

DOI: 10.16285/j.rsm.2016.2865

低裙式吸力桩真空沉贯及抗拔极限承载力

柳晓科^{1,2}, 鹿 群^{1,3,4}, 路士伟¹, 刘春龙¹, 郭少龙¹

(1. 天津城建大学 土木工程学院, 天津 300384; 2. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300381;
3. 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; 4. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310014)

摘 要: 为了提高裙式吸力桩的承载力, 使其更易于沉贯且能更好地保护主桶周围土体免受洋流冲刷, 提出了一种新型低裙式吸力桩模型, 采用双桶负压法沉贯该桩, 能有效减小土塞高度。提出的超低位真空预压法能够快速固结土体, 缩短试验周期, 采用该方法加固的土体, 能够较好地模拟强度沿深度增加的地基土。在该土体上采用抽真空法沉贯不同规格的吸力桩模型, 对比研究低裙式吸力桩的可贯性, 分析其沉贯阻力, 结合试验数据拟合出了沉贯阻力公式。最后, 通过 45° 斜拉试验并结合 PLAXIS 3D 软件对吸力桩承载力展开研究, 对比试验与数值模拟结果, 分析新型低裙式吸力桩的合理性。

关 键 词: 低裙式吸力桩; 超低位真空预压法; 沉贯阻力; 土塞效应; 承载力

中图分类号: TU 473.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2018) 06-2089-10

Vacuum penetration and ultimate pull-out capacity of low skirted suction caissons

LIU Xiao-ke^{1,2}, LU Qun^{1,3,4}, LU Shi-wei¹, LIU Chun-long¹, GUO Shao-long¹

(1. School of Civil Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China; 2. North China Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Tianjin 300381, China; 3. Tianjin Key Laboratory of Soft Soil Characteristics and Engineering Environment, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China; 4. PowerChina Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou, Zhejiang 310014)

Abstract: A new model of the low skirted suction caisson was proposed to improve its bearing capacity and make it easy to penetrate and protect the soil around the barrel from the ocean current. Penetrating the caisson with a double barrel of vacuum pressure can not only improve the penetration but also effectively reduce the height of soil plug. A new method of ultra-low underneath vacuum preloading was put forward to consolidate soft soil and shorten the period quickly. The soil reinforced by this method can better simulate the foundation soil with increased strength along the depth. The suction caisson models with different specifications by the vacuum method were penetrated into soil, and then the feasibility of the low skirted suction caisson was comparatively studied. The penetration resistance was analysed, and then a corresponding formula was deduced by fitting experimental data. The bearing capacity of the suction caisson was studied by the 45° pullout test combined with the finite element analysis of PLAXIS 3D software. Finally, the rationality of the low skirted suction caisson was verified.

Keywords: low skirted suction caisson; underneath vacuum preloading; penetration resistance; soil plug effect; bearing capacity

1 引 言

随着海上石油、风电等资源的开发, 海洋平台需要建在越来越深的海区, 采用吸力式基础可以节省费用并能满足平台基础承受荷载的条件^[1]。

吸力式基础之所以受到工程界的青睐是因为其

有着不可替代的优点: ①施工周期短; ②可重复利用; ③直径大, 长径比小; ④抗拔时桶中形成负压, 能提高桩的抗拔承载力。然而吸力式基础同样也存在一些缺点, 例如土塞现象, 有关土塞的危害及形成特点, 文献[2-4]进行了详细研究, 不再赘述。本文在考虑土塞效应的基础上, 提出一种新型低裙式

收稿日期: 2017-02-15

基金项目: 天津市应用基础与前沿技术研究计划一般项目 (No.15JCYBJC48900); 中国电建集团科技项目 (No.SD2013-10)。

This work was supported by the Tianjin Application Foundation and Frontier Technology Research Plan (15JCYBJC48900) and the Science and Technology Project of PowerChina (SD2013-10).

第一作者简介: 柳晓科, 男, 1990 年生, 硕士研究生, 主要从事基础工程、软地基处理等方面的研究。E-mail: atliuxiaoke@163.com

通讯作者: 鹿群, 男, 1970 年生, 博士, 教授, 主要从事基坑工程、桩基工程及地基处理等方面的研究。E-mail: zdlq585@126.com

吸力桩模型, 并分析其可行性。

有关传统吸力桩的研究相对较多, 例如: 孙东昌等^[5]对单桶形基础负压沉贯特性进行了分析; 杨少丽等^[6-7]通过模型试验研究了传统吸力桩沉贯过程中桶内水力梯度变化过程; 朱儒弟等^[8]通过模型试验对比研究了海上平台桶形基础模型压力压贯与负压沉贯的特点; 李大勇等^[9]认为, 吸力式基础的沉贯量与主桶内吸力的大小的设定密切相关, 太小时土塞太高, 太小时降低施工速率; 朱斌等^[10]通过研究建立了负压与沉贯量及沉贯量与时间的关系等。此外, Andersen 等^[11]基于大量的现场实测数据及室内外模型试验结果, 给出了两套吸力桶在砂土中安装时的阻力计算公式。API 规范^[12]给出了吸力沉贯时最大容许内部吸力值的计算公式。李大勇等^[13]在深入研究已有塔架的基础上, 提出了裙式吸力锚, 使得吸力式基础在国内进一步发展。文献[14-17]主要介绍了该基础形式的沉贯机制、承载机制, 分析了该基础在中粗砂中的可沉贯性, 并通过有限元数值分析及模型试验对该基础的水平承载力做了详细研究。相对于传统的单桶式吸力桩, 裙式吸力桩水平承载能力高, 增加的裙筒能保护主桶周围土体不受洋流刨蚀, 提高吸力桩使用寿命。

延续以上学者及专家对传统吸力桩和裙式吸力桩的研究, 本文从实际情况出发, 考虑土塞效应的不良影响, 进一步提出新型低裙式吸力桩模型, 并通过室内模型试验对比研究低裙式吸力桩的可贯性, 分析负压与沉贯深度的关系。考虑吸力桩实际服役过程中的受力方式, 通过 45° 斜拉试验并结合 PLAXIS 3D 软件对吸力桩承载力展开研究, 对比试验与数值模拟结果, 分析低裙的合理性。

相对于其他研究, 本文的独特之处在于: ①采用超低位真空预压法加固高岭土, 有效缩短了试验周期; ②提出了新型低裙式吸力桩模型; ③采用抽真空方式沉贯吸力桩, 进一步改进沉贯方法使其更有利于桩体的沉贯, 能有效减小土塞效应。

