

DOI: 10.11779/CJGE202003019

# 黏性土中裙式吸力基础沉贯与注水拔出试验研究

李大勇<sup>1, 2</sup>, 王栋林<sup>1</sup>, 张雨坤<sup>\*1</sup>, 高玉峰<sup>3</sup>

(1. 山东科技大学山东省土木工程防灾减灾重点实验室, 山东 青岛 266590; 2. 福州大学土木工程学院, 福建 福州 350108;  
3. 河海大学土木交通学院, 江苏 南京 210024)

**摘要:** 开展模型试验研究海洋黏性土中裙式吸力基础沉贯和注水上拔特性, 并研究了土体强度、基础尺寸和安装方式等影响因素。研究表明: 主桶长径比为 1.0 和 2.0 的裙式吸力基础最终沉贯深度较相同高度传统吸力基础仅降低 2% 和 6%, 证实了裙式吸力基础在黏性土中具有良好沉贯性。主桶和裙结构在吸力沉贯时对土体造成扰动, 导致吸力沉贯阻力小于压力贯入时的阻力。基于极限平衡方法, 提出了裙式吸力基础在黏性土中的沉贯阻力与所需吸力的计算公式, 并验证其准确性。得到传统和裙式吸力基础在注水拔出过程中基础内部水压力、上拔阻力与基础上拔位移之间的关系, 发现基础内部水压力随上拔位移先迅速增加至最大值, 然后逐渐降低, 裙式吸力基础最终上拔位移小于相同基础高度的传统吸力基础。得到了裙式吸力基础注水拔出阻力计算公式。

**关键词:** 裙式吸力基础; 黏性土; 吸力沉贯; 注水拔出; 模型试验

中图分类号: TU442 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2020)03-0568-08

作者简介: 李大勇(1971—), 男, 教授, 从事海洋岩土工程等方面的理论及试验研究。E-mail: ldy@fzu.edu.cn。

## Model tests on penetration and extraction of modified suction caissons in clay

LI Da-yong<sup>1, 2</sup>, WANG Dong-lin<sup>1</sup>, ZHANG Yu-kun<sup>1</sup>, GAO Yu-feng<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Civil Engineering Disaster Prevention and Mitigation, Qingdao 266590, China; 2. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China; 3. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China)

**Abstract:** A series of model tests are conducted to investigate the installation and extraction behavior of the modified suction caisson(MSC) embedded in marine clay by taking the MSC dimensions, shear strength of clay and installation method into account. It is found that the discrepancies between the final penetration depths of the MSC with the aspect ratio of 1.0 and 2.0 and the corresponding regular suction caissons (RSCs) are 2% and 6%, indicating that the MSC can penetrate into the clay to a desired depth. During suction-assisted installation, the internal compartment and the external skirt are found to disturb the soils around the caisson, leading to the decrease of the penetration resistance compared with the penetration resistance during jacking installation. Based on the limit equilibrium method, the expressions for estimating the required suction to penetrate the MSC into clay and the penetration resistance were proposed. In addition, the variations of the water pressure in the suction caisson and uplift resistance during suction caisson extraction are also obtained. The results show that the water pressure in suction caisson firstly increases sharply to the maximum value with the extraction displacement, and then decreases to a certain value. It is also found that the MSCs and RSCs can not be fully extracted by injecting water into the caisson. The expression obtaining the extraction resistance of the MSC is proposed to guide the foundation design.

**Key words:** modified suction caisson; clay; suction-assisted installation; extraction by water injection; model test

## 0 引言

海上风电塔架基础主要为重力式基础和大直径桩单基础, 但这些基础建设安装成本高, 且仅适用于水深小于 50 m 的浅海水域。吸力基础可以克服上述基础形式不足, 同时具有安装简便、可重复利用等优点。近年来吸力基础在海上风电工程中得到应用, 被用作海上风机、测风塔和海上升压站基础。

工程实践及研究表明, 吸力基础能成功穿越中粗砂及以下砂土、粉土以及黏性土地基<sup>[1]</sup>。国内外学者通过开展模型试验、数值模拟以及理论分析, 研究了吸力基础在砂土粉土以及黏性土中吸力沉贯特性

基金项目: 国家自然科学基金项目(51879044, 51808325, 51639002);  
山东科技大学科研创新团队项目(2015TDJH104)

收稿日期: 2019-01-29

\*通信作者(E-mail: philc007@163.com)

(Andersen 等<sup>[2]</sup>、Randolph 等<sup>[3]</sup>、Houlsby 等<sup>[4]</sup>)、Chen 等<sup>[5]</sup>和 Zhou 等<sup>[6]</sup>)。研究表明, 吸力沉贯吸力值大小取决于基础受到的阻力。沉贯阻力主要包括基础内外壁摩阻力以及基础端部阻力。准确预测基础沉贯阻力对沉贯吸力值的确定有重要的指导意义。

