

水平荷载作用下张力腿平台吸力式基础的物理模拟

张建红¹, 林小静¹, 鲁晓兵²

(1. 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084; 2. 中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘要:介绍了张力腿平台吸力式基础在水平静载和循环动荷载作用下的离心模型试验。通过水平静载离心试验获得了基础的水平承载力。利用电磁式激振器模拟动荷载, 研究在动荷载作用下吸力式基础的动力响应, 并比较了荷载强度和基础刚度对基础动力响应的影响。分析结果表明, 在动荷载作用下, 泥面下1~2 m深度内土体中孔压最大。当动荷载强度超过临界承载力时, 基础周围土体有非常强的液化可能性。综合孔压变化和基础沉降规律分析基础有两种可能的破坏模式: 振动最初1~2 h内的液化破坏和长时间激振后沉降过大引发的问题。将单桶连接成多桶基础, 增大基础刚度, 在相同动载强度下, 周围孔压增长和激振沉降均小于承受相同荷载条件的单桶基础。

关键词: 张力腿平台; 海冰; 振动; 吸力式基础; 动加载设备; 离心机; 孔隙水压力

中图分类号: TU411.5

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2007)01-0077-05

作者简介: 张建红(1967-), 女, 副教授, 主要从事海洋土力学及环境岩土工程研究。E-mail: cezhangjh@tsinghua.edu.cn。

Physical modelling of suction foundations of TLPs under horizontal loads

ZHANG Jian-hong¹, LIN Xiao-jing¹, LU Xiao-bing²

(1. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Institute of Mechanics, China Academy of Science, Beijing 100080, China)

Abstract: The results of centrifuge model tests on the behavior of suction bucket foundations of a TLP under static and cyclic horizontal loads were presented. The ice-sheet induced structural vibration was simulated as an equivalent cyclic lateral load by an electro-magnetic actuator. The effects of the load intensity and the geometry of the foundation were investigated. The static horizontal bearing capacity of the foundation was determined by the static tests. It was indicated by the results of dynamic centrifuge tests that the excess pore water pressure reached the highest value within a depth of 1~2 m below the mud line. The pore pressures and the induced settlement increased with the increase of the amplitudes of the cyclic loadings. Two failure modes might be involved: liquefaction in the early excitation and settlement induced problem after long term excitation. However, with the increase of stiffness of the bucket foundation, the pore pressures and the induced settlement decreased.

Key words: TLP; ice sheet; vibration; suction foundation; static and dynamic loads; centrifuge; pore water pressure

0 引言

吸力式桶型基础(简称桶基)是底端敞开、上端封闭的钢制圆桶, 因其通过圆桶封闭端的抽气口抽气进行沉贯安装而得名。工作过程中, 基础封闭端产生被动吸力, 从而获得比传统型式基础更好的承载性能, 国内外已开展了很多相关的研究^[1-3]。图1为典型的张力腿海洋平台及其桶型基础。桶基结构简单, 承载力高, 适应性强, 能显著节省运输、施工、场地调查等方面的费用, 并且可以重复使用。近年来被广泛用于海洋平台基础、人工岛护岸、码头、防波堤等建设中。本文针对张力腿平台桶型基础进行研究。

图2是张力腿平台桶基受力示意图, 其中静荷载主要是基础自重、平台预加载、海洋冰盖对平台的静压; 低频荷载为风、洋流和潮汐等对平台的作用, 可

以近似作为拟静力荷载处理; 波浪荷载的频率略高, 约为0.1~0.25 Hz; 高频荷载主要包括冰排破碎引起的结构和地基基础振动, 及风暴对平台的冲击等, 频率约为0.8~1 Hz, 可持续数小时或者更长。

清华大学开展了一系列张力腿平台桶基在水平静动荷载作用下的离心模型试验。本文选择两组静载和三组动载试验结果分析吸力式基础的静水平承载力, 不同荷载强度和基础刚度下吸力式基础的动力响应。

1 离心模型制备与试验步骤

本文的试验是在清华大学 50gt 土工离心机上进

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50679035); 清华大学基础研究基金资助项目(JCxx2005067)

