

中粗砂中吸力锚的负压沉贯模型试验研究

李大勇^{1, 2}, 张雨坤^{1, 2}, 高玉峰³, 宋言江^{1, 2}

(1. 山东省土木工程防灾减灾重点实验室, 山东 青岛 266590; 2. 山东科技大学土木建筑学院, 山东 青岛 266590;
3. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098)

摘要: 吸力锚是海洋工程中广泛采用的一种基础形式。其沉贯能力(即达到预定海床位置)是其承载力达到设计要求的重要保证。国内外针对吸力锚在细砂、粉土和黏土中的沉贯性进行了较多理论及模型试验研究, 但对中粗砂研究相对较少。分别针对不同水位深度和不同抽吸速度条件, 对吸力锚在中粗砂中的沉贯性进行了大量模型试验研究和分析, 得到了负压与沉贯深度的关系。通过沉贯方案对比, 得出了吸力锚负压沉贯的最佳试验条件。通过有机玻璃吸力锚对比沉贯试验, 直观展示了沉贯过程中吸力锚中“水塞”和“土塞”的形成过程。吸力沉贯与压力贯入对比试验表明, 负压导致的渗流显著降低了吸力锚的沉贯阻力, 是中粗砂中得以沉贯的主要原因。基于试验成果, 提出了模型试验条件下, 吸力锚沉贯计算的理论公式。

关键词: 吸力锚; 沉贯; 中粗砂; 渗流; 水塞; 模型试验

中图分类号: TU441, P751

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2012)12-2277-07

作者简介: 李大勇(1971-), 男, 山东泰安人, 博士, 教授, 博士生导师, 从事海洋岩土工程方面研究。E-mail: ldy@sdust.edu.cn。

Model tests on penetration of suction anchors in medium-coarse sand

LI Da-yong^{1, 2}, ZHANG Yu-kun^{1, 2}, GAO Yu-feng³, SONG Yan-jiang^{1, 2}

(1. Key Laboratory of Civil Engineering Disaster Prevention and Mitigation, Qingdao 266590, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 3. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Suction anchors are widely used in offshore engineering for fixing platforms, offshore wind turbines and mooring floating facilities. Penetration of suction anchors, i.e., driven into a desired position in the seabed by the suction, is a key factor for the design. It is necessary for the bearing capacity to meet the needs. Researchers have focused their attention on the installation in the fine sand in a medium or dense state, silt and clay. This study shows that it is feasible for the penetration of suction anchors in the natural medium-coarse sand. Model tests are carried out to investigate the behavior of the penetration of steel suction anchors in medium-coarse sand by varying water levels and pumping speeds. The relation between the suction and the penetration depth is obtained. By comparing different installation approaches, the optimized method to achieve the maximum penetration depth is put forward. The formation of water/soil plug is observed by using Perspex suction anchors, and reasons for preventing the penetration of suction anchors are analyzed. Compared with the jacking tests, the seepage induced by vacuum plays a vital role in assisting the suction anchors to achieve the penetration in the medium-coarse sand. Finally, an approach is developed to calculate the required suction under a desired penetration depth on the basis of the model tests.

Key words: suction anchor; penetration; medium-coarse sand; seepage; water plug; model test

0 引 言

吸力锚基础(图 1)是一种广泛应用于海洋工程的基础形式, 也被称之为吸力沉箱(Suction caisson)、吸力桶形基础(Suction bucket)或吸力桩(Suction pile), 是由其长径比或用途来命名的^[1]。吸力锚的工程应用始于 20 世纪 80 年代^[2], 通常用来系泊海上浮动式结构物, 此后经过 10 多年发展, 被应用到海洋石油平台等永久结构基础。近年来也在海上风力发电工

程得到了应用^[4-5]。吸力锚通常是底部敞开, 顶部(承台)封闭的钢制圆筒结构, 类似倒置的“水桶”, 承受着巨大水平、竖向荷载与弯矩, 其直径一般在 3~12 m 之间, 长径比通常为 1~6^[6], 桶壁厚与直径比一般为

基金项目: 国家自然科学基金项目(51078227); 山东省自然科学基金项目(ZR2009FM003); 山东省“泰山学者”建设工程专项基金项目; 教育部留学回国人员科研启动基金项目

收稿日期: 2012-01-14

0.3%~0.6%，桶壁厚度多取 15~50 mm^[7]。与桩基相比，吸力锚基础具有施工简便，造价低和可重复利用等优点^[3]。尤其施工速度快，如一只直径 9 m，长度 10 m 的吸力锚，用一台排水泵（排水量 300 m³/h）可在 1~3 h 内完成沉贯。工程实践表明，吸力锚能成功穿越砂土、粉土和黏性土组成的海床地基。

