

砂土中吸力式三筒基础水平承载特性试验研究

赵学亮^{1,2†},李扬扬^{1,2},王鑫³,朱文波^{1,2},戴国亮^{1,2},邓温妮^{1,2}

(1. 东南大学 土木工程学院,江苏 南京 211189;

2. 混凝土及预应力混凝土结构教育部重点实验室(东南大学),江苏 南京 211189;

3. 林同棧国际工程咨询(中国)有限公司,江苏 南京 210019)

摘要:通过一系列小比尺模型试验对吸力式三筒基础水平荷载作用下的承载特性进行了研究,分析了长径比、荷载作用方向和筒间距对吸力式三筒基础承载力影响,试验包括 3 个长径比、3 个荷载作用方向以及 3 个不同筒间距.试验结果表明:不同工况条件下得到的吸力式三筒基础荷载-位移曲线特性有所不同.相同筒重、不同筒间距下,增大筒的长径比有利于提高水平承载力,但在基础失稳前,沉箱基础模型水平位移随长径比的增加而增大.荷载作用方向对吸力式三筒基础联合工作区域影响显著,荷载最有利方向为 0°,此时对应的联合工作效应区域最大;最不利方向为 60°,此时筒-土间的联合工作效应最弱.相同尺寸和荷载方向条件下,随着筒间距的增加,承载力有不同程度的上升,长径比越大,承载力增加幅度越明显.

关键词:吸力式三筒基础;模型试验;砂土;水平承载力

中图分类号:TU 411

文献标志码:A

Experimental Study on Horizontal Bearing Characteristics of Tripod-bucket Foundation in Sand

ZHAO Xueliang^{1,2†}, LI Yangyang^{1,2}, WANG Xin³,

ZHU Wenbo^{1,2}, DAI Guoliang^{1,2}, DENG Wenni^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China;

2. Key Laboratory of Concrete and Prestressed Concrete Structure of Ministry of Education(Southeast University), Nanjing 211189, China;

3. T. Y. Lin International Engineering Consulting(China)Co Ltd, Nanjing 210019, China)

Abstract:Based on a series of small-scale model tests, the bearing characteristics of suction tripod-bucket foundation under horizontal loads are studied, and the effects of the length diameter ratio, load direction and spacing of suction caisson are investigated. The test parameters include three different aspect ratios (length/diameter), three load directions and three caisson spacing conditions. According to the test results, the characteristics of the load-displacement curve for the tripod-bucket foundation under various working conditions are different. Under the same caisson weight and different spacing conditions, increasing the aspect ratio is beneficial to improve the horizontal bearing capacity. However, before the foundation loses stability, the caisson with a larger aspect ratio results in greater

* 收稿日期:2020-08-07

基金项目:国家重点研发计划专项项目(2017YFC0703408), National Key Research & Development Program of China(2017YFC0703408); 国家自然科学基金资助项目(51878160, 51678145), National Natural Science Foundation of China(51878160, 51678145)

作者简介:赵学亮(1974—),男,山西长治人,东南大学副教授,博士

† 通信联系人, E-mail: zhaoxl@seu.edu.cn

horizontal displacement. The change of load direction has a significant influence on the joint working area of the suction tripod-bucket foundation. When the load direction is 0 degree, the corresponding joint working effect area is the largest, which provides the most benefit to the horizontal bearing capacity of the foundation. On the other hand, when the load direction is 60 degrees, the joint working effect between the caisson and soil is the weakest, resulting in the smallest horizontal bearing capacity. Under the same size and load direction conditions, with the increase of caisson spacing, the bearing capacity increases in different degrees. And the larger the ratio of length to diameter is, the more obvious the increase of bearing capacity is.

Key words: triple-bucket foundation; model test; sandy soil; horizontal bearing capacity

吸力式三筒导管架基础作为一种新型深水基础结构型式,弥补了单桩基础与重力式等传统基础结构导致工程造价过高、经济效益低等缺点,在海上风电工程中的应用逐渐增多。吸力式三筒基础主要承受风、浪产生的水平力以及传递到基础的弯矩作用^[1-2],其中筒间距、长径比与加载方向对三筒基础水平承载力影响较大。因此,对新型海上风电吸力式多筒导管架基础结构在水平及弯矩共同作用下的承载特性进行试验研究具有重要的理论和实践意义。

目前关于吸力式筒型基础水平承载特性已有不少相关研究成果。Bransby 和 Randolph^[3]对粉土地基中单筒基础进行 V 、 H 、 M 复合加载条件下的小比例尺室内模型试验研究。试验探讨了不排水加载和部分排水加载条件下筒基础承载力变化情况。Wakil^[4]通过离心机室内试验研究了不同砂土密实度下圆柱形单筒基础水平承载特性,得到了密实度与承载力之间的影响规律。Kim 等^[5]通过试验对粉砂地基中三筒基础在水平荷载作用下的力学特性进行研究,试验结果与单筒进行对比,发现三筒基础有更好的抗倾覆能力。张苇^[6]通过模型试验研究了吸力式三桩基础在水平与竖向组合荷载作用下,长径比、荷载作用角度及桩间距等因素对承载特性的影响规律。还有学者通过理论与有限元方法研究了吸力式筒型基础的水平极限承载力。刘振纹等^[7]利用模型试验结果,探讨了水平荷载下单筒基础的破坏模式,以极限平衡法中 Engel 假设为基础,分析水平荷载下单筒的受力状态,推导出单筒基础水平极限承载力理论公式。Bang 等^[8]通过离心机试验研究了不同荷载作用点和作用角度下砂土地基中吸力式沉箱基础的抗拔承载力。黎冰等^[9-10]通过一系列模型试验研究了吸力式沉箱基础的最佳作用点位置,试验中考虑了荷载作用点、荷载作用角度和长径比 3 个重要因素。结合荷载

与吸力式沉箱基础的转角关系,分析了荷载水平作用于最佳作用点下吸力式沉箱基础的破坏模式。Gourvenec^[11]通过有限元模拟了单筒基础在非均质黏土中复合加载模式下受力状态,分析了基础长径比与地基承载力包络线形状之间的关系。

综上所述可以发现,目前筒型基础研究成果很多集中在单筒基础的力学特性分析,针对砂土地基中的多筒基础的受力特性,尤其是试验方面的研究尚不充分,本文考虑吸力式三筒基础不同长径比、水平荷载角度和筒间距,通过模型试验和数值模拟对砂土中吸力式三筒基础水平承载特性进行研究。