收稿日期: 2005-11-01

行的^[4]，离心加速度为 80g。为了解决动态离心模型试验中的比尺矛盾^[5]，采用一种渗透性约为原型 1/40 的粉质砂土，表 1 列出了土物理力学特性。动态试验中孔压消散的速度是孔压增长速度的 80 倍，因此本试验所测得的累积孔隙水压力偏低。

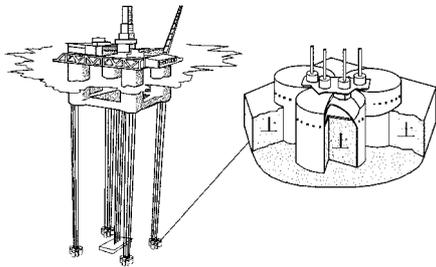


图 1 张力腿平台及其吸力式基础^[1]
Fig. 1 TLP and suction foundations^[1]

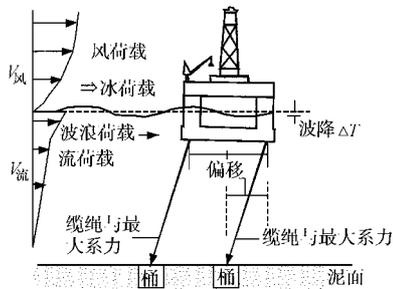


图 2 张力腿平台桶基受力示意图^[2]
Fig. 2 Forces acting on the TLP^[1]

图 3 为离心模型试验系统示意图。模型箱净空间 35 cm×60 cm×35 cm。试验中采用的模型桶直径 6 cm，高 7.2 cm（原型桶径 4.8 m，高 5.76 m）。圆桶为钢制薄壁中空圆桶，桶顶有可以闭合的小孔。外径为 8 mm 的钢管焊接在桶顶，用于模拟钢制导管或者张

力腿等结构。在模型箱中，按照干密度 1.52 g/cm³ 将粉砂击实，将桶压入土中至桶顶与土面相平。将模型箱用厚有机玻璃板密封，保持 740~760 mm 汞柱的真空度对模型箱抽真空，并从模型箱底部缓慢通无气水直至水面高于土层表面 1 cm。经测试土样饱和度可达 97% 以上。地基在 80g 下固结 40 min（相当于 1g 下固结 6 个月），原型固结沉降约 80 cm。固结后粉砂的干密度为 1.6 g/cm³，属于中密状态。固结完成后封闭桶顶小孔，开始加载。

施加静载时采用气动油压加载设备，主要包括液压油缸和力传感器，如图 3 所示。水平力通过力传感器量测。桶杆处的水平位移由位移传感器 L1、L2 量测，L1、L2 与桶杆处于在同一个竖直面，分别在桶杆加载点上、下 2 cm 处，加载点在桶顶上方 8 cm。由 L1、L2 点量测的位移可以计算桶顶位移及桶的转动角度。桶周围土体的变化通过一个彩色摄像头监视和录像。施加动载采用电磁式激振器，文献[6, 7]中有详细介绍。动载频率为 64 Hz，历时 20 min（原型频率 0.8 Hz，历时 26.7 h）。在距离桶壁 5 mm 和 3 mm 处（原型 40 cm、24 cm）沿深度埋设两列孔压传感器以监测土层中的孔压变化。桶顶的位移传感器用于记录激振沉降。为方便起见，下文的描述均采用原型数据。

2 静载离心试验结果及分析

桶基承受弯矩和水平荷载的联合作用，本文没有分析加载点高度对桶基承载特性的影响。图 4 (a) 和 4 (b) 为两次重复试验的荷载 - 桶顶位移和荷载 - 桶转角关系曲线。图 4 (c) 给出荷载 - 位移梯度关系曲线^[8]，并确定出临界承载力 $H_c=327$ kN，极限承载力 $H_u=513$ kN。图 4 (d) 列出荷载 - 桶基转动中心关系

