

软土中单桶基础竖向循环承载力的模型试验*

曲延大¹, 王建华²

(1. 中海油田服务股份有限公司 天津 300451; 2. 天津大学岩土工程研究所 天津 300072)

摘 要: 利用真空预压法制备了一个大尺寸软土模型试验土池, 针对两种不同直径桶型基础, 进行了多组竖向静荷载与循环荷载共同作用下单桶基础承载力的模型试验, 研究了软土中单桶基础循环承载力的变化。研究表明, 如果基础受到的竖向总荷载比小于 0.85, 则循环荷载作用下基础的竖向累积沉降随循环次数的变化趋势是安定的; 如果竖向总荷载比大于 0.9, 那么基础的竖向循环累积沉降将逐渐增加, 并最终导致基础破坏; 如果竖向总荷载比接近或大于 1.0, 基础的循环累积沉降发展加快, 而且此时竖向静荷载越大, 竖向循环累积沉降发展就越快。依据模型试验结果可以得出, 竖向静荷载与循环荷载共同作用下, 软土中单桶基础的循环承载力大约为静承载力的 80% 左右。

关键词: 桶型基础; 模型试验; 循环承载力; 海洋平台基础; 软土地基

桶型基础是海洋平台一种重要的基础, 由于其造价低、可移动, 很适合在海洋软土海床中使用。尤其是在边际油田的开发中, 更能发挥其可移动的特点。海洋平台经常会承受来自风浪和冰等循环荷载的作用, 评价循环荷载作用下软土中桶型基础的承载力是桶型基础设计的一项重要内容。

评价循环荷载作用下桶形基础承载力的方法有: ① 拟静力循环强度分析法^[1-4]。该方法通过定义土单元的循环强度, 将荷载对土体的循环作用等效为土体强度的改变。进而依据土动力试验建立的循环强度随循环平均应力变化的关系, 由地基不同土单元的循环平均应力确定相应的循环强度, 再通过有限元计算分析静荷载与循环荷载共同作用下地基的循环承载力。② 拟静力二维极限平衡法^[5-8]。利用此方法分析桶型基础的循环承载力, 需要将三维问题转换成二维问题, 尽管已有的一些工作表明这种转换是可行的, 但是这种方法不能很好反应地基土与基础之间的相互作用。③ 依据各向异性增量弹塑性理论, 建立描述软土循环特性的弹塑性本构关系, 借助增量弹塑性有限元方法分析地基的循环承载力^[9-10]。利用循环弹塑性本

构关系, 分析地基循环承载力特点是能够跟踪循环应力路径, 较直观描述地基的循环破坏过程。但是, 由于波浪引起的循环荷载次数成百上千, 采用这种方法不但计算量巨大, 还可能由于计算误差的积累导致计算结果不收敛。需要注意的是, 利用上述这些方法得出结果的合理性尚缺乏模型试验验证。

进行软土中桶型基础循环承载力模型试验的主要困难在于: 软土层的制备周期长, 试验必须具备专用的超低频循环加载装置, 而且由于一次制备的模型试验土层需要多次使用, 很难保证每一次模型试验具有完全一致的土性条件。因此, 关于软土中桶型基础循环承载力的模型试验报道较少。

鉴于以上分析, 本研究利用真空预压方法制备了一个大尺寸模型试验软黏土土池, 采用电气伺服超低频循环加载装置, 进行了软土中单桶基础在竖向静荷载与竖向循环荷载共同作用下的承载力模型试验。本研究目的在于通过模型试验对软土中桶形基础循环承载力的变化有一个定量认识, 同时也为评价软土中桶型基础循环承载力方法的合理性提供一些可供验证的模型试验数据。

* 基金项目: 国家自然科学基金项目 (50879055)。

1 模型试验

1.1 模型试验土池与模型试验装置

模型试验土池长与宽各 1.8 m, 高 2.1 m, 土池四周采用钢板支撑 (图 1)。土池内部放置一个可以密封的橡胶布膜袋。在膜袋底部铺设 26 cm 厚的粗砂反滤层, 在反滤层中间埋设与外部真空排水系统相接的排水管网共同组成真空预压室。采用淤泥质黏土制备软土地基。制备时, 先将土配制成含水量为 80%~86% 的泥浆, 然后分层放入土池膜袋内, 直至土池中泥浆深度接近 1.8 m。在泥浆的上下表面以及四周铺设了 5 mm 厚土工布作为排水路径, 加速预压固结速度。采用真空泵作为真空源。抽真空期间膜袋上部的真空预压荷载基本维持在 50 kPa 左右, 预压后土层厚 1.50 m, 图 2 是预压后土层的情况。在模型试验前, 通过取样测定试验土层的含水量以及三轴不固结不排水强度。由于不同部位的土性指标有一定差异, 表 1 给出了模型试验软土层的平均物理力学指标。



