

饱和砂土中桶形基础承载力的实验研究

鲁晓兵 矫滨田 刘亮
(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

【摘要】 桶形基础是近年开发的一种新型的可广泛应用于海洋工程结构的基础形式。由于多种优越性而受到各国石油部门的重视, 并引起许多研究人员的关注。通过在饱和砂中的单桶和四桶基础模型实验, 研究了桶形基础的静承载特性。分别进行了垂直方向和水平方向的加载实验, 其中, 四桶基础水平方向加载又分为沿四桶中心构成的正方形的平行边方向和对角线方向施加, 得到了载荷位移曲线, 对单桶和四桶基础承载力特性, 以及加载方向和速率的影响进行了分析和比较。

【关键词】 桶形基础; 承载力; 饱和砂

【中图分类号】 TU 447

Experimental Study on the Bearing Capacity of Bucket Foundation in Saturated Sand

Lu Xiaobing Jiao Bintian Liu Liang
(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080 China)

【Abstract】 Bucket foundation is a new type of foundation which may be used extensively in offshore structures. It is attracted by oil corporations and researchers because of its several advantages. The static bearing capacity of bucket foundation is studied by experiments of single and four bucket foundation in saturated sand layer. The characteristics of bearing capacity under vertical load and horizontal load are obtained experimentally. The horizontal load of four bucket is applied in the direction parallel to one sideline or one catercorner of the quadrangle formed by the centers of four buckets. The load-displacement curves are obtained. The characteristics of single bucket and four bucket foundation, the effects of load direction and load rate are analyzed.

【Key Words】 bucket foundation; bearing capacity; saturated sand

0 引言

随着海上石油开发的发展, 需要采取新型的平台以节省费用。桶形基础正是近年出现的新型平台基础, 它是上端封闭, 下端开口, 外形像一个倒扣的圆桶。1994 年, 在北海 70 m 水深的区域, 挪威国家石油公司建成了世界上第一座桶形基础平台^[1]。

桶形基础具有以下优点: 节省钢材的用量; 采用负压施工, 加快施工速度; 可以重复使用; 桶形基础插入深度浅, 只需对浅层土体进行勘察。鉴于这些优点, 桶形基础近年来被各国的石油公司所重视^[2-3]。

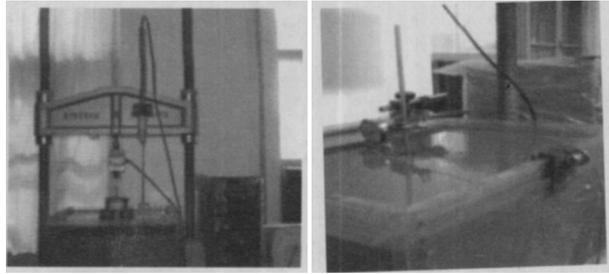
目前国际上已建成的桶形基础海洋平台少, 我国还没有得到足够的实验数据以形成成熟的技术和经验, 迫切需要开展相关的研究。为了考察桶形基础的静承载特性, 人们开展了许多研究工作, 探讨了静拉拔承载力、水平承载力等^[4-9]。这些研究

多数是以单桶为对象。为此, 我们在饱和砂中对四桶和单桶模型的承载力特性分别进行了研究并作了对比。对单桶和四桶基础的垂直和水平承载力在不同条件下的特性分别进行了对比; 对桶顶封口和不封口条件下的承载力特性进行了对比。

1 模型实验

四桶模型是连接在一起的四个钢制圆桶, 桶高 7.2 cm, 直径 4 cm, 壁厚 0.2 cm, 桶中心间距为 10 cm。单桶模型是一个钢制圆桶, 尺寸与四桶中的单桶一致。采用饱和蒙古砂, 干密度为 1.6 g/cm^3 , 置于一个边长为 50 cm 的立方体有机玻璃槽中, 砂面上有约 3 cm 厚的水层, 见图 1。使用量程为 0~30 mm 的百分表测量桶形基础的位移, 使用量程为 0~600 kg 的力传感器测量施加的载荷。先在模型槽中铺砂, 控制干密度为 1.6 g/cm^3 , 当砂层厚度达到 40 cm 后, 再通过模型槽底部的一个圆孔注水, 保

持砂面上有约 1 cm 厚的水层,使砂始终处于饱和状态,注完水后静置 24 h,然后开始实验。



(a) 垂直加载实验布置 (b) 水平加载实验布置

图 1 实验装置照片

2 实验过程

在实验开始前,将力传感器固定于砂槽正中的上方,在砂槽正中放置模型桶,使桶上的细钢杆正对传感器。在桶顶封口和不封口两种条件分别进行垂直加载实验。采用桶顶不封口进行实验时,先让桶在重力作用下自行下沉。待下沉停止后,上升砂槽,使钢杆与传感器刚刚接触。即在力传感器示数恰为零时,停止上升砂槽,设此位置为模型位移的零位

