

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2024.06.003

## 低裙摩擦型吸力式基础及其可贯性对比试验

柳晓科<sup>1</sup>, 苏敏<sup>2</sup>, 鹿群<sup>3</sup>, 刘海涛<sup>1</sup>, 赵丽红<sup>4</sup>, 郭少龙<sup>3</sup>, 王清华<sup>5</sup>

(1. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300381; 2. 山东万斯达智筑教育科技有限公司, 济南 250000;  
3. 天津城建大学土木工程学院, 天津 300384; 4. 天津市恒德劳动服务有限公司, 天津 300350; 5. 中国电建市政建设集团有限公司, 天津 300384)

**摘要:**为进一步优化吸力式基础结构,减小“土塞”效应,提高吸力式基础的可贯性与承载力,文中提出了低裙摩擦型吸力式基础模型。通过室内模型试验对比研究了不同吸力式基础模型的负压( $P$ )-沉贯量( $y$ )曲线。给出沉贯力、沉贯阻力与沉贯量之间的关系,结合试验数据分析了不同桩型之间的差异,对比得出各类桩型的可贯性及沉贯量。结果表明,低裙摩擦型吸力式基础可贯性良好,能有效减小“土塞”效应,提高桩体承载力。

**关键词:**低裙摩擦型吸力式基础;可贯性;沉贯力;沉贯阻力

中图分类号: TU354

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2024)06-024-11

## Experimental research on development of low skirted friction suction caissons and its penetrability

LIU Xiaoke<sup>1</sup>, SU Min<sup>2</sup>, LU Qun<sup>3</sup>, LIU Haitao<sup>1</sup>, ZHAO Lihong<sup>4</sup>, GUO Shaolong<sup>3</sup>, WANG Qinghua<sup>5</sup>

(1. North China Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Tianjin 300381, P. R. China;  
2. Shandong Wansida Zhizhu Education Technology Co., Ltd., Jinan 250000, P. R. China; 3. School of Civil Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, P. R. China; 4. Tianjin Hengde Labor Service Co., Ltd., Tianjin 300350, P. R. China; 5. STECOL Corporation, Tianjin 300384, P. R. China.)

**Abstract:** In this study, a low skirted friction type suction caisson model was proposed to optimize suction foundation, reduce soil plugging effect, and improve penetrability and load capacity. Indoor model tests were conducted to investigate the relationship between penetration force, resistance and volume in negative pressure ( $P$ )-sinker volume ( $y$ ) curves with different suction caisson types. Furthermore, the study analyzed differences among various caisson models and confirmed their penetrability and sinker volume. Results demonstrate that the low-skirt friction type suction caisson, offering improved penetrability, effectively mitigates soil plugging and improves caisson bearing capacity.

**Keywords:** low skirted frictional suction caisson; penetrability; penetration force; penetration resistance

收稿日期: 2023-03-09

基金项目: 天津市技术创新引导专项(23YDTPJC00110); 中国电建市政建设集团有限公司 2020 年度重点项目(KHX2020-006); 中国市政工程华北设计研究总院有限公司 2023 年度重点课题(2023-20-JIUY)。

Supported by the Tianjin Technology Innovation Guidance Plan (23YDTPJC00110), the Key Projects of STECOL Corporation in 2020 (KHX2020-006), and Self-supporting Subject of North China Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd. (2023-20-JIUY).

作者简介: 柳晓科(1990—), 硕士, 工程师, 主要从事海洋风电基础研究及混凝土结构研究, (E-mail)atliuxiaoke@163.com。

通信作者: 鹿群(1970—)男, 教授, 博士, (E-mail)zdlq585@126.com。

随着海上风电资源的开发和利用,吸力式基础由于其安装简单、费用低廉、可循环利用等优越性被广泛应用于海上设施<sup>[1-2]</sup>。然而,吸力式基础在负压沉贯过程中会使桶内泥面上抬到桶顶产生“土塞”,阻止吸力式基础继续下沉,降低桩体沉贯量,影响桩体承载力,产生“土塞”效应<sup>[3]</sup>。“土塞”效应对吸力式基础在使用过程中的安全性极其不利。因此,有效降低“土塞”效应有利于解决实际工程问题。

目前,国内外学者对黏性土、粉土、砂土及层状土中吸力式基础的“土塞”效应都有较广泛的研究<sup>[4-7]</sup>,但结论有一定的差异。首先,关于“土塞”的大小,Rauch等<sup>[8]</sup>基于模型试验结果认为,土塞的体积与吸力式基础贯入地基土内的侧壁体积相等;而杨少丽等<sup>[9-10]</sup>通过模型试验发现,在未发生流土的情况下土塞的体积远大于置换土体的吸力式基础侧壁体积。其次,关于“土塞”的成因,丁红岩等<sup>[11]</sup>通过模型试验发现粉质黏土中吸力式基础内“土塞”与其所受压力差、沉放速度等因素有关;李大勇等<sup>[12-13]</sup>通过室内模型试验针对中粗砂地基中裙式吸力基础的沉贯特性进行了分析,发现渗流力是导致“土塞”发展的主要原因。刘俊滨等<sup>[14]</sup>采用有限元分析了“土塞”形成的机理,认为渗流力虽然可以大幅度降低基础端部阻力,但过大的渗流力会使桶内土体结构疏松产生大变形,形成“土塞”,甚至会使砂土地基中筒内土体液化而发生涌动,导致基础倾斜丧失承载力。关于“土塞”引起的承载力损失,Lee等<sup>[15-19]</sup>研究认为,吸力式基础的承载力不仅与荷载形式、作用点位置、作用时长等外界因素密切相关,与桩壁接触土体的面积呈正相关,受“土塞”影响使桶壁贯入量降低是影响吸力式基础承载力的主要因素。除此之外,柳晓科等<sup>[20]</sup>认为较高的“土塞”会改变吸力式基础周围洋流速率,刨蚀吸力式基础主桶周边土体,降低吸力式基础承载力,为保护主桶周围土体免受洋流刨蚀,提出了低裙吸力式基础模型。

笔者针对黏性土中吸力式基础“土塞”效应展开精细化研究。首先,对吸力式基础结构进行了优化,提出一种新型低裙摩擦型吸力式基础模型<sup>[21]</sup>,增大“土塞”与基础侧壁之间的作用力,有效抑制“土塞”生长,同时增大基础竖向刚度,增加基础抗变形能力,保证吸力式基础安全性。其次,在吸力式基础安装施工方面,继续深化施工及纠偏措施,采用双筒负压法沉贯,增加导向杆,保证吸力式基础安装的施工质量,提高吸力式基础的可贯性与承载力。

