

DOI: 10.16285/j.rsm.2016.2870

软黏土中吸力锚循环失稳过程的模型试验

程星磊^{1,2}, 王建华¹, 王哲学¹

(1. 天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072; 2. 天津城建大学 天津市软土特性与工程环境重点实验室, 天津 300384)

摘 要: 开展了张紧式吸力锚在侧壁最优系泊点处遭受平均荷载和循环荷载共同作用下的模型试验, 着重研究了软黏土中吸力锚在等幅及变幅循环荷载下的变形失稳过程。研究发现, 循环累积位移过大是锚发生破坏的主要原因。对于等幅循环加载试验, 由于竖向附加荷重的施加, 锚在水平向的循环累积位移要明显大于竖向, 表现为明显的水平破坏模式。在特定的平均荷载水平下, 循环荷载水平越高, 锚的累积位移发展得越快, 达到破坏所需的循环次数就越少。循环位移随循环次数的增长变化不明显, 但随循环荷载水平的增大而增大。对于变幅循环加载试验, 系泊点各方向的循环累积位移与循环位移均与循环荷载水平成正比。不同的循环加载时程下, 锚的竖向累积位移均比水平累积位移大, 表现为偏向于竖向破坏的中间破坏模式。锚前期的循环加载历史对后续加载产生的累积变形有明显影响。与静力加载相比, 循环加载时锚的运动方向角有所增大, 这可能是由于锚底孔压的累积要大于锚侧孔压的累积, 从有效应力的角度分析, 锚底有效应力的减少相对锚侧明显, 进而使得锚竖向承载力减小得更多, 导致锚的竖向运动更明显。

关 键 词: 吸力锚; 模型试验; 循环荷载; 循环变形; 软黏土

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2018) 09-3285-09

Model experiment on cyclic instability process of suction anchors in soft clays

CHENG Xing-lei^{1,2}, WANG Jian-hua¹, WANG Zhe-xue¹

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Key Laboratory of Soft Soil Engineering Character and Engineering Environment of Tianjin, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China)

Abstract: Model tests of the suction anchors with taut mooring systems are conducted under combined average and cyclic loads at the optimal loading point on the side wall of anchors. The deformation instability process of suction anchor subjected to constant and variable amplitude cyclic loads are investigated. It is found that too large cyclic accumulative displacement is the main reason for the failure of anchor. The cyclic accumulative displacement of anchor in the horizontal direction is larger than that in the vertical direction due to application of the vertical additional loads, so the horizontal failure of suction anchors occurs for the constant amplitude cyclic loading tests. The accumulative displacement increases faster with higher cyclic load level at a given average load level, and the number of cycles to failure becomes less. The cyclic displacement does not change obviously with the increase of the number of cycles, but increases with the increase of cyclic load level. The cyclic accumulative displacement and cyclic displacement in each direction at the mooring point increase with the increase of cyclic load level for variable amplitude cyclic loading tests. The accumulative displacements are larger in vertical than in horizontal under different cyclic loading time histories, so the moderate preferring vertical failures of anchors occur. Besides, the previous cyclic loading histories have an obvious influence on the accumulative deformation produced by subsequent loading. Compared with the static loading, the movement direction angle of the anchor under cyclic loading increases, which may be due to the greater accumulation of pore pressure at the bottom of the anchor than that at the side wall. From the view of effective stress, the decrease of effective stress at the bottom is relative obvious than that at the side wall, thus vertical bearing capacity decreases more remarkably, and vertical movement of anchor is more obvious.

Keywords: suction anchors; model tests; cyclic loads; cyclic deformation; soft clays

收稿日期: 2016-12-06

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.51579174); 天津市高等学校基本科研业务费资助项目 (No.2016CJ04, No.2016CJ01)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51579174) and the Fundamental Research Funds for the Universities in Tianjin City (2016CJ04, 2016CJ01).

第一作者简介: 程星磊, 男, 1987 年生, 博士研究生, 主要从事土的动力特性及本构关系方面的研究工作。E-mail: chengxinglei110@163.com

通讯作者: 王建华, 男, 1955 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事土动力学与海洋岩土工程方面的研究工作。E-mail: tdwjh@tju.edu.cn

1 引言

深水能源的开发已成为中国海洋发展战略的关键。张紧式吸力锚作为深水环境中浮式平台的一种重要基础形式,其应用越来越广泛^[1]。许多情况下张紧式吸力锚基础是建在海底软黏土地基上的,在海洋极端环境中,一方面会承受平衡上部结构所受浮力而引起的张拉荷载(平均荷载),另一方面还会承受由风、浪、流等多种环境因素引起的循环荷载^[2]。因此,研究平均荷载和循环荷载共同作用下软黏土中吸力锚的变形失稳过程,了解其破坏模式及破坏机制对吸力锚基础的设计有重要意义。

关于循环荷载作用下的吸力锚基础,国内外学者已开展过一些试验研究。Dyvik^[3]、Andresen^[4]等通过开展 1g 条件下的现场试验,研究了吸力锚在竖向循环荷载作用下的承载力;Clukey 等^[5]在黏土中进行了 10g 条件下的离心模型试验,研究了竖向循环荷载作用下吸力锚的抗拔承载力特性;El-Gharbawy 等^[6-7]开展了 1g 条件下的室内模型试验,研究了吸力锚顶部遭受竖向或者倾斜循环荷载作用时,荷载频率、排水条件等对吸力锚承载力及破坏模式的影响;Allersma 等^[8-9]分别在黏土和砂土中开展了循环荷载及长期竖向加载条件下的吸力锚离心模型试验,研究了长径比、循环荷载幅值、加载速率等对吸力锚承载力的影响。Chen 等^[10-12]在正常固结黏土、轻微超固结黏土和敏感性黏土中进行了一系列 120g 条件下的离心模型试验,研究了吸力锚在长期持续荷载和循环荷载作用下的抗拔承载力特性以及外部径向应力的变化。