置。装配好位移传感器以测量位移,然后开始加载实验并记录数据。整体设备布置见图 1(a)。采用桶顶封口进行实验时,在实验开始前,在砂槽正中放置模型桶,先让其在重力作用下自行下沉;待下沉停止后,上升砂槽,将模型桶压入砂中,直至桶顶预留的小孔不再有水冒出时停止,用螺丝钉将小孔堵住,并用密封泥密封。

受加载设备限制,垂向加载采用等位移加载方式,加载速率是 0.4 mm/min,同时开始记录力传感器的读数,即记录承载力,位移每变化 0.2 mm 记录一次。当载荷位移曲线趋于水平后终止实验。

在模型桶上部的钢杆上固定一根钢丝绳,通过一个定滑轮挂上托盘。钢丝绳水平静侧拉方向沿模型箱的一边平行。整体设备布置见图 1(b)。横向加载采用载荷控制方式,即加砝码的形式,每级加载量根据实际情况而定。在每次加载后,等待足够长的时间,待位移完全稳定,即百分表指针不再转动时记录数据。当被测点位移超过 10 mm 或模型整体失稳时终止实验。具体实验方案,见表 1。

表 1 实验方案

编号	模型类型	载荷类型	加载速率	备注
1	单桶	垂直压载	逐级施加,静态	不封口,2次重复
2	单桶	垂直压载	逐级施加,静态	封口,2次重复
3	四桶	垂直压载	逐级施加,静态	不封口,2次重复
4	四桶	垂直压载	逐级施加,静态	封口,2次重复
5	单桶	垂直拉拔	1 mm/min	封口,2次重复
6	单桶	垂直拉拔	10 mm/min	封口,2次重复
7	单桶	垂直拉拔	20 mm/min	封口,2次重复
8	四桶	垂直拉拔	1 mm/min	封口,2次重复
9	四桶	垂直拉拔	10 mm/min	封口,2次重复
10	四桶	垂直拉拔	20 mm/min	封口,2次重复
11	四桶	垂直拉拔	0.6 mm/min	封口,2次重复
12	四桶	垂直拉拔	40 mm/min	不封口,2次重复
13	单桶	水平载荷	逐级施加,静态	封口,2次重复
14	四桶	水平载荷	逐级施加,静态	封口,2次重复,载荷沿边线
15	四桶	水平载荷	逐级施加,静态	封口,2次重复,载荷沿对角线。
16	四桶	水平载荷	逐级施加,静态	不封口,2次重复,载荷沿对角线

注:表中“静态”指对应每一级载荷,变形不发展时再加下一级载荷;边线和对角线指四通中心构成的正方形的边线和对角线

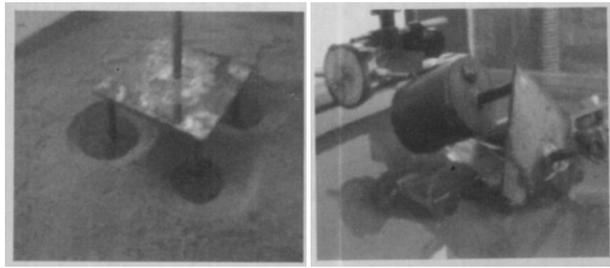
3 实验结果及分析

3.1 垂向载荷

在四桶和单桶的压力载荷实验过程中均可以看到,随着模型桶被压入砂中,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。实验结束后的照片见图 2,可以看到,在垂直载荷下,桶周围土体沉陷而形成

凹坑,在水平载荷下,桶拔出土体而倾倒破坏。单桶和四桶基础在桶顶封口和不封口条件下的压力载荷位移曲线见图 3 和图 4。通过载荷位移曲线可以看出,承载力随位移的增加而逐渐增大并趋于某一最大值,即极限承载力。四桶基础在桶顶封口与不封口条件下的结果对比表明,两种情况下的极限承载力一致(见图 3),图 4 中单桶基础在桶顶封口和不