2 试验设计过程、试验结果及分析

2.1 吸力桩模型

本试验采用 4 个吸力桩模型, 共分为 3 种类型, ①为传统意义上的单筒吸力桩, ②、③为普通裙式吸力桩, ④为低裙式新型吸力桩。①是一个底端敞开、上端封闭的圆柱状桶结构; ②、③是在传统吸力桩的基础上增加一层裙边, 形成 T 型结构的裙式吸力桩, 若将②、③裙筒降低, 则形成十字型结构的低裙式吸力桩④。①桩顶设有抽气排水孔及测压

孔; ②、③除在桩顶设有抽气排水孔及测压孔之外, 在主桶与裙筒之间的裙顶还设有排水孔 (沉贯过程不连接吸力管道); 而④在主桶与裙筒之间的裙顶设抽气排水孔 (连接吸力管道)。在原有吸力桩模型的基础上增设导向杆, 以保证吸力桩模型在贯入过程中的垂直度。桩体示意图如图 1 所示, 各尺寸如表 1 所示。为了便于观察桩内土塞情况, 所有吸力桩模型材料均采用亚克力 (PMMA) 透明玻璃, 连接管道采用透明高分子承压管道。

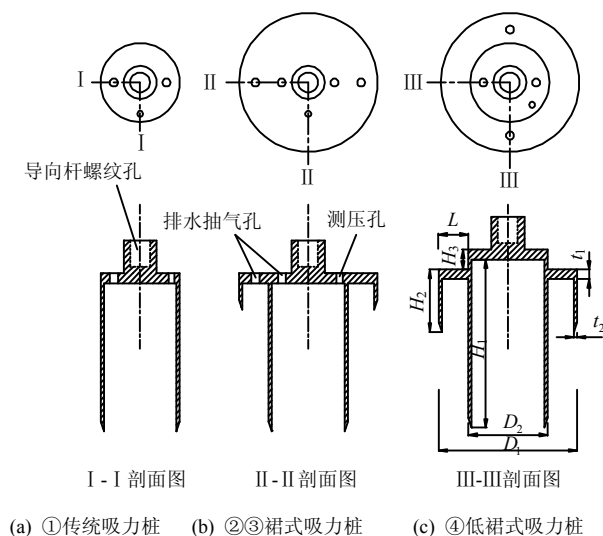


图 1 吸力桩结构示意图

Fig.1 Structure of suction caissons

表 1 吸力桩细部尺寸表

Table 1 Detail size table of suction caissons

模型 编号	主桶直径 D_2/mm	主桶高度 H_1/mm	裙桶直径 D_1/mm	裙桶高度 H_2/mm	高差 H_3/mm	顶厚 t_1/mm	壁厚 t_2/mm
①	120	255				15	5
②	120	255	200	55	0	15	5
③	120	255	200	75	0	15	5
④	120	255	200	75	30	15	5

本文提出的低裙式吸力桩模型④在结构外观及沉贯方式上均有别于文献[13]中提出的模型②或③。首先是结构外观方面, 如图 1 所示, 本文模型是在考虑了土塞不可避免的基础上, 降低了模型裙顶及裙边的高度, 使改进后的模型裙边能更好地保护主桶周围土体不受洋流刨蚀且不至于漏空, 同时期望同等高度的裙边能提高吸力桩水平承载力。其次是沉贯方式的不同, 本文采用双桶负压法沉贯, 而文献[13]中则采用单筒沉贯法, 双桶沉贯法更能提高裙式吸力桩的可贯性。本文试验模型 D/t 较大, 负压作用有效面积大, 桩端阻力相对较小, 有利于桩体沉贯。

2.2 土体制备

试验土样采用钙质低渗透高岭土, 颗粒直径主

要集中在 0.005~0.100 mm 之间,测得其塑限为 32%,液限为 59%。

试验模型箱尺寸为 1.0 m×0.9 m×0.8 m(长×宽×高)。使用正反循环强制式搅拌机,将天然含水率为 5%的松散高岭土加水搅拌成目标含水率为 90%的均质泥浆。然后在试验箱内加入适量水,将泥浆在水下一层层均匀摊铺以保证箱体内泥浆的饱和度,直至预定高度,静置 3 d 后,抽走上层清水,测得表面泥浆含水率为 93.1%。

箱内由下而上依次为:30 mm 厚砾石、 $\phi 26$ mm 钢丝螺纹滤管等间距排列、一层土工布、50 mm 厚中粗砂、一层土工布、700 mm 厚高岭土泥浆、一层土工布、HDPE 防渗膜密封。试验装置及模型箱立面布置如图 2 所示。

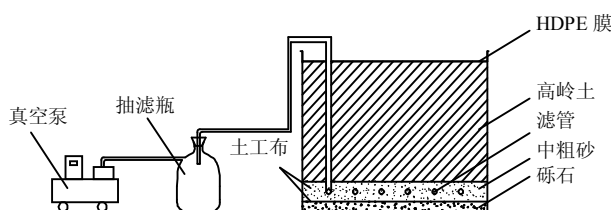


图 2 试验装置及模型箱布置示意图

Fig.2 Experimental apparatus and the model box

海底土层主要是冲积和沉积作用形成,其主要黏土矿物为伊利石和蒙脱石^[18]。由于沉积历史不同,天然海底土往往呈现为成层特性,其力学特性也常常表现为各向异性。但考虑到吸力桩有着较小的长径比,其入土深度相对于灌注桩很小,桩身大多处于海洋土表层,且本文主要研究吸力桩的真空沉贯阻力及抗拉拔承载力,故在土样制备时着重考虑土体强度沿深度的分布,而忽略了海洋土成层特性。

为使箱体内土样强度能够快速提高并接近海底软黏土强度特点,采用超低位真空预压法加固箱内土体。超低位真空预压法是在真空预压法的基础上改进的一种快速加固土体的方法,其主要特点是在土层最底层抽真空,使土体中的水向下渗流,以达到快速固结土体的目的,可减少试验周期。如图 2 所示,设置数控真空泵,使抽滤瓶中负压维持在 -75~-80 kPa 范围,抽真空 15 d,最终高岭土层厚度约为 550 mm,测得其物理性质指标:强度、重度、黏聚力、内摩擦角分别如图 3~6 所示,固结后的高岭土样在扫描电镜(SEM)下的微观结构如图 7 所示,无裂隙,土颗粒连接紧密,均质单一,整体呈絮状结构,结构性良好,无明显缺陷。