综上所述,以往研究更多着重于锚的极限承载力及其相关影响因素,如加载频率、荷载幅值等,通常是锚的顶部遭受竖向或倾斜荷载,很少涉及在锚侧壁最优系泊点作用倾斜循环荷载的研究。为此,刘晶磊^[13]、王建华^[14-15]等已对在侧壁最优系泊点处遭受平均荷载和循环荷载共同作用的张紧式吸力锚基础开展过相关试验研究,然而试验主要偏向于锚承载力特性的研究,且由于加载设备试验条件的限制,采用的锚径相对偏小。本文拟将锚径增大,继续开展吸力锚在侧壁最优系泊点处遭受平均荷载和循环荷载共同作用下的模型试验,并着重研究其循环失稳过程。另外,吸力锚在海洋环境中所承受的循环荷载并非总能保持等幅特性,事实上荷载幅值往往会随时间发生变化。因此,本文也将研究吸力锚遭受荷载幅值随时间变化的变幅循环荷载作用时的变形失稳过程,还尝试利用适当的孔压传感器研

究吸力锚在循环荷载作用下周围土体的孔压变化规律,以便更好地理解锚的失稳破坏机制。

2 模型试验土层及试验设备

2.1 模型试验土层

模型试验在长×宽×高=1.5 m×1.0 m×1.2 m 的模型箱内开展,试验用土为取自天津塘沽滩海地区的淤泥质软黏土,利用真空预压法制备试验土层^[13],制备好的土层单位重度为 17.5 kN/m³,塑限为 27.01%,液限为 44.44%,塑性指数为 17.43。模型箱内土层十字板剪切强度 S_u 沿深度线性增长,基本在 3~15 kPa 之间,如图 1 所示。

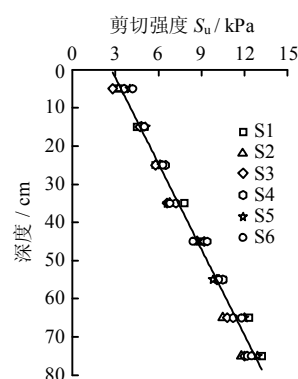


图1 土层强度沿深度分布
Fig.1 Shear strength of soft clay along depth

2.2 模型锚

模型锚采用不锈钢材料制作,表面光滑,为增加其与土层之间的摩擦系数,进而增强其竖向承载力,在锚外壁附加一层钢丝网,以增强其粗糙程度。为利用负压将锚贯入土层,在锚顶设置一个排气阀,以便使锚内土塞与真空负压装置连接。为观察锚在贯入过程以及试验过程中锚内土塞的变化,在锚顶同时设置了一个密封的有机玻璃观察孔。此外,在锚的侧壁设置了若干个系泊点调节孔,以便于确定最优系泊点的位置。模型锚的直径为 15.2 cm,当加载方向角(系泊方向与水平方向的夹角)为 30° 时,最优系泊点位置约在距锚顶以下 27 cm 处,最优系泊点的确定方法可参考文献[13]。锚的具体参数见表 1,覆盖钢丝网的模型锚见图 2。

2.3 模型试验加载及测量装置

模型试验采用可改变系泊方向的加载导向装置,见图 3。该装置由加载架、导向板和导向滑轮组成。上部导向滑轮固定,下部导向滑轮可按照试验要求调节其在导向板上的位置。模型试验采用自主研发的多功能便携式电动伺服控制加载装置,该

表1 模型锚的基本参数

Table 1 Parameters of model anchors

锚径 D/m	锚长 L/m	长径比 L/D	锚壁厚度/ m	摩擦系数
0.152	0.456	3	0.002	0.26

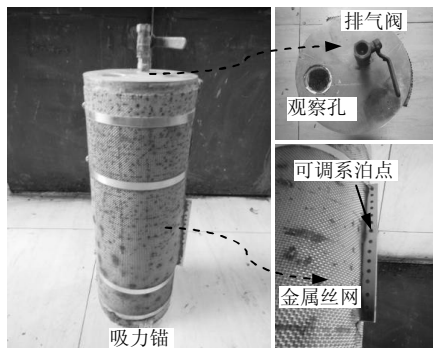


图2 覆盖金属丝网的模型锚

Fig.2 Model anchor covered with metal wire mesh

装置由计算机控制系统、伺服控制系统、加载执行机构、控制量反馈设备及测量量传感器组成，可以在力控制或位移控制模式下实现静力及循环加载，并结合数据采集装置实现力和位移的采集^[13]。模型试验中，利用4个位移传感器分别测定锚的斜向、水平向与竖向位移（近土体主动区与被动区分别布置一个竖向位移传感器），利用力传感器测定吸力锚系泊荷载，传感器的布置也示于图3。

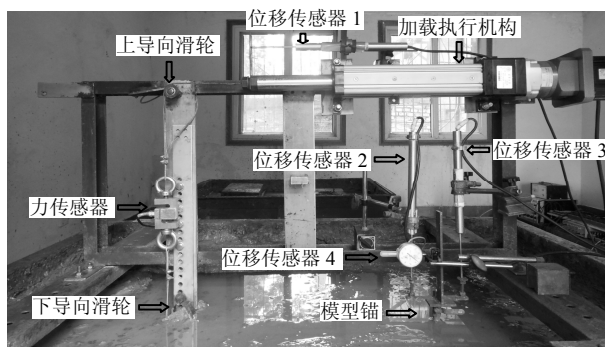


图3 加载导向及测量装置

Fig.3 Test apparatus and measuring transducers

为测定循环加载时孔压的变化，在锚底和锚侧各布置一个孔压传感器，布置方式如图4所示，锚底孔压测点在锚底面正下方5.0 cm处，锚侧测点在距锚壁中央5.0 cm处，埋设于锚侧被动区土体中。