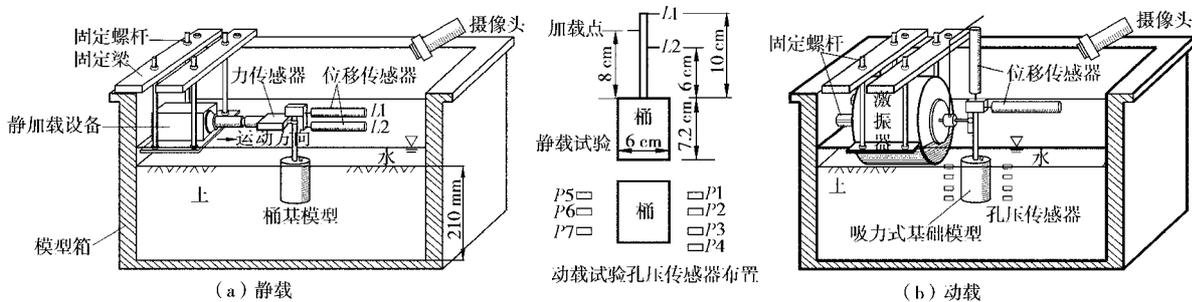


图 3 离心模型孔隙水压力传感器布置示意图

Fig. 3 Layout of the pore pressure transducers of centrifuge models

表 1 地基土性参数

Table 1 Properties of the soil

分类	d_{60}/mm	d_{10}/mm	比重	塑性指数 I_p	干密度/(g·cm ⁻³)	渗透系数/(cm·s ⁻¹)	c'/kPa	φ'
粉质砂土	0.15	0.035	2.69	8.7	1.60	2×10^{-4}	0	35°

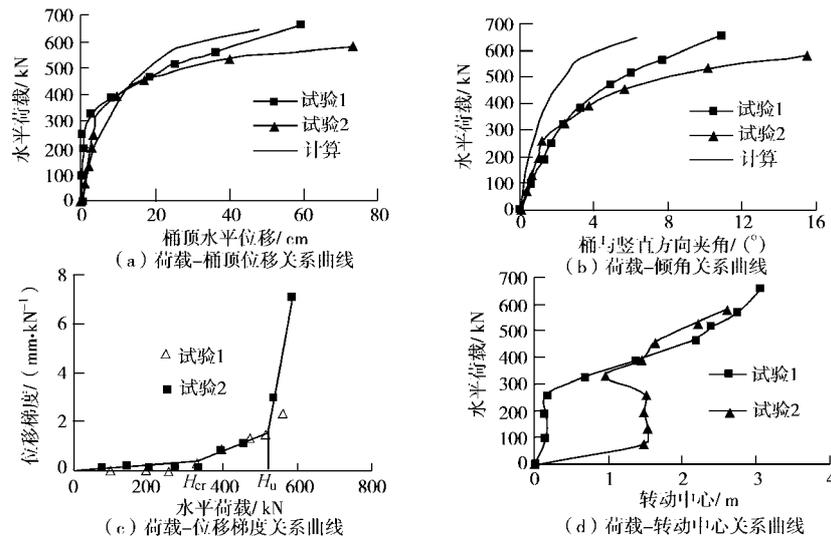


图 4 桶基在水平静荷载作用下的关系曲线

Fig. 4 Curves of foundation under static lateral load

曲线, 曲线横轴为桶基转动中心与桶顶的距离。从图 4 (d) 可以看出, 随着荷载的增加, 桶基转动中心总体趋势是逐渐下移。可见浅层土体首先充分发挥承载力, 而后逐渐向深层土体发展, 最终达到土体的整体破坏。图 5 为试验后桶基变形特征。