1 试验内容与试验方法

为了研究砂土地基中吸力式三筒基础的水平承载力特性,试验中考虑了 3 种不同长径比筒基础、3 个荷载作用方向和 3 个筒间距,共 13 组工况(每组工况中,三筒基础的 3 个筒大小相同),模型试验方案如表 1 所示。

为保证模型周围土体满足消除边界效应的要求,模型箱尺寸(长×宽×高)为 $1.2\text{ m} \times 1.2\text{ m} \times 1.5\text{ m}$ 。模型槽采用单面排水,具体做法为铺排出水孔径 8 mm 排水管网于模型箱底部^[12],由于地基土为砂土,在排水管上铺设一层土工布,防止排水过程中有砂砾排出,土工布上方布置 150 mm 厚的碎石反滤层,其上再铺设一层土工布增强过滤与排水效果。通过颗粒级配试验所得的土样级配曲线如图 1 所示。模型箱内铺设砂土总厚度为 1.45 m ,采用分层铺设,每层厚度约为 0.2 m ,并用夯锤人工夯实,满夯 20 遍。砂土铺设完成后对其注水至与土样表面齐平,静置 1 d 进行固结^[13]。固结完成后,取箱内 10 cm 以下土样,按照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)

进行室内土工试验,测得试验砂土的基本物理力学性质见表2,本试验用砂相对密实度为0.59.

表1 试验工况汇总表
Tab.1 Test programs

试验编号	直径 <i>D</i> /mm	筒长 <i>L</i> /mm	长径比 <i>L/D</i>	筒间距 <i>S/D</i>	荷载方向/ $^{\circ}$
1	102	164.7	1.61	3.0	0
2	102	164.7	1.61	3.0	30
3	102	164.7	1.61	3.0	60
4	102	164.7	1.61	2.5	0
5	102	164.7	1.61	2.0	0
6	120	134.0	1.12	3.0	0
7	120	134.0	1.12	3.0	30
8	120	134.0	1.12	3.0	60
9	120	134.0	1.12	2.5	0
10	120	134.0	1.12	2.0	0
11	133	112.6	0.85	3.0	0
12	133	112.6	0.85	2.5	0
13	133	112.6	0.85	2.0	0

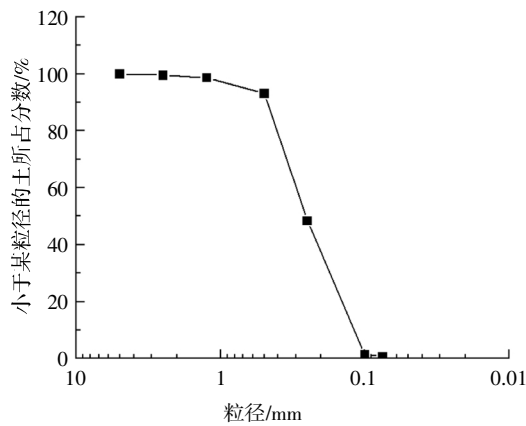


图1 颗粒级配曲线

Fig.1 Grain size distribution curve

表2 试验用砂物理参数

Tab.2 Physical parameters of sand

砂土性质	压缩模量/MPa	泊松比	剪切模量/MPa	内摩擦角/ $^{\circ}$	土的含水率/%
试验值	33	0.26	13.10	35	24.5
砂土性质	砂土天然重度/ $(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	试验砂土重度/ $(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	最小干密度/ $(\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	最大干密度/ $(\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	黏聚力/kN
试验值	15.9	19.6	1.429	1.733	0

试验中的模型筒采用 Q235 钢管, 外径分布为 102 mm、120 mm 和 133 mm 3 种, 对应的筒身長分别为 164.7 mm、134 mm 和 112.6 mm, 壁厚为 3 mm, 每种尺寸的筒重量相同, 均为 1.45 kg. 单筒顶部预留两个螺栓孔, 一个用于与筒顶部三脚架相连接, 另一个作为排气孔方便筒的贯入与拔出, 如图 2 所示. 筒顶三脚架中部位置留出长度为 150 mm 螺栓孔, 方便调整筒与筒之间的位置来研究三筒筒间距对三筒基础承载力影响. 其次, 在三脚架每隔 90 mm 处设置一吊耳用于三筒基础施加水平荷载, 三筒结构示意图如图 3 所示. 三筒基础呈等边三角形结构布置,

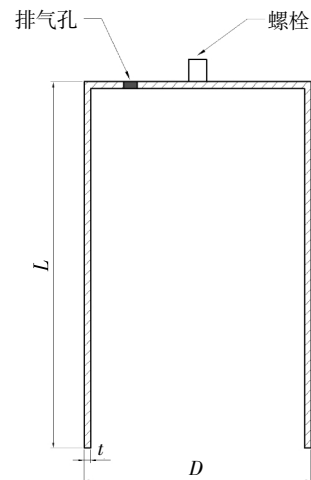


图2 筒型基础单筒模型示意图

Fig.2 Schematic diagram of single caisson model

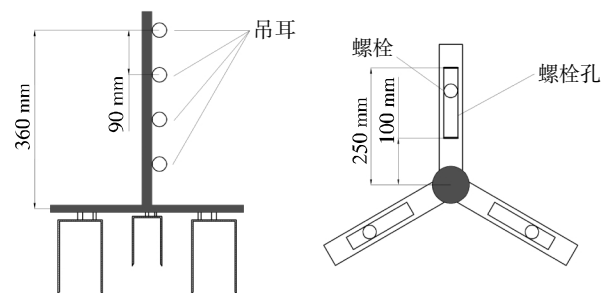


图3 组合三筒模型示意图

Fig.3 Schematic diagram of tripod-bucket foundation

根据结构的对称性研究荷载的方向只需要在 0° 到 60° 范围内进行, 如图 4 所示.