部分模型试验开展过程中，为增大锚的竖向极限抗力，除在锚壁覆盖一层金属丝网外，还在锚顶施加一定的附加荷重，如图5所示。附加荷重大小用 W 表示。

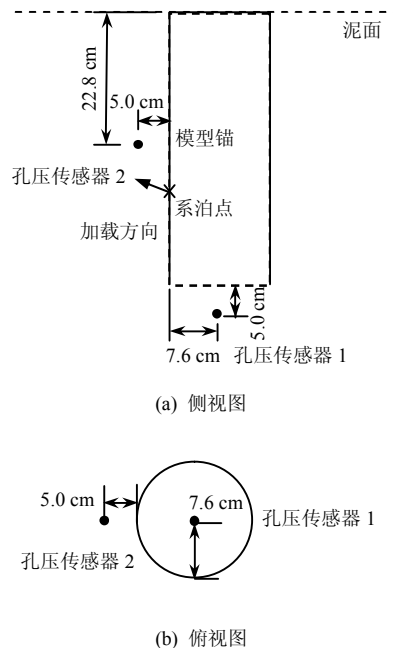


图4 孔压传感器布置示意图

Fig.4 Layout of pore pressure sensors

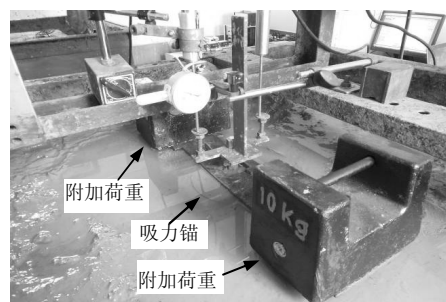


图5 锚顶施加附加荷重方法

Fig.5 Additional weight applied to the top of anchor

3 模型试验方法

模型试验包括静力单调加载试验、等幅循环加载试验和变幅循环加载试验。等幅循环加载试验过程中锚顶施加30 kg附加荷重，变幅循环加载试验无附加荷重施加。静力加载试验也包含有附加荷重及无附加荷重两种工况。开展静力加载试验的目的是为了获得软黏土中模型锚的静极限承载力以及归一化荷载-位移曲线，同时确立相应加载条件下的位移破坏标准，为开展循环加载试验时荷载的施加奠定基础。

静力加载试验主要步骤如下：① 利用十字板剪切仪测定试验位置处的土层强度，采用负压加荷方式将锚贯入到预定位置。静置约一周后开始试验，以减少沉锚对土体扰动的影响。② 在锚的最优系泊点处分别以力控制模式和位移控制模式，沿着加载

方向施加单调荷载,力控制模式下采用分级加荷方式施加荷载;位移控制模式下,加载速率为0.01 m/h。加载过程中,锚的竖向位移、水平位移、系泊方向位移及系泊方向力被实时测量,当位移持续增长,而力无明显增长时,认为此时锚的承载力达到极限状态,土体发生破坏,试验停止。 F 和 F_f 分别表示施加的荷载大小及破坏时的极限承载力。图6显示了锚沿系泊方向归一化的荷载-位移曲线,图6(a)相应试验过程中有30 kg附加荷重施加,而图6(b)无附加荷重。由图可得,对于竖向有附加荷重的锚破坏位移约为0.5倍锚径,无竖向荷重的锚破坏位移约为0.6倍锚径。

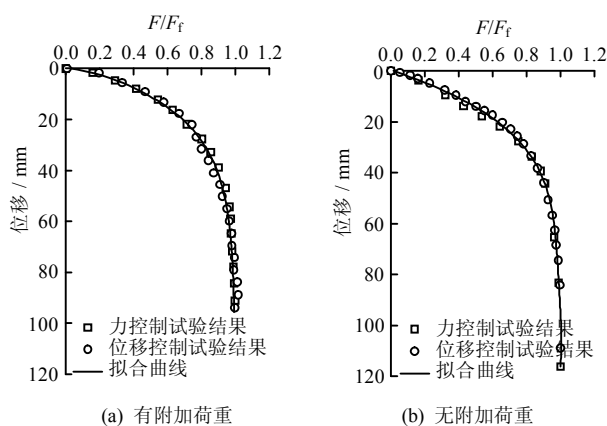


图6 归一化荷载-位移曲线
Fig.6 Normalized load-displacement curves

等幅循环加载试验主要步骤如下:①与静力单调加载一致,试验前先测定土层强度,然后沉锚。②按预定的静荷载比 F_a/F_f ,采用分级加荷方式沿系泊方向给锚施加静力拉伸荷载 F_a 。考虑到每次试验锚周围土体的强度有一定的差异,极限承载力 F_f 也有所不同,为此,参考图6所示的系泊方向归一化荷载-位移曲线,以 F_a/F_f 对应的位移作为施加静荷载大小的位移控制标准,当施加的荷载 F 达到相应的位移控制标准时,此时的荷载即为预定静荷载比下给锚施加的静力拉伸荷载(平均荷载) F_a ,并据此确定每次模型试验对应的静极限承载力 F_f ($F_f = F_a/(F_a/F_f)$)。③待静力拉伸荷载作用下的位移稳定后,参考第2步确定的静极限承载力 F_f ,按预定的循环荷载比 F_{cy}/F_f 沿系泊方向给锚施加正弦等幅循环荷载 F_{cy} ($F_{cy} = F_f(F_{cy}/F_f)$),荷载频率为0.1 Hz,当静荷载作用下系泊点沿系泊方向的静位移与循环荷载作用下的循环累积位移之和达到锚的位移破坏标准时(0.5倍锚径),停止试验。试验后利用正压将锚拔出土层,对试验处土层进行平整恢复。