Houlsby 等<sup>[4, 7]</sup>得到了砂土和黏性土中, 吸力基础在自重沉贯和吸力沉贯中的贯入阻力以及吸力沉贯最大容许吸力值的计算公式。Chen 等<sup>[8]</sup>得到吸力基础在砂土中沉贯侧壁摩阻力及端部阻力变化规律率, 讨论了渗流作用对沉贯阻力的影响。李大勇等<sup>[1]</sup>证实吸力基础可在中粗砂及以下砂土中实现沉贯, 发现施加吸力引起砂土中渗流可显著降低基础沉贯阻力。Zhu 等<sup>[9]</sup>基于桶壁摩擦力和静力触探阻力预测了沉贯所需的吸力值。

海上风场的设计使用期限一般为20 a, 实现其可持续发展, 势必要在原有风场的基础上进行升级改造, 即选择研发更大容量的风机设备, 致使原有基础难以满足新的设计要求。因此需要实现原有风电塔架基础的拔出及重复利用。吸力基础具有高压注水可回收、重复利用的优点, 明确其注水拔出特性具有重要意义。目前国内外对吸力基础开展注水拔出特性研究较少。Zhang 等<sup>[10-11]</sup>研究砂土中吸力基础注水拔出特性, 发现吸力基础的极限抗拔承载力受上拔速率的影响较大, 极限抗拔承载力随上拔速率的增加而增大。另外发现基础拔出位移达0.04倍基础直径时, 基础内部注水压力达到最大值。

裙式吸力基础是李大勇等<sup>[12]</sup>对传统吸力基础的改进。李大勇等<sup>[13-16]</sup>和张雨坤等<sup>[17-18]</sup>通过开展模型试验和数值模拟对裙式吸力基础的水平承载力和竖向承载力进行了一系列研究, 但基础在黏性土的沉贯和注水拔出特性研究需要进一步深入。此外, 当吸力基础沉贯时遇到坚硬土体或石块, 导致基础无法继续沉贯, 通常需要将基础注水拔出, 改变位置重新沉贯, 因此有必要将沉贯和注水拔出作为一个连续过程进行研究。

基于极限平衡法提出裙式吸力基础在黏性土中吸力沉贯阻力和所需吸力值计算公式。研究裙式和传统吸力基础的吸力沉贯和注水拔出特性, 基于试验结果, 得到吸力基础注水拔出过程阻力计算公式。

## 1 沉贯阻力及吸力计算公式

Houlsby 等<sup>[4]</sup>, 提出了传统吸力基础在黏性土中吸力贯入阻力计算方法见式(1), 可用于计算裙结构未与土体接触时裙式的吸力基础沉贯阻力。

$$G' + 0.25S\pi d_i^2 = F_{IC,i} + F_{IC,o} + Q_{IC,tip} \quad , \quad (1)$$

式中,  $G'$  为吸力基础浮重量,  $S$  为基础内部吸力值,

$F_{IC,i}$  和  $F_{IC,o}$  分别为主桶内壁和外壁摩阻力,  $Q_{IC,tip}$  为主桶端部阻力。

式(1)中各项阻力均采用不排水抗剪强度进行计算。假设沉贯计算中黏性土的不排水抗剪强度  $s_u$  随埋深  $z$  线性变化:

$$s_u = s_{u0} + kz \quad , \quad (2)$$

式中,  $s_{u0}$  为土体表面不排水抗剪强度,  $k$  为不排水抗剪强度随深度变化梯度。

主桶内、外壁摩阻力、端部阻力可分别由下式计算:

$$\left. \begin{aligned} F_{IC,i} &= \alpha_{IC,i} \pi d_i \int_0^h s_u(z) dz , \\ F_{IC,o} &= \alpha_{IC,o} \pi d_o \int_0^h s_u(z) dz , \\ Q_{IC,tip} &= [\gamma' h - S + N_{IC,c} s_u(h)] \pi dt . \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中  $\alpha_{IC,i}$ ,  $\alpha_{IC,o}$  分别为主桶内、外壁土体扰动系数;  $N_{IC,c}$  为主桶端部以下土体承载力系数;  $\gamma'$  为土体有效重度;  $h$  为基础贯入深度;  $d=(d_o+d_i)/2$  为主桶平均直径。

当裙结构接触泥面后, 裙式吸力基础沉贯阻力由主桶内外壁摩阻力、端阻力以及裙结构内外壁摩阻力、端阻力组成, 沉贯阻力可由下式计算:

$$G' + 0.25S\pi d_i^2 = F_{ES,i} + F_{ES,o} + Q_{ES,tip} + F_{ES,i} + F_{ES,o} + Q_{ES,tip} \quad , \quad (4)$$

式中,  $F_{ES,i}$  和  $F_{ES,o}$  分别为裙结构内、外壁摩阻力,  $Q_{ES,tip}$  为裙结构端部阻力, 分别由下式计算:

$$\left. \begin{aligned} F_{ES,i} &= \alpha_{ES,i} \pi D_i \int_0^H s_u(z) dz , \\ F_{ES,o} &= \alpha_{ES,o} \pi D_o \int_0^H s_u(z) dz , \\ Q_{ES,tip} &= [\gamma' H + N_{ES,c} s_u(H)] \pi dt . \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中  $\alpha_{ES,i}$ ,  $\alpha_{ES,o}$  分别为裙结构内、外壁土体扰动系数;  $N_{ES,c}$  为裙结构下土体承载力系数;  $H=h-l+L$  为裙结构贯入深度;  $D=(D_o+D_i)/2$  为裙结构平均直径。