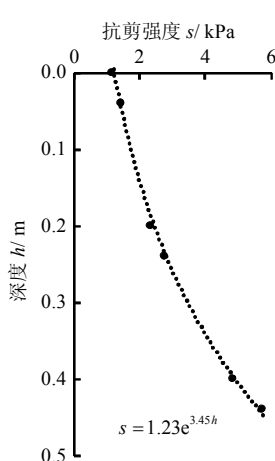


图 3 十字板抗剪强度分布图

Fig.3 Vane shear strength distribution

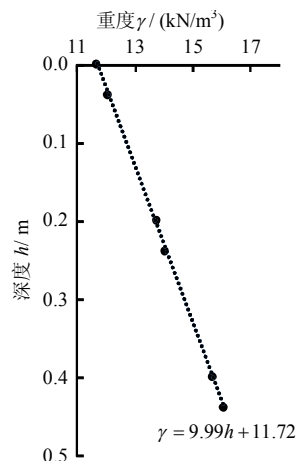


图 4 重度分布图

Fig.4 Unit weight distribution

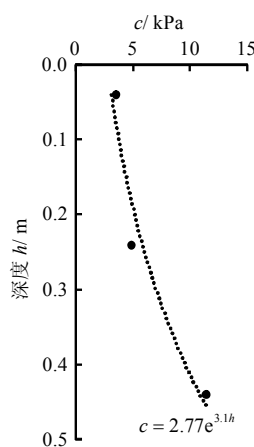


图 5 黏聚力 c 分布图

Fig.5 Variation of cohesion along the depth

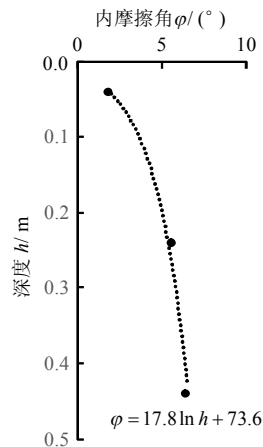


图 6 内摩擦角 phi 分布图

Fig.6 Variation of friction angle along the depth

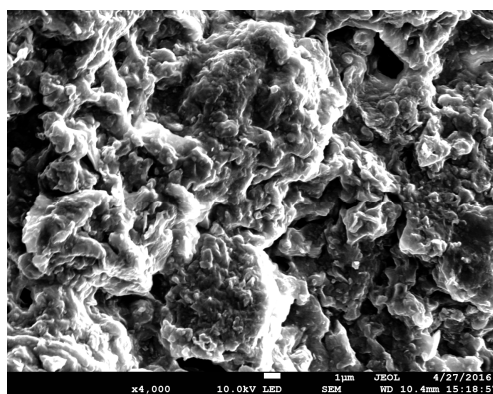


图 7 固结后的高岭土微观结构

Fig.7 Microstructure of kaolin after consolidation

2.3 吸力桩平面布置及沉贯装置

吸力桩贯入顺序及平面布置如图 8 所示,图中①、②、③、④分别代表不同型号的吸力桩模型,其具体参数见表 1。①、③桩水平间距为 500 mm,②、③桩竖向间距为 450 mm。

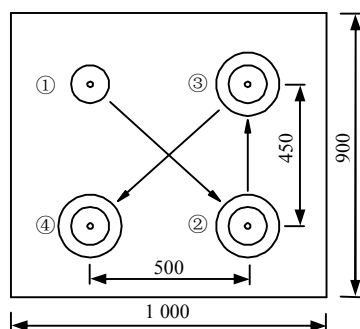


图 8 沉贯顺序及平面布置图 (单位: mm)
Fig.8 Penetration sequence and floor plan (unit: mm)

沉贯装置如图 9 所示, 主要由数控真空泵、抽滤瓶、负压及位移监测系统组成。本试验的负压采用微型孔压计测定并使用与其配套的数据采集卡采集记录。沉贯过程如图 10 所示。

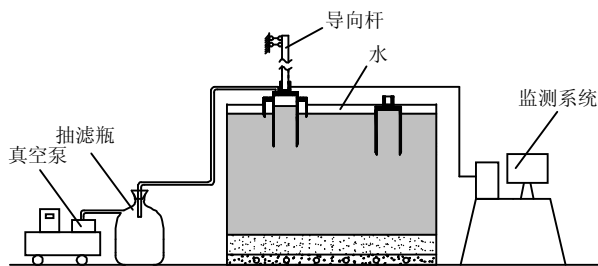


图 9 沉贯装置示意图
Fig.9 Schematic of the penetration device

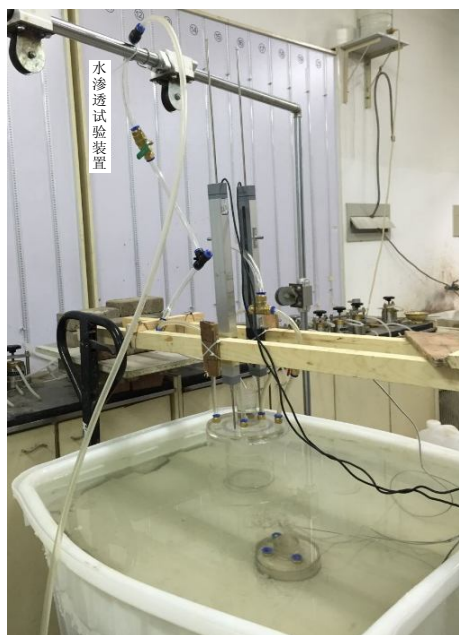


图 10 吸力桩模型沉贯过程
Fig.10 Penetration process of suction caisson

2.4 拔桩试验装置

采用自主研发的立面内多角度拉拔试验装置对

已贯入的吸力桩进行拉拔试验, 此装置的特点在于连接在滑块上的滑轮可在钢架横杆及竖杆上任意位置滑动或固定, 从而实现拉索与被拉物之间的角度变换, 进而实现试验目的。具体如图 11 所示, 拉拔试验如图 12 所示。

