的 UU 强度; b 为顺水平作用力方向的基础宽度。

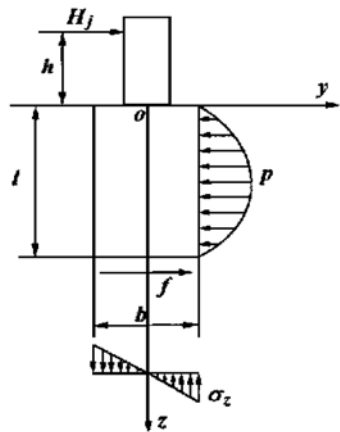


图 4 单桶基础极限平衡受力分析

Fig. 4 The forces acting on a single bucket in limit equilibrium

由 $\sum F_y = 0$ 得

$$H + f = B \int_0^l p \, dz = \frac{7}{3} B l S_u \tag{3}$$

由 $\sum M_0 = 0$ 得

$$Hh + B \int_0^l p z \, dz = fl + 2B \int_0^{\frac{b}{2}} q_y dy \tag{4}$$

由式 (3) 与式 (4) 并考虑到式 (1), (2), 得单桶基础地基水平极限承载力关系式 (5)。

$$H_j = \frac{7Bl^2 + 8Bl^2}{6(h+l)} S_u \tag{5}$$

式中 H_j 为水平极限承载力, kN; B 为垂直于水平作用力方向的基础宽度, m; h 为水平力距地面的距离, m。

式 (5) 是针对矩形基础底面的单桶基础地基水平极限承载力关系式。对于圆形基础底面, 用式 (6) 表示基础底面的地基反力分布, 最后得出圆形基础底面单桶基础地基水平极限承载力关系式 (7)。

$$q_z = \frac{16S_u}{b}y \cos \alpha \tag{6}$$

式中 α 为圆桶外法线与 y 轴的夹角。

$$H_j = \frac{D(14l^2 + 3\pi D^2)}{12(h+l)} S_u \tag{7}$$

式中 D 为圆桶直径 (m), 其它含义同式 (5)。

为了说明上述地基水平极限承载力关系式的适用性, 对具有不同条件的单桶基础进行有限元计算, 然后与上述关系式的计算值进行比较, 结果见表 1。由表 1

表 1 有限元计算结果与式 (5) 计算结果的比较

Table 1 Comparison of results obtained by FEM and Eq. (5)

工况	b/m	l/m	h/m	S_u/kPa	H_i/kN		相对误差 / %	ω/rad
					有限元	式 (5)		
1	0.5	0.5	0.25	3.75	3.3	3.13	5.15	0.036
2	0.5	1.0	0.5	3.75	3.9	3.75	3.85	0.023
3	1.0	1.0	0.3	3.75	8.0	7.20	10.00	0.035
4	1.0	1.0	0.5	3.75	6.5	6.25	3.85	0.032
5	1.0	2.0	1.0	3.75	8.0	7.50	6.25	0.028
6	2.0	2.0	0.6	3.75	15.0	14.40	4.00	0.033
7	2.0	2.0	1.0	3.75	13.2	12.50	5.30	0.036
8	2.0	4.0	2.0	3.75	16.0	15.00	6.25	0.029
9	4.0	4.0	1.2	3.75	30.5	28.90	5.25	0.033
10	4.0	4.0	2.0	3.75	26.0	25.00	3.85	0.032
11	1.0	1.0	0.3	7.00	14.4	13.50	6.26	0.035
12	2.0	4.0	1.0	7.00	35.0	33.60	4.00	0.025
13	2.0	4.0	2.0	7.00	30.0	28.00	6.67	0.028
14	2.0	4.0	1.0	20.00	102.0	96.00	5.88	0.025
15	2.0	4.0	2.0	20.00	82.0	80.00	2.44	0.023
16	2.0	4.0	2.0	40.00	165.0	160.00	3.03	0.026

知,有限元计算结果与式(5)计算结果最大相对误差为10%。因此,从有限元计算角度讲,式(5)能够较好描述软土地基中单桶基础的水平极限承载力特性。同时,运用有限元方法,还计算了单桶基础失稳时的转角 ω ,对于基础宽度与基础埋深相当的桶型基础,其失稳时的转角 ω 在0.02~0.04 rad之间,并且,当基础埋深与基础宽度比 $\frac{L}{b}$ 增加时,地基失稳时的基础转角 ω 也会随之减小。