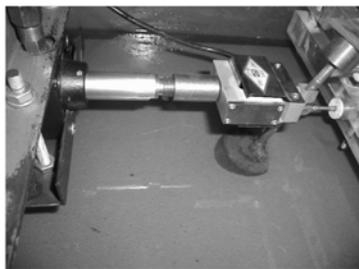


图 5 试验结束后桶基的变形特征

Fig. 5 Bucket foundation after centrifuge tests

采用商业有限元软件 MSC.MARC 进行桶基承载特性分析, 地基考虑为弹塑性材料, 桶壁与地间设置刚塑性薄层接触面单元。图 6 为桶基的变形特征。试验和计算得出的水平荷载 - 桶顶位移曲线基本一致 (如图 4 (a)), 转角曲线有一定差别 (如图 4 (b)), 原因在于没有考虑加载点的高度。

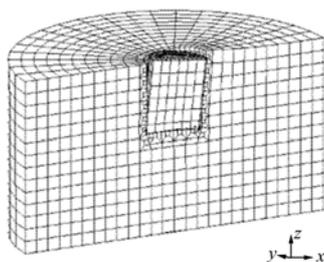


图 6 有限元分析得出的桶基失效模式

Fig. 6 Results of finite element analysis

3 水平循环荷载下离心模型试验结果及分析

3.1 荷载强度对承载特性的影响

为考察冰荷载强度对基础的承载特性的影响, 对基础施加频率为 0.8 Hz, 强度为 384 kN (大于临界静承载力) 和 128 kN 的动荷载, 历时 26.7 h。这里荷载强度指的是半波峰值。

图 7 为距桶壁 24 cm 的孔压传感器 P1~P4 测出的孔压时程曲线, 将各曲线上孔压最大值与传感器埋深的关系显示在图 8 (a) 中, 并将动孔压比 (孔压与初始竖向有效应力之比) 与传感器埋深的关系显示在图 8 (b) 中。图 8 (c) 是激振过程中桶基的沉降曲线。从图 7 可看出, 激振的第一个小时内, 孔压迅速上升。当动荷载强度超过临界承载力时, 浅层土体中的孔压先随时间增加达到一个峰值, 然后随时间减小; 相应的动孔压比接近 1, 见图 8 (b), 液化的可能性非常大。深层土体或荷载强度比较低时, 孔压基本上随时间增加。说明高荷载强度时浅层土体容易发生剪胀, 而深层土体或荷载强度较低时, 土体主要发生剪缩。

由图 8 (a) 可见, 孔压最大值出现在土面以下 1~2 m 之间, 浅层土体容易发生液化, 而后孔压随埋深降低, 2~4 m 之间, 曲线有一拐点或极值点, 说明基础在振动过程中, 以土面以下 2~4 m 之间某一点为转动中心, 该点的振动幅度相对较小, 所以周围土体的孔压增长较小。动载时基础转动中心比受同等大小静载时略为靠下, 说明了基础的动载效应。

与孔压规律相似, 沉降主要发生在加载初期, 而后随时间增长曲线趋于平缓, 如图 8 (c) 所示。经过 26.7 h 的激振后, 基础周围土体被振密, 并产生沉降,