## 1 试验装置

### 1.1 低裙摩擦型吸力式基础试验

黏土中吸力式基础在负压作用下沉贯会不可避免地产生“土塞”<sup>[20]</sup>。压力差作用下由外而内的强渗流力是导致桩端处土体“突涌”及桶内土体结构疏松产生大变形形成“土塞”的主要原因。其次,渗流力降低了“土塞”与内桶壁之间的摩擦力,使“土塞”高度高于桶外泥面形成“土塞”。

基于以上原因,为更多地降低“土塞”高度,减小“土塞”生长速率,文中在原有低裙吸力式基础模型的基础上,通过在主桶内设置摩擦键,改变主桶内表面的光滑度,形成摩擦型吸力式基础。该摩擦键在桶内沿圆周均匀布置,在竖直方向从底端以上 $0.1H_1$ 处至裙顶下边缘布置处,如图1所示,实物模型如图2所示。

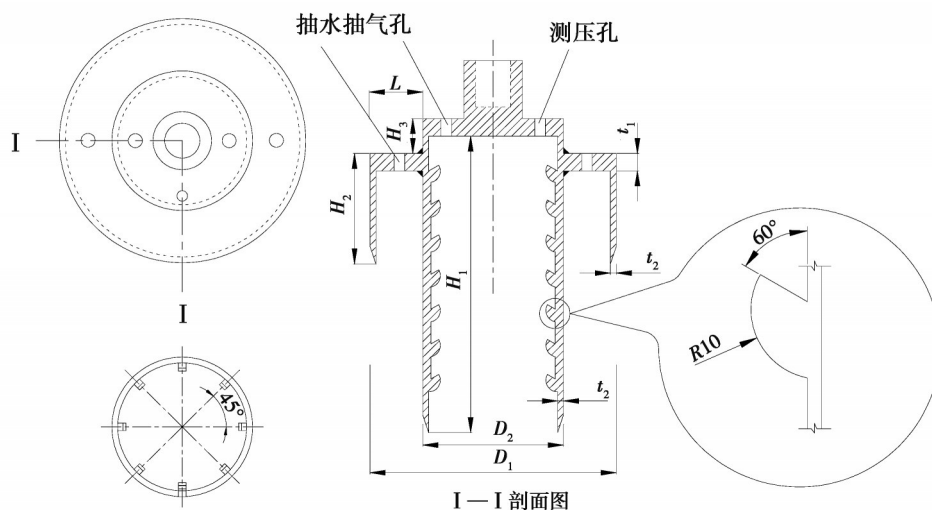


图1 新型低裙摩擦型吸力式基础结构示意图

Fig. 1 Structure of low skirted friction type suction caisson.

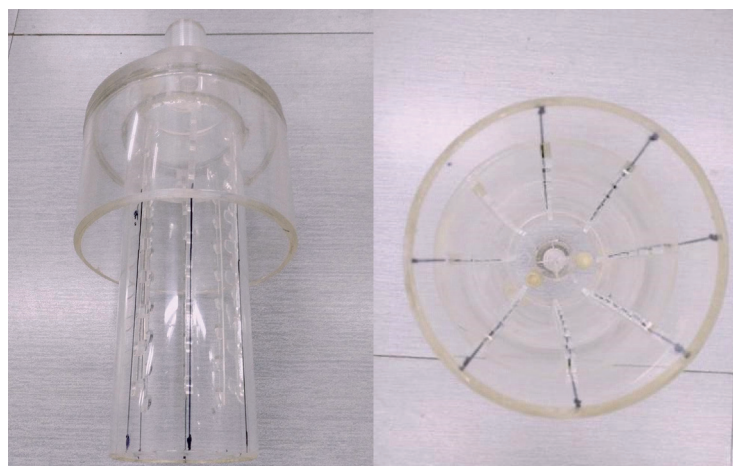


图2 新型低裙摩擦型吸力式基础模型

Fig. 2 Low skirted friction type suction caisson model

新型低裙吸力式基础模型中,设置摩擦键首先是为了增加了吸力式基础沉贯过程中桶内壁的粗糙程度,增大桩内壁与土的摩擦力,抑制桩端处土体“突涌”,弥补渗流力降低的“土塞”与内桶壁之间的摩擦力。其次,类似加劲肋的摩擦键可增加主桶竖向刚度,增大桩体主桶抗变形能力,使桩体更利于沉贯。此外,“倒刺”形凸缘可增加桩体抗拔过程中的承载力。

### 1.2 吸力式基础模型试验参数

为验证新型摩擦型吸力式基础的试验效果,共采用了4种类型的吸力式基础模型进行对比试验:①号桩为桶径120 mm的普通单筒吸力式基础,其底部敞开,顶部承台设有抽水(气)排水(气)孔及测压孔;②号桩为裙径240 mm、主桶径120 mm的普通裙式吸力式基础,是在传统吸力桩模型的基础上增加一层“裙边”,形成“T”型结构的裙式吸力式基础。除在桩顶设有抽水(气)排水(气)孔及测压孔之外,在主桶与裙筒之间的裙顶还设有排水孔(沉贯过程中不连接吸力管道);③号桩为将裙桶及裙顶降低形成的“十”字型结构的低裙吸力式基础<sup>[21]</sup>,在主桶与裙筒之间的裙顶设抽水(气)排水(气)孔(沉贯过程中连接吸力管道),如图3所示。④号桩为前述增加了摩擦键的新型低裙摩擦型吸力式基础模型,如图1所示,在主桶与裙筒之间的裙顶设抽水(气)排水(气)孔(沉贯过程中连接吸力管道)。试验各桩体尺寸如表1所示。