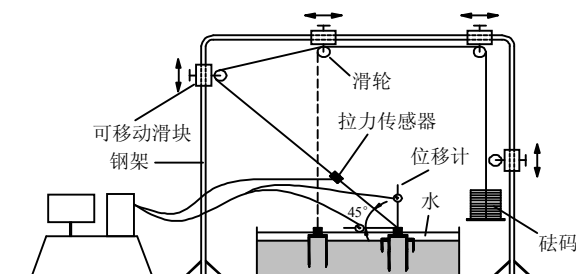


图 11 拔桩试验装置示意图
Fig.11 Device schematic of suction caissons drawing test

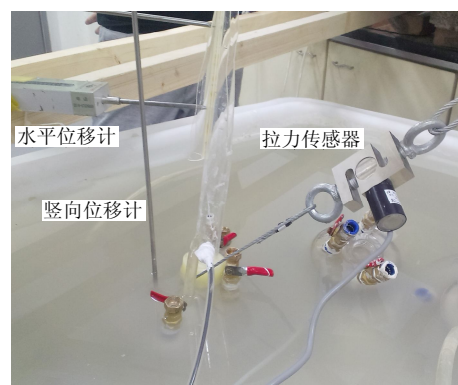


图 12 吸力桩模型 45° 拉拔试验
Fig.12 The 45° drawing test of suction caissons

2.5 试验流程

吸力桩模型沉贯过程与实际工程施工工况基本一致, 主要为桩体就位、管道安装、负压沉贯、桩顶封闭、管道拆除等过程。

本试验共分为 3 个阶段:

(1) 控制真空泵负压加载速率, 使传统吸力桩①以一定的速率贯入土体, 确定其土塞高度, 优化裙式吸力桩②、③, 降低其裙顶及裙边高度形成低裙式吸力桩模型④。

(2) 采用抽真空法贯入吸力桩模型②、③、④。

(3) 静置 3 d 后采取逐级加载的方式对吸力桩②、③、④做 45° 拉拔试验, 直至桩体完全丧失承载能力。

沉贯过程中, 低裙式吸力桩④在裙边接触泥面以前, 其裙顶抽气排水孔与真空泵之间的阀门处于关闭状态, 待裙边完全接触泥面以后, 再打开阀门。

2.6 沉桩试验结果

在沉贯过程中, 为了避免模型之间的相互影响,

按图 8 所示的顺序,在模型试验箱内分阶段依次贯入 4 种不同规格的吸力桩模型,得到的负压荷载-沉贯量曲线如图 13 所示。沉桩过程会对桩周土产生扰动影响,但随其距离的增加,土体受扰动程度越小。由于本试验模型的 D/t 较大,属于部分挤土桩,相对实体桩而言对桩周土的扰动较小,且采用真空沉贯法,能进一步减小桩周土的受扰动情况。因此本文桩间距对沉桩影响相对较小。

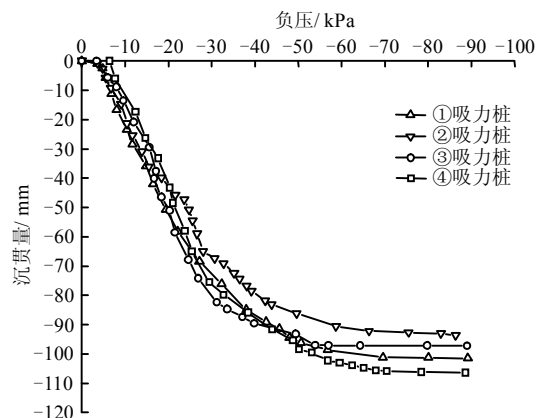


图 13 吸力桩模型荷载-沉贯量曲线
Fig.13 Load-penetration curves of suction caissons

为观察水塞高度的变化情况,模型没有完全淹没在水中,所以沉贯过程中先抽的是空气,后期抽的是水。由于气流的不稳定性,所采集的负压值会有所波动,然而本文在绘制图 13 的过程中,所有负压值均采用 1 min 之内所采的多个负压值的平均值。总体而言,无论是抽水还是抽气,其目的都是减小筒内负压提供压力差,使桩体能够在压力差作用下下沉,原理上没有太大差别。但具体来说,由于水重度远大于空气,抽真空设备正常工作情况下抽水比抽气更加稳定,且抽水时可以控制流量,而气流很难控制。

由上图可知,在本试验条件下,吸力桩①、②、③、④的沉贯趋势基本一致,下沉过程中所需维持的负压随下沉深度呈抛物线增长^[13]。

由图 13 可知,最终沉贯负压达到 90 kPa 左右,相对于本试验土体强度而言较大,这是由于固结后的泥面相对于桩顶平面而言凹凸不平,当凸出的泥面接触桩顶时不能作为试验停止的标志,故需继续加大负压,使主桶顶面完全接触土塞表面而后溢出白色泥浆,才停止试验。

相对于单筒吸力桩①及普通裙式吸力桩②、③,新型低裙式吸力桩④的可贯性良好,不因桩体结构形式的改变而降低,这是因为在沉贯吸力桩④时采

用双桶负压沉贯的原因,具体叙述如下:

API 规范^[12]及丁红岩等^[19]指出,在吸力沉贯时,必须施加足够的吸力以使吸力桩下沉,同时吸力也应控制在一定的范围内,以使土体不致发生整体失稳破坏形成过大土塞。因此,当最大吸力压强 P 一定,吸力桩直径、地基土强度确定时,吸力桩的沉贯效应 S 取决于压力差作用的有效面积,有效面积越大,沉贯效应越大,最终沉贯量也越大,从而土塞高度相对越小。

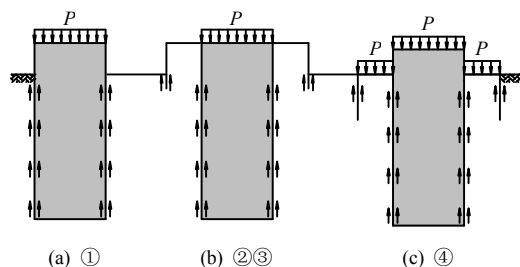


图 14 吸力桩模型沉贯结果示意图
Fig.14 Penetration results of suction caissons

上图分别表示①、②、③、④吸力桩的沉贯结果。在相同沉贯吸力值 P 作用下,①桩内由于负压引起的渗流力促使桩外土体不断涌入主桶产生土塞,②、③桩同样也会产生,并且由于裙的阻碍作用,使桩体沉贯速率减小,渗流力作用时间相对延长,导致土塞高度增加,造成桩身材料浪费,且高出泥面的裙边作用不大,裙桶内容易形成水塞。而④桩由于降低了裙高且采用双桶负压沉贯法的方式,相对于②、③沉贯效应增大,能够克服阻力继续下沉,有效减小土塞高度,最大程度发挥桩体性能。

因此,由图 13 可知,对于裙高度相同的吸力桩模型③和④,采用双桶负压法沉贯的吸力桩④要比单桶负压法沉贯的吸力桩③贯得深。

此外,本文还充分考虑了时间效应,即加载速率对沉贯结果的影响,试验过程中尽可能使①、③、④吸力桩沉贯速率相同且维持在 0.65 mm/min,而使②吸力桩沉贯速率维持在 0.35 mm/min。所得位移时程曲线如图 15 所示。由图可知吸力桩①、③、④所反映的时间-位移曲线趋势基本一致,试验过程中发现土塞大约在 180 min 时形成,而吸力桩②沉贯速率相对最慢,其土塞大约在 270 min 形成。吸力桩的最终沉贯量有所差异,由此可见,土塞的高度与沉贯速率有一定关系^[20]。