由于黏性渗透系数非常低, 吸力沉贯时, 可以忽略吸力引起的土中渗流作用<sup>[4]</sup>。因此, 传统吸力基础沉贯过程中所需吸力由下式计算:

$$S_{req} = \frac{F_{IC,i} + F_{IC,o} + [\gamma' h + N_{IC,c} s_u(h)] \pi dt - G'}{0.25\pi d_i + \pi dt} \quad . \quad (6)$$

式(6)也可计算裙结构未与泥面接触时基础所需吸力值。当裙结构与泥面接触后, 裙式吸力基础沉贯所需吸力为

$$S_{req} = \frac{F_{IC,i} + F_{IC,o} + [\gamma' h + N_{IC,c} s_u(h)] \pi dt + F_{ES,i} + F_{ES,o} + Q_{ES,tip} - G'}{0.25\pi d_i + \pi dt} \quad . \quad (7)$$

由式(6)和(7)可知,当裙结构接触泥面后,裙式吸力基础沉贯所需吸力大于传统吸力基础。

## 2 模型试验装置及流程

### 2.1 试验装置

试验采用模型箱尺寸为长×宽×高=1.0 m×1.0 m×1.0 m。试验黏性土采用泥浆沉降法堆载预压制备,土层最终厚度达0.8 m,土体参数如表1所示。

钢制传统吸力基础(编号RSC1和RSC2)和裙式吸力基础(编号MSC1和MSC2)模型示意图和尺寸如图1和表2所示。试验在两种强度土体中开展,不同土体强度通过控制堆载预压时间实现。主桶顶板设有两个抽水孔,分别与抽水泵和压力传感器连接。裙结构顶板设有2个排水孔。

表1 试验土体参数

Table 1 Parameters of clay

含水率 /%	渗透系数 (m·s <sup>-1</sup> )	饱和重度 (kN·m <sup>-3</sup> )	塑性 指数	液性 指数
39	5.46×10 <sup>-9</sup>	19.1	18.4	0.6

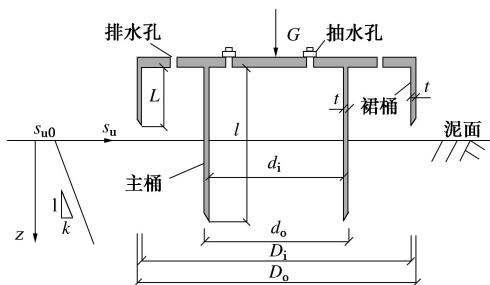


图1 裙式吸力基础示意图

Fig. 1 Modified suction foundation

模型试验装置如图2所示。抽水泵通过PVC管路与基础连接,通过抽取主桶内水体或向主桶内注水实现基础沉贯和上拔。

### 2.2 试验流程

首先将吸力基础在自重作用下贯入土体。然后将

抽水泵和压力传感器与主桶抽水孔相连。开启抽水泵,进行吸力沉贯。沉贯过程中采用水准气泡和测斜仪调整基础沉贯垂直度(图3)。吸力沉贯试验结束后,使用抽水泵向主桶内高压注水,进行注水拔出试验。



图2 试验装置

Fig. 2 Test setup



图3 吸力基础沉贯

Fig. 3 Installation of suction caissons

## 3 试验结果分析

表3给出了不同工况传统和裙式吸力基础吸力沉贯所用时间以及最终沉贯深度。传统和裙式吸力基础最终沉贯深度约为主桶高度的80%~84%。主桶长径比为1.0和2.0的裙式吸力基础最终沉贯深度较相同高度的传统吸力基础仅小约2%和6%,说明裙式吸力基础在黏性土中有良好的沉贯性。

图4为不同强度土体中传统吸力基础沉贯阻力及基础内部吸力随沉贯深度变化规律,其中沉贯阻力由基础竖向静力平衡推到得到。基础沉贯阻力与内部吸力随沉贯深度增加均逐渐增加。图4还给出采用式(1)和(6)计算得到的不同深度下传统吸力基础沉贯阻力

表2 试验模型尺寸

Table 2 Dimensions of test caisson models

试验工况	安装方式	土体强度 $S_u$	重量 G/N	$d_i$ /mm	$l$ /mm	$D_i$ /mm	主桶长径比 ( $l/D_i$ )	$L$ /mm	$t$ /mm
RSC1	吸力沉贯	$S_u=12+0.8z$	17.3	120	120	—	—	—	2
MSC1	吸力沉贯	$S_u=12+0.8z$	28.8	120	120	180	1.0	60	—
RSC2	吸力沉贯	$S_u=3.3+0.1z$	23.1	120	240	—	—	—	2
MSC2	吸力沉贯	$S_u=3.3+0.1z$	34.8	120	240	180	2.0	90	—
RSC3	压力贯入	$S_u=3.3+0.1z$	23.1	120	240	—	—	—	2
MSC3	压力贯入	$S_u=3.3+0.1z$	34.8	120	240	180	2.0	90	—