变幅循环加载试验主要步骤如下:前两步与等幅循环加载试验一致,区别在于第3步,即循环荷载的施加,循环荷载不是一直保持幅值不变,而是按照设定的循环荷载时程分阶段的施加,即参考第2步确定的静极限承载力 F_f ,按预定的3个阶段的循环荷载比 F_{cy1}/F_f 、 F_{cy2}/F_f 和 F_{cy3}/F_f ,给锚依次施加相应循环次数的正弦等幅循环荷载 F_{cy1} 、 F_{cy2} 和 F_{cy3} ,加载频率均为0.1 Hz,当静荷载作用下系泊点沿系泊方向的静位移与多级循环荷载作用下的循环累积位移之和达到锚的位移破坏标准时(0.6倍锚径),停止试验。

等幅循环加载与变幅循环加载下的试验安排分别见表2、3。表2中的 N_f 为循环加载破坏次数,表3中的 N_1 、 N_2 、 N_3 分别是变幅循环加载3个阶段相应的荷载循环次数。

表2 等幅循环加载试验安排
Table 2 Programs for constant amplitude cyclic loading tests

编号	F_f / kN	$\frac{F_a}{F_f}$	$\frac{F_{cy}}{F_f}$	$\frac{F_{f,cy}}{F_f}$	N_f /次
T1	2.40	0.5	0.44	0.94	55
T2	2.50	0.5	0.40	0.90	94
T3	2.38	0.5	0.35	0.85	210
T4	2.32	0.5	0.30	0.80	351

表3 变幅循环加载试验安排
Table 3 Programs for variable amplitude cyclic loading tests

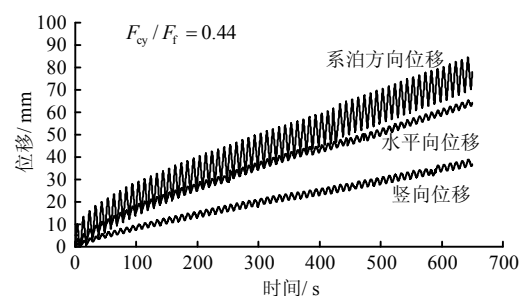
编号	F_f / kN	$\frac{F_a}{F_f}$	$\frac{F_{cy1}}{F_f}$	N_1 /次	$\frac{F_{cy2}}{F_f}$	N_2 /次	$\frac{F_{cy3}}{F_f}$	N_3 /次
T5	2.00	0.5	0.15	100	0.25	100	0.38	45
T6	2.12	0.5	0.21	100	0.38	80	0.30	20
T7	1.94	0.5	0.32	50	0.23	100	0.38	20
T8	2.15	0.5	0.33	50	0.21	50	0.33	80

4 模型试验结果

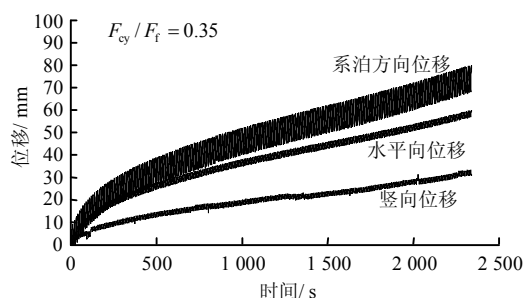
4.1 等幅循环荷载下锚的变形失稳过程

图7给出了编号为T1、T3试验吸力锚系泊点沿系泊方向、竖直方向以及水平方向的位移时程曲线。由图可见,锚在各方向的循环累积位移(平均位移)均远大于循环位移(振动位移),循环累积位移过大是锚发生破坏的主要原因。锚在水平向的循环累积位移要明显大于竖向,但水平向与竖向的循环位移相当。图8给出了不同循环荷载水平下系泊方向位移时程的对比。可以看出,静荷载比一定时,循环荷载水平越高,锚的累积位移发展得越快,达到破坏时所需的循环次数就越小。特定的循环荷载水平下,循环位移随循环次数的增长变化不明显;

但在不同的循环荷载水平下, 循环位移随循环荷载水平的增大而增长。



(a) 试验 T1



(b) 试验 T3

图7 等幅循环荷载下锚的位移时程曲线

Fig.7 Displacement-time curves of anchor under constant amplitude cyclic loads

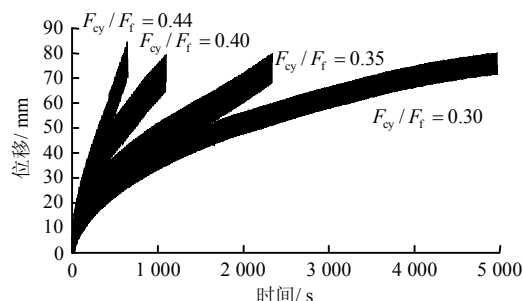


图8 不同循环荷载水平下锚系泊方向的位移时程曲线

Fig.8 Displacement-time curves of anchor along mooring direction under different cyclic load levels