相关研究表明^[14-15], 下沉方法对吸力筒基础长期承载力的影响很小, 针对本文小比尺模型采用负压和重力共同贯入的方法, 利用垂直贯入装置将沉箱模型完全沉入试验土池中, 使筒顶面与泥面齐平. 筒基础贯入 24 h 后, 通过分级加载法施加水平荷载, 荷载级差取预估荷载的 $1/10$ ^[16]. 如图 5 所示, 水平荷载

通过砝码、加载架和滑轮进行施加, 试验过程中, 通过在筒顶处设置的位移传感器记录测量点的水平位移, 具体的试验示意图如图 5 所示。

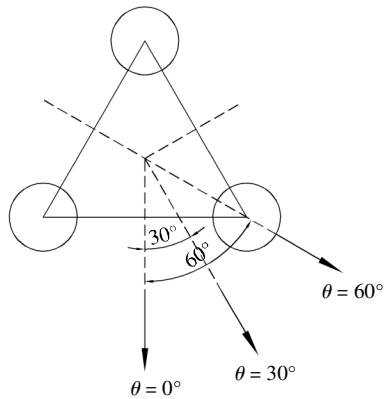


图 4 加载方向示意图

Fig.4 Schematic diagram of load direction

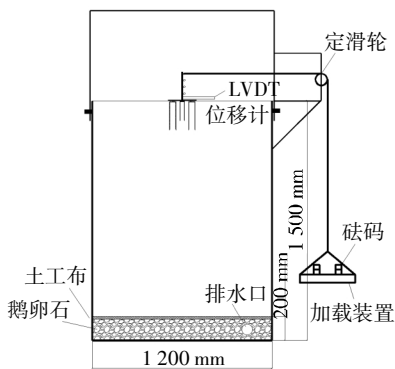


图 5 模型试验示意图

Fig.5 Schematic diagram of model test

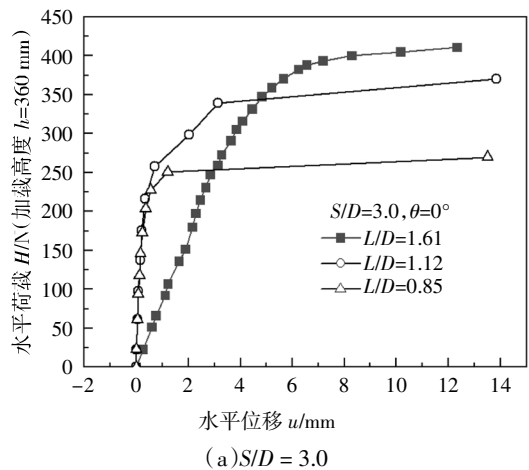
2 试验结果分析

目前对于吸力式三筒基础水平极限承载力, 国际上还没有统一的破坏标准, 也缺乏相应的位移特征点研究结果. 由于三筒基础目前应用相对较少, 更缺乏有关三筒基础的破坏标准. 作者对目前采用的一些极限承载力的确定方法进行了总结, 本文对于吸力式三筒基础水平极限承载力判断主要方法是通过荷载-位移曲线上特征点的角度对基础水平承载力进行判定, 针对具有明显拐点的曲线选取拐点值为特征点, 对没有明显拐点的曲线采用切线相交法^[16]选取特征点。

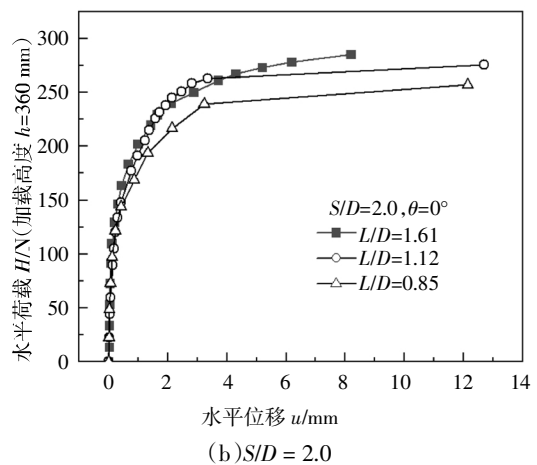
2.1 长径比对承载力影响

选取两组不同筒间距 ($S/D = 2.0$ 和 $S/D = 3.0$) 在相同荷载作用角度下的工况, 分析长径比对水平承载力的影响. 图 6 分别给出了相同筒重、不同三筒尺

寸条件下, 筒间距 $S/D = 2.0$ 和 $S/D = 3.0$ 在 0° 荷载作用方向工况下的荷载-位移曲线. 由图 6(a) 可知, 当三筒基础各个筒之间的距离为 3 倍筒径时, 不同尺寸的单筒对组合三筒基础结构水平承载力的影响较为明显, 长径比 $L/D = 1.61$ 的基础水平承载力最大, $L/D = 1.12$ 下基础水平承载力次之, $L/D = 0.85$ 时基础水平承载力为最小. 进一步分析筒间距为 2 倍筒径时结果, 由图 6(b) 可知, 当 $S = 2D$ 时所得结论与 $S = 3D$ 基本一致。



(a) $S/D = 3.0$



(b) $S/D = 2.0$

图 6 不同 S/D 和 L/D 三筒基础的荷载-位移曲线

Fig.6 Load-displacement curves with different S/D and L/D

图 7 给出了不同筒间距情况下, 三筒基础的水平极限承载力与长径比之间的关系. 从图中可以发现当筒间距 $S/D = 2.0$ 时 3 种长径比下的基础水平承载力差距不大; 但当筒间距 $S/D = 3.0$ 时, 各长径比下的水平承载力相差较为明显. 这是由于当筒间距较小时, 各个筒之间的相互影响明显, 三筒基础工作状态类似于大直径单筒, 削弱了长径比变化对整体水平承载力的影响. 这一现象可从相同工况下有限元模拟结果(图 8)进一步进行阐明. 从图 8 中可以看出,

在同为 $S/D = 3.0$ 条件下, 长径比 $L/D = 1.61$ 的三筒基础筒之间的相互影响最为突出, 长径比较小的两组筒基础($L/D = 1.12$ 和 $L/D = 0.85$), 虽然筒间距相对值 S/D 相等, 但由于它们筒间距绝对值较 $L/D = 1.61$ 更大, 筒之间的影响较小. 当筒间距较大时, 三筒基础结构的各个筒之间联系减弱, 相互影响作用减小, 其工作状态类似于三个单个筒的叠加作用, 此时水平极限承载力主要受长径比的影响, 长径比越大的筒其侧摩阻力越大, 抗拔能力越强, 故长径比大的 $L/D = 1.61$ 的三筒基础水平承载力显著提高.