说明:  $z$  为土体中计算点的深度。

表3 各工况吸力沉贯试验结果

Table 3 Test results of installation for various test cases

试验工况	沉贯时间/s	沉贯量/mm	最大吸力/kPa	沉贯阻力/kN
RSC1	138	95.8 (0.8l)	33.1	0.38
MSC1	236	96.9 (0.81l)	40.0	0.45
RSC2	113	201.4 (0.84l)	23.0	0.28
MSC2	124	190.0 (0.8l)	25.5	0.33

和所需吸力值。参考 Andersen 等<sup>[19]</sup>研究结果, 式中取主桶端部承载力系数  $N_{IC,c}=7.5$ 。同时, 根据 Housby 和 Byrne 等<sup>[4]</sup>的研究假定主桶内壁与外壁土体的扰动系数  $\alpha_{IC,i}=0.5$ ,  $\alpha_{IC,o}=0.5$ 。由式(1)反演得到较高强度和低强度试验黏性土在泥面处不排水抗剪强度, 分别为  $S_{u0}=12 \text{ kPa}$  和  $3.3 \text{ kPa}$ , 不排水抗剪强度随埋深  $z$  变化的关系分别为:  $S_u=12+0.8z$ ,  $S_u=3.3+0.1z$ 。由图 4 图可知, 试验值与理论计算值吻合较好, 说明反演土体参数可靠性。

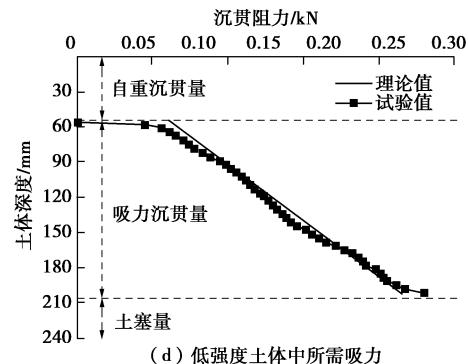
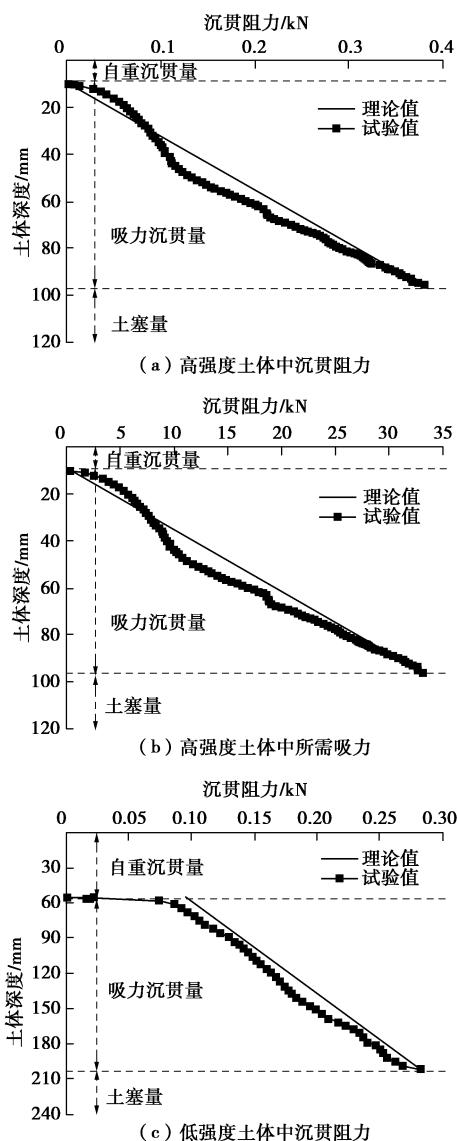
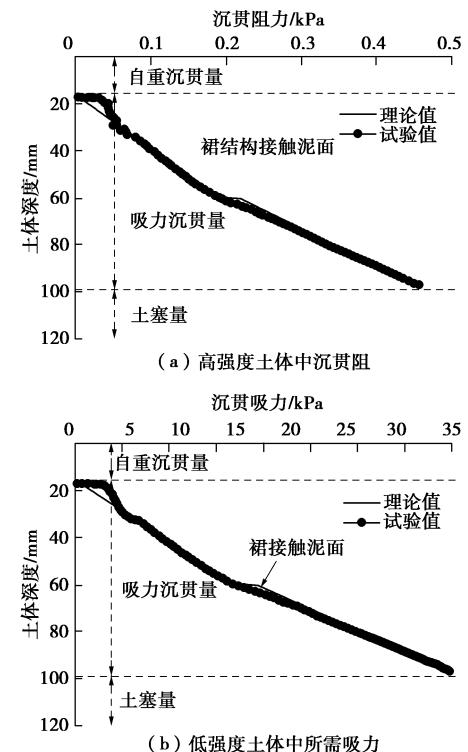


Fig. 4 Relationships among installation resistance, suction and penetration depth for RSCs