沉陷区域呈椭圆状(椭圆长轴为激振方向)。基础内保持了完整的土塞,由于桶内土体孔压累积,靠近桶顶的土塞松软且含水率较大,而靠近桶底处则较密实。

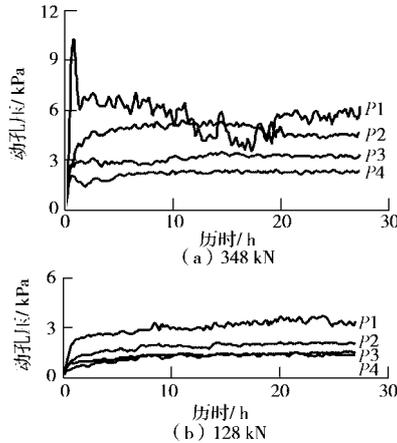


图7 动荷载强度为384 kN和128 kN下土体中孔隙水压力时程曲线

Fig. 7 Excess pore pressure in the models under the loads of 384 kN and 128 kN

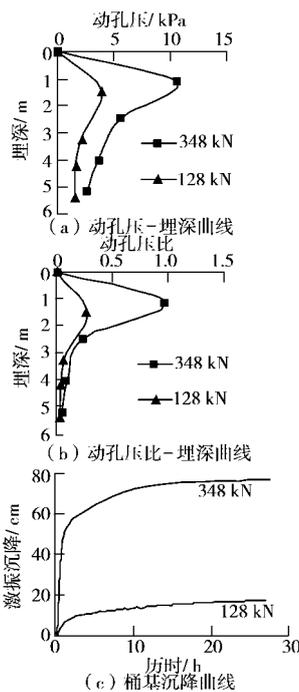


图8 两种荷载强度下3种曲线

Fig. 8 Curves of the foundation under two load intensities



图9 激振后的桶基

Fig. 9 Bucket foundation after the excitation

综合孔压变化和基础沉降规律分析基础有两种可能的破坏模式:振动最初1~2 h内的液化破坏和长时间激振后沉降引发的问题。

3.2 基础刚度对承载特性的影响

为考察基础刚度对承载特性的影响,设计了一个4桶基础,如图10所示。每个桶基尺寸与单桶相同,用0.4 m厚的钢板模拟平台自重并连接各桶,按正方形排列,桶顶中心距为10 m。孔压传感器布置如图10。先对基础施加峰值为384 kN动荷载(对应单桶荷载峰值96 kN)。20 h后,将荷载峰值增加到704 kN(对应单桶荷载峰值176 kN),持续8 h。

基础受384 kN(单桶荷载96 kN)的荷载时,孔压时程曲线只有微小波动。因此,这里列出后期704 kN荷载强度下(单桶荷载176 kN)时的孔压时程曲线,并与128 kN荷载单桶试验结果相比较。

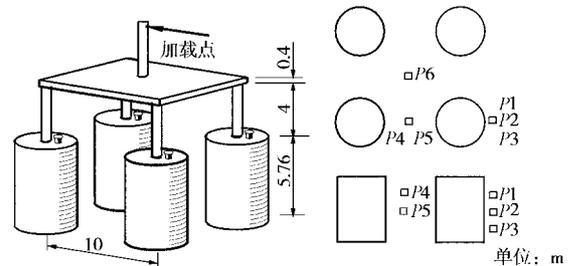


图10 4桶基础和孔压传感器布置图

Fig. 10 Four-bucket foundation and the layout of pore pressure transducers

多桶基础周围土体在动荷载作用下主要为剪缩,与单桶基础所得结论一致,如图11和图7(b)所示。孔压随埋深的变化趋势与单桶基础有一定区别。单桶基础在基础底部还有相当大的孔压增长。多桶基础在水平动载作用下,孔压随埋深增加先达到一定峰值,随后又迅速减小。在靠近基础底部位置,基本没有孔压增长。说明多桶基础中,荷载只对浅层土体有影响。而且由于桶基的屏蔽作用,两桶内侧的孔压远小于外侧。

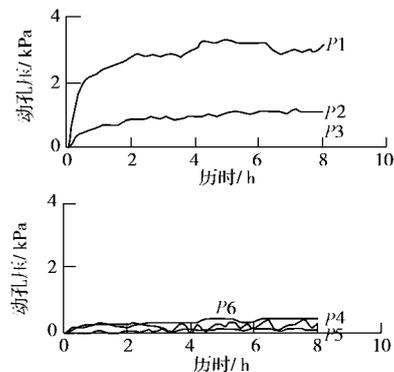


图11 4桶基础孔压时程曲线(动荷载峰值704 kN)