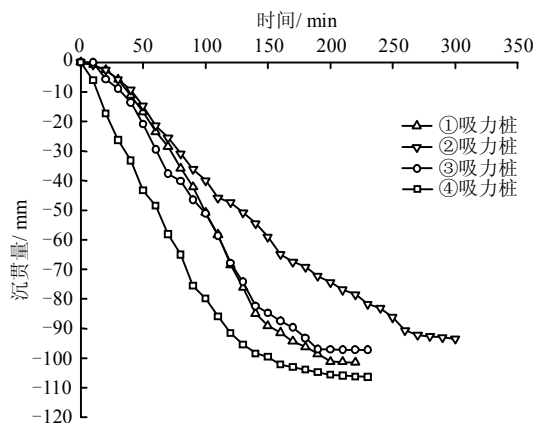


图 15 吸力桩模型位移时程曲线

Fig.15 Displacement-time curves of suction caissons

在沉贯末期, 为保证主桶内土体不发生管涌破坏, 将桩顶管道刚好出现白色高岭土泥浆做为停止施加负压的标志, 最终所得各桩自然沉贯量 (即吸力桩在自身、导向杆、阀门及管道重力作用下的沉贯量)、吸力沉贯量以及土塞高度如表 2 所示, 沉贯结果如图 16 所示。

表 2 吸力桩模型沉贯结果

Table 2 Penetration results of suction caisson model

模型 编号	主桶有效 长度 H / mm	自然沉贯量 h_1 / mm	吸力沉贯量 h_2 / mm	土塞高度 h_3 / mm
①	240	105.50	101.50	33
②	240	100.40	93.60	46
③	240	102.75	97.25	40
④	240	106.60	106.40	27



图 16 吸力桩模型沉贯结果

Fig.16 Penetration results of suction caissons

由表 2 及图 15 可以得出:

(1) 对比②、③吸力桩可知, 沉桩速率对土塞高度有明显影响, 即沉贯速率越慢, 土塞高度越高。

(2) 对比②、③、④吸力桩可得, 在本试验条件下, 低裙式吸力桩的可贯性优于普通裙式吸力桩, 此沉贯方法可有效降低土塞高度, 提高桩体承载力。

3 理论分析

3.1 试验验证

由图 13 可知, 当负压为 -50 kPa 左右时, 荷载-沉贯量曲线出现拐点, 说明裙式吸力桩裙边已进入泥面, 沉贯阻力增大, 沉贯量增长曲线趋于平缓, 此时有效沉贯阻力也随之增大。本文根据各桩实际贯入量, 按照已有文献[4]的计算公式:

$$R = Q_f + Q_p = \sum f_b A_b + q_d A_p \quad (1)$$

式中: R 为沉贯阻力 (kN); Q_f 为桩侧摩阻力 (kN); Q_p 为桩端阻力 (kN); f_b 为桩侧面单位面积摩阻力 (kPa), 取土的不排水抗剪强度 c_u ; A_b 为桩侧面面积 (m^2); q_d 为桩端部地基单位面积承载力 (kPa), 黏性土取 $q_d = 9c_u$; A_p 为桩端部总面积 (m^2)。

将式 (1) 中 c_u 用本文试验得到的室内十字板剪切强度 s 替换, $s = 1.23e^{3.45h}$ (见图 3), 可得到本试验各裙式吸力桩裙边进入泥面之前的最大沉贯阻力。具体分析计算如下:

沉贯过程中的效应可由下式表示:

$$S = W + P_p \quad (2)$$

式中: S 为沉贯效应 (kN); W 为桩体、部分管道、阀门、导向杆自重 (kN), 试验测得 $W = 0.027$ kN, 本文取 0.03 kN; P_p 为负压荷载 (kN), $P_p = (\pi D^2 P_a) / 4$, P_a 为各桩主桶内实测压强值 (kPa)。

根据上述计算式 (1)、(2), 桩内实测负压值及实际沉贯量, 计算可得各桩沉贯效应及相应沉贯阻力如表 3 所示。

表 3 吸力桩沉贯效应及沉贯阻力

Table 3 Penetration effect and resistance test of suction caissons

桩号	沉贯量 / m	S / kN	R / kN	接近率 / %
①	0.195	0.51	0.38	0.75
②	0.193	0.50	0.37	0.74
③	0.196	0.50	0.38	0.76
④	0.192	0.51	0.37	0.73

由上表计算结果可知, 沉贯效应 S 与沉贯阻力 R 比较接近, 接近率达 75% 左右, 证明了本文试验与理论的相一致性。

计算得到的沉贯阻力 R 略小于沉贯效应 S , 这主要是由两方面原因造成的。①因为吸力沉贯引起水在土体中的渗流, 产生的渗流力增加了吸力桶形基础外部土体有效应力, 但减小了桶内部土体和桶尖端处土体的有效应力, 使吸力桶形基础的总贯入阻力减小^[21]; ②因为在计算最大沉贯阻力时, 沉贯

量取桩外侧有效沉贯量，而忽略了桩内土塞高于桩外泥面部分所引起的摩擦阻力。

3.2 沉桩机制分析

为减小上述原因所引起的误差，本文从平衡理论出发，结合试验数据，拟合出更符合实际情况的沉贯阻力表达式，为海上施工作业提供参考依据。

分析可知，吸力桩沉贯效应主要有沉贯负压及桩身自重，沉贯阻力有主桶内、外摩擦力及桩端阻力。由于桩体在沉贯过程中速度缓慢且不间断，故不考虑加速度引起的惯性力，假定沉贯效应 S 等于沉贯阻力 R 。即

$$S = R \quad (3)$$

以此为依据，在文献[4]已有计算公式的基础上，假设沉贯阻力 R 与十字板剪切强度 s 存在如下

关系：

$$R = 2k_1 s A'_b + k_2 s A_p + k_3 \quad (4)$$

式中： A'_b 表示某一时刻吸力桩贯入海床中的单侧侧面积；通过本文试验数据进行拟合，求得 $k_1 = 2$ ， $k_2 = 1$ ， $k_3 = -0.2 \text{ kN}$ 。