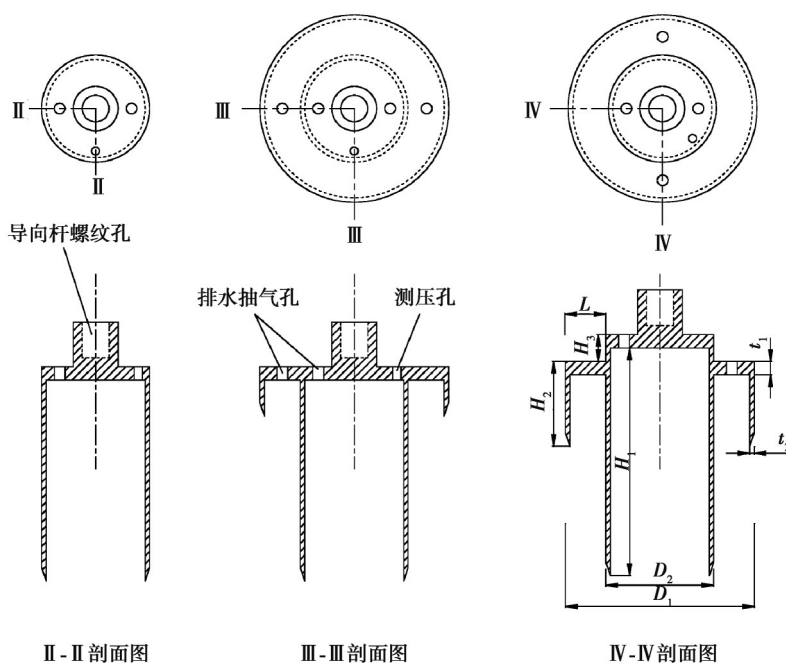
图3 吸力式基础结构示意图<sup>[20]</sup>

Fig. 3 Suction caissons structure

表 1 吸力式基础细部尺寸表  
Table 1 Detailed sizes of suction caissons

模型编号	主桶直径 $D_2/\text{mm}$	主桶高度 $H_1/\text{mm}$	裙桶直径 $D_1/\text{mm}$	裙桶高度 $H_2/\text{mm}$	高差 $H_3/\text{mm}$	顶厚 $t_1/\text{mm}$	壁厚 $t_2/\text{mm}$	摩擦键设置
①	120	380	—	—	—	20	10	否
②	120	380	240	140	0	20	10	否
③	120	380	240	140	60	20	10	否
④	120	380	240	140	60	20	10	是

降低裙边高度形成低裙吸力式基础是为了使裙桶尽早进入泥面,增加裙桶贯入量,提高桩体水平承载力。前期试验发现,①号桩的“土塞”高度 $>70\text{ mm}$ ,为了保证主桶完全沉贯而裙桶尽可能多地沉贯,取③号、④号低裙吸力式基础模型的桩顶、裙顶高差为 $60\text{ mm}$ 。为保证吸力式基础模型在贯入过程中的垂直度及便于观察桩内“土塞”增长情况,所有模型均设有导向杆,模型材料均采用亚克力(PMMA)透明玻璃。吸力式基础实体模型桩如图 4 所示。

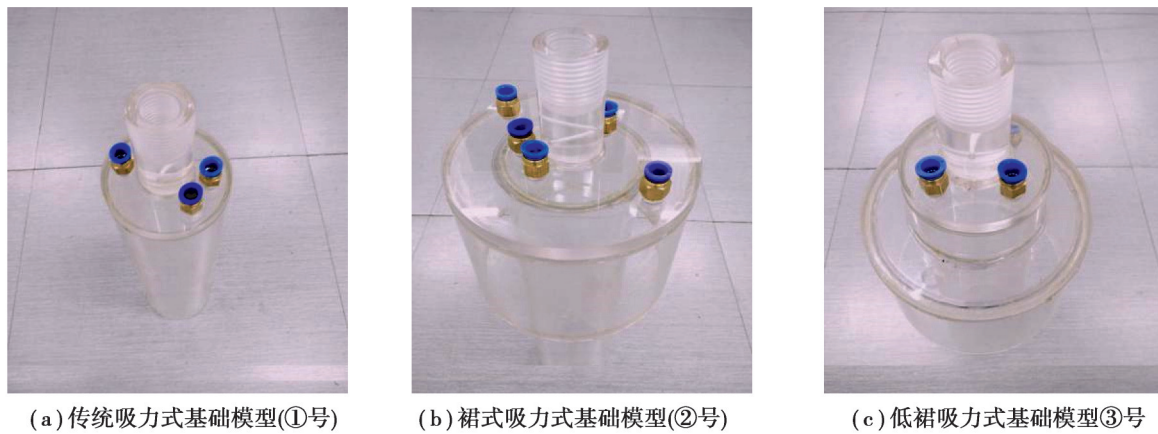


图 4 吸力式基础模型  
Fig. 4 Models of different suction caissons

### 1.3 试验土体及其力学特性

试验用土选用钙质高岭土,测其粒径范围为 $0.005\sim 0.1\text{ mm}$ ,塑限与液限分别为 $30\%、60\%$ 。经正、反循环强制式搅拌机加水搅拌后形成含水率为 $95\%$ 的泥浆,采用如图 5 所示的潮汐循环荷载固结软土装置<sup>[22]</sup>快速固结 $15\text{ d}$ 后备用,固结后土体厚度为 $0.65\text{ m}$ ,土体表面距离模型箱顶部 $0.35\text{ m}$ 。潮汐循环荷载通过储水箱中的水泵 $M_1$ 与模型箱中的水泵 $M_2$ 交替开启,使模型箱中水位呈周期性升降,进而对模型箱中土体进行周期性加载。