Fig. 11 Excess pore pressure in the four-bucket model under the load of 704 kN

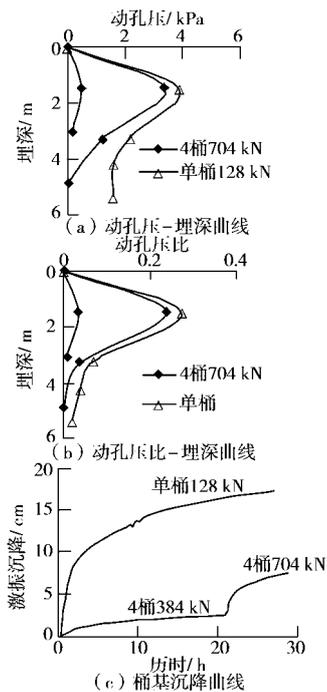


图 12 两种荷载强度下 3 种曲线

Fig. 12 Curves of the foundation under two load intensities

荷载峰值为 704 kN (对应单桶荷载峰值 176 kN) 时的孔压变化与单桶 128 kN 荷载的孔压相比, 虽然前者荷载强度略大, 但孔压增长仍然小于单桶基础。多桶基础的激振沉降只有 7.5 cm, 且周围土体基本没有变化, 而单桶基础在激振后沉降为 17.4 cm。可见, 将单桶组合成多桶基础, 增大基础刚度, 可以大大提高基础的强度和稳定性。

4 结 论

本文配置了与渤海湾原状土有近似级配的粉质砂土, 进行了静、动水平荷载下粉砂地基中吸力式基础的离心模型试验, 得到如下结论:

(1) 静载离心模型试验确定了桶基的水平承载力, 临界承载力为 327 kN, 极限承载力为 513 kN。FEM 分析结果与试验荷载位移曲线较为接近。随着水平荷载的增加浅层土体首先充分发挥承载力, 而后逐渐向深层土体发展。

(2) 水平动荷载作用下, 孔压最大值出现在泥面以下 0~1.5 m 之间, 而后又随埋深降低。基础有两种可能的破坏模式: 激振最初 1~2 h 内的液化破坏和长时间激振后沉降过大引发的问题。

(3) 不同荷载强度下孔隙水压力的变化规律和基础沉降量有很大区别。低荷载下, 土体以减缩为主,

孔隙水压力上升至稳定值, 液化可能性非常小。当动荷载峰值为静承载力的 70% 时, 土体先减缩后剪胀, 浅层土体的动孔压比已经接近 1, 液化可能性非常大。

(4) 4 桶连接构成刚度较大的基础, 在水平动荷载作用下, 最大孔压和沉降均小于相同荷载条件下的单桶基础。

参考文献:

- [1] PRAKASHA K S, JOER H A, RANDOLPH M F. Establishing a model testing capability for deep water foundation systems[C]// *Frontier in Offshore Geotechnics*, 2005: 309 - 315.
- [2] 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与分析[J]. *海洋工程*, 2004, 22(2): 90 - 97. (ZHANG Jian-hong, SUN Guo-liang, YAN Dong, LU Xiao-bing. Geotechnical centrifuge modeling on suction caissons [J]. *The Ocean Engineering*, 2004, 22(2): 90 - 97. (in Chinese))
- [3] CAO J C. Centrifuge modeling and numerical analysis of the behavior of suction caissons in clay[M]. Newfoundland: St. John's of Memorial University, 2003.
- [4] PU J L, LIU F D, LI J K, LI S Q, et al. Development of medium-size geotechnical centrifuge at tsinghua university[C]// *Proc of Int Conference Centrifuge 94*. Singapore, 1994: 53 - 56.
- [5] KUTTER B L, JAMES R G. Dynamic centrifuge model tests on clay embankments[J]. *Geotechnique*, 1989, 39(1): 91 - 106.
- [6] 张建红, 孙国亮, 鲁晓兵. 离心机中动冰荷载的模拟[J]. *岩土工程学报*, 2005, 27(4): 474 - 477. (ZHANG Jian-hong, SUN Guo-liang, LU Xiao-bing. Centrifuge modeling of cyclic loading induced by ice-sheet [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2005, 27(4): 474 - 477. (in Chinese))
- [7] ZHANG J H, YAN D, SUN G L, LI W X. Development of a dynamic loading device for suction pile in centrifuge[C]// *BGA International Conference on foundations: innovations, observations, design and practice*. Scotland, 2003: 985 - 990.
- [8] JGJ 94-94 建筑桩基规范[S]. 1995. (JGJ 94-94 Technical code for building pile foundations [S]. 1995. (in Chinese))