封口条件下的结果也说明同样的结果。在本文中的实验条件下,四桶基础的压载承载力接近于单桶基础的4倍。它们之间的关系还应与桶间距等因素有关。



(a) 垂直加载实验后照片 (b) 水平加载实验后照片
图2 四桶模型垂直加载及水平加载实验后照片

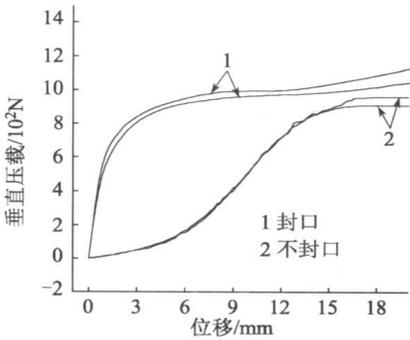


图3 四桶封口与不封口垂直压载实验结果对比

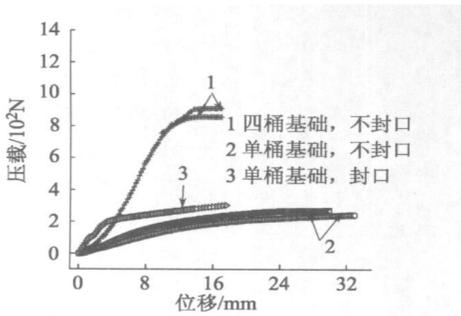


图4 单桶四桶压载实验结果对比

单桶和四桶基础在桶顶封口和不封口条件下的垂直拉拔载荷实验结果见图5和图6。可以看出,在施加垂直拉拔载荷时,随加载速率增加,极限载荷增加,但不是线性变化。在封口和同样加载速率条件下,四桶基础承载力约是单桶承载力的6倍,也就是说,四桶基础导致明显的整体效应。该效应可能还与四桶间距、单桶尺寸等有关系。加载速率对桶基拉拔承载力有相当大的影响,在四桶基础的实验中,当桶顶封口,加载速率为1 mm/min时,极限承载力为200 N;当桶顶不封口,加载速率为40 mm/min时,极限承载力为210 N。

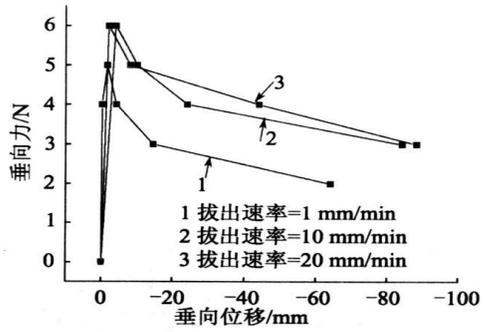


图5 单桶拔出载荷位移曲线

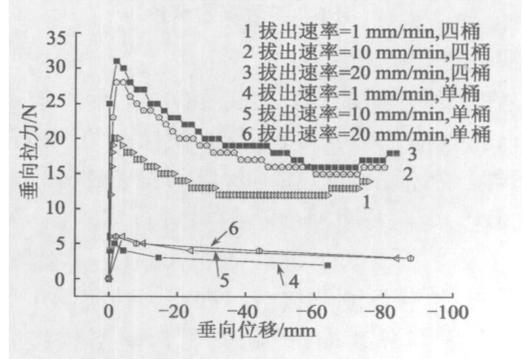


图6 单桶和多桶拉拔载荷位移曲线

3.2 水平载荷

水平载荷沿四桶中心构成的四边形的边线平行方向施加和沿对角线方向施加的承载特性比较见图7。从载荷位移曲线上来看,总体趋势均是水平承载力随位移的增加而逐渐增大。沿对角线方向施加时,在曲线前半段斜率较沿边线平行方向的大,即刚性大;后半段均趋于同样的最大值,即最大值基本相同。桶顶封口与不封口条件下的极限承载力也相同,即桶顶是否封口对桶基的水平极限承载力影响很小。这可能是由于在水平静载下,桶基基本不产生吸力。单桶横向极限承载力约是四桶的1/4。

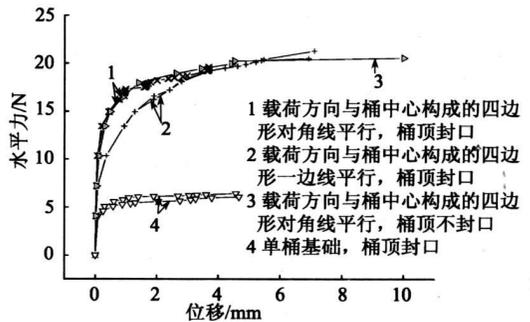


图7 四桶模型沿不同加载方向时的水平载荷位移曲线 (两个方向分别为四桶中心构成的四边形的对角线与边线方向。沿对角线方向还作了开口条件下的实验。)

(下接第199页)

环境条件所限,无法采用除人力挖掘外的其他方法);