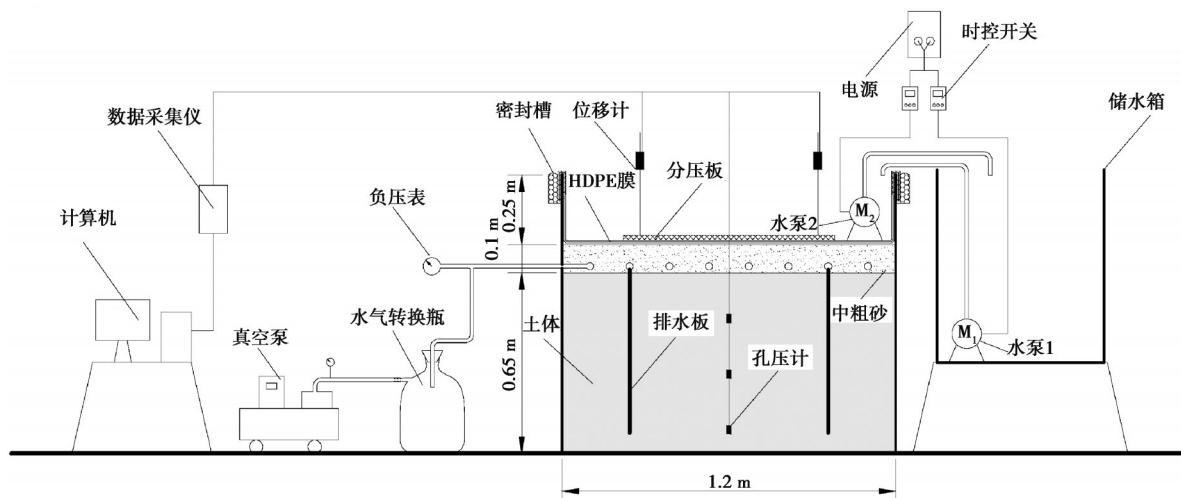


图 5 试验装置及模型箱布置示意图  
Fig. 5 Experimental apparatus and model box



采用室内直剪试验仪及室内微型十字板剪切仪测得固结后所得土体沿厚度方向的力学特性,分别如图6~8所示。

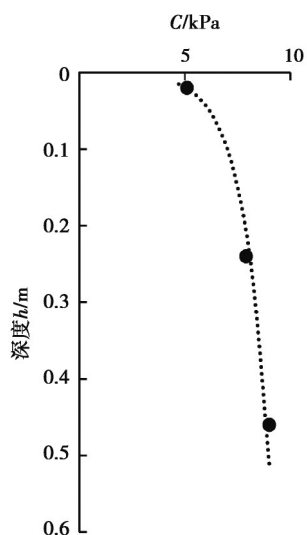


图6 黏聚力 $c$ 沿深度分布图  
Fig. 6 Cohesion distribution

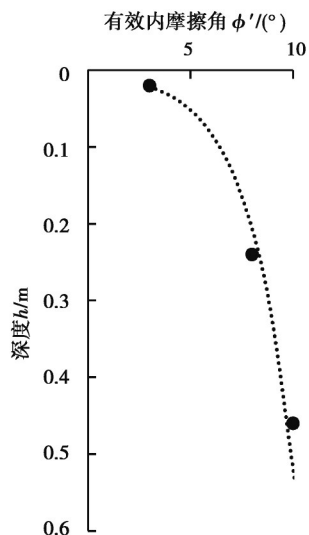


图7 有效内摩擦角 $\phi'$ 沿深度分布图  
Fig. 7 Friction Angle distribution

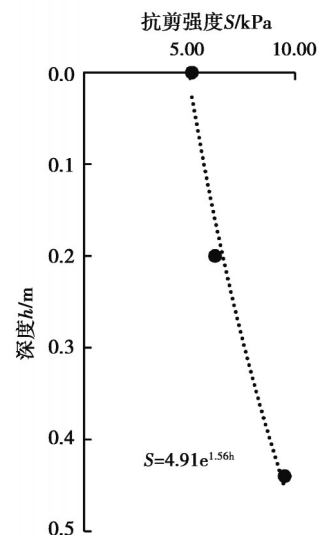


图8 十字板抗剪强度沿深度分布图  
Fig. 8 Vane shear strength distribution

## 1.4 试验辅助装置

### 1.4.1 模型箱

根据《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)基桩的最小中心距要求及桩距承台边缘的构造要求<sup>[23]</sup>,结合吸力式基础模型尺寸及数量,模型箱采用长×宽×高为1.2 m×1.2 m×1.0 m、壁厚5 mm不锈钢钢箱。在模型箱顶部及中部各设置1道50 mm×50 mm×8 mm(宽×高×厚)方钢进行加固以保证模型箱刚度,更真实地模拟实际工程土体边界条件。

### 1.4.2 吸力式基础沉贯装置

吸力式基础沉贯装置如图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。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自动采集记录。

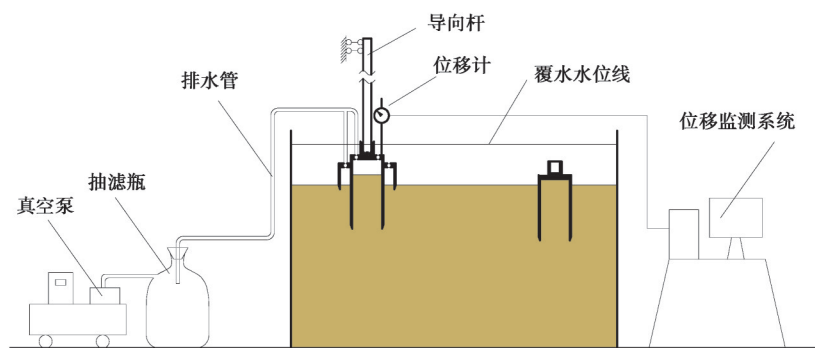


图9 沉贯装置示意图  
Fig. 9 Schematic diagram of penetration device

## 1.5 试验步骤

依据实际工程,吸力式基础模型沉贯过程分为2个阶段,即重力沉贯阶段和负压沉贯阶段。重力沉贯是依靠吸力式基础自身重力作用使桩体从水面以上下落至海床并切入海床一定深度,在主桶内形成密闭空间。负压沉贯是在重力沉贯结束后形成的密闭空间内抽水(气)排水(气)使桩体内部形成负压,通过控制真空泵输出功率,使吸力式基础以一定的速率贯入土体,沉贯完成的标志为主桶顶与泥面完全接触。与此同时,排

水管中有白色泥土吸出且负压瞬时增大,竖向位移不再发生变化。

沉贯步骤为:1)在固结好土体的模型箱内注入深度大于桩长的水,模拟海洋环境;2)找准平面位置并安放好模型桩;3)安装阀门、负压管道、抽滤瓶、真空泵等加载系统;4)安装孔压计、导向杆、水平位移计、竖向位移计、数据采集仪、电脑等监测系统;5)模型在自重作用下初始下沉,并通过按压方式使沉贯量在20 mm;6)打开数据监测系统;7)打开真空泵、阀门;8)调节真空泵功率控制加载速率使桩体匀速下沉;9)沉贯到位;10)保存数据;11)关闭监测系统;12)关闭阀门、真空泵;13)拆除管道及导向杆;14)试验完毕。沉贯过程如图10所示。