为确定模型试验中锚的破坏模式, 参考文献[13], 对张紧式吸力锚在静荷载与循环荷载共同作用下的破坏模式给予简要介绍。如图9所示, 点 A 是系泊点, A' 是锚发生平移后的系泊点位置, α 是加载角, β 是运动方向角。当 $\beta < 40^\circ$ 时, 锚为水平破坏; 当 $\beta > 60^\circ$ 时, 锚为竖向破坏; 而处于 $40^\circ \sim 60^\circ$ 之间时, 锚为介于水平破坏与竖向破坏之间的中间破坏模式。

图10给出了锚的运动方向角随系泊方向位移的变化。由图可见, 随系泊位移的增加, 不同荷载水平下锚的运动方向角基本保持在 33° 左右。由上文关于锚破坏模式的定义可知, 锚的破坏表现为典

型的水平破坏模式。等幅循环加载下锚发生水平破坏时典型的变形情况如图11所示。由图可见, 锚发生平移破坏, 破坏时锚与主动区土体之间出现一较大裂缝, 被动区土体发生隆起并伴随有裂隙产生。锚破坏时的水平位移明显大于竖向位移。

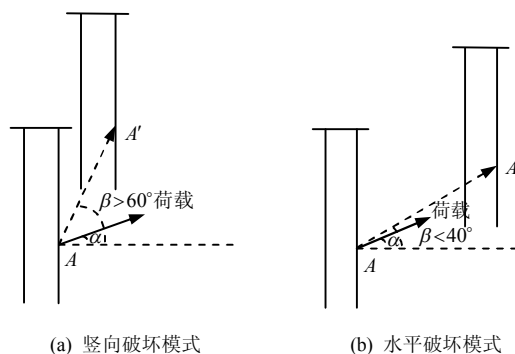
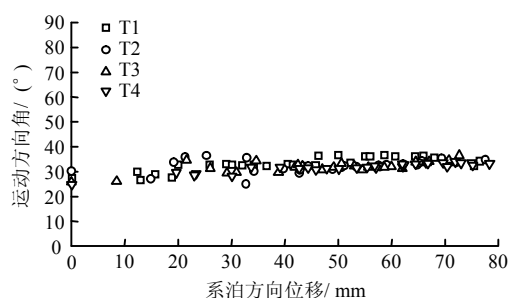
图9 锚破坏模式的判断
Fig.9 Judgment of failure modes of anchors

图10 水平破坏模式下锚运动方向角随系泊位移的变化

Fig.10 Movement direction angle versus displacement along mooring direction in horizontal failure mode

图11 水平破坏模式的锚
Fig.11 Anchor in horizontal failure mode

对于循环加载试验, 当获得锚系泊点的位移时程后, 可以依据静力单调加载试验得到位移破坏标准, 按系泊点沿系泊方向的静位移与循环累积位移之和达到该位移破坏标准(0.5倍锚径)时确定循环破坏次数 N_f , 此时静荷载与循环荷载之和即为相应破坏次数下的循环承载力:

$$F_{f,cy} = F_a + F_{cy} \quad (1)$$

式中: F_a 为循环荷载作用之前锚所受的静荷载; F_{cy} 为吸力锚所受的循环荷载; $F_{f,cy}$ 为吸力锚的循环承载力。

循环承载力的大小可用循环承载力与静极限承载力的比值 $F_{f,cy}/F_f$ 反映:

$$F_{f,cy}/F_f = F_a/F_f + F_{cy}/F_f \quad (2)$$

式中: F_f 为吸力锚的静极限承载力。

表 2 给出了不同循环荷载水平下锚的循环承载力大小与相应的循环破坏次数。将不同循环荷载水平下的 $F_{f,cy}/F_f$ 与 N_f 绘于图 12, 并用直线函数对试验结果进行拟合, 发现两者在半对数坐标内基本满足线性关系。因此可以利用拟合所得直线函数预测不同循环荷载水平下相应的循环破坏次数。

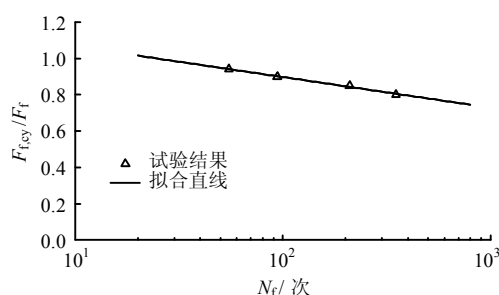
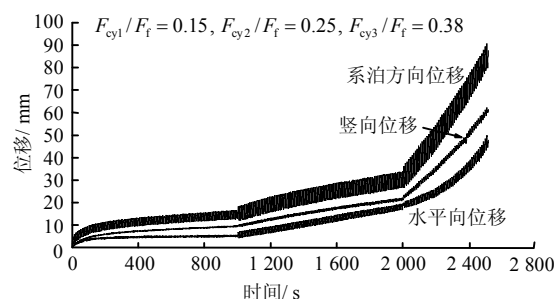


图 12 循环承载力及相应的循环破坏次数

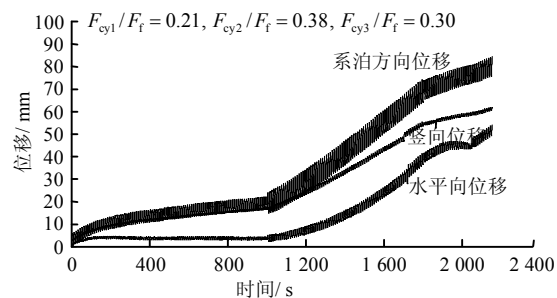
Fig.12 Cyclic bearing capacity versus the number of cycles to failure