吸力锚沉贯到预定位置，是其承载力达到设计要求的重要保证。国内外对吸力锚在细砂、粉土和黏性土中的沉贯有较多研究，早在 1975 年，Wang 等^[8]对吸力锚模型分别在细砂、粉土和黏性土中进行了吸力沉贯试验，证实了吸力锚的可沉贯性，这是世界较早的吸力沉贯模型试验报道。Andersen 等^[9]利用离心模型试验研究了正常固结软黏土中吸力锚的沉贯性。研究发现：吸力锚的沉贯性与吸力锚自重、吸力锚内压和吸力锚内土塞有关，并分别得到了吸力锚沉贯深度与吸力锚内压、土塞隆起和吸力锚外孔隙水压力关系曲线。Houlsby 等^[10-11]采用解析方法，基于地基承载力和力的平衡原理，分别得到了砂土和黏性土条件下，吸力锚分别在自重和吸力作用下的解析沉贯公式。丁红岩等^[12-13]通过吸力锚分别在均质砂土、粉土和粉质黏土层的模型试验研究，发现土塞高度与吸力锚下沉深度有关，同时指出基础沉贯过程中应注意负压的控制，避免引起土体整体失稳或形成过大土塞。杨少丽等^[14-15]对均质粉土中，进行了一系列室内沉贯模型试验研究。得出了桶内土体在向上的渗流力的作用下，土体孔隙增加，体积膨胀；桶内土塞发展与基础的高径比有关。朱斌等^[16]采用大比尺吸力锚进行了粉土中的负压沉贯模型试验，建立了负压与沉贯深度以及沉贯与时间的关系。

综上所述，国内外对于吸力锚在中粗砂沉贯特性的试验研究较少。因此，进行吸力锚在中粗砂中的沉贯特性研究，可以拓广吸力锚应用土质范围。

针对吸力锚在中粗砂中的沉贯吸力控制问题，进行了大量模型试验研究，发现了“水塞”现象；研究了不同水位对沉贯的影响；得到了吸力锚在负压作用下的沉贯计算理论公式。

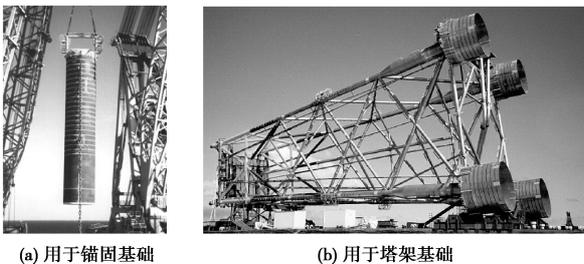


图 1 吸力锚 (www.ngi.no)

Fig. 1 Suction anchors

1 沉贯室内模型试验装备

1.1 仪器设备

主要仪器设备包括：吸力锚模型、模型箱（长×宽×高=2.5 m×2.5 m×1.3 m）、水气转换桶、智能真空泵（可控制流量，可任意设置初始和终止负压，最大流量为 25 L/min）、ZB2-X 真空泵（流量为 120 L/min）、伺服电动缸（用于压贯试验）、LVDT 位移传感器（量程为 300 mm）、负压传感器（量程：-20~0 kPa）和数据采集仪 Datataker DT80G 等。

1.2 试验用砂

原状砂取自青岛风河入海口处，其粒径级配曲线如图 2 所示，其不均匀系数 C_u 为 4.25，曲率系数 C_c 为 1.09，为级配不良的中粗砂。

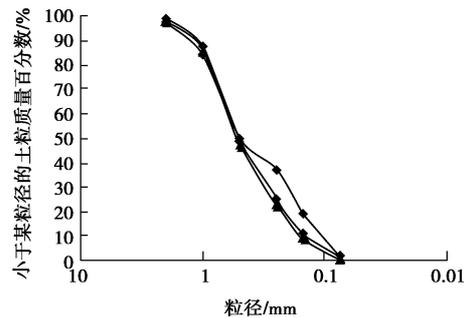


图 2 试验砂的颗粒级配曲线

Fig. 2 Particle-size distribution curves of test sand

将饱和中粗砂静置 15 d 后，测得其相对密度为 70%，孔隙比 e 为 0.7，渗透系数为 0.002 cm/s，内摩擦角 φ' 为 30°，砂土比重 G_s 为 2.69。