4.2 双桶基础的地基水平承载力

图5是两桶基础的有限元计算模型,两桶之间用刚性框架连接。框架高0.3 m。水平力 H 施加在框架中点, H 距地表面0.25 m。分别将桶间距取为桶径的0.2,0.5,0.8,1,2,3倍进行计算。两桶基础模型试验表明,水平力作用下,右边桶的附近土体将产生向下的压缩变形,而左边桶的附近土体将有向上产生拉伸变形的趋势,左桶也有拔出土体的趋势。文献[5]通过模型试验得出,桶内负压的保持与土性、加荷快慢、作用时间等因素有关。为此,按两种典型情况考虑桶间距的变化对双桶基础地基承载力的影响:①认为左边桶内的土与桶内侧壁之间有较大摩擦力,且在负压作用下土与桶内侧壁吸附在一起;②认为左边桶内的土与桶内侧壁之间摩擦力很小,土与桶内侧壁不能吸附在一起。图6是分别按第一、第二种情况计算得出的刚性框架右边距地表5 cm处A点(见图5)水平方向位移 y 随 H 的变化关系曲线,取陡降段前一点对应的作用力为地基的水平极限承载力,并与单桶基础的地基水平承载力进行比较(单桶基础的地基水平极限承载力为3.3 kN,见表1),结果见表2,3。表中, $\frac{L}{D}$ 为桶间距与桶径之比, H_j 为双桶基础的每个桶平均分担的水平地基极限承载力,定义 R_h 为多桶效率系数,在这里为双桶水平效率系数, R_h 等于双桶基础每个桶平均分担的地基水平极限承载力与单桶基础的地基水平极限承载力之比。

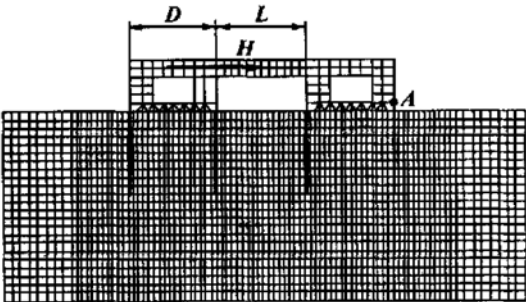


图5 两桶基础有限元计算模型局部图
Fig.5 FEM model of double buckets

表2 按第一种情况计算的水平承载力
Table 2 The calculated horizontal limit bearing capacity of case 1

$\frac{L}{D}$	0.2	0.5	0.8	1.0	2.0	3.0
H_j / kN	7.4	8.7	9.7	10.6	13.8	16.0
R_h	1.21	1.32	1.47	1.61	2.06	2.42

表3 按第二种情况计算的水平承载力
Table 3 The calculated horizontal limit bearing capacity of case 2

$\frac{L}{D}$	0.2	0.5	0.8	1.0	2.0	3.0
H_j / kN	4.8	5.8	6.4	7.1	9.2	10.3
R_h	0.73	0.88	0.97	1.08	1.39	1.56

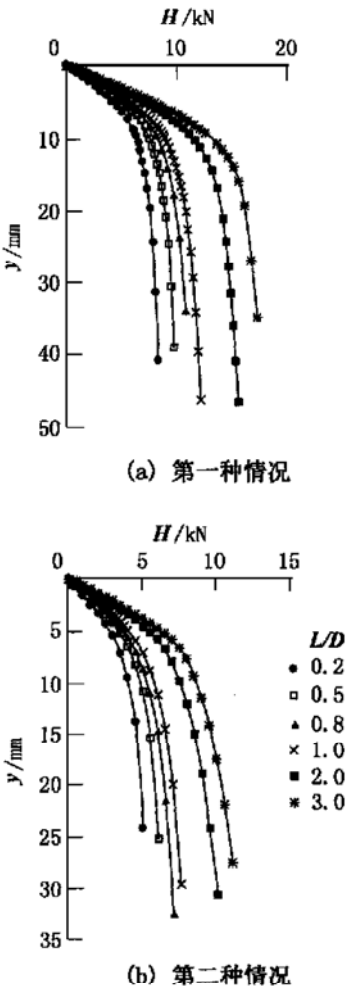


图6 两桶基础水平承载力计算结果
Fig.6 Calculated results of double buckets foundation

表2,3中的结果表明,随桶间距的增加, R_h 增大,地基水平承载能力也在增加。在第一种情况下,地基水平承载能力随桶间距增加的变化更明显,而在第二种情况下,地基水平承载能力随桶间距增加而增大的程度大大减少,当桶间距小于1倍桶径时, $R_h < 1$,地基水平承载能力与单桶相比还有所减小。由此看来,当桶间距增加时,导致地基水平承载力增加的主要原因是左边桶与桶内土体之间的摩擦力以及吸附力。