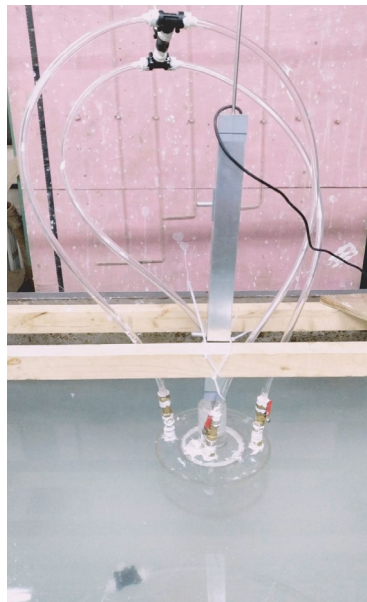


图10 沉贯过程图

Fig. 10 Penetration process

为减小沉贯过程中桩体之间的相互影响,采用如图11所示的对角路线按顺序依次贯入①号、②号、③号、④号吸力式基础模型,桩间距为600 mm,桩中心距离模型槽边缘距为300 mm。

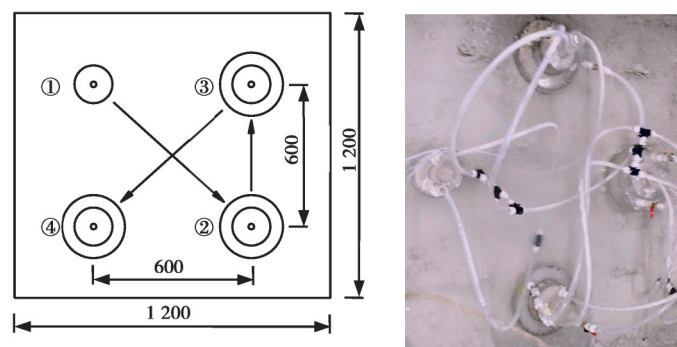


图11 吸力式基础沉贯顺序及桩体平面布置图

Fig. 11 Penetration sequence and floor plan

## 2 试验结果及分析

### 2.1 沉桩结果

根据上述试验步骤得到的①号、②号、③号、④号吸力式基础模型的负压( $P$ )-沉贯量( $y$ )过程曲线如图12所示。

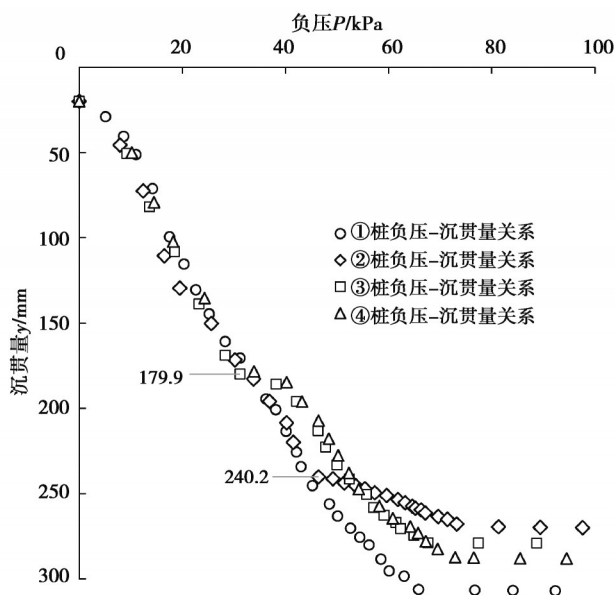


图12 吸力式基础模型负压-沉贯量曲线

Fig. 12 Load-penetration curve of suction caissons

由图12可知,在试验条件下,各吸力式基础模型下沉过程中所需负压荷载随下沉深度逐渐增长,所有吸力式基础模型的 $P$ - $y$ 曲线趋势一致。①号桩从始至终基本维持直线轨迹,当负压达到65.8 kPa时,沉贯量基本不再增加,但负压迅速增长,标志着沉贯完成。②号桩的 $P$ - $y$ 曲线呈折线形,在沉贯量达到240 mm左右时出现拐点,此时,裙边接触到泥面,阻力增大,随后维持直线继续下沉,当负压达到73.2 kPa时沉贯量基本不再增加,沉贯完成。③号和④号桩的 $P$ - $y$ 曲线呈阶梯状,在沉贯量达到180 mm时,裙边接触到泥面阻力增大, $P$ - $y$ 曲线出现拐点,曲线出现平台,随后开启裙桶顶负压阀门,此时, $P$ - $y$ 曲线出现另一个拐点,随后 $P$ - $y$ 曲线以一定斜率继续下沉。③号桩在负压达到67.6 kPa时沉贯量基本不再增加,完成沉贯。④号桩在负压达到72.9 kPa时,沉贯量基本不再增加,完成沉贯。

由图可知,传统吸力式基础(①号)的 $P$ - $y$ 曲线无拐点,所需负压( $P$ )与沉贯量( $y$ )呈线性关系。②号桩在裙边下沉到泥面时出现了拐点,直线斜率变缓,继续保持线性,整体呈折线形。③号和④号桩在裙边下沉到泥面时同样出现了拐点,但此时开启裙顶负压阀门采用“双筒负压法”沉贯后, $P$ - $y$ 曲线再次出现拐点继续下沉,形成“双折线”。③号、④号桩 $P$ - $y$ 沉贯曲线形态基本一致,只是④号桩内壁增加了摩擦键,使得④号桩桶内摩擦力及桩端阻力有所增加,沉贯负压高于③号桩,但正是摩擦键的作用,才使得④号桩的最终沉贯量大于③号桩。最大加载量、沉贯量结果及“土塞”高度如表2所示。

表2 吸力式基础模型沉贯结果

Table 2 Penetration results of suction caisson models

模型编号	沉贯完成负压/kPa	沉贯量/mm	“土塞”高度/mm
①	65.8	287	73
②	73.2	250	110
③	67.6	259	101
④	72.9	268	92

沉贯过程中,当最大吸力 $Q$ (负压)、吸力式基础的直径、地基土的强度等条件一定时,吸力式基础的沉贯力取决于压力差作用的有效面积,如图13所示,有效面积越大,即吸力 $Q$ 覆盖的面积越大,沉贯效应越大,最终沉贯量也越大。