1.3 吸力锚模型

吸力锚模型（图 3）采用不锈钢（锚 II 和 IV）和有机玻璃（锚 I 和 III）制作，模型尺寸如表 1 所示。

表 1 吸力锚模型尺寸

Table 1 Dimensions of suction anchors						mm
模型编号	材料	L	D	t_1	t_2	
锚 I	有机玻璃	240	120	5	10	
锚 II	钢制	120	120	1.5	10	
锚 III	有机玻璃	120	120	5	10	
锚 IV	钢制	240	120	1.5	10	

注：表中尺寸及符号含义如图 3 所示。

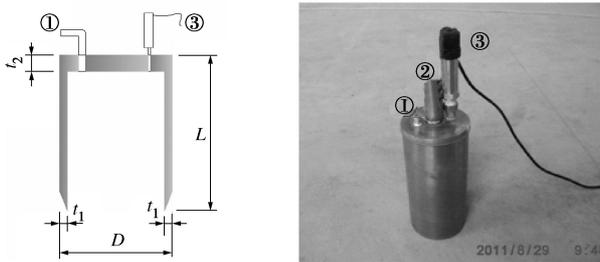
1.4 试验设备组装

吸力锚顶端安装负压传感器，真空泵通过水气转换桶与吸力锚连接，沉贯试验装备如图 4 所示。沉贯过程要求管路有较高的气密性，从而利于负压及其测试数据的稳定性。

2 吸力锚沉贯试验

模型试验中，吸力锚沉贯过程为（图 5）：首先在自重作用下（考虑配重），吸力锚部分沉入中粗砂中，使桶内形成封闭状态，然后借助于真空泵，通过水气转换桶，抽出吸力锚内的空气，此时吸力锚内形成负压，在大气压差作用下，吸力锚外水体向其内渗流，

从而降低了吸力锚的沉贯阻力, 吸力锚得以继续下沉。



①出水/气孔 ②加载端头 ③负压传感器



①锚 I ②锚 II ③锚 III ④锚 IV

图 3 吸力锚模型

Fig. 3 Suction anchor models

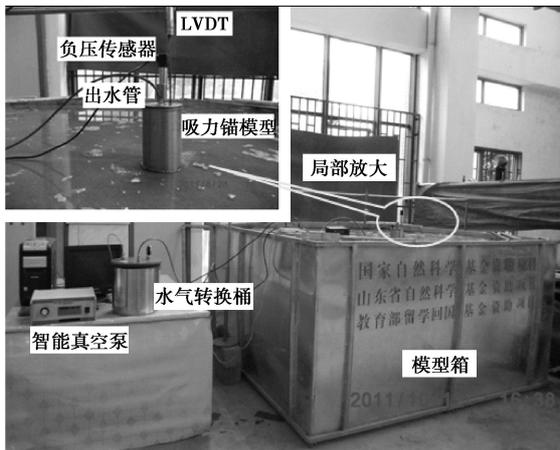
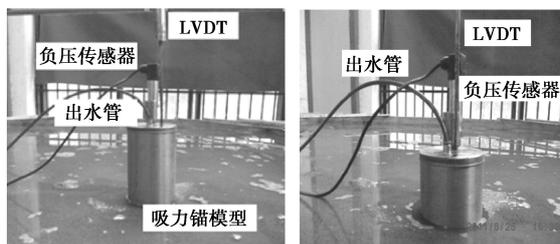


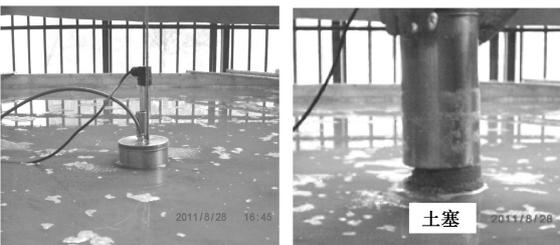
图 4 吸力锚沉贯试验全貌

Fig. 4 Equipment setup and testing in progress



(a) 自重及配重下贯入

(b) 负压沉贯



(c) 沉贯结束

(d) 吸力锚模型拔出

图 5 钢制吸力锚模型沉贯过程

Fig. 5 Process of penetration of a steel suction anchor

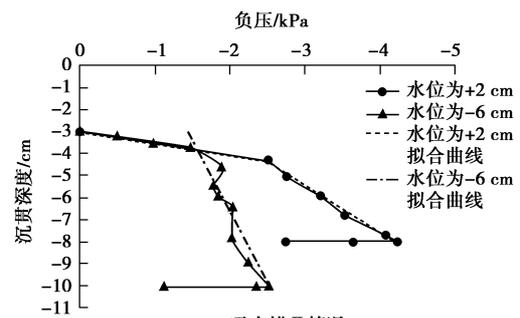
水位是影响吸力锚负压沉贯一个关键因素, 为了探讨其影响, 考虑了 3 种不同水位情况, 即水位相对砂土表面在+2, -6, -12 cm (“+”表示水位高于中粗砂顶面, “-”表示水位低于中粗砂顶面)。