因此，沉贯阻力 R 关于室内十字板剪切强度 s 的表达式可表示为

$$\left. \begin{aligned} R &= 4sA'_b + sA_p - 0.2 \\ s &= 1.23e^{3.45h} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

整理上述结果可知沉贯阻力 R 是沉贯量 h 的函数。将沉贯量 h 代入式(5)，所得沉贯阻力-沉贯量曲线与沉贯效应-沉贯量的吻合程度如图 17 所示。

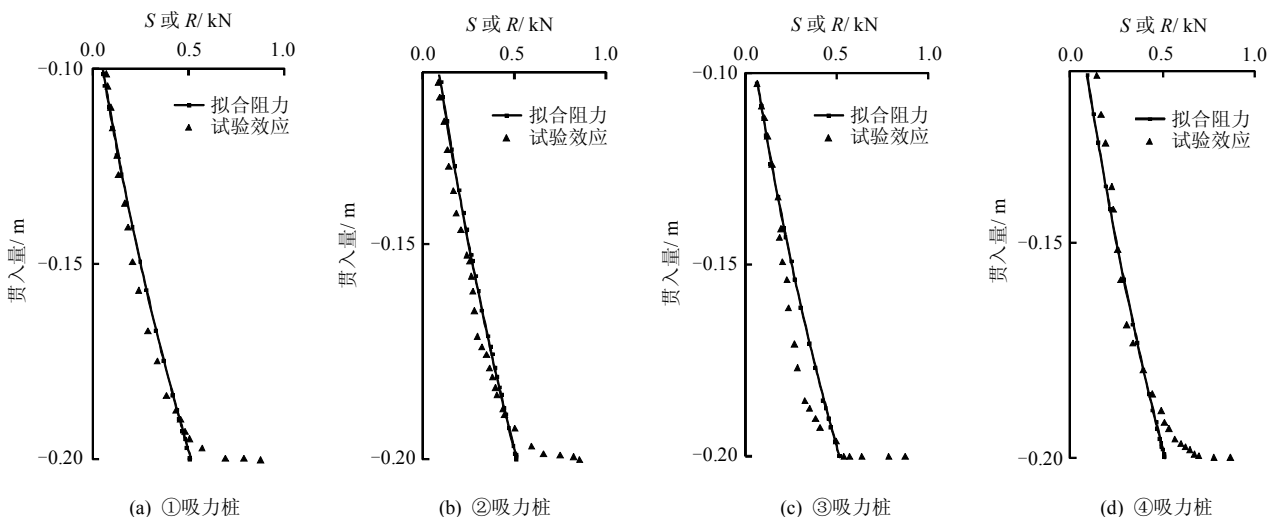


图 17 吸力桩试验效应与拟合阻力

Fig.17 Penetration effect and resistance fitting of suction caissons

由图可知，在土塞完全形成之前，沉贯效应与拟合的沉贯阻力吻合程度较高，符合实际情况。将桩内实测负压值 P 及沉贯量代入式(2)、(5)，可得各桩沉贯效应及沉贯阻力如表 4 所示。

表 4 吸力桩沉贯效应及沉贯阻力
Table 4 Penetration effect and resistance of suction caissons

桩号	沉贯量/m	S/kN	R/kN	接近率/%
①	0.195	0.51	0.48	0.94
②	0.193	0.50	0.47	0.94
③	0.196	0.50	0.49	0.98
④	0.192	0.51	0.47	0.92

由表可知，沉贯阻力与沉贯效应的接近率约为 95%。对比表 3 及表 4 可知，式(5)相对于式(2)得到的最大沉贯阻力 R 更接近与沉贯效应 S ，证明

了拟合公式(5)的合理性。

3.3 吸力桩拉拔试验结果与分析

为尽可能减小所拔桩体对其他未拔桩体的影响，在保证立面内拉拔角度为 45° 的前提下，本文灵活选择平面拉拔角度，减小相互桩体之间的影响。对已贯入的裙式吸力桩②、③、④进行 45° 斜拉试验，加载方式为等时间间隔逐级均匀加载，拉力传感器监测到的拉力-时间曲线如图 18 所示。

由图可知，起始阶段拉力随时间呈线性增长，当桩体抗拔承载力达到极限值之后，抗拔能力在短时间内迅速下降至 0 附近，标志着此时桩体已完全丧失承载能力。

试验所得到的拉力-斜位移曲线如图 19 所示。图中，无论是模型试验还是有限元模拟（见下文 3，模拟结果如图 19 模拟曲线），都表明桩体的斜拉抗

拔承载力与裙有关,对比吸力桩②、③可知,当裙长度的增加 20 mm,吸力桩 45° 抗拔承载力增加 32%,对比吸力桩③、④可知,由于土塞的阻碍,合理降低裙高度(相当于增大裙长度)能有效提高桩体承载能力,本试验提高了 23%。

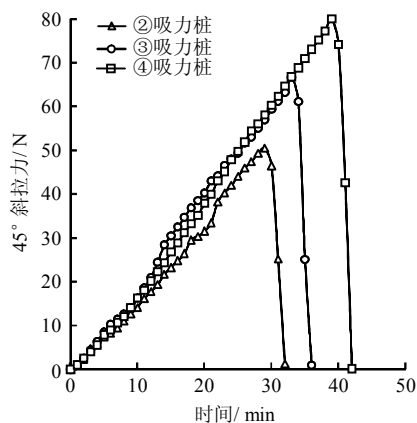


图 18 裙式吸力桩拉力-时间曲线

Fig.18 Tensile force-time curves of skirted suction caissons

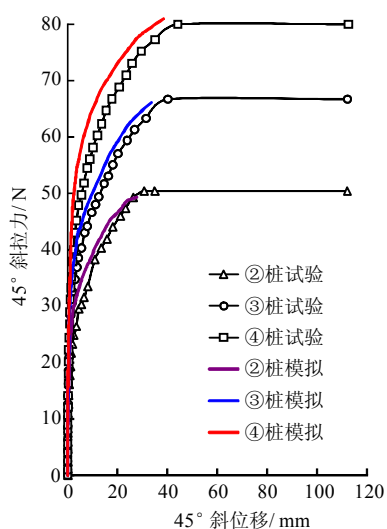


图 19 裙式吸力桩拉力-斜位移曲线

Fig.19 Tensile force-displacement curves of skirted suction caissons

4 PLAXIS 3D 岩土有限元数值模拟

4.1 模型的建立与参数设置

为了和模型试验数据做对比,相互验证,本文采用岩土有限元分析软件 PLAXIS 3D 对饱和高岭土中吸力桩承载力展开数值模拟研究。

PLAXIS 3D 软件包含许多本构模型,如 Mohr-Coulomb 模型、HS 土体硬化模型(hardening soil model)、HSS 小应变硬化模型(HS-small strain stiffness)等,由于 HSS 模型所反映的土体刚度与