图 1 模型试验土池

表 1 模型试验土层的基本参数

| 天然容重 /kN/m ³ | 含水量 /% | 液限/% | 塑限/% | 不排水强度 Su/kPa |
|----------------------------|-----------|------|------|-----------------|
| 17.5 | 54.5 | 57.7 | 28.9 | 8.0 |

钢质模型试验桶直径为 160 mm 与 270 mm 两种, 壁厚 8 mm, 高径比 1.5, 桶顶部预留一个直径 12 mm 与真空贯入设备相连的抽气孔, 在桶顶面中心处安装一连接铰杆与竖向循环加载装置相接 (图 3)。

使用电气伺服低频循环加载装置在载荷控

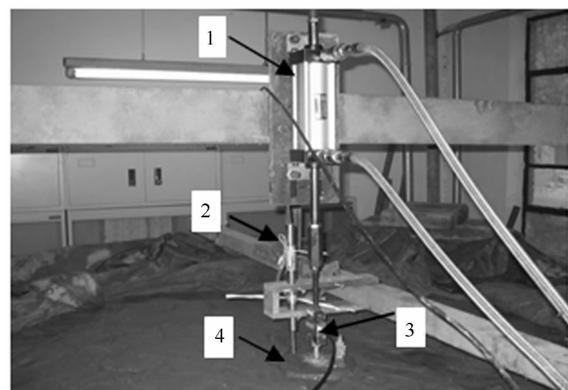


图 2 真空预压后的试验土层



图 3 模型试验桶

制条件下给基础施加竖向静荷载与循环荷载, 循环荷载频率为 0.1 Hz, 形式为正弦。图 4 是模型试验加载装置与测量传感器布置图。



1—伺服加载装置; 2—位移传感器; 3—力传感器; 4—模型桶

图 4 模型试验竖向循环加载与测量装置

利用与桶顶中心连接铰杆相接的荷载传感

器 3 测量给基础施加的竖向静荷载与竖向循环荷载, 同时力传感器采集的信号也作为伺服控制反馈信号进行精确的加载控制。利用差动变压器式位移传感器 2 (LVDT) 测量基础在竖向静荷载作用下的竖向沉降以及在竖向循环荷载作用下的附加循环累积沉降。

1.2 试验步骤

计算结果表明, 桶型基础的竖向循环承载力取决于循环荷载作用前基础受到的竖向静荷载。为此选择不同的竖向静荷载分别进行循环承载力模型试验, 具体过程如下。

(1) 利用负压方法将桶沉入软土中, 为恢复沉贯过程对地基土体扰动带来的影响, 基础沉入地基后静置 2 天再进行试验。

(2) 为进行循环承载力试验, 首先采用单调分级加荷试验方法确定基础的竖向静极限承载力 V_f 。

(3) 施加循环荷载前, 参考基础的竖向静承载力 V_f , 利用分级加荷方法给基础施加一定的竖向静荷载 V_a 。

(4) 当最终竖向静荷载作用下的竖向位移稳定后, 仍然参考基础的静承载力 V_f , 再给基础施加竖向循环荷载 V_{cy} , 直到基础的竖向静沉降与循环累积沉降达到规定的破坏标准为止。对于为达到破坏标准的试验, 最大循环次数控制在 2 000 次以内。试验过程中, 利用计算机 A/D 转换技术记录竖向循环荷载时程与循环沉降时程。

(5) 每次试验后, 利用正压将桶拔出土层, 然后对试验处的土层进行平整并静置恢复 3 天后再进行下一次试验。

表 2 与表 3 分别给出了 160 mm 直径桶、270 mm 直径桶模型试验的安排及试验结果。表中的 $d_{v,s}$ 是循环荷载作用前静荷载作用下的竖向沉降, $(d_{v,a})_f$ 是竖向荷载作用后, 达到预定的竖向沉降破坏标准时需要的循环累积沉降, N_f 是桶在静荷载作用下的竖向沉降与循环荷载作用下的累积沉降与之和达到破坏标准时的荷载循环次数, 即循环破坏次数。