2.1 不同水位下钢制吸力锚沉贯试验

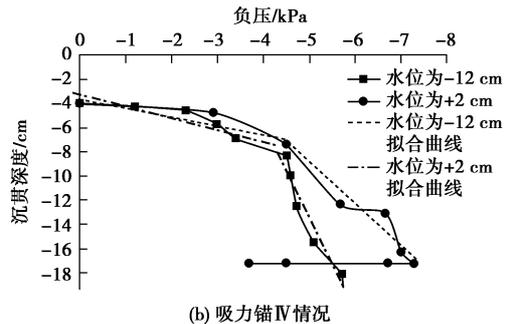
吸力锚负压沉贯前, 首先根据自重和配重不同, 将初始贯入深度分别设为-3 cm (锚 I 和 II) 和-4 cm (锚 III 和 IV); 然后逐渐抽出吸力锚内的空气, 使吸力锚内产生负压, 吸力锚随负压增加而逐渐下沉; 负压使得吸力锚外水头高于锚内水头, 水头差即为负压的绝对值除以水的重度, 因此, 产生向桶内的渗流(图 9)。吸力锚沉贯一段时间后, 渗流作用使吸力锚内部充满水并伴有土塞产生, 此时负压急剧减小, 贯入力随之降低, 即便土塞顶面没有和吸力锚顶面接触, 沉贯也会终止。

(1) 负压与沉贯量的关系

通过变化水位高度, 得到了相应的吸力锚沉贯深度与负压的关系, 如图 6 所示。图 6 (a) 为吸力锚 II 在水位分别为+2 和-6 cm 时沉贯深度和沉贯负压关系及分段拟合直线, 由此得出, 达到相同的沉贯深度, 地下水为-6 cm 时所需要的吸力要比地下水为+2 cm 时小, 而其最终沉贯深度大 2 cm。图 6 (b) 为吸力锚 IV 在水位分别为+2 和-12 cm 时沉贯深度和沉贯负压关系及分段拟合直线, 由此得出, 相同的沉贯深度, 地下水为-12 cm 时所需要的吸力要比地下水为+2 cm 时小, 而最终沉贯深度大 3 cm。即水位在模型高度方向的中间位置时, 沉贯效果相比其它水位深度时更好。



(a) 吸力锚 II 情况



(b) 吸力锚 IV 情况

图 6 吸力锚在不同水位的沉贯深度-负压曲线

Fig. 6 Curves of penetration depths vs. suctions

造成这种现象的原因是：中粗砂渗透系数相对较大，当地下水位较高时，负压作用下，中粗砂中水进入吸力锚内较快，当水充满模型内部时，形成“水塞”，模型内负压迅速下降（图6中曲线最下端形成水平直线段）。当地下水位在吸力锚高度方向的中间位置时，延长了水塞出现时间，沉贯效果最好。如果继续降低地下水位，抽吸吸力锚内部空气时，大气通过砂土地基进入吸力锚内部，即吸力锚内部与大气连通，导致沉贯过早终止。

另外，从初始拟合直线发现，负压变化幅度较大而沉贯量相对较小，表现为直线平缓，第二段拟合直线斜率相对较大。这与渗流发挥作用的大小有关，即负压较小时，渗流作用较弱，沉贯阻力相对较大，因此，沉贯量较小。当负压达到一定量，渗流发挥较大作用，沉贯阻力会显著降低，即为第二拟合直线段，且两直线段存在着明显拐点。

(2) 抽吸速度与沉贯量的关系

经过大量沉贯试验，发现吸力锚的沉贯量与抽吸速度也相关。另外，还发现当吸力锚顶端抽气管有水抽出时，负压会急剧下降，沉贯量也随之急剧减小并终止沉贯，未达到预定沉贯位置。这是由于抽出的水量等于渗流进入吸力锚的水量，这种情况下，要使吸力锚继续下沉，必须提高出水速度，并减少进入吸力锚内的渗流量。为了减少渗入吸力锚内的水量，即减小“水塞”高度，并防止吸力锚内砂土液化，在吸力锚内部放置一块厚度为1 cm的透水石（图11）。以水位+2 cm情况为例，分析如下：图7(a)为吸力锚II在抽吸速度分别为120, 25 L/min时，沉贯深度和负压的关系及分段拟合直线，可得出：对于相同的沉贯深度，抽吸速度为120 L/min时所需的负压要略大，最终的沉贯深度要比25 L/min时大1 cm；图7(b)为吸力锚IV的试验结果，表明：相同的沉贯深度时，抽吸速度为120 L/min所需的负压明显较大，但最终的沉贯深度比25 L/min时大0.7 cm。