应力相关,既反映了土体的复杂非线性特性,又考虑了土体小应变阶段刚度增大问题,适合于大部分土体,因此,本文采用 HSS 模型。

低裙式吸力桩的模型及网格划分如图 20 所示,对应于前期开展的模型试验,本次有限元分析中吸力桩与模型试验中尺度一致,具体尺寸见表 1。

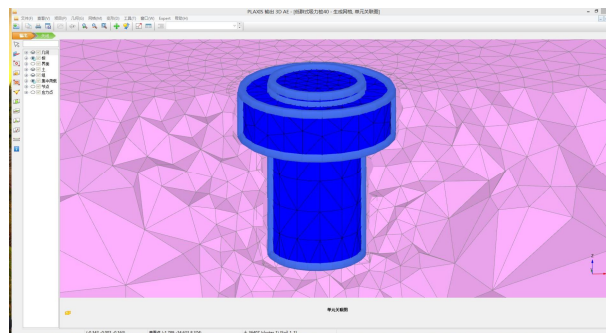


图 20 低裙式吸力桩④有限元模型及网格划分

Fig.20 Finite element model and mesh of low skirted suction caisson No.4

对于土体边界条件的设置,参考文献[22-24],取水平方向为桩体主桶尺寸的 13 倍、竖直方向为 6 倍主桶直径的土体作为边界,此时土体边界效应对计算结果的影响可以忽略不计。土体采用 10 节点四面体实体单元划分网格,桩体采用 6 节点板单元划分网格,桩体与土体接触部分设置 12 节点界面单元。根据 PLAXIS 用户手册可知,界面单位属性与周边的土模型参数相关,这些参数依赖于周边土体所选用的材料模型。本文中界面参数选用相邻土体参数,并给予强度折减系数 0.8。土体表面设置高度为 15 cm 的水层,PLAXIS 3D 可根据模型需要任意设置水头高度。顶面为自由边界,侧面施加水平向约束,底面施加固定约束。加载模式采用逐级加载分步施工模式,在加载计算的过程中,当桩体位移突然增大,土体崩塌,计算不收敛时作为计算的终止条件。

4.2 计算结果与分析

分别按照上述模型条件及参数分别建立吸力桩②、③、④有限元模型,输入模型试验加载参数,得到的拉力-位移曲线如图 19 所示。由图可知,与室内模型试验所得曲线基本吻合。拉拔后的桩体相对位置及土体破坏情况如图 21 所示,桩体沿拉力方向整体移动,左侧泥面随桩体右移下凹,而右侧泥面由于桩顶及裙顶的带动作用上凸。从总位移场图 22 可知,桩体左侧表面 A 处土体呈现水平位移,靠近桩体的 B 处土体具有斜向下的位移,这是由于桩体向右移动出现缝隙,左侧土压力迫使土体斜向下

移动, C 处的土体在主桶的带动下表现为 45° 斜向上的位移场, 与桩体位移基本一致, D 处由于上拔力的作用而出现了竖直向上的位移场, E 处由于桩体的挤压及带动呈现斜向上的位移, F 处在桩体的移动和带动作用, 土体隆起。

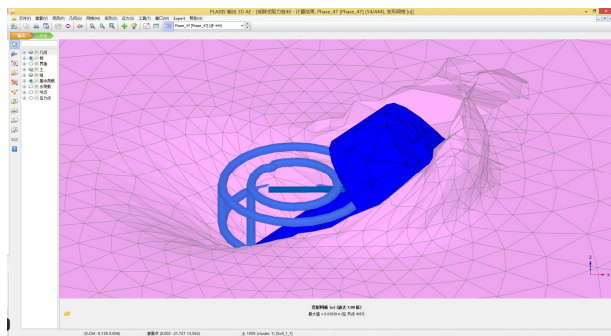


图 21 吸力桩④ 45° 拉拔桩体位移及土体破坏模拟结果
Fig.21 Simulation results of displacement and destruction of the soil of the suction caisson No.4

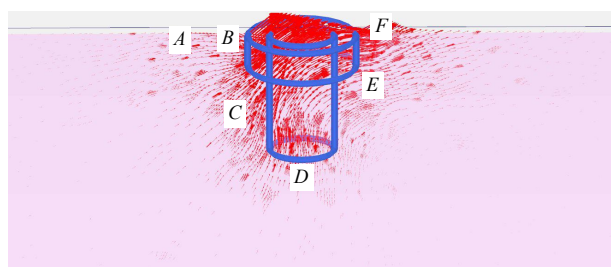


图 22 吸力桩④ 45° 拉拔土体位移场模拟结果
Fig.22 Soil displacement field of the suction caisson No.4 by simulation

5 结 论

(1) 新型低裙式吸力桩吸力可贯性良好, 易于施工。

(2) 由于内外压力差及渗流力的存在, 采用抽真空法沉贯吸力桩时, 土塞现象不可避免。

(3) 双桶负压沉贯方式能有效降低吸力桩土塞高度, 增加桩体有效长度, 提高吸力桩承载力。

(4) 在强度沿深度方向增加的土层中采用抽真空法沉贯吸力桩时, 吸力桩沉贯阻力是沉贯量的函数。

(5) 本试验中, 低裙式新型吸力桩的承载能力相对于普通裙式吸力桩提高了 23%。

(6) 超低位真空预压法能够快速固结软黏土, 且固结后的土体整体性良好、强度随深度增加。

参 考 文 献

[1] 张建红, 孙国亮, 严冬, 等. 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, et al. Geotechnical centrifuge modeling on suction caissons in offshore engineering[J]. *Ocean Engineering*, 2004, 22(2): 90—97.

[2] 丁红岩, 刘振勇, 陈星. 吸力锚土塞在粉质黏土中形成的模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(4): 442—444.

DING Hong-yan, LIU Zhen-yong, CHEN Xing. Model tests on soil plug formation in suction anchor for silty clay[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2001, 23(4): 442—444.

[3] 丁红岩, 杜杰, 戚兰. 吸力锚下沉过程中土塞高度计算[J]. 天津大学学报, 2002, 35(4): 439—442.

DING Hong-yan, DU Jie, QI Lan. The height calculation of soil plug during suction anchor penetration[J]. *Journal of Tianjin University*, 2002, 35(4): 439—442.