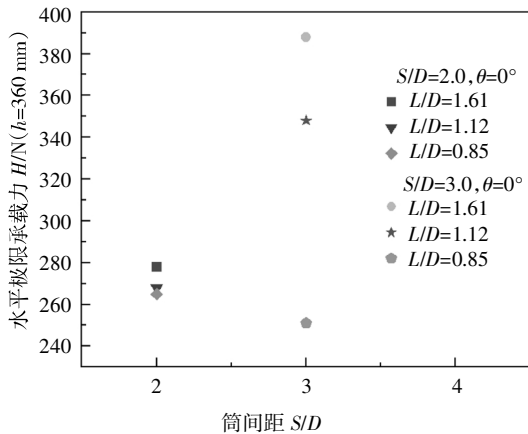
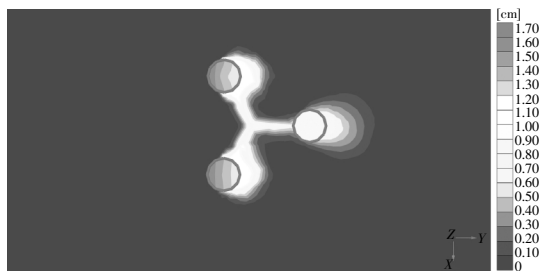
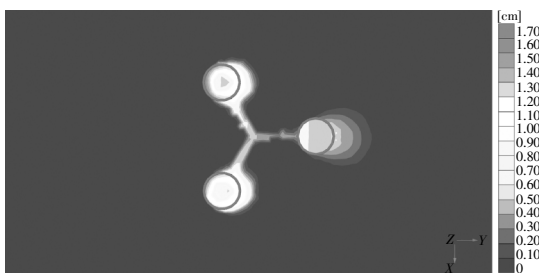


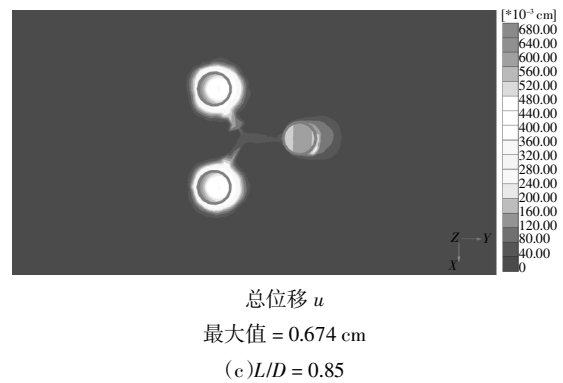
图7 水平承载力随长径比的变化关系
Fig.7 The relationship between the horizontal bearing capacity and length diameter ratios



总位移 u
最大值 = 1.620 cm
(a) $L/D = 1.61$



总位移 u
最大值 = 1.667 cm
(b) $L/D = 1.12$



总位移 u
最大值 = 0.674 cm
(c) $L/D = 0.85$
图8 不同长径比下基础浅埋层地基表面位移
Fig.8 Shallow surface displacement of foundation under different aspect ratios

2.2 荷载作用方向对承载力影响

当筒间距 $S/D = 3.0$ 时, 分析长径比分别为 $L/D = 1.61$ 和 $L/D = 1.12$ 下荷载作用角度与承载力之间关系. 图9为三筒基础在不同水平荷载作用方向下, 承载力随着水平位移的变化结果. 从图9中可以看出, 三筒基础的水平极限承载力受荷载作用方向的影响较为明显. 两种不同长径比的工况均在 0° 方向下三筒基础水平承载力为最大, 而 60° 方向下, 基础的水平承载力为最小. 但图9(a)中, 0° 方向下长径比 $L/D = 1.61$ 的三筒基础在加载过程中其水平位移大于其他两种工况, 造成这种现象的原因是在该组试验中, 加载时荷载级差取值较小, 为预估值的 $1/20$, 因此累积变形的次数和时间增多, 相应的变形更大.

图10给出了不同模型尺寸情况下, 三筒基础的水平承载力随着荷载作用方向变化的结果. 从图10可知, 三筒基础的水平承载力随荷载作用角度的增大而降低, 0° 方向下基础承载力最优. 分析原因为: 对于吸力式三筒基础结构型式, 筒与筒间土相互作用区域将影响联合工作效果的发挥, 筒-土之间联合工作效果随荷载作用方向的变化而发生变化. 当荷载角度为 0° 时, 三筒基础筒-土间联合工作影响的范围相对较大, 联合工作效果明显; 当荷载角度为 60° 时, 联合工作区域最薄弱. 除联合工作效应的影响以外, 三筒基础水平承载力也受位移的影响. 三筒基础的整体位移大小取决于结构最薄弱环节产生的位移, 当荷载作用角度为 0° 时, 此时失稳状态为一个筒受压, 两个筒受拉, 产生位移最大处取决于受压筒; 当角度为 60° 时, 一个筒受拉, 两个筒受压, 最薄弱环节位于受拉筒, 由于筒的抗压承载能力要远大于抗拔承载能力, 因此三筒基础在 0° 荷载作用方向下承载力要大于 60° 下承载力.

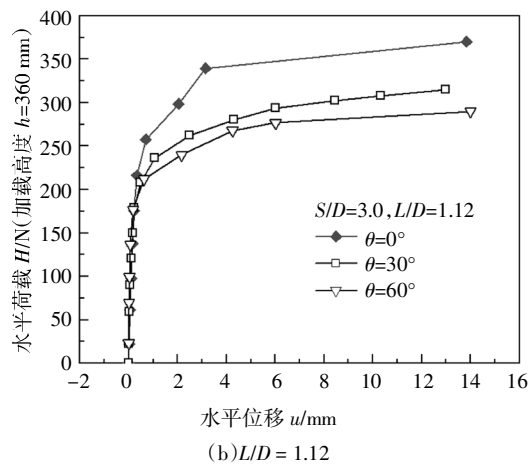
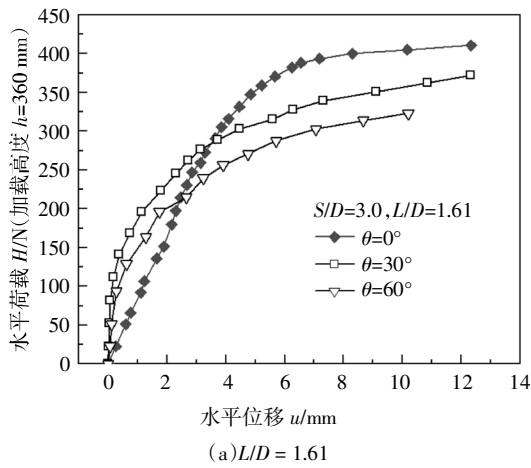