由此可见，吸力锚长径比小于等于1时利于沉贯；另外，适当地加快抽吸速度对沉贯也是有利的，但抽吸速度过快，负压增长幅度过大，并出现液化和砂沸现象，加重土塞形成；过大抽吸也会使透水石发生翘起，反而阻碍了吸力锚沉贯。

2.2 有机玻璃吸力锚对比试验

钢制吸力锚沉贯过程中，吸力锚内部土塞及渗流情况不易观察；另外，吸力锚吸力沉贯到一定深度后负压迅速下降的原因也不是很清楚，因此，进行了相应有机玻璃吸力锚的对比试验。

通过有机玻璃吸力锚I和III的沉贯试验，可清晰

观察到砂土内的水不断渗入吸力锚内，且其内水面均匀平稳上升（并与吸力锚顶部抽气孔位置无关），同时土塞也均匀上升，但吸力锚内水面始终高于土塞顶面，即形成“水塞”。当吸力锚内水塞与吸力锚内顶面接触，并由抽气管流出时，吸力锚会停止下沉，这时土塞并没有与吸力锚顶盖接触。如果此时关闭真空泵，静置一段时间，待吸力锚内的水塞高度降低或消除后，继续抽吸力锚内部的空气，吸力锚将继续下沉，如此反复几个过程直至土塞接触到吸力锚内顶面（图8）。

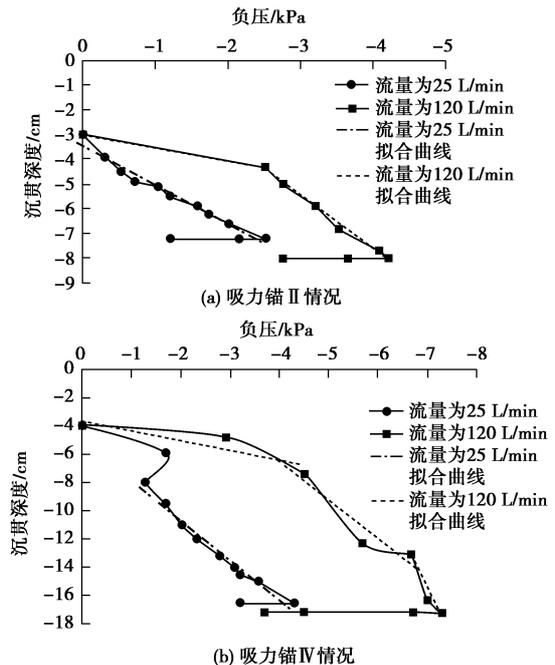


图7 吸力锚在不同抽吸速度的沉贯深度 - 负压关系曲线
Fig. 7 Relation between penetration depths and suctions under different pumping speeds

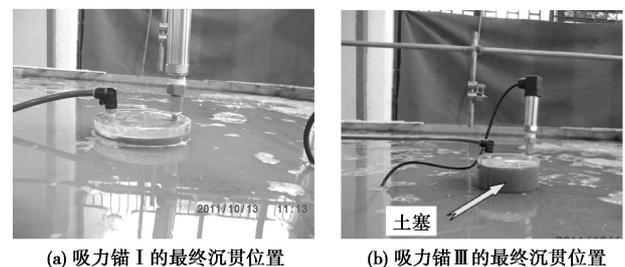


图8 有机玻璃吸力锚最终沉贯深度

Fig. 8 Final penetration of Perspex suction anchor

另外，试验中还发现有机玻璃吸力锚I和III比相应的钢制吸力锚吸力沉贯时所需的沉贯负压要小，最终的沉贯深度也大。分析其原因因为吸力锚I和III的材料为有机玻璃，与砂土地基之间的摩擦系数要小于钢制模型II和IV；虽然模型I和III的壁厚（5 mm）相比模型II和IV（1.5 mm）要大的多，但负压沉贯时所需吸力小。说明受渗流影响，吸力锚“尖端”阻力