4.2 变幅循环荷载下锚的变形失稳过程

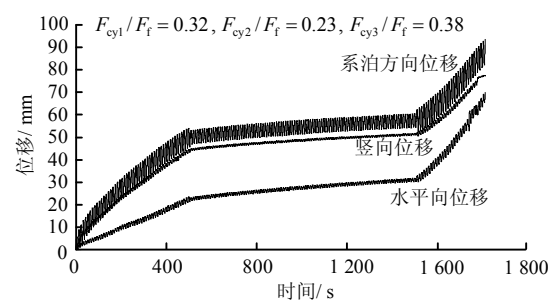
图 13 给出了编号为 T5~T8 试验锚系泊点处沿系泊方向、竖直方向以及水平方向的位移时程曲线。由不同循环荷载时程下的位移时程曲线可知, 系泊点各方向的循环累积位移与循环位移均与循环荷载水平成正比。由图 13(a)可知, 在 3 个不同荷载水平的循环加载阶段, 随荷载水平不断增大, 每个阶段产生的循环累积位移与循环位移也不断增大, 然而对于同一个循环加载阶段, 系泊点在各方向的循环位移并无明显变化, 最终锚由于多级循环荷载下的累积位移之和过大而发生破坏。另外, 不同加载时程下, 系泊点在竖向与水平向均有较大位移产生, 且竖向均比水平向累积位移大, 说明锚在竖直方向的运动要强于水平方向。由图 13(d)可知, 尽管第 1 阶段的循环荷载水平与第 3 阶段相同, 但在相同循环次数下, 第 3 阶段产生的循环累积位移明显小于第 1 阶段, 这说明前期的循环加载历史对后续加载产生的累积变形有明显影响。



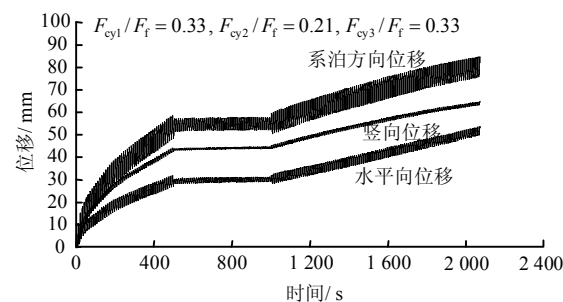
(a) 试验 T5



(b) 试验 T6



(c) 试验 T7



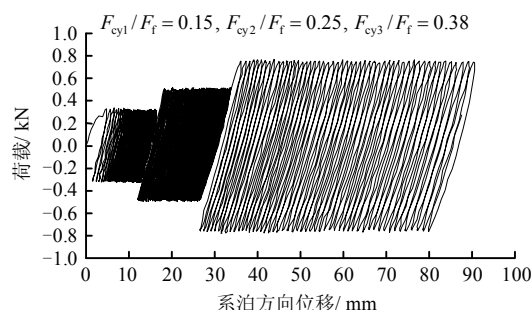
(d) 试验 T8

图 13 变幅循环荷载下锚的位移时程曲线

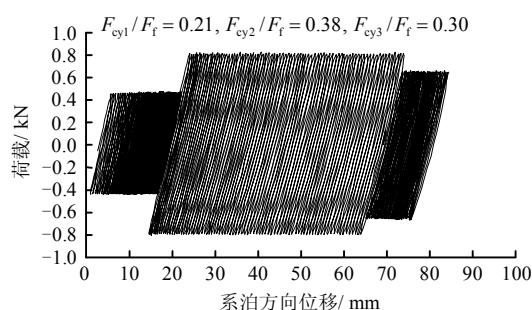
Fig.13 Displacement-time curves of anchor under variable amplitude cyclic loads

图 14 给出了不同循环荷载时程下, 锚系泊点处沿系泊方向的荷载-位移曲线。可见, 变幅循环加载下吸力锚基础表现出显著的非线性响应, 不同荷载水平下, 荷载-位移曲线表现出较好的滞回特性, 且随循环次数增加, 锚的位移逐渐向受拉方向累积, 循环荷载水平越大, 滞回圈越大, 滞回特性越明显, 位移的累积也越快。另外, 在每个阶段的加载初期,

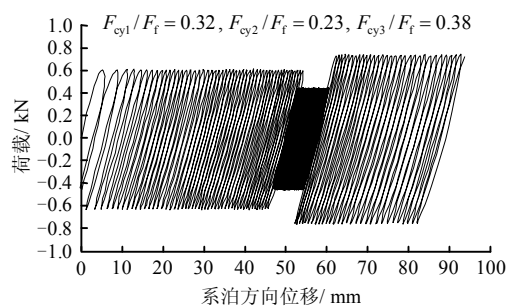
循环累积位移发展较快, 随循环次数增加, 发展趋势逐渐变缓。由图能更为清晰地看出, 循环加载水平及加载历史对循环位移与循环累积位移均有较大影响, 加载时程不同, 锚的变形过程也完全不同。



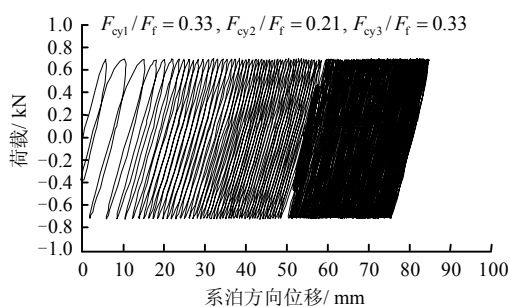
(a) 试验 T5



(b) 试验 T6



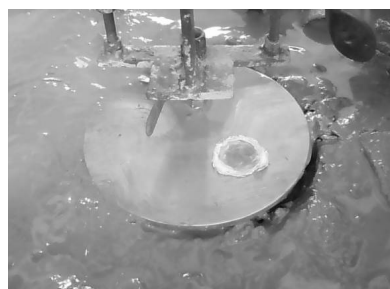
(c) 试验 T7



(d) 试验 T8

图 14 变幅循环荷载下锚系泊方向的荷载-位移曲线
Fig.14 Load-displacement curves of anchor along mooring direction under variable amplitude cyclic loads