[4] 刘俊滨, 李玉峰, 刘金铎. 吸力锚沉放过程中土塞形成的有限元分析[J]. 水科学与工程, 2007, (3): 39—42.

LIU Jun-bin, LI Yu-feng, LIU Jin-duo. Finite element analysis of soil plug forming during suction anchor penetration[J]. *Water Sciences and Engineering Technology*, 2007, (3): 39—42.

[5] 孙东昌, 张士华, 于鸿洁, 等. 桶形基础负压沉贯特性分析[J]. 海岸工程, 1999, 18 (1): 33—36.

SUN Dong-chang, ZHANG Shi-hua, YU Hong-jie, et al. Characteristic analysis of bucket foundation during penetration by suction[J]. *Coastal Engineering*, 1999, 18 (1): 33—36.

[6] 杨少丽, 李安龙, 齐剑锋. 桶基负压沉贯过程模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(2): 236—238.

YANG Shao-li, LI An-long, QI Jian-feng. Experimental study on bucket foundation during penetration by suction[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2003, 25(2): 236—238.

[7] 杨少丽, GRANDE LARS, 齐剑锋, 等. 桶基负压沉贯下粉土中水力梯度的变化过程[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(6): 662—665.

YANG Shao-li, GRANDE LARS, QI Jian-feng, et al. Process of hydraulic gradient in silt during penetration of bucket by suction[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2003, 25(6): 662—665.

[8] 朱儒弟, 高恒庆, 马小兵, 等. 海上平台桶形基础模型压力压贯与负压沉贯试验研究[J]. 海岸工程, 1999,

- 18(1): 60—66.
- ZHU Ru-di, GAO Heng-qing, MA Xiao-bing, et al. Offshore bucket foundation model penetration by pressure and suction test research[J]. **Coastal Engineering**, 1999, 18(1): 60—66.
- [9] 李大勇, 吴宇旗, 张雨坤, 等. 沙土中桶形基础吸力值的设定范围[J]. 岩土力学, 2017, 38(4): 985—991.
- LI Da-yong, WU Yu-qi, ZHANG Yu-kun, et al. Determination of suction range for penetration of suction caissons in sand[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(4): 985—991.
- [10] 朱斌, 孔德琼, 童建国, 等. 粉土中吸力式桶形基础沉贯及抗拔特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(7): 1045—1053.
- ZHU Bin, KONG De-qiong, TONG Jian-guo, et al. Model tests on penetration and pullout of suction caissons in silt[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2011, 33(7): 1045—1053.
- [11] ANDERSON K H, JOSTAD H P, DYVIK R. Penetration resistance of offshore skirted foundations and anchor in dense sand[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2008, 134(1): 106—116.
- [12] API RP-2SK, Recommended practice for design and analysis of stationkeeping systems for floating structures[S]. Washington D. C.: American Petroleum Institute, 2005.
- [13] 李大勇, 刘小丽, 孙宗军. 海上风电塔架基础的新型吸力锚研发[J]. 海洋技术, 2011, 30(3): 83—87.
- LI Da-yong, LIU Xiao-li, SUN Zong-jun. A new type of suction anchor foundation research and development used on offshore wind tower[J]. **Marine Technology**, 2011, 30(3): 83—87.
- [14] 李大勇, 张雨坤, 高玉峰, 等. 中粗砂中吸力锚的负压沉贯模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(12): 2278—2283.
- LI Da-yong, ZHANG Yu-kun, GAO Yu-feng, et al. Model tests on penetration of suction anchors in medium-coarse sand[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2012, 34(12): 2278—2283.
- [15] 李大勇, 王梅, 刘小丽. 离岸裙式吸力基础在砂土地基中沉贯性研究[J]. 海洋工程, 2011, 29(1): 111—115, 148.
- LI Da-yong, WANG Mei, LIU Xiao-li. Behavior of installation of offshore skirted suction foundation in sand[J]. **Ocean Engineering**, 2011, 29(1): 111—115, 148.
- [16] 李大勇, 冯凌云, 郭彦雪, 等. 裙式吸力基础水平承载数值分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增刊 1): 33—38.
- LI Da-yong, FENG Ling-yun, GUO Yan-xue, et al. Numerical analysis of lateral bearing behaviors of skirted suction caissons[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2013, 35(Supp.1): 33—38.
- [17] 李大勇, 冯凌云, 张雨坤, 等. 饱和细砂中裙式吸力基础水平单调加载模型试验——承载力及变形分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(11): 2030—2037.
- LI Da-yong, FENG Ling-yun, ZHANG Yu-kun, et al. Model tests on lateral bearing capacity and deformation of skirted suction caissons in saturated fine sand under horizontal monotonic loading[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2013, 35(11): 2030—2037.
- [18] 钱寿易, 杜金声, 楼志刚, 等. 海洋土力学现状及发展[J]. 力学进展, 1980, (4): 1—14.
- QIAN Shou-yi, DU Jin-sheng, LOU Zhi-gang, et al. Marine soil mechanics situation and development[J]. **Advances in Mechanics**, 1980, (4): 1—14.
- [19] 丁红岩, 张浦阳. 海上吸力锚负压下沉渗流场的特性分析[J]. 海洋技术, 2003, 22(4): 44—48.
- DING Hong-yan, ZHANG Pu-yang. The seepage field analysis of sea suction anchor penetration by suction[J]. **Marine Technology**, 2003, 22(4): 44—48.
- [20] 柳晓科. 低裙式吸力桩负压沉贯及其抗拔承载力试验研究[D]. 天津: 天津城建大学, 2017.
- LIU Xiao-ke. Model test on vacuum penetration and pullout of low skirted suction caissons[D]. Tianjin: Tianjin Chengjian University, 2017.
- [21] SENDERS M, RANDOLPH M F. CPT-based method for the installation of suction caissons in sand[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2009, 139(1): 14—25.
- [22] BIENEN B, GAUDIN C, CASSIDY M J. Numerical modeling of a hybrid skirted foundation under combined loading[J]. **Computers and Geotechnics**, 2012, 45(4): 127—139.
- [23] HUNG L C, KIM S R. Evaluation of vertical and horizontal bearing capacities of bucket foundations in clay[J]. **Ocean Engineering**, 2012, 52(1): 75—82.
- [24] 刘红军, 张浩, 李洪江, 等. 软黏土中伞式吸力锚基础水平承载有限元分析[J]. 岩土力学, 2017, 38(11): 3325—3331.
- LIU Hong-jun, ZHANG Hao, LI Hong-jiang, et al. Finite element analysis of horizontal bearing capacity of umbrella suction anchor foundation in soft clay[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(11): 3325—3331.