4.3 试验验证

为了对上述分析结果做进一步验证, 又在一个试验土池内进行了单桶基础和双桶基础的模型试验。试验参数为: 地基土 $S_u = 3.4 \text{ kPa}$, 桶径 $D = 0.3 \text{ m}$, 埋深 $l = 0.5 \text{ m}$, 水平作用力距泥面 0.3 m , 双桶模型的桶间距为 2 倍的桶径。图 7 是试验得到的单桶与双桶基础 $H-y$ 曲线, 其中 y 为单桶和双桶基础地表处的水平位移, 且双桶模型破坏模式与上述的第二种情况一致。据此确定相应的水平极限承载力: 单桶基础为 0.5 kN , 双桶基础为 1.45 kN , 相应的 $R_h = 1.45$, 这与表 3 给出的计算结果接近。同时, 按式(7) 计算的单桶基础地基水平极限承载力 $H_j = 0.46 \text{ kN}$, 这也与模型试验结果接近。

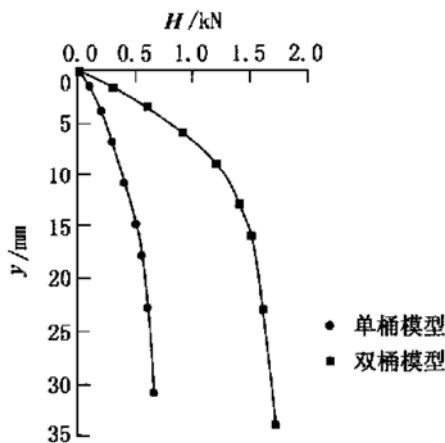


图 7 水平承载力试验结果

Fig. 7 Model test results

4.4 对评价双桶基础的地基水平极限承载力的建议

上述分析表明, 当基础的埋深与桶径相当, 且桶间距在 0.2 倍桶径到 3 倍桶径之间变化时, 如果认为桶内土体与桶壁之间吸附在一起, 那么确定的 R_h 变化范围为 1.21~ 2.42; 如果桶内土体与桶壁之间摩擦力很小, 那么确定的 R_h 变化范围为 0.73~ 1.56。随桶间距

增加, R_h 逐渐增加的特性与水平荷载作用下群桩承载力的变化规律也基本一致^[6]。因此在评价双桶基础的地基水平方向极限承载能力时, 依据单桶基础的地基水平极限承载力, 利用计算得出的 R_h , 即可估算得出双桶基础的地基水平极限承载力。

5 结 语

通过单桶基础的模型试验, 分析得出了水平力作用下单桶基础主动、被动区的土压力分布, 并结合模型试验结果, 确定了有限元计算模型。在此基础上, 分析了水平力作用下单桶基础的地基破坏模式, 采用极限平衡法, 提出了计算单桶地基水平极限承载力的关系式, 对具有不同条件的单桶基础进行了计算比较, 结果表明所得关系式有较好的适用性。最后, 通过有限元计算, 详细分析了双桶基础的地基水平极限承载力随桶间距的变化规律与估算方法, 并通过模型试验, 验证了所得结论, 为进一步研究多桶基础的地基水平承载力提供了参考。

参考文献:

- [1] Morten Baerheim, Statoil, et al. Development and structural design of the bucket foundations for the Europipe Jacket[A]. OTC 27, Vol. 2[C], 1995. 859~ 867.
- [2] Chen W F. Limit analysis and soil plasticity[M]. New York: Elsevier Scientific Publishing Company, 1975. 22~ 23; 179~ 181.
- [3] 张学言. 岩土塑性力学[M]. 北京: 人民交通出版社, 1993. 119~ 120.
- [4] 唐业清, 等译. 桩结构物的计算方法和计算实例[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1984. 16~ 22; 128~ 136.
- [5] 初新杰, 等. 桶形基础的稳定性试验研究[J]. 海洋工程, 1999, 18(1): 43~ 47.
- [6] 陈仲颐, 等. 基础工程学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1990. 314~ 315.

本刊征集广告启事

本刊自开辟广告栏目以来得到岩土工程界人士的广泛赞同和支持。为扩大本刊信息量, 为沟通读者与厂家企业的联系, 本刊将进一步开拓广告版面, 并给长期合作者以优惠。广告简章函索即寄。

本刊广告登记证: 南京工商广字 83477468- 6 联系地址: 本刊编辑部 联系人: 胡海霞小姐