图 5 为裙式吸力基础沉贯阻力及基础内部吸力随沉贯深度变化规律。试验值与理论值吻合较好, 证实公式的适用性和准确性。其中式(4)和式(7)中取  $\alpha_{ES,i}=3.5$ ,  $\alpha_{ES,o}=3.5$ ,  $N_{ES,c}=4$ 。由此可知, 主桶的贯入会对裙结构下土体产生扰动, 导致裙结构下土体扰动系数和端部承载力系数较降低。从图 5(a) 中可得当裙结构与土体接触时, 基础沉贯阻力突然增大, 然而试验中沉贯阻力突变不明显, 这是由于裙结构模型端部加工成尖端(图 1), 导致端阻力降低。

图 5(b) 和 (d) 为不同强度土体中裙式吸力基础主桶内部吸力随沉贯深度变化规律。当裙结构接触土体时, 主桶内吸力显著增加, 强度较高黏性土中吸力随沉贯深度增长率发生明显改变, 而在低强度黏性土中增长率变化不显著。在强度较低和较高土体中, 裙式吸力基础所需吸力最大值较传统吸力基础分别提高 20% 和 11%。



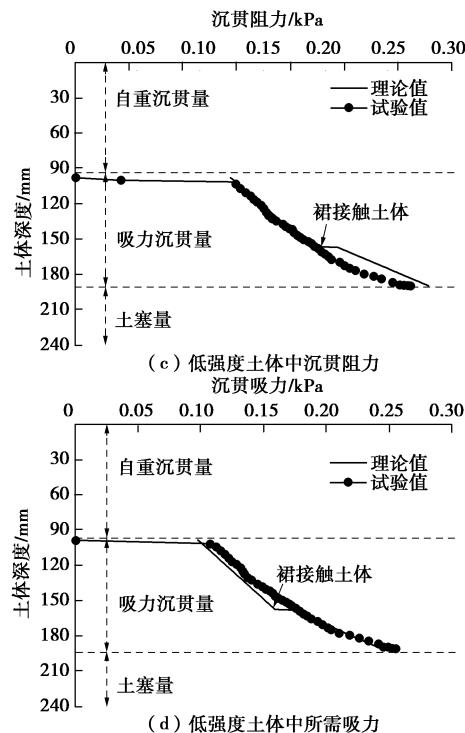


图 5 裙式吸力基础沉贯阻力、所需吸力变化

Fig. 5 Relationships among installation resistance, suction and penetration depth for MSCs

表 3 所示, 虽然长径比为 1.0 的 RSC1 和 MSC1 基础最终沉贯深度仅为长径比为 2.0 的 RSC2 和 MSC2 基础的 0.5 倍, 但由于 RSC1 和 MSC1 试验土体强度远高于 RSC2 和 MSC2 试验土体强度, 导致 RSC1 和 MSC1 沉贯吸力最大值较 RSC2 和 MSC2 分别提高 43.9% 和 56.9%, 沉贯阻力分别提高 35.7% 和 36.4%。因此, 在影响吸力基础沉贯阻力各因素中, 土体强度占主导地位。

#### 4 注水拔出试验结果分析

用抽水泵向主桶内注水, 实现基础向上拔出回收。图 6 给出了传统吸力基础和裙式吸力基础注水上拔位移随时间变化规律。裙式吸力基础上拔所用时间较传统吸力基础显著降低, 主要原因为, 上拔过程中, 基础内部水压力首先克服自重及主桶和裙结构内外壁摩阻力, 相比于传统吸力基础, 裙式吸力基础自重及摩阻力显著提高, 注水拔出时需更高注水压力以及注水速度实现上拔, 因此其上拔时间较传统吸力基础缩短。另外, 裙式吸力基础最终上拔位移也小于传统吸力基础, 因此上拔所需时间较短。

由图 6 可得, 传统和裙式吸力基础并未实现完全拔出。通过观察上拔过程中基础周围土体变化发现, 当基础拔出至一定位置时, 基础周围土体产生裂隙, 内部水体从裂隙涌出, 导致基础内部水压力迅速降低, 基础无法继续上拔, 此时基础在自重作用下发生小幅