表 2 160 mm 直径桶模型试验安排及试验结果

| 编号 | V_a/V_f | $d_{v,s}/\text{mm}$ | $(d_{v,a})_f/\text{mm}$ | V_{cy}/V_f | $(V_a+V_{cy})/V_f$ | 是否破坏 | N_f |
|----|-----------|---------------------|-------------------------|--------------|--------------------|------|-------|
| S1 | 0.535 | 0.78 | 7.20 | 0.226 | 0.761 | 否 | — |
| S2 | 0.425 | 0.44 | 7.56 | 0.368 | 0.793 | 否 | — |
| S3 | 0.417 | 0.42 | 7.58 | 0.405 | 0.822 | 否 | — |
| S4 | 0.714 | 2.40 | 5.60 | 0.379 | 1.093 | 是 | 148 |
| S5 | 0.574 | 0.98 | 7.02 | 0.429 | 1.003 | 是 | 175 |
| S6 | 0.672 | 1.84 | 6.20 | 0.306 | 0.978 | 是 | 333 |
| S7 | 0.450 | 0.50 | 7.50 | 0.436 | 0.906 | 是 | 1 160 |
| S8 | 0.626 | 1.37 | 6.63 | 0.343 | 0.886 | 是 | 1 270 |

表 3 270 mm 直径桶模型试验安排及试验结果

| 工况 | V_a/V_f | d_{sv}/mm | $(d_{v,a})_f/\text{mm}$ | V_{cy}/V_f | $(V_a+V_{cy})/V_f$ | 是否破坏 | N_f |
|----|-----------|--------------------|-------------------------|--------------|--------------------|------|-------|
| L1 | 0.311 | 0.73 | 12.77 | 0.462 | 0.773 | 否 | — |
| L2 | 0.431 | 1.47 | 12.03 | 0.361 | 0.792 | 否 | — |
| L3 | 0.643 | 4.11 | 9.39 | 0.310 | 0.953 | 是 | 824 |
| L4 | 0.439 | 1.55 | 11.95 | 0.466 | 0.905 | 是 | 1 270 |
| L5 | 0.293 | 0.65 | 12.85 | 0.590 | 0.883 | 是 | 1 690 |

2 模型试验结果分析

2.1 竖向静荷载作用下的承载力

对于 160 mm 直径桶, 分别在土池的不同部

位进行了 3 次竖向静承载力模型试验, 对于 270 mm 直径桶, 分别在土池的不同部位进行了 2 次竖向静承载力模型试验, 图 5 给出了试验得到桶的顶面中心处竖向沉降随归一化静荷载

(即静荷载 V_a 与静极限承载力 V_f 之比) 的变化曲线。在图 5 中, 之所以用竖向静荷载 V_a 与竖向静承载力 V_f 的比表示竖向荷载的大小, 是因为土池不同部位的土性具有一定差异、每次模型试验的沉桶过程对土体扰动的程度也不同, 因此每次模型试验结果之间存在一定偏差, 采用归一化荷载, 可以消除每次模型试验由于土层强度差异导致的离散性。参考已有研究, 这里按桶的竖向沉降达到桶径的 5% 确定基础的竖向静承载力 V_f 。综合多次模型试验结果, 对于 160 mm 直径桶, $V_f=0.784$ kN, 对于 270 mm 直径桶, $V_f=2.107$ kN。

2.2 竖向循环荷载作用下基础的沉降

模型试验结果表明, 当竖向循环荷载 V_{cy} 大于竖向静荷载 V_a 时, 基础的竖向循环变形较大, 同时伴随竖向循环累积沉降, 此时循环荷载越大, 循环变形也就越大, 且循环变形随荷载循环次数增加有逐渐变大的趋势。当竖向循环荷载小于竖向静荷载时, 循环变形减小, 循环累

积沉降随荷载循环次数的增加变得更加明显。另外, 基础的循环累积沉降增量在循环加载初期较大, 随竖向循环荷载次数增加有逐渐减小的趋势。图 6 是两种典型情况对应的基础顶部竖向位移时程曲线。图 7 给出了试验得到的基础典型竖向循环荷载位移滞回曲线, 图 8 是实测的竖向循环荷载作用下基础沉降的情况。