下降显著, 其内外侧壁摩擦阻力是沉贯阻力中的主要组成部分。

2.3 压力贯入试验

压贯试验目的是为了直观揭示渗流降低沉贯阻力的程度。压贯设备为 PLC 控制式伺服电动缸 (图 9), 其压贯速度设定为 0.1 mm/s。贯入力由拉压传感器测得, 贯入量由 LVDT 测得。得到压贯试验曲线如图 10 所示, 并与同条件吸力沉贯结果进行比较。试验结果表明: 渗流能大大降低吸力锚受到的沉贯阻力, 如在沉贯深度-100 mm 时, 吸力沉贯情况阻力为 9.5 kPa, 而压力沉贯阻力高达 45 kPa。因此, 如果没有渗流作用, 中粗砂中吸力锚仅靠负压, 是难以实现沉贯的。

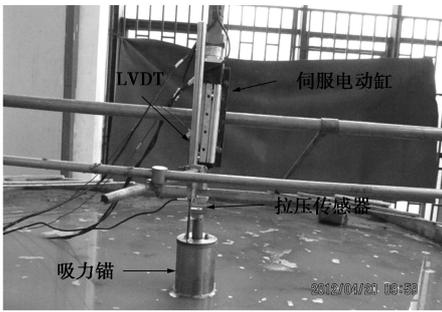


图 9 压力贯入试验

Fig. 9 Jacking penetration

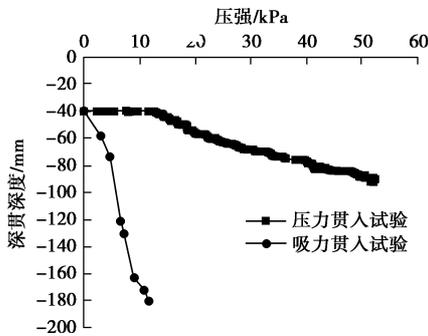


图 10 压贯试验与吸力沉贯比较

Fig. 10 Jacking pressures versus penetration depths

3 吸力锚负压下的沉贯计算

3.1 计算假定

为了简化计算, 采用如下假定: ① $t < h$, 所以 $2h + t \approx 2h$; ② 砂土地基的侧压力系数为静止土压力系数 K_0 ; ③ 砂土地基的渗透系数 k 为常数。

3.2 砂土地基条件下沉贯所需吸力计算

吸力锚沉贯过程中, 受到向上的沉贯阻力 (包括 3 部分: 外侧摩擦阻力、内侧摩擦阻力和端部阻力) 及向下的沉贯力, 如图 11 所示。只有当沉贯力大于或等于沉贯阻力时, 吸力锚才会下沉。

(1) 吸力锚向下的沉贯力 F_p

$$F_p = sS_{D_1} + W = s \frac{\pi D_1^2}{4} + W \quad (1)$$

式中, s 为吸力 (即负压的绝对值), W 为吸力锚自重 (水位以下取浮重度), D_1 为吸力锚模型的内径, S_{D_1} 为吸力锚内截面面积。

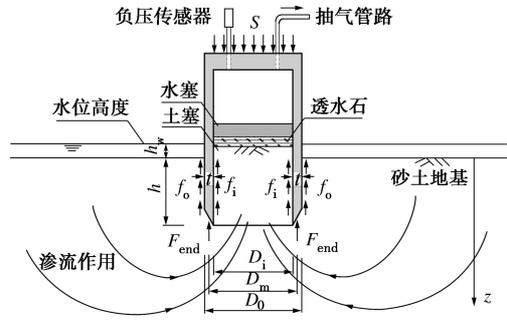


图 11 吸力锚沉贯示意

Fig. 11 Penetration of suction anchor

(2) 吸力锚外侧摩擦力 F_{out}

吸力锚外侧竖向有效应力为

$$\sigma'_{vz0} = \gamma'z + i\gamma_w z = (\gamma' + i\gamma_w)z \quad (2)$$

式中 i 为水力梯度, $i = \frac{s}{2h+t} \approx \frac{s}{2h}$, h 为吸力锚的入土深度; γ' 为砂土的有效重度; γ_w 为水的重度; t 为吸力锚模型的壁厚。

深度 z 处摩擦力为

$$f_{out} = K_0 \sigma'_{vz0} \tan \delta \cdot \pi D_0 \quad (3)$$

式中, K_0 为砂土地基的侧压力系数, 其值为 $1 - \sin \phi'$, δ 为砂土与吸力锚的摩擦角。

吸力锚外壁摩擦力为

$$F_{out} = \int_0^h f_{out} dz \quad (4)$$

将式 (2)、(3) 代入式 (4) 积分得

$$F_{out} = K_0 \tan \delta \cdot \pi D_0 (\gamma' + \frac{s}{2h} \gamma_w) \frac{h^2}{2} \quad (5)$$