回落。

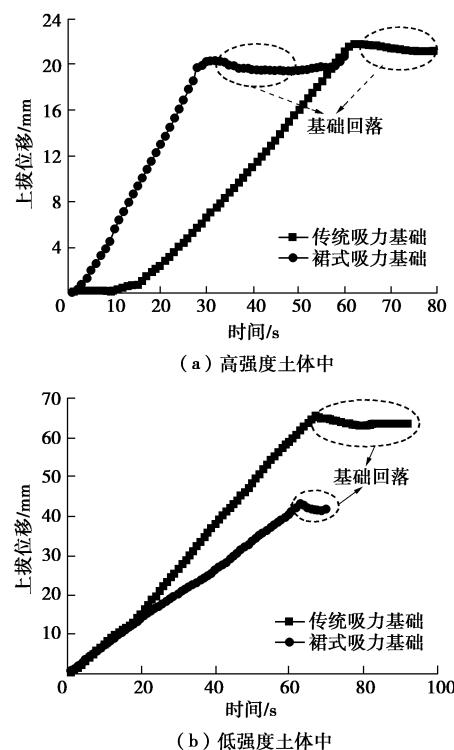


图 6 吸力基础拔出位移随时间变化

Fig. 6 Relationships between extraction displacement and elapsing time

图 7 给出了传统和裙式吸力基础内部水压力随时间变化规律。在不同强度土体中, 基础内水压力均快速增长到达峰值, 随后随着时间的增加下降。

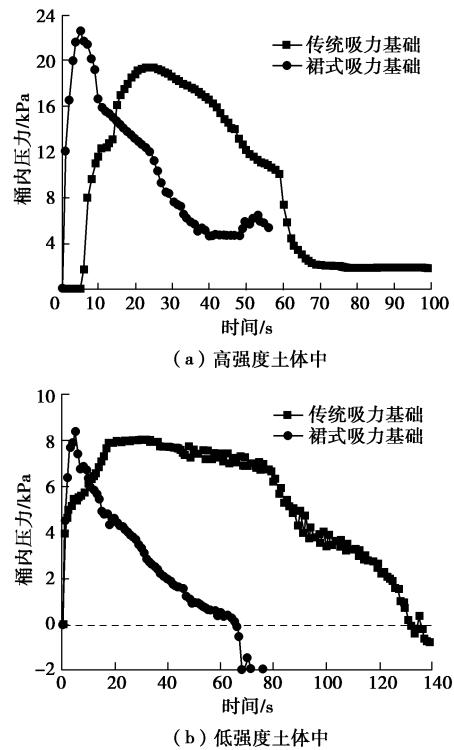


图 7 主桶内压力随时间变化

Fig. 7 Variation of water pressure in internal compartment

表 4 注水上拔试验数据  
Table 4 Test results for suction caissons during extraction

试验工况	上拔时间/s	上拔位移/mm	桶内最大水压力		最大上拔阻力	
			值/kPa	时间/s	值/kPa	时间/s
RSC1	63	21.8 (18%)	19.5	23	0.22	23
MSC1	60	20.7 (17%)	22.7	5	0.25	6
RSC2	67	65.4 (27%)	8.4	5	0.10	6
MSC2	127	43.8 (18%)	8.1	31	0.11	31

图 8 为不同强度土体中基础上拔位移 - 内部压力曲线图。上拔初期, 基础竖向位移较小, 但基础内部水压力迅速增加至峰值。此后, 随着上拔位移的增加, 桶内压力开始缓慢下降, 最后趋于平稳。表 4 给出了不同工况上拔过程中基础内部最大水压力和最大上拔阻力值。在较高强度土体中传统和裙式吸力基础最终上拔位移约为 0.2 倍基础高度; 在低强度土体中传统和裙式吸力基础最终上拔位移量差别明显。

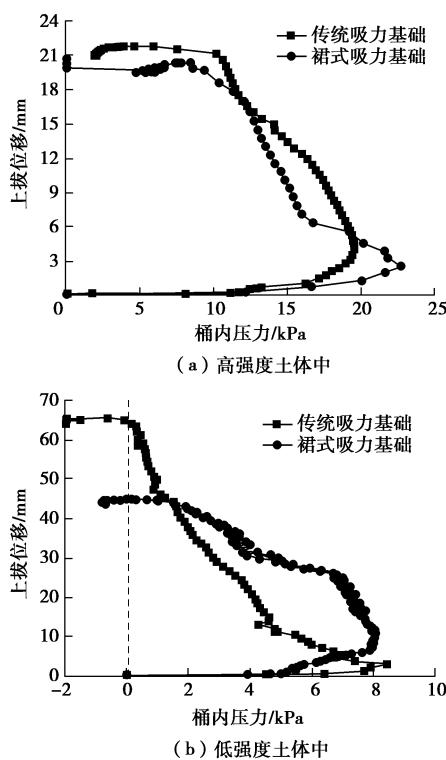


图 8 注水拔出试验水压 - 上拔位移曲线

Fig. 8 Water pressure-displacement curves during extraction by water injection

根据静力平衡, 吸力基础上拔过程中阻力可由下式进行计算:

$$0.25S\pi d_i^2 = f + ma_n \quad , \quad (8)$$

式中,  $f$  为注水拔出阻力,  $m$  为基础质量,  $a_n$  为基础在某一时刻处加速度 (由试验结果计算获得)。

图 9 给出了试验中吸力基础注水拔出阻力与上拔

位移的关系。图中曲线趋势与图 8 中曲线趋势相似。对比图 8 和图 9 发现当吸力基础内部压力达最大值时, 此时基础拔出阻力也达到最大值。

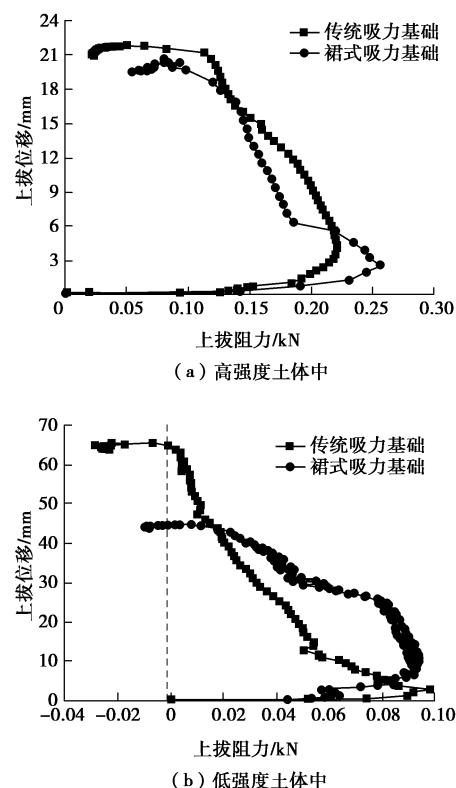


图 9 注水拔出试验上拔阻力 - 上拔位移曲线

Fig. 9 Penetration resistance-displacement curves during extraction by water injection

## 5 沉贯方式对注水上拔影响

开展压力贯入试验, 对比研究压力贯入和吸力沉贯条件下传统和裙式吸力基础注水拔出规律。

图 10 为不同贯入条件下, 传统和裙式吸力基础注水上拔试验上拔位移 - 基础内水压力曲线。压贯条件下基础最终上拔位移均大于吸力沉贯安装情况, 此现象对于传统吸力基础更加明显。由此说明在分析吸力基础注水上拔特性时, 吸力沉贯过程对土体造成的扰动不可忽视。

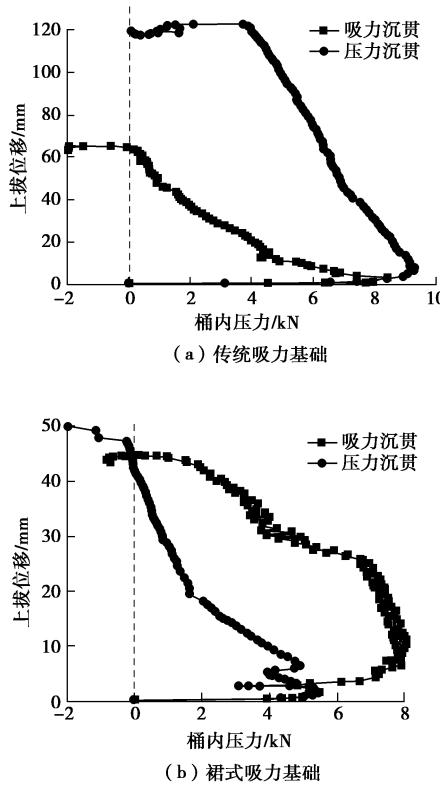


图 10 注水上拔试验上拔位移 - 桶内压力曲线

Fig. 10 Penetration resistance-displacement curves during extraction by water injection

## 6 结 论

研究了黏性土中裙式吸力基础和传统吸力基础吸力沉贯和注水拔出特性, 得到了裙式吸力基础沉贯阻力、所需吸力和注水拔出阻力计算公式。结论如下:

(1) 裙式吸力基础在较高强度土体和低强度土体中最终吸力沉贯深度较传统吸力基础仅小约 2% 和 6%, 证实了裙式吸力基础在黏性土中有良好的沉贯性。

(2) 得到裙式吸力基础沉贯阻力及所需吸力计算公式。公式所得结果与试验结果吻合较好。试验结果表明基础贯入会对裙结构下土体产生扰动, 从而使沉贯阻力较压力贯入情况显著降低。

(3) 注水上拔过程中主桶内压力随上拔高度增加先增大, 后减小。当基础内部压力达最大值时, 此时基础注水拔出阻力最大。得到吸力基础注水拔出阻力计算公式, 指导实际工程基础拔出阻力以及注水压力的确定。