图 9 不同 L/D 和加载方向荷载-位移曲线
Fig.9 Load-displacement curves with different L/D and loading direction

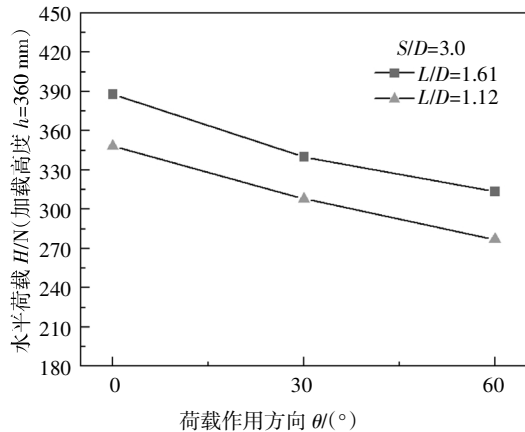


图 10 水平承载力随荷载作用方向的变化关系
Fig.10 The relationship between the horizontal bearing capacity and loading directions

2.3 筒间距对承载力影响

图 11 为长径比分别为 $L/D = 1.61$ 、 $L/D = 1.12$ 、 $L/D = 0.85$ 情况下不同筒间距吸力式三筒基础水平承

载力与位移的关系曲线. 从图 11 可看出, 随着三筒基础筒间距增加, 相同水平和弯矩荷载作用方向下水平极限承载力总体呈现增长趋势, 主要原因为随着筒间距增大, 筒之间的干扰减弱以及筒基础力矩臂增加提高了极限承载力. 但在长径比 $L/D = 0.85$ 情况下有所不同, 三筒基础水平极限承载力并没有

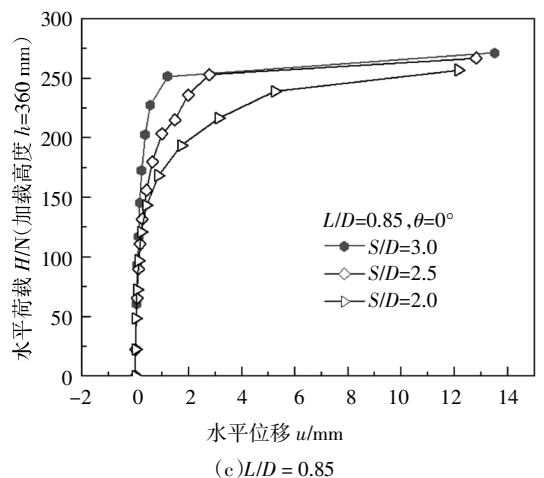
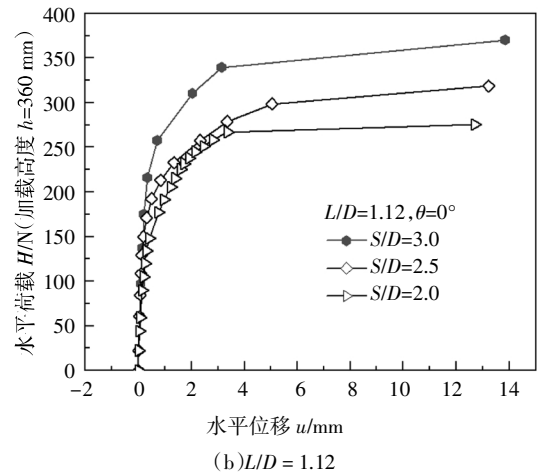
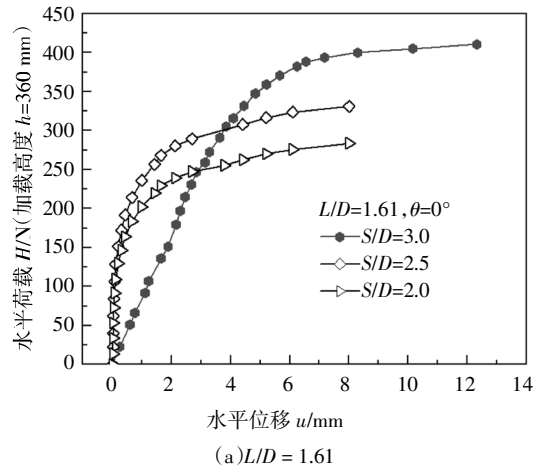


图 11 不同 L/D 和 S/D 荷载-位移曲线
Fig.11 Load-displacement curves of tripod-bucket foundation with different L/D and S/D

有随筒间距增大而一直增加,这是由于长径比较小的三筒基础,由于本身筒长较小,影响的筒周围的土体范围也较小,在其筒间距达到某一长度时,筒与筒之间的相互联系非常弱,各个筒单独工作。

由于吸力式三筒基础通过支撑架与上部结构连接,筒间距大小直接影响支撑架尺寸从而影响结构整体用钢量,因此可在本次试验结果的基础上研究如何在满足基础承载力的同时,从用钢量出发优化基础长径比及筒间距。采用目前应用最广泛的基础结构型式作为计算样本,如图12所示,横撑与斜撑之间夹角均为60°。基于本文所研究的筒不属于大直径筒基础范畴,为了简化计算,参照一些学者的研究结论和规范建议以及一些实际工程经验,横撑与斜撑的直径均取0.75倍的筒基础直径,横撑与斜撑的壁厚取0.02倍的直径大小。计算不同筒间距和长径比下筒基础上部与连接段的支撑架的用钢量及承载力,并作对比分析,具体计算结果见表3。

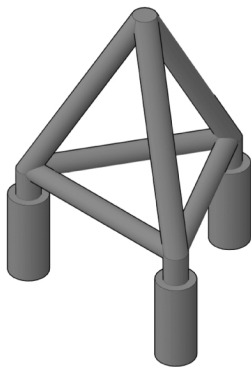


图12 吸力式三筒基础结构型式

Fig.12 The structure type of tripod-bucket foundation

表3 吸力式三筒基础结构用钢量与水平承载力增长率结果

Tab.3 Results of steel consumption and growth rate of horizontal bearing capacity of tripod-bucket foundation