3) 灰土拱内的天然土未挖空,并未形成空洞,在建筑荷载下,拱体不存在稳定问题。

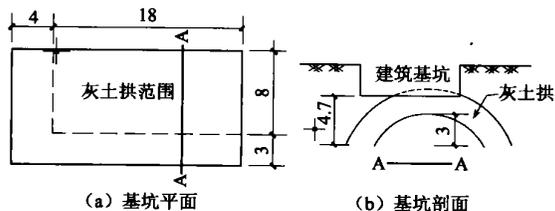


图2 基坑平剖面图(单位:m)

基于以上分析,本着既要改善地基的不均匀状况,又减少开挖工程量的原则,确定灰土拱不动,在基底灰土以外部分的粉质粘土地基下挖2m,然后在挖除的部分用3:7(质量比)灰土夯实回填。经上述处理后,改善了地基不均匀状况,调整了地基沉降,建筑物建成后,效果良好。

1.4 基槽浸水

基槽开挖后,槽底持力层如遭水浸润,土质被泡软,再加上施工过程中人员和机械的践踏扰动,这部分土的天然结构被破坏,承载力大大降低,一般不能作为地基。浸水的原因有多种:如雨季施工,雨水直接淋入槽内或槽外雨水汇集流入槽内;基槽周边地下管道渗漏水流入槽内;基槽开挖施工中,虽然采取降

水措施,降低了地下水位,但基槽及周边土体中仍有可能残留一些地下水。除此而外,还有些特殊的情况,如北郊大屯变电站在勘察时,在基槽开挖深度内无地下水,但在基槽开挖后,槽底普遍存在积水。经调查发现,基槽周围为稻田,勘察时为冬季,稻田无水,而基槽开挖时,正值水稻生长期,稻田水经地下渗入槽内,造成槽底积水。基槽底的积水,一般采用明沟排水,槽底被水浸软的土层和扰动的土层,应挖除。

2 结论

1) 地基验槽是一项技术性和经验性很强的工作,在验槽中发现工程地质问题并妥善处理,就能把安全隐患消除在工程建设之前,从而保障建筑物安全和施工顺利。

2) 地基验槽中,除现场直接观察外,根据情况和需要,有时要采用轻型动力触探、铲探、挖探等查验手段查明情况,以便处理。

3) 建筑场地的地质勘察,除合理布孔,保证勘察精度外,还要注意调查场地环境和地形的变迁,以及地下有无人防洞、地窖、老房基等埋藏物。

参 考 文 献

- [1] 工程地质手册编写委员会. 工程地质手册(第三版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1992.

收稿日期: 2006-02-15

(上接第172页)

4 结论

在本文实验条件下,四桶基础的压载承载力接近于单桶基础的4倍。在施加垂直拉拔载荷时,随加载速率增加,极限载荷增加,但不是线性变化。在不封口和同样加载速率条件下,四桶基础承载力约是单桶承载力的6倍。加载速率大而不封口时的极限拉拔承载力可能比加载速率小但封口条件下的大。四桶平行边方向承载力和对角线方向承载力最大值基本相同,桶顶封口与不封口条件下的极限承载力也相同,即桶顶是否封口对桶基的水平极限承载力影响很小。单桶横向极限承载力约是四桶的1/4。

致谢: 本文的顺利完成,是在赵京、王淑云、单立和王爱兰同志协助下完成的。在此对他们的辛勤劳动表示衷心的感谢!

参 考 文 献

- [1] Bye A, Erbrich C, Earl K, et al. Geotechnical design of bucket foundation[C]. OTC7793, 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.
- [3] 施晓春, 徐日庆, 龚晓南, 等. 桶形基础发展概况[J]. 土木工程学报, 2000, 33(4): 68-73.
- [4] 施晓春, 龚晓南, 等. 桶形基础抗拔力实验研究[J]. 建筑结构, 2003, 33(8): 49-51.
- [5] 张宇. 桶形基础在静载作用下桶-土相互作用机理研究[D]. 北京: 中国科学院力学研究所, 2003.
- [6] 张金来, 鲁晓兵. 桶形基础极限承载力特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(7): 1169-1172.
- [7] 刘振纹, 王建华, 秦崇仁, 等. 负压桶形基础地基水平承载力研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(6): 694-695.
- [8] 刘振纹, 王建华, 袁中立, 等. 负压桶形基础地基竖向承载力研究[J]. 中国海洋平台, 2001, 16(2): 1-6.
- [9] Christensen N H, Haahr F. Breakout resistance of large suction piles[C]. OMAE-Volume F-B, Offshore Technology, Proc. of 10th International Conference of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 1991: 617-622.

收稿日期: 2006-04-18