(3) 吸力锚内壁摩擦力 F_{in}

吸力锚内侧砂土地基竖向有效应力为

$$\sigma'_{vzi} = \gamma'z - i\gamma_w z = (\gamma' - i\gamma_w)z \quad (6)$$

深度 z 处摩擦力为

$$f_{in} = K_0 \sigma'_{vzi} \tan \delta \cdot \pi D_1 \quad (7)$$

式中, D_1 为吸力锚模型的内径。则吸力锚内壁摩擦力为

$$F_{in} = \int_0^h f_{in} dz \quad (8)$$

将式 (6)、(7) 代入式 (8) 积分得

$$F_{in} = K_0 \tan \delta \cdot \pi D_1 (\gamma' - \frac{s}{2h} \gamma_w) \frac{h^2}{2} \quad (9)$$

(4) 吸力锚底端阻力 F_{end}

土体渗流情况下吸力锚端部土体的竖向有效应力为

$$\sigma'_{\text{end}} = \sigma'_{\text{vo}} N_q + \gamma' N_\gamma t \quad (10)$$

式中, N_q , N_γ 为 Terzaghi 承载力系数, σ'_{end} 为吸力锚底部地基土的有效应力。

锚端阻力为

$$F_{\text{end}} = \sigma'_{\text{end}} \pi D_m t \quad (11)$$

式中, D_m 为吸力锚模型的平均直径, 其余符号含义同前。

因此, 根据吸力锚竖直方向上力的平衡, 得

$$F_p = F_{\text{out}} + F_{\text{in}} + F_{\text{end}} \quad (12)$$

负压沉贯过程中, 由初始沉贯深度 h_1 沉贯至深度为 h_2 时, 左侧的沉贯力在沉贯过程中对吸力锚所做正功为

$$\begin{aligned} \int_{h_1}^{h_2} F_p dz &= \int_{h_1}^{h_2} (s \frac{\pi D_i^2}{4} + W) dz \\ &= \frac{\pi D_i^2}{4} \int_{h_1}^{h_2} s dz - \rho_w g \pi D_m t \int_{h_1}^{h_2} (z + h_w) dz + \int_{h_1}^{h_2} W dz \\ &= \frac{\pi D_i^2}{4} \int_{h_1}^{h_2} s dz - \rho_w g \pi D_m t \left[\frac{h_2^2 - h_1^2}{2} + h_w (h_2 - h_1) \right] + W (h_2 - h_1) \end{aligned} \quad (13)$$

式中, h_w 表示砂土表面以上水位高度。

沉贯阻力对吸力锚所做负功为

$$\begin{aligned} &\int_{h_1}^{h_2} (F_{\text{out}} + F_{\text{in}} + F_{\text{end}}) dz \\ &= \int_{h_1}^{h_2} K_0 \tan \delta \cdot \pi D_o (\gamma' + \frac{s}{2z} \gamma_w) \frac{z^2}{2} dz + \\ &\int_{h_1}^{h_2} K_0 \tan \delta \cdot \pi D_i (\gamma' - \frac{s}{2z} \gamma_w) \frac{z^2}{2} dz + \\ &\int_{h_1}^{h_2} (\sigma'_{\text{vo}} N_q + \gamma' N_\gamma t) \pi D_m t dz \quad (14) \end{aligned}$$

假定沉贯过程中所需吸力大小与沉贯深度呈线性关系, 其关系可表示为 $s=ah+b$, 其中 a , b 为常数。

由功能原理可知, 吸力锚沉贯过程中, 沉贯力所做功与沉贯阻力做功相等, 令式 (13)、(14) 相等, 同时将吸力表达式 $s=ah+b$ 代入式 (13)、(14), 可得

$$\begin{aligned} &\frac{\pi D_i^2}{4} \left[\frac{a(h_2^2 - h_1^2)}{2} + b(h_2 - h_1) \right] + W (h_2 - h_1) - \\ &\rho_w g \pi D_m t \left[\frac{h_2^2 - h_1^2}{2} + h_w (h_2 - h_1) \right] \\ &= \int_{h_1}^{h_2} K_0 \tan \delta \cdot \pi D_o (\gamma' + \frac{s}{2z} \gamma_w) \frac{z^2}{2} dz + \\ &\int_{h_1}^{h_2} K_0 \tan \delta \cdot \pi D_i (\gamma' - \frac{s}{2z} \gamma_w) \frac{z^2}{2} dz + \\ &\int_{h_1}^{h_2} (\sigma'_{\text{vo}} N_q + \gamma' N_\gamma t) \pi D_m t dz \quad (15) \end{aligned}$$