L/D	S/D	用钢量/ cm^3	水平极限承载力/ N	用钢量增长率/%	承载力增长率/%	承载力与用钢量增长率比/%
	2.0	450.06	278.0	—	—	—
1.61	2.5	562.59	324.0	25	16.37	65.1
	3.0	675.11	388.0	20	19.94	99.7

	2.0	732.87	263.0	—	—	—
1.12	2.5	916.09	298.5	25	13.50	54
	3.0	1 099.31	348.0	20	16.58	82.9

	2.0	997.79	239.0	—	—	—
0.85	2.5	1 247.24	258.5	25	8.16	32.6
	3.0	1 496.68	251.0	20	-2.90	-14.5

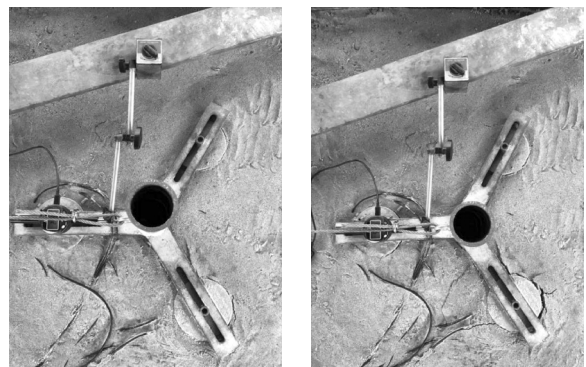
通过表3可知,对于 $L/D = 1.61$ 和 1.12 两种情况下的三筒基础,当筒间距 S/D 从2.5增加到3.0时,其水平极限承载力增长率最大,此时增大筒间距对提升水平极限承载力的效果最明显,对于长径比小于1的浅埋吸力式三筒基础,其筒间距 S/D 值推荐为2.0或2.5。

2.4 三筒基础的失稳破坏机制

三筒基础在水平力作用下破坏模式主要表现为受压筒前后侧土体发生塑性破坏,受拉筒被拔出泥面。图13为水平荷载作用下三筒基础逐渐失稳破坏的过程,可以分为3个阶段。



(a)试验初始阶段



(b)试验中间阶段前(左)后(右)期

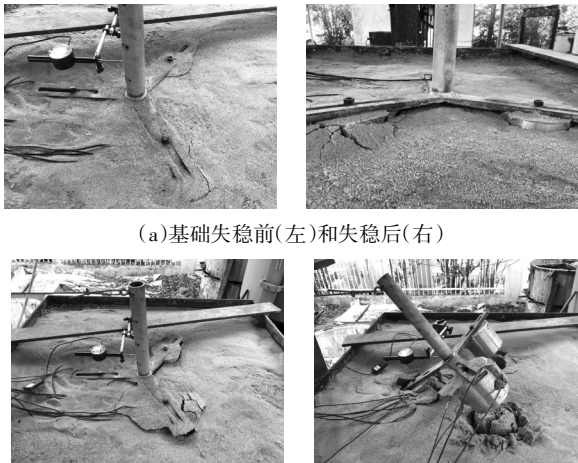


(c)基础完全失稳阶段

图13 三筒基础试验过程

Fig.13 Test process of tripod-bucket foundation

结合图 6、图 9、图 11 三筒基础水平承载力结果与图 14 基础逐渐失稳视图可以发现,在试验初始阶段到试验中间阶段,三筒基础只出现微小的水平位移,筒周围土体仍处于弹性变形阶段,模型实验中很难观察到明显的变形,只在受拉筒后侧出现狭窄的微裂缝,此时的受压筒周围土体几乎没有出现变形;随着加载继续,筒周土体由弹性变形阶段逐渐进入塑性变形阶段,受拉筒后侧出现的裂纹随着荷载的增大逐渐向后方扩展,受拉筒前侧土体出现隆起趋势,受拉筒发生向上拔起的趋势并向加荷方向旋转,此时受压筒后侧的裂缝可以观察清楚,但受拉筒周围土体的变形要明显大于受压筒周围的土体。



(a)基础失稳前(左)和失稳后(右)

(b)基础失稳后 20 min(左)和完全拔出(右)
图 14 三筒基础逐渐失稳过程

Fig.14 Failure of tripod-bucket foundation before and after instability

当荷载达到一定值后,荷载难以继续施加,通过位移计显示结果来看,筒基础的水平位移持续并急剧增大,整个基础进入完全失稳阶段.观察筒周围破坏土体发现,受拉筒前后侧的土体发生的塑性破坏仅限于靠近土体表面那一层,且随着长径比的减小,发生塑性破坏的土层越薄,说明受拉筒主要做上拔运动,如图 15 所示.受拉筒在被拔起时,筒内土塞发生脱落,筒内壁与土塞存在摩擦,这表明受拉筒提供

的水平抗力主要来自筒壁内外侧与砂土之间的摩擦力;受压筒前侧土体则受挤压逐渐隆起形成被动侧破坏楔体,且破坏范围广、深度大,筒体前侧的被动区土压力也提供了三筒基础水平抗力。

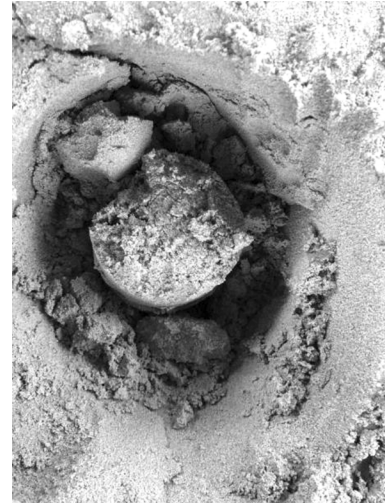


图 15 受拉筒内土塞脱落

Fig.15 Soil plug falling off tension cylinder

图 16 ~ 图 18 分别是通过有限元软件 PLAXIS 模拟筒间距 $S/D = 3.0$ 、加载方向 0° 、高度 $H = 360$ mm 时,长径比分别为 $L/D = 1.61、1.12、0.85$ 的 3 个工况下得到的位移矢量图、三筒基础整体变形云图以及受压筒位移结果。

从图中可以看出:1) 水平荷载作用下当筒的长径比较小时,受压筒水平运动占比较大,受拉筒主要是垂直上拔,这也解释了模型试验中长径比越小,受拉筒前后侧发生塑性破坏的土体越小这一现象;随着筒裙高度增加,受压筒转动趋势愈加明显,同时也有少量水平位移,受拉筒在上拔过程中会伴随前倾的转动趋势,如图 16 所示.根据三筒基础整体变形云图(图 17)可以判断,受压筒前会受到很大的压应力作用,上部会首先出现塑性破坏并不断扩展.三筒基础的水平抗力主要来自于两个受拉筒的筒壁摩擦力以及受压筒前侧土体提供的压应力.2) 由图中受