(4) 压力贯入条件下传统和裙式吸力基础注水拔出位移高于吸力沉贯情况, 说明在分析吸力基础注水上拔特性时, 吸力沉贯过程对土体造成的扰动不可忽视。

## 参 考 文 献:

- [1] 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): 2277 - 2283. (LI Da-yong, ZHANG Yu-kun, et al. Model tests on penetration of suction anchors in medium-coarse sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(12): 2277 - 2283. (in Chinese))
- [2] ANDERSEN K, JOSTAD H. Shear strength along inside of suction anchor skirt wall in clay[J]. Die Psychiatrie, 2004, 6(4): 209 - 212.
- [3] RANDOLPH M F, HOUSE A R. Analysis of suction caisson capacity in clay[C]// Offshore Technology Conference, 2002, Houston, Texas.
- [4] HOULSBY G T, BYRNE B W, et al. Design procedures for installation of suction caissons in clay and other materials[J]. Geotechnical Engineering, 2005, 158: 135 - 144.
- [5] CHEN W, RANDOLPH M F. External radial stress changes and axial capacity for suction caissons in soft clay[J]. Géotechnique, 2015, 57(6): 499 - 511.
- [6] ZHOU M, HOSSAIN M S, HU Y, et al. Installation of stiffened caissons in nonhomogeneous clays[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2016, 142(2): 04015079.
- [7] HOULSBY G T, BYRNE B W. Design procedures for installation of suction caissons in sand[J]. Geotechnical Engineering, 2005, 158(158): 135 - 144.
- [8] CHEN F, LIAN J J, WANG H J. Large-scale experimental investigation of the installation of suction caissons in silt sand[J]. Applied Ocean Research, 2016, 60: 109 - 120.
- [9] ZHU B, KONG D Q, CHEN R P, et al. Installation and lateral loading tests of suction caissons in silt[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2011, 48(7): 1070 - 1084.
- [10] ZHANG Y K, LI D Y, CHEN F Q. Experimental studies on sand plug formation in suction caisson during extraction[J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2018: 1 - 10.
- [11] ZHANG Y K, LI D Y, GAO Y F. Model tests on installation and extraction of suction caissons in dense sand[J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2016, 35(7): 921 - 929.
- [12] 李大勇, 都 浩, 孙宗军. 海底裙式吸力锚:中国, ZL200920239914.8[P]. 2010. (LI Da-yong, DU Hao, SUN Zong-jun. Offshore skirted suction anchors: China ZL200920239914[P]. 2010-09-15. (in Chinese))

- [13] LI D Y, FENG L Y, ZHANG Y K. Model tests of modified suction caissons in marine sand under monotonic lateral combined loading[J]. Applied Ocean Research, 2014, **48**: 137 - 147.
- [14] LI D Y, ZHANG Y K, FENG L Y, et al. Capacity of modified suction caissons in marine sand under static horizontal loading[J]. Ocean Engineering, 2015, **102**: 1 - 16.
- [15] LI D Y, ZHANG Y K, FENG L Y. Response of skirted suction caissons to monotonic lateral loading in saturated medium sand[J]. China Ocean Engineering, 2014, **28**(4): 569 - 578.
- [16] LI D Y, MA S L, ZHANG Y K. Undrained pullout capacity of modified suction caisson in clay by finite element limit analysis[J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2017(1): 1 - 10.
- [17] ZHANG Y K, GAO Y F, LI D Y, et al. H-M bearing capacity of a modified suction caisson determined by using load-/displacement-controlled methods[J]. China Ocean Engineering, 2016, **30**(6): 926 - 941.
- [18] ZHANG Y K, LI D Y, GAO Y F. Earth pressures on modified suction caisson in saturated sand under monotonic lateral loading[J]. Journal of Renewable & Sustainable Energy, 2016, **8**(5): 325 - 337.
- [19] ANDERSEN K, JOSTAD H. Foundation design of skirted foundations and anchors in clay[C]// Offshore Technology Conferences, 1999, Houston: 383 - 392.

## 《岩土工程学报》征订启事

《岩土工程学报》创办于 1979 年, 是我国水利、土木、力学、建筑、水电、振动等六个全国性学会联合主办的学术性科技期刊。由南京水利科学研究院承办, 国内外公开发行。主要刊登土力学、岩石力学领域中能代表当今先进理论和实践水平的科学的研究和工程实践成果等。报道新理论、新技术、新仪器、新材料的研究和应用。欢迎国家自然科学基金项目及其他重要项目的研究成果向本刊投稿, 倡导和鼓励有实践经验的作者撰稿, 并优先利用这些稿件。主要栏目有黄文熙讲座、综述、论文、短文、工程实录、焦点论坛、讨论和简讯等。

本刊被《中文核心期刊要目总览》连续多年确认为核心期刊, 并在建筑类核心期刊中位于前列; 本刊被科技部“中国科技论文统计源期刊”(中国科技核心期刊)及“中国科技论文与引文数据库”收录; 本刊被中国科学院“中国科学引文数据库”收录; 本刊被“中国知网”全文收录及“中国学术期刊综合评价数据库”收录; 本刊被“工程索引 Ei Compendex 数据

库”和“日本科学技术振兴机构数据库 JST”等国际数据库收录。本刊网址 ([www.cgejournal.com](http://www.cgejournal.com)) 全文发布本刊所有刊载文章。

本刊读者对象为土木建筑、水利电力、交通运输、矿山冶金、工程地质等领域中从事岩土工程及相关专业的科研人员、设计人员、施工人员、监理人员和大专院校师生。

本刊为月刊, A4 开, 双栏排版, 192 页, 每月中旬出版, 每期定价 40 元, 全年定价 480 元。

本刊国际标准刊号 ISSN 1000 - 4548, 国内统一刊号 CN 32 - 1124/TU, 国内发行代号 28 - 62, 国外发行代号 MO 0520。欢迎广大读者在全国各地邮局订购, 也可在编辑部订购(不另收邮费)。编辑部订购地址: 南京虎踞关 34 号《岩土工程学报》编辑部; 邮编: 210024; 联系电话: 025-85829534, 85829543, 85829553, 85829556; 传真: 025-85829555; E-mail: ge@nhri.cn。

《岩土工程学报》编辑部