将式 (15) 右边进行积分, 并取 $D_o \approx D_i \approx D_m$, 化简为

$$D_i [a(h_1 + h_2) + 2b]$$

$$\begin{aligned} &= \frac{2K_0 \tan \delta [4\gamma'(h_2^2 + h_2 h_1 + h_1^2) + 3b\gamma_w (h_1 + h_2)]}{3} + \\ &4t [(\gamma' N_q + \gamma_w)(h_1 + h_2) + 2\gamma' N_\gamma t + 2h_w \gamma_w] - \frac{8W}{D_i \pi} \quad (16) \end{aligned}$$

试验中所用砂土地基的相关计算参数见表 2, 由图 6 (b) 中水位+2 cm 情况, 对式 (16) 进行校核。由前文所述, 在自重下沉贯深度 h_1 为 0.04 m, 分别将 h_2 取值为 0.1, 0.15 m 并代入公式 (16), 计算得 $a=-26.39$, $b=-0.87$ 。即吸力锚沉贯深度为 z 时所需负压大小为

$$s = -26.39z - 0.87 \quad (17)$$

将 $z=0.05$ m 代入式 (17), 计算得 $s=-2.2$ kPa, 试验实测数据沉贯负压为 -2.94 kPa; 将 $z=0.13$ m 代入式 (17) 计算得 $s=-4.3$ kPa, 试验实测数据沉贯负压为 -5.6 kPa,; 由以上 2 组数据可看出由式 (17) 计算负压值与图 6 (b) 中吸力锚模型 IV 在水位为 +2 cm 时沉贯所需负压吻合较好。

表 2 计算参数

Table 2 Parameters for calculation

γ' (kN·m ³)	W /N	$K_0 \tan \delta$	D_o /m	D_i /m	N_q	N_γ
0.0015	21.7	0.29	0.119	0.118	24.9	41.39

Houlsby 等^[11]和李大勇等^[17]提出的关于负压沉贯时所需吸力的计算, 为不同沉贯阶段的最大沉贯深度所需负压大小的计算, 然而实际的负压沉贯过程中, 吸力并不是一个恒定值, 式 (17) 为假定负压与沉贯深度为线性关系时得出的, 相比前者所做负压计算公式, 式 (17) 能够计算出假定前提下吸力锚模型沉贯过程中不同深度所需负压的大小。由此类推到实际工程中, 通过吸力锚现场安装时测试两个不同沉贯深度所对应负压大小, 就能确定吸力锚整个吸力沉贯过程中沉贯深度和负压大小的关系。

4 结论与建议

(1) 中粗砂中水位对沉贯有重要影响。地下水位在吸力锚高度方向的中间位置时, 吸力锚的沉贯效果最理想, 能达到最大沉贯深度, 此时负压沉贯结束时, 吸力锚内部被土塞和“水塞”填充; 而当水位较高时, 由于中粗砂渗透系数大, 吸力锚内部容易形成较高的“水塞”, 影响吸力锚的负压沉贯; 当水位低于砂土表面下 1 倍吸力锚的长度时, 吸力锚内部和大气连通, 无法形成密闭空间, 不能形成足够大的负压, 而使沉贯终止。

(2) 抽吸速度和吸力锚长径比影响负压沉贯。在一定范围之内, 加快抽吸速度有利于吸力锚的负压沉贯, 但当抽吸速度超过负压沉贯容许值时, 吸力锚内

部的砂土出现液化和砂沸现象, 从而加大土塞和水塞高度, 导致吸力锚达不到预定的沉贯位置。

(3) 发现了“水塞”现象。由于试验所用中粗砂的渗透系数较大, 负压沉贯过程中, 吸力锚内水面和土面同时上升, 但水面上升速度高于土塞的上升速度, 直至水面早于土面与吸力锚内顶面接触, 沉贯终止, 此时吸力锚内部土塞顶面以上水体称之为“水塞”, “水塞”的存在使得吸力锚内真空度急剧下降, 从而阻碍吸力锚下沉, 这种现象在粗颗粒(中砂、粗砂)砂土中尤为突出。

为避免抽空气形成负压导致的“水塞”问题, 建议进一步深入研究中粗砂中吸力锚完全侵入水中情况下, 抽水形成负压的沉贯试验研究, 这种条件下的试验符合工程实际情况。

参考文献:

- [1] TJELTA T. Suction piles: their position and application today[C]// Proceedings of the Eleventh International Offshore and Polar Engineering Conference, 2001: 1 - 6.
- [2] ANDERSEN H, MURFF D, RANDOLPH F. Suction anchors for deepwater applications. *Frontiers in Offshore Geotechnics: ISFOG*[