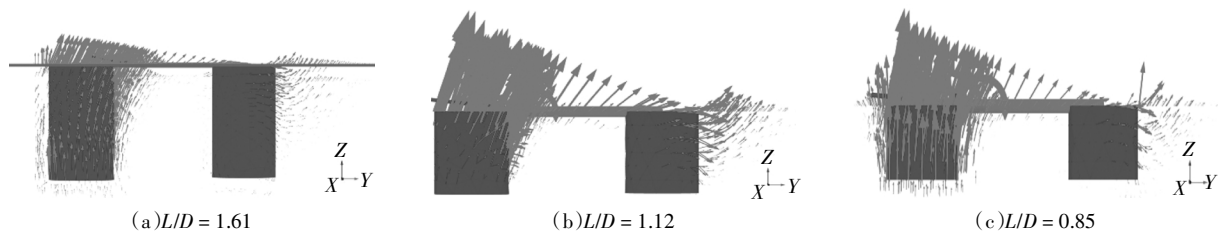
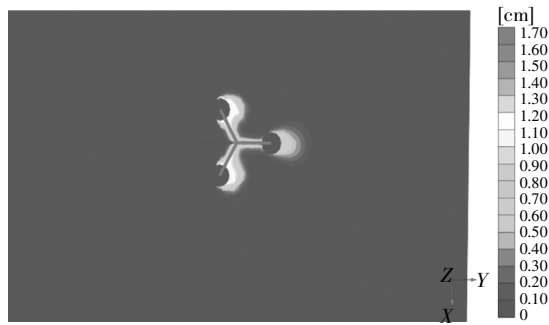


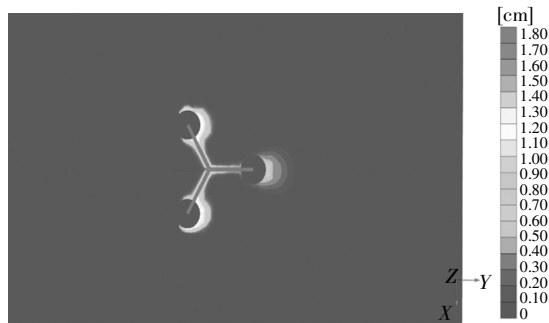
图 16 有限元计算位移矢量图

Fig.16 Displacement vector diagram calculated by finite element method

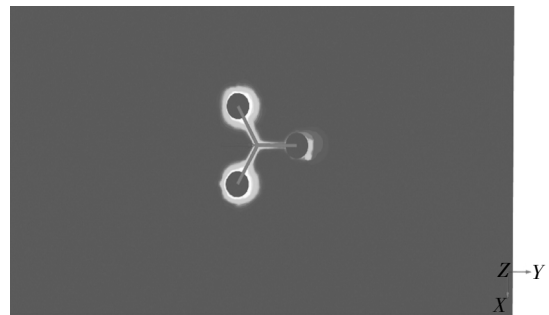
压筒位移云图(图 18)变化趋势可以看出三筒基础围绕受压筒底部转动,与单筒基础在水平荷载作用下的转动中心的位置相一致,有所不同的是,单筒基础在水平力作用下其转动中心在筒的中轴线上,而三筒基础的转动中心在受压筒中轴线偏向水平力方向一侧的位置,并且转动中心在 Y 方向的位置随着长径比的改变变化不大,而转动中心在 Z 方向的位置随着长径比的减小而降低.这个趋势也很好地解释了长径比大的筒在水平力作用下转动占主要变形,长径比小的筒主要变形为水平位移.



总位移 u
最大值=1.630 cm(单元 1 597 在节点 14 986)
(a) $L/D = 1.61$



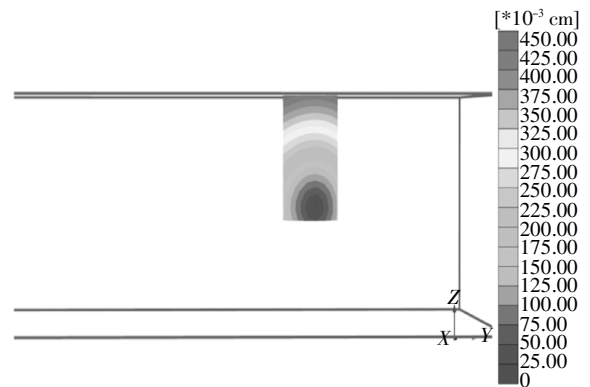
总位移 u
最大值=1.734 cm(单元 2 757 在节点 23 601)
(b) $L/D = 1.12$



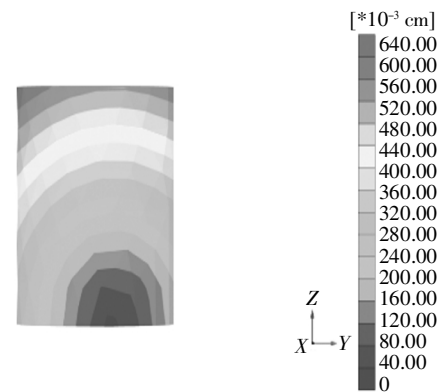
总位移 u
最大值=0.7579 cm(单元 2 876 在节点 28 031)
(c) $L/D = 0.85$

图 17 三筒基础整体变形云图

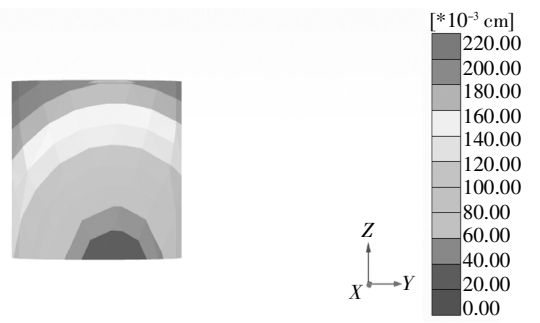
Fig.17 Integral deformation nephogram



(a) $L/D = 1.61$



(b) $L/D = 1.12$



(c) $L/D = 0.85$

图 18 三筒基础受压筒位移图

Fig.18 Displacement diagram of compressed cylinder

3 结论

通过模型试验研究了砂土中吸力式三筒导管架基础的水平承载特性,结论如下.