图 15 给出了 T5 号试验 3 个循环加载阶段的变形图。第 1 阶段加载完毕时, 锚竖向与水平向均产生了较小的位移, 锚与主动区土体之间出现一微小裂缝, 但被动区土体无明显变化。第 2 阶段加载完毕时, 锚竖向与水平向均发生了明显的位移, 锚与主动区土体之间的裂缝进一步发展, 被动区土体也出现了明显裂隙。第 3 阶段加载完毕时, 锚达到了破坏位移, 锚与主动区土体之间产生一较大的裂缝, 被动区土体发生隆起且伴随有多条较大的裂隙产生。锚破坏时竖向与水平向均产生了较大的位移, 但竖向位移大于水平位移。



(a) 循环加载阶段 1



(b) 循环加载阶段 2



(c) 循环加载阶段 3

图 15 T5 号试验不同加载阶段的变形图
Fig.15 Deformation diagrams of different loading stages in T5 test

图 16 给出了不同加载时程下锚的运动方向角随系泊方向位移的变化。由图可见, 锚的运动方向角随系泊向位移的增长略有减小, 但基本在 55° 左右变化, 锚的竖向运动要比水平运动相对明显。依据上文关于锚破坏模式的定义, 锚呈现出一种偏于

竖向破坏的中间破坏模式。图 17 给出了同样土层、加载方向下静力加载时锚的运动方向角随系泊方向位移的变化,可以看出静力加载时运动方向角基本在 47° 左右变化。与静力加载相比,循环加载时锚的运动方向角有所增大,这可能是由于循环加载导致竖向承载力的减弱较水平承载力的减弱更为明显,从而引起锚的竖向运动更加显著所致。

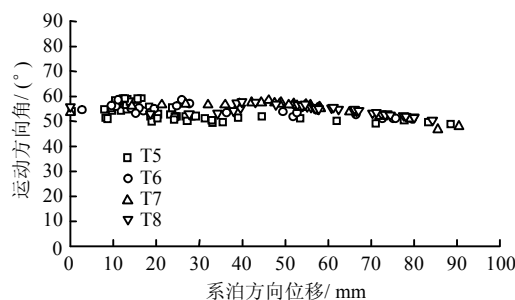


图 16 变幅循环加载时运动方向角随系泊方向位移的变化
Fig.16 Movement direction angle versus displacement along mooring direction under variable amplitude cyclic loads

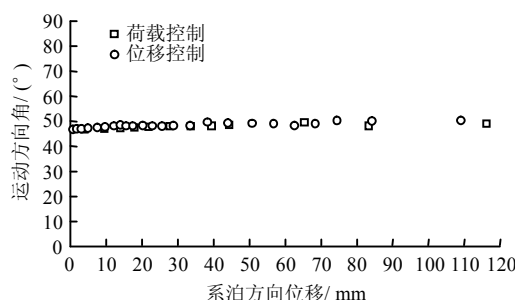
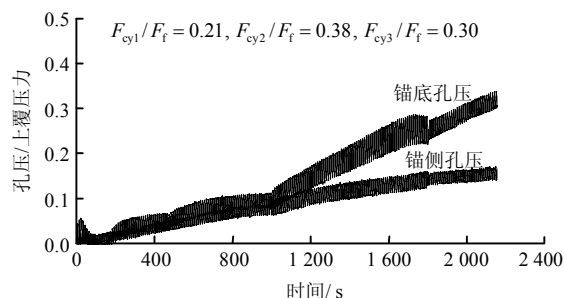
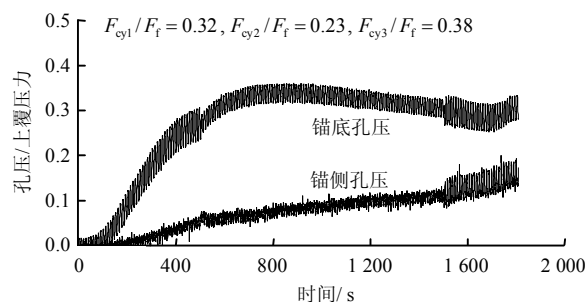


图 17 静力单调加载时运动方向角随系泊方向位移的变化
Fig.17 Movement direction angle versus displacement along mooring direction under static monotonic loads

图 18 给出了 T6 及 T7 号试验锚底和被动区测点处的孔压时程曲线,纵坐标为用锚底测点处土的上覆压力归一化的孔压。可以看出,随循环加载进行,锚底和锚侧的孔压均不断累积,且不同加载时程下,孔压的变化趋势也不一样,振动孔压与累积孔压均与循环荷载水平成正比。锚破坏时,锚底累积孔压约为 0.30~0.35 倍的锚底上覆压力,锚侧累积孔压约为 0.15~0.20 倍的锚底上覆压力,锚底累积孔压要大于锚侧累积孔压,约为锚侧孔压的 2 倍。从有效应力的角度分析,锚底的孔压增长较之于锚侧明显,则会引起锚底有效应力减小相对锚侧明显,这会导致锚竖向承载力减小得更多,从而导致锚的竖向运动更明显,最终促使锚发生偏于竖向模式的破坏。