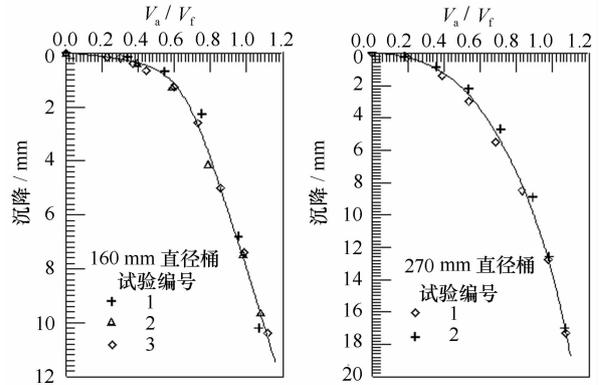


图 5 静承载力模型试验得到的竖向沉降随归一化荷载变化曲线

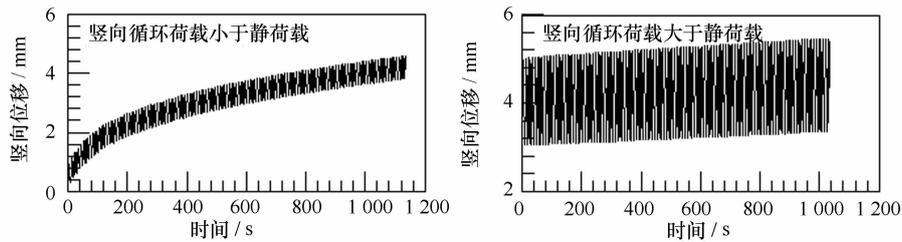


图 6 两种典型的基础顶部竖向位移时程曲线

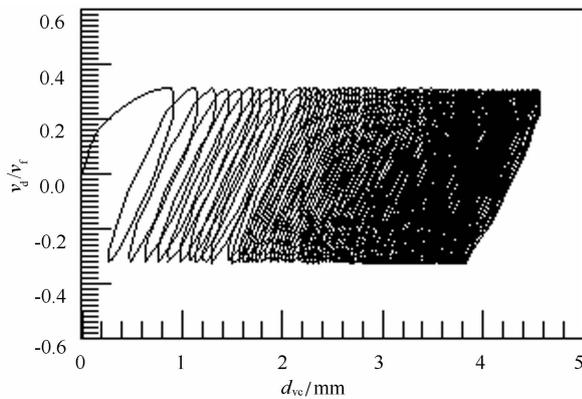


图 7 基础竖向循环位移随荷载变化的滞回曲线



图 8 基础竖向竖向沉降情况

2.3 竖向循环承载力

图 9 和图 10 分别给出了由 160 mm 直径桶模型试验以及由 270 mm 直径桶模型试验得到的基础竖向循环累积沉降随荷载循环次数 N 的变化关系。由于基础在静荷载作用下会产生相应的沉降, 循环荷载作用后又会产生附加的循环累积沉降。因此按两部分荷载产生的沉降之和达到竖向沉降破坏标准确定循环承载力是恰当的。这里仍然按照静荷载与循环荷载共同作用下基础竖向总沉降达到桶径的 5% 确定循环破坏次数与相应的循环承载力。

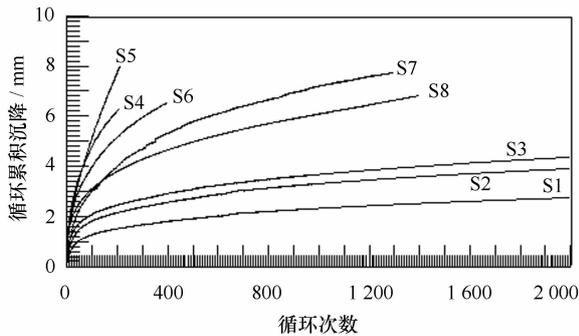


图 9 160 mm 直径桶的循环累积沉降随循环次数的变化关系

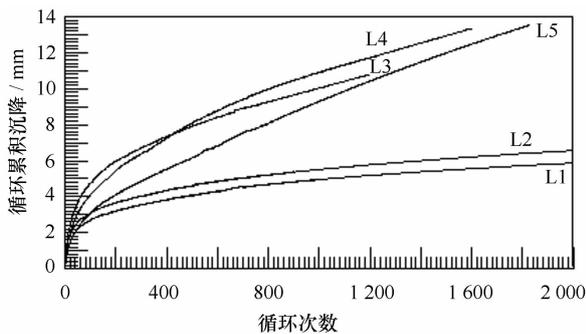


图 10 270 mm 直径桶的循环累积沉降随循环次数的变化关系

对于给定的静荷载比 V_a/V_f , 首先按图 5 中的归一化荷载位移曲线确定静荷载作用下的沉降, 然后按图 9 和图 10 给出的循环累积沉降随循环次数变化关系曲线确定达到破坏标准时对应的循环次数 N_f , 最后按式 (1) 确定与该循环破坏次数对应的竖向循环承载力 $V_{f,cy}$ 。这里用 $V_{f,cy}/V_f$ 表示循环承载力的大小, 表 2 与表 3 中达到破坏标准的 $(V_a + V_{cy})/V_f$ 就是与 N_f 对应的循环承载力比 $V_{f,cy}/V_f$ 。