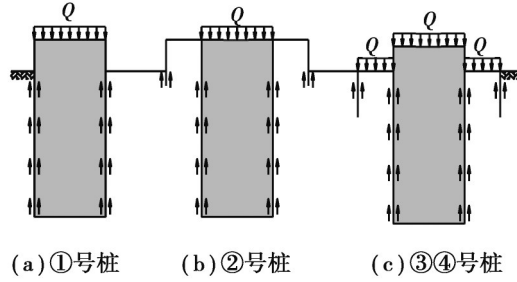


图13 吸力式基础模型沉贯受力示意图

Fig.13 Schematic diagram of the penetrating force of suction caissons

由表2可知,①号桩的“土塞”高度最小,其次依次为④号、③号、②号。对比①号、②号桩,②号桩由于裙式吸力式基础裙边在沉贯过程中增加了沉贯阻力,使桩体后期沉贯速率降低、桩体主桶内渗流力作用时间增长,“土塞”增长时间长,“土塞”变高,最终导致沉贯量减小;对比②号、③号桩,③号桩降裙处理使裙边尽早进入泥面,减小了渗流力作用时间,即减少了“土塞”增长时间,可有效降低“土塞”高度;另外,③号桩采用“双筒负压”沉贯,增大了负压作用面积,进一步减少了“土塞”增长时间,加快了桩体沉贯速率,因此,“土塞”高度小于②号桩;对比③号、④号桩,在降裙的基础上增加摩擦键,增加了桩体内表面摩擦力,有效抑制了“土塞”增长,“土塞”高度较小。

由上可知,相对于②号桩,③号、④号桩为低裙吸力式基础且均采用双筒负压沉贯方式,提高了沉贯效率,减小了“土塞”增长时间,沉贯量增大;另外,④号桩的摩擦键有效抑制了“土塞”增长,提高桩体承载力。丁红岩等<sup>[3,11]</sup>指出在吸力沉贯过程中,必须施加足够的吸力以使吸力式基础下沉,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”,与文中试验结果一致。建议在实际工程中采用新型低裙摩擦型吸力桩模型并采用“双筒负压法”沉贯方式以增加吸力式基础沉贯量,在提高施工效率的同时提高吸力式基础承载力。

## 2.2 沉贯阻力分析

根据静力学平衡原理,吸力式基础在沉贯过程中的沉贯阻力与沉贯效应相等。式(2)、式(5)适用于传统吸力式基础(不带裙)负压法沉贯过程中桩侧摩阻力及端阻力计算,式(3)、式(6)适用于裙式吸力式基础负压法沉贯过程中桩侧摩阻力及端阻力计算。

$$R = Q_f + Q_p, \quad (1)$$

$$Q_f = \int_0^H (\gamma' h K_p + 2c' \sqrt{K_p}) \mu \pi D_2 dh + \int_0^H k_0 \gamma' h \pi D_2^2 dh, \quad (2)$$

$$Q_f = \int_0^H (\gamma' h K_p + 2c' \sqrt{K_p}) \mu \pi D_2 dh + \int_0^H k_0 \gamma' h \pi D_2^2 dh + \int_0^{H'} (\gamma' h K_p + 2c' \sqrt{K_p}) \mu \pi D_1 dh + \int_0^{H'} k_0 \gamma' h \pi D_1^2 dh, \quad (3)$$

$$K_p = \tan^2 \left( 45^\circ + \frac{\phi'}{2} \right), \quad (4)$$

$$Q_p = q_d A_p, \quad (5)$$

$$Q_p = q_d A_p + q'_d A'_p. \quad (6)$$

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;  $\gamma'$ 为土的浮重度, kN/m<sup>3</sup>, 取 7 kN/m<sup>3</sup>;  $H$ 为吸力式基础主桶随时间的沉贯量, m;  $H'$ 为吸力式基础裙桶随时间的沉贯量, m;  $K_p$ 为被动土压力系数,  $\phi'$ 为土的有效内摩擦角, 文中取 9°,  $K_p=1.4$ ;  $c'$ 为黏性土的有效黏聚力, kPa; 文中取 8 kPa;  $\mu$ 为土与吸力式基础之间的摩擦系数, 通过有机玻璃与高岭土接触面的直剪试验得到, 取 0.13;  $D_1$ 为吸力式基础裙桶外直径, m;  $D_1'$ 为吸力式基础裙桶内直径, m;  $D_2$ 为吸力式基础主桶外直径, m;  $D_2'$ 为吸力式基础主桶内直径, m;  $K_0$ 为土的侧压力系数或静止土压力系数, 文中取 0.71;  $q_d$ 为桩端部地基单位面积承载力, kPa; 根据文献[14]当桩端为平底时取  $q_d = 9C_u$ , 文中用  $S$ 代替  $C_u$ , 由于试验模型裙边呈楔形, 因此, ①②③号桩取  $q_d = 4.5S$ , ④号桩因设置了摩擦键, 约取  $q_d = 7S$  ( $S$ 取值见图8);  $q'_d$ 为裙端部地基单位面积承载力, kPa, 文中约取  $q'_d = 3S$ ;  $A_p$ 为桩端部截面面积, m<sup>2</sup>;  $A'_p$ 为裙端部截面面积, m<sup>2</sup>。



在沉贯过程中,桩端主桶尖端由外向内倾斜,下沉过程中会向外挤土,使得桩体外侧土压力接近于被动土压力,而桩体内部挤土效应并不明显,由于向上的渗流与摩擦力相互抵消,使桩体内部近似于静止土压力,因此,式(2)用被动土压力计算摩阻力,式(3)用静止土压力。沉贯力计算公式如下,式(8)适用于单桶负压法沉贯过程中吸力计算,式(9)适用于双筒负压法沉贯过程中吸力计算。

$$F = W + P, \quad (7)$$

$$P = \pi D_2'^2 P_a, \quad (8)$$

$$P = \pi D_2'^2 P_a + \pi (D_1'^2 - D_2'^2) P_a'. \quad (9)$$

式中: $F$ 为沉贯吸力; $W$ 为桩体、部分管道、阀门、导向杆自重,kN;单筒吸力式基础取0.03 kN,裙式吸力式基础取0.06 kN; $P$ 为负压荷载; $P_a$ 为主桶内实测负压值; $P_a'$ 为裙桶内实测负压值。

将试验测得相关参数及沉贯量、负压值代入上述公式中,计算得出沉贯吸力、沉贯阻力随沉贯量的变化曲线如图14所示。

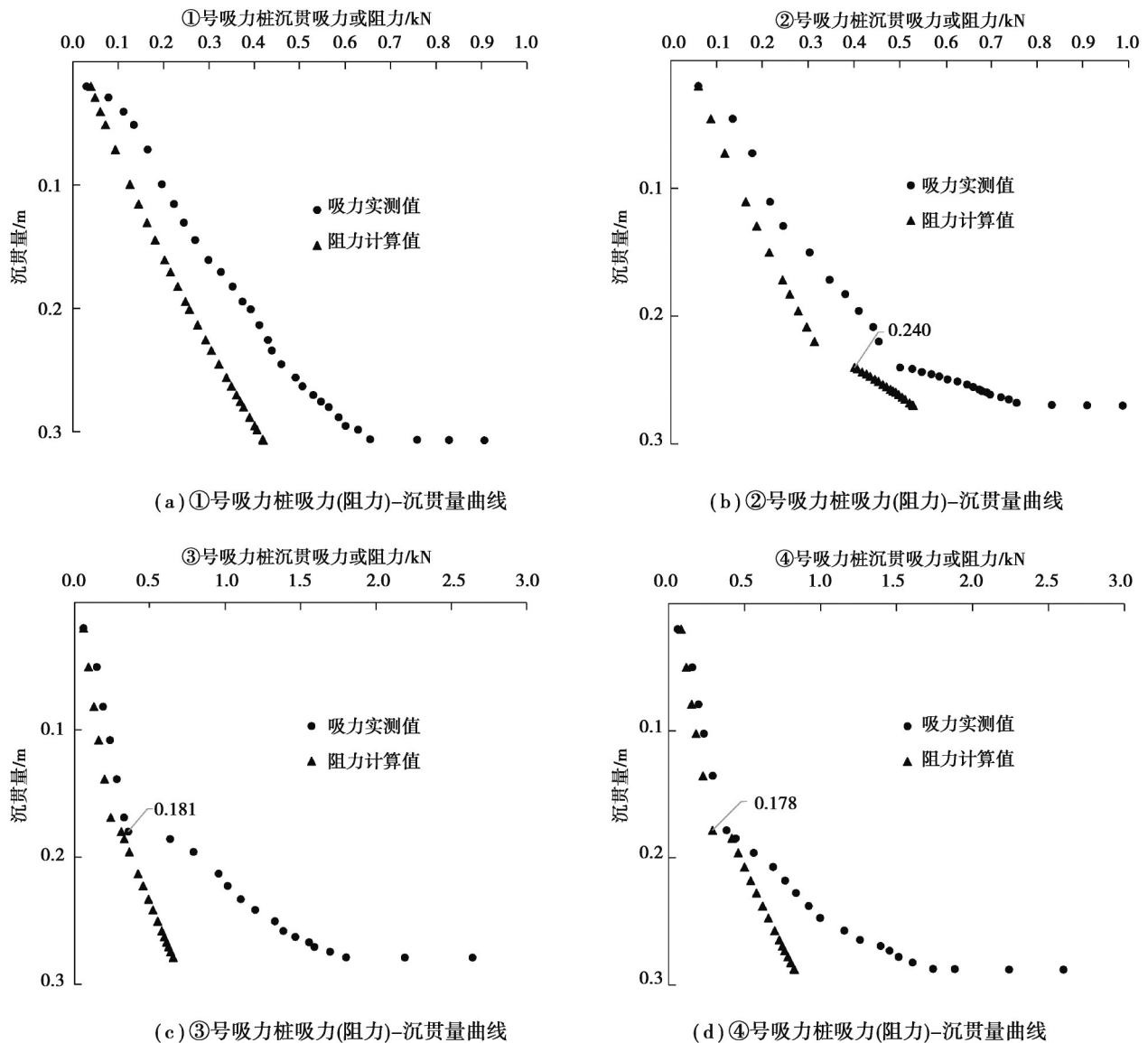


图14 吸力式基础沉贯力、沉贯阻力随沉贯量变化曲线

Fig. 14 Variation curve of penetration effects and resistance of suction caissons with penetration changing

由静力学平衡原理可知,在忽略惯性力等因素的情况下,沉贯阻力与沉贯力应相等或者接近。图14中,所有吸力式基础的沉贯阻力与沉贯力相对比较接近,沉贯阻力随沉贯量的增加呈线性增加,相应地沉贯

力也随沉贯量增加而增大,但沉贯力与阻力之间存在一定的“差距”,这种“差距”随着沉贯量的增加而增大,当桩体沉贯接近完成时,该“差距”进一步增大。

从能量守恒的角度来看,吸力式基础沉贯过程中,沉贯力除了需克服沉贯阻力外,还需提供维持“土塞”增长所需的渗流力,沉贯力与沉贯阻力之间存在这种合理的“差距”。沉贯初期,“土塞”高度从零开始增长,沉贯量较小,渗流路径较短,沉贯力与沉贯阻力比较接近;当沉贯接近完成时,“土塞”完全形成,桩顶阻碍“土塞”不再增长,阻力达到极限值,渗流路径长度也增大至极限值,而负压的增长不受限制,沉贯力与沉贯阻力之间的“差距”越来越大。

试验发现,在沉贯过程中,沉贯力与沉贯阻力之间的“差距”越大沉贯速率越快,可贯性越好。传统吸力式基础(①号)的沉贯力及沉贯阻力随沉贯量的增加呈线性增长,直至沉贯完成后沉贯力进一步增大;裙式吸力式基础(②号、③号、④号)在沉贯过程中当裙边接触泥面时沉贯阻力均出现了拐点,沉贯阻力随沉贯量呈折线形。对比裙式吸力式基础②号、③号、④号的沉贯阻力拐点后曲线可知,②号桩的“差距”最小,其次为④号、⑤号。由此可知,传统吸力式基础(①号)的可贯性最好,其次分别为③号、④号、②号,说明双筒负压法可提高裙式吸力式基础的可贯性。

由于沉贯量与吸力式基础的承载能力成正相关,有效提高桩体沉贯量对于实际工程中吸力式基础的安装有重要意义。对比低裙吸力式基础③号、④号的沉贯阻力曲线可知,虽然④号桩的可贯性相对于③号桩稍微逊色,但④号桩的沉贯量优于③号桩,从而证明摩擦键的设置可有效降低“土塞”高度,提高桩体承载力。