1)三筒基础在水平荷载作用下,基础失稳模式表现为:加载前期,基础伴随着平动加转动的趋势,长径比大的基础其转动趋势更明显,长径比较小的结构其平动趋势更明显,但最终的破坏形式都表现为倾覆破坏.三筒基础整体结构转动中心位于受压筒中轴线附近,长径比越小,转动中心在深度方向上位置越低.由于转动中心在受压筒内,受压筒周围土体变形最明显,土压力值明显大于其他区域.在水平

荷载作用下,基础围绕某一点发生转动,转动轴以上土前侧土体为被动区,被动区土体刚度相比于基础结构很小,因此,当基础失稳时,在被动区一侧会产生很大的剪切变形.受压筒前侧土体拱起,形成被动破坏区,而筒后筒-土分离形成裂缝.这种基础失稳的主要原因是由于被动区土压力过大而产生土体塑性破坏.

2)水平荷载作用下,当基础长径比较小,在位移较小时就发生整体倾覆破坏;在长径比较大时,基础发生倾覆前会经历较大程度的位移变化.这些规律可为确定吸力式三筒基础破坏标准做参考.受拉筒前后侧土压力值较小,说明受拉筒主要作上拔运动,筒内外侧与土体的摩阻力是提供三筒基础水平承载力的主要抵抗力.

3)相同筒重条件下,长径比大小对三筒基础水平承载力的影响明显,特别是在筒间距较大的情况下,长径比这一影响特点更明显.

4)同一筒间距下,荷载作用方向对吸力式三筒基础水平承载力影响显著.荷载最有利方向为 0° ,此时对应的联合工作效应区域最大;最不利方向为 60° ,此时筒-土间的联合工作效应最弱.

5)相同尺寸和荷载方向条件下,随着筒间距的增加,承载力有不同程度的提升,长径比越大,承载力增幅越明显;当长径比较小时,承载力随着筒间距的增大而略微增加,并在某个筒间距范围内达到稳定值.

参考文献

- [1] 武科. 滩海吸力式桶形基础承载力特性研究[D]. 大连:大连理工大学,2007:13—14.
WU K. A study on bearing capacity behavior of suction bucket foundation in beach-shallow sea[D]. Dalian:Dalian University of Technology,2007:13—14. (In Chinese)
- [2] 孙曦源. 水平荷载作用下软土地基中桶形基础工作机理及承载性能研究[D]. 大连:大连理工大学,2009:15—16.
SUN X Y. A study on working mechanism and bearing capacity performance of bucket foundation in soft ground under lateral loads [D]. Dalian:Dalian University of Technology,2009:15—16. (In Chinese)
- [3] BRANSBY M F,RANDOLPH M F. Combined loading of skirted foundations[J]. Géotechnique,1998,48(5):637—655.
- [4] WAKIL A Z. Horizontal capacity of skirted circular shallow footings on sand [J]. Alexandria Engineering Journal,2010,49(4):379—385.
- [5] KIM D J,CHOO Y W,KIM J H, *et al.* Investigation of monotonic and cyclic behavior of tripod suction bucket foundations for offshore wind towers using centrifuge modeling [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2014,140(5):1—12.
- [6] 张苇. 饱和砂土中吸力式组合三桩基础抗斜拉承载特性研究[D]. 太原:太原理工大学,2018:49—70.
ZHANG W. Resistance capacity and deformation behavior of suction tripod piles in saturated sand under inclined pulling load [D]. Taiyuan:Taiyuan University of Technology,2018:49—70. (In Chinese)
- [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):691—695.
LIU Z W,WANG J H,QIN C R, *et al.* Research on the horizontal bearing capacity of bucket foundations [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2000,22(6):691—695. (In Chinese)
- [8] BANG S,JONES K D,KIM K O, *et al.* Inclined loading capacity of suction piles in sand [J]. Ocean Engineering,2011,38(7):915—924.
- [9] 黎冰,高玉峰,沙成明,等. 砂土中吸力式沉箱基础的最大承载力计算方法 [J]. 东南大学学报(自然科学版),2012,42(6):1201—1205.
LI B,GAO Y F,SHA C M, *et al.* Calculation method for maximum bearing capacity of suction caisson foundation in sand[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition),2012,42(6):1201—1205. (In Chinese)
- [10] 黎冰,郑翔,高玉峰,等. 砂土中吸力式沉箱基础的最佳荷载作用点位置模型试验研究 [J]. 岩土力学,2013,34(9):2521—2526.
LI B,ZHENG X,GAO Y F, *et al.* Model tests on optimal load attachment point of suction caisson foundation in sands[J]. Rock and Soil Mechanics,2013,34(9):2521—2526. (In Chinese)
- [11] GOURVENEC S. Effect of embedment on the undrained capacity of shallow foundations under general loading [J]. Géotechnique,2008,58(3):177—185.
- [12] 朱文波,戴国亮,袁龙锦,等. 吸力式沉箱基础长期水平荷载作用下承载特性试验研究[J]. 海洋工程,2018,36(3):26—32.
ZHU W B,DAI G L,YUAN L J, *et al.* Experimental study on the long-term horizontal bearing characteristics of suction caisson foundation[J]. The Ocean Engineering,2018,36(3):26—32. (In Chinese)
- [13] 黎冰,郑翔,高玉峰,等. 砂土中吸力式沉箱基础抗拔承载特性试验研究[J]. 岩土工程学报,2013,35(5):902—907.
LI B,ZHENG X,GAO Y F, *et al.* Model tests on pull-out capacity of suction caisson foundation in sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2013,35(5):902—907. (In Chinese)
- [14] JONES K D,BANG S,CHO Y. Pullout capacity of embedded suction anchors in sand[J]. Ocean Engineering,2007,34(16):2107—2114.
- [15] CHEW W,RANDOLPH M F. Radial stress changes around caissons installed in clay by jacking and by suction[C]// Proceedings of 14th International Offshore and Polar Engineering Conference. Toulon, France:ISOPE,2004:493—499.
- [16] 港口工程桩基规范:JTS 167-4-2012[S]. 北京:人民交通出版社,2012:78—79.
Code for pile foundation of harbor engineering:JTS 167-4-2012 [S]. Beijing:China Communications Press,2012:78—79. (In Chinese)