(a) 试验 T6



(b) 试验 T7

图 18 锚底和锚侧测点处的孔压时程曲线
Fig.18 Pore pressure-time curves at bottom and side wall of anchor

5 结论

本文开展了张紧式吸力锚在侧壁最优系泊点遭受平均荷载和循环荷载共同作用下的模型试验,着重研究了张紧式吸力锚的循环失稳过程,得到如下几点结论:

(1) 对于循环荷载作用下的张紧式吸力锚,循环累积位移过大是锚发生破坏的主要原因。对于等幅循环加载试验,由于竖向附加荷重的施加,锚在水平向的循环累积位移要明显大于竖向,表现为典型的水平破坏模式。当锚受到的平均荷载水平一定时,循环荷载水平越高,锚的累积位移发展得越快,达到破坏时所需的循环次数就越小。循环位移随循环次数的增长变化不明显,但随循环荷载水平的增大而增大。不同荷载水平下,锚的循环承载力与相应循环破坏次数的对数基本满足线性关系。

(2) 对于变幅循环加载试验,系泊点各方向的循环累积位移与循环位移均与循环荷载水平成正比。不同的循环加载时程下,吸力锚表现出显著的非线性响应,荷载-位移曲线具有较好的滞回特性;由于竖向无附加荷重施加,锚在竖向与水平向均有较大位移产生,且竖向累积位移比水平向大,表明锚在竖向的运动要强于水平向;另外,锚前期的循

环加载历史对后续加载产生的累积变形有显著影响。

(3) 与静力加载相比, 循环加载时锚的运动方向角有所增大, 这可能是由于循环荷载作用下, 锚底孔压的累积要大于锚侧。从有效应力的角度分析, 锚底有效应力减小相对锚侧明显, 因此导致锚竖向抗拔承载力减小得更多, 造成锚的竖向运动更明显。然而, 由于本次试验仅对锚周围土体中的孔压进行初步尝试测定, 所以试验时布置的孔压传感器数量较少。在后续的研究工作中, 将需要布置更多的孔压传感器对锚周围不同位置处的孔压进行系统测定, 以便对孔压的变化规律及孔压对抗拔承载力的影响机制进行更充分的试验验证。

参考文献

- [1] RAVICHANDRAN V, MAJI V B, GANDHI S R. Field testing of suction anchors for mooring applications[J]. **Indian Geotechnical Journal**, 2015, 45(3): 267—277.
- [2] ANDERSON K H. Bearing capacity under cyclic loading-offshore, along the coast, and on land[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2009, 46(5): 513—535.
- [3] DYVIK R, ANDERSEN K H, HANSEN S B, et al. Field tests of anchors in clay I: description [J]. **Journal of Geotechnical Engineering, ASCE**, 1993, 119(10): 1515—1531.
- [4] ANDERSEN K H, DYVIK R, SCHRDER K et al. Field tests of anchors in clay II: predictions and interpretation[J]. **Journal of Geotechnical Engineering, ASCE**, 1993, 119(10): 1532—1549.
- [5] CLUKEY E C, MORRISON M J, GARINER J, et al. The response of suction caissons in normally consolidated TLP loading conditions[C]//Offshore Technology Conference. Houston: [s. n.], 1995.
- [6] EL-GHARBAWY S, OLSON R. The pullout capacity of suction caisson foundations for tension leg platforms[C]//The Eighth International Offshore and Polar Engineering Conference. Montreal: [s. n.], 1998.
- [7] EL-GHARBAWY S, OLSON R. The cyclic pullout capacity of suction anchor foundations[C]// The Ninth International Offshore and Polar Engineering Conference. Brest: [s. n.], 1999.
- [8] ALLERSMA H G B, KIERSTEIN A A, MAES D. Centrifuge modeling on suction piles under cyclic and long term vertical loading[C]//The Tenth International Offshore and Polar Engineering Conference. Seattle: [s. n.], 2000.
- [9] ALLERSMA H G B, BRINKGREVER R B J, SIMON T. Centrifuge and numerical modeling of horizontally loaded suction piles[J]. **International Journal Offshore and Polar Engineering**, 2000, 10(3): 223—235.
- [10] CHEN W, RANDOLPH M F. Uplift capacity of suction anchors under sustained and cyclic loading in soft clay[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE**, 2007, 133(11): 1352—1363.
- [11] CHEN W, RANDOLPH M F. Measuring radial total stresses on model suction anchors in clay[J]. **Geotechnical Testing Journal**, 2007, 30(2): 124.
- [12] CHEN W, ZHOU H, RANDOLPH M F. Effect of installation method on external shaft friction of anchors in soft clay[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2009, 135(5): 605—615.
- [13] 刘晶磊. 循环荷载作用下软黏土中张紧式吸力锚承载力研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
LIU Jing-lei. Study on bearing capacity of suction anchors with taut mooring systems in soft clay under cyclic loading[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.
- [14] 王建华, 刘晶磊, 周扬锐. 静荷载与循环荷载作用下张紧式吸力锚承载特性的模型试验[J]. **岩土工程学报**, 2012, 34(6): 997—1004.
WANG Jian-hua, LIU Jing-lei, ZHOU Yang-rui. Model tests on bearing capacities of suction anchors with taut mooring systems under combined static and cyclic loads[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2012, 34(6): 997—1004.
- [15] WANG J H, LIU J L, YANG Y. Model tests on failure modes and bearing capacities of suction anchors with taut mooring system[C]//The Twenty-second International Offshore and Polar Engineering Conference. Rhodes: [s. n.], 2012: 658—667.