### 3 结 论

1)吸力式基础的“土塞”高度与沉贯时间正相关,沉贯时间越长,“土塞”的高度越高;在负压一定的前提下,吸力式基础的沉贯力取决于压力差作用的有效面积,有效面积越大,沉贯速率越大,最终沉贯量也越大。因此,实际工程中应尽可能采用长径比较小的桩,对于底裙吸力式基础可采用“双筒负压法”安装吸力式基础以提高施工效率及承载力;

2)低裙吸力式基础的裙边能尽早进入泥面,减小渗流力的作用时间,可有效降低“土塞”高度,增加裙桶贯入量;

3)摩擦型吸力式基础可贯性良好,能有效减小“土塞”效应,提高桩体承载力;

4)沉贯力除需克服沉贯阻力外,还需提供维持“土塞”增长所需的渗流力,因此沉贯力大于沉贯阻力。

### 参考文献

- [ 1 ] 国振,王立忠,袁峰.黏土中吸力锚沉贯阻力与土塞形成试验研究[J].海洋工程,2011,29(1):9-17.  
Guo Z, Wang L Z, Yuan F. An experimental investigation of insertion resistance and soil heave during caisson installation in soft clay[J]. The Ocean Engineering, 2011, 29(1): 9-17.(in Chinese)
- [ 2 ] Jiang J P, Gao J R. Study on the horizontal movement state of suction anchor piles for offshore wind power during horizontal pulling[J]. World Journal of Engineering and Technology, 2022, 10(1): 88-97.
- [ 3 ] 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 H Y, Zhang P Y. Suction penetration seepage field's characteristics of suction anchor[J]. Ocean Technology, 2003, 22(4): 44-48.(in Chinese)
- [ 4 ] Lee J, Do J. Effects of the installation method, loading condition, and failure mechanism on the behavior of suction piles under monotonic horizontal loading[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2021, 9(12): 1333.
- [ 5 ] Ryu M S, Jung M U, Lee J S, et al. Closed form solutions for predicting lateral response of tripod suction pile for offshore wind turbine foundation[J]. Energies, 2020, 13(23): 6176.
- [ 6 ] Vieira M, Maciel G, Henriques E, et al. A new proposal for an offshore wind foundation for transitional waters[J]. Marine Structures, 2019, 68: 102657.
- [ 7 ] Hendriyawan H, Primananda M, Puspita A D, et al. Simplification analysis of suction pile using two dimensions finite element modeling[J]. Geomechanics and Engineering, 2019, 17: 317-322.
- [ 8 ] Rauch A, Olson R E, Luke A M, et al. Measured response during laboratory installation of suction caissons[C]// Matsui T,

- Chung J S, Sayed M, et al. Proceedings of 13th International Offshore and Polar Engineering Conference. Hawaii: 2003, 780-787.
- [ 9 ] 杨少丽, Grande Lars, 齐剑峰, 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 S L, Grande L, Qi J F, 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.(in Chinese)
- [10] 杨少丽, 李安龙, 齐剑峰. 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 S L, Li A L, Qi J F. Experimental study on bucket foundation during penetration by suction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(2): 236-238.(in Chinese)
- [11] 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): 441-444.  
Ding H Y, Liu Z Y, Chen X. Model tests on soil plug formation in suction anchor for silty clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(4): 441-444.(in Chinese)
- [12] 李大勇, 都浩, 孙宗军, 等. 海底裙式吸力锚: CN200910019282.9[P]. 2010-05-12.  
Li D Y, Du H, Sun Z J, et al. Skirted suction caissons of seafloor: CN200910019282.9[P]. 2010-05-12.(in Chinese)
- [13] 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 D Y, Feng L Y, Zhang Y K, 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.(in Chinese)
- [14] 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]. 水科学与工程学报, 2007(3): 39-42.  
Liu J B, Li Y F, Liu J D. Finite element analysis of soil plug forming during suction anchor penetration[J]. Water Sciences and Engineering Technology, 2007(3): 39-42.(in Chinese)
- [15] Lee J H, Tran N X, Kim S R. Development and field application of GFRP suction pile[J]. Ocean Engineering, 2019, 173: 308-318.
- [16] Abyaneh S, Kennedy J, Maconochie A, et al. Undrained capacity of suction piles subjected to moment loading[J]. International Journal of Offshore and Polar Engineering, 2018, 28(3): 312-317.
- [17] Mohammadlou A S, Darsanj S. Estimation of soil heave inside a suction pile[J]. International Journal of Offshore and Polar Engineering, 2018, 28(2): 212-217.
- [18] Kim B, Kim Y, Jin B, et al. Numerical analysis on tilting control of suction pile for offshore wind power[J]. Journal of the Korean Geoenvironmental Society, 2016, 17(9): 5-12.
- [19] Soedigdo I, Budiman I, Prakoso W A. Analysis of suction piles for mooring floating Structure Foundations in clay soil at deepwater levels[J]. International Journal of Technology, 2015, 6(2): 253.
- [20] 柳晓科, 鹿群, 路士伟, 等. 低裙式吸力桩真空沉贯及抗拔极限承载力[J]. 岩土力学, 2018, 39(6): 2089-2098.  
Liu X K, Lu Q, Lu S W, et al. Vacuum penetration and ultimate pull-out capacity of low skirted suction caissons[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(6): 2089-2098.(in Chinese)
- [21] 柳晓科, 鹿群, 刘寒鹏, 等. 海底新型低裙式吸力桩: CN201611047417.9[P]. 2017-05-31.  
Liu X K, Lu Q, Liu H P, et al. Low skirted suction caisson under the sea floor: CN201611047417.9[P]. 2017-05-31.(in Chinese)
- [22] 鹿群, 苏敏, 柳晓科, 等. 潮汐循环荷载固结软土试验装置: CN201621245348.8[P]. 2017-05-17.  
Lu Q, Su M, Liu X K, et al. Device for consolidating soft soil under tidal cyclic load: CN201621245348.8[P]. 2017-05-17.(in Chinese)
- [23] 中华人民共和国建设部. 建筑桩基技术规范: JGJ 94—2008[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.  
Ministry of Construction of the People's Republic of China. Technical code for building pile foundations: JGJ 94—2008[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008. (in Chinese)

(编辑 陈移峰)