$$V_{f,cy} = (V_a + V_{cy})_f \quad (1)$$

表 2 和表 3 中的模型试验结果表明, 如果竖向总荷载比 $(V_a + V_{cy})/V_f$ 大于 0.85, 那么循环荷载作用下的累积沉降将逐渐增加, 最终会使基础达到竖向沉降破坏标准。如果竖向总荷载比 $(V_a + V_{cy})/V_f$ 接近 1.0 或者大于 1.0, 循环荷载作用下基础的循环累积沉降发展加快, 而且此时竖向静荷载比越大, 竖向循环累积沉降发展就越快。如果竖向总荷载比 $(V_a + V_{cy})/V_f$ 小于 0.8, 那么循环荷载作用下的累积沉降变化趋势随荷载循环次数增加将逐渐趋于稳定, 此时基础循环累积沉降的变化是安定的。因此, 这里的模型试验结果显示, 竖向静荷载与循环荷载共同作用下, 软土中单桶基础的承载力大约降低至静荷载作用下单桶基础承载力的 80% 左右。

3 结论

用真空预压方法制备了一个大尺寸软黏土模型试验土池, 采用电气伺服控制循环加载装置进行了软土中单桶基础在竖向静荷载与循环荷载共同作用下的承载力模型试验。试验结果表明: 利用真空预压方法能够在在大尺寸试验土池内制备出满足模型试验要求的软土层; 如果竖向总荷载比 $(V_a + V_{cy})/V_f$ 大于 0.85, 那么基础的循环累积沉降将逐渐增加, 最终使基础达到竖向沉降破坏标准; 如果竖向总荷载比 $(V_a + V_{cy})/V_f$ 接近 1.0 或大于 1.0, 那么基础的循环累积沉降发展加快, 而且此时竖向静荷载越大, 竖向循环累积沉降发展就越快; 如果竖向总荷载比 $(V_a + V_{cy})/V_f$ 小于 0.8, 那么基础的循环累积沉降变化趋势随荷载循环次数增加将逐渐趋于稳定。因此, 依据本研究进行的模型试验结果, 竖向静荷载与循环荷载共同作用下, 软土中单桶基础的承载力大约降低至静荷载作用下单桶基础承载力的 80% 左右。

参考文献

- [1] WANG Jianhua, LI Chi, MORAN K. Cyclic undrained behavior of soft clays and cyclic bearing capacity of a Single bucket foundation[C]// International Society of Offshore and Polar Engineers,

- Proceeding of the Fifteenth International Offshore and Polar Engineering Conference, Seoul, Korea, 2005:392-399.
- [2] 王建华,杨海明. 软土中桶形基础水平循环承载力的模型试验[J]. 岩土力学,2008,29(10): 2606-2612.
- [3] 刘振纹,软土地基上桶形基础的稳定性研究[D]. 天津:天津大学,2002.
- [4] WANG Jianhua, LIU Yuanfeng, XING Yan, et al. Estimation of undrained bearing capacity for offshore soft foundation with cyclic loads[J]. China Ocean Engineering, 1998, 12(5): 213-222.
- [5] ANDERSEN K H, LAURITZSEN R. Bearing capacity for foundations with cyclic loading[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1988, 114(5): 540-555.
- [6] ANDERSEN K H, JOSTAD H P. Foundation design of skirted foundations and anchors in clay[C] //Offshore Technology Conference. Houston, Texas, USA;1999:10824.
- [7] ANDERSEN K H. Bearing capacity under cyclic loading-offshore, along the coast, and on land[J]. Canada Geotechnical Journal, 2009, 46(3): 513-535.
- [8] ANDERSEN K H, DYVIK R. Model tests of gravity platform II: Interpretation [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1989, 115(11): 1550-1568.
- [9] PREVOST J H. Offshore gravity structures: analysis[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1981, 107(2): 143-165.
- [10] 王建华,要明伦. 软黏土不排水循环特性的弹塑性模拟[J]. 岩土工程学报,1996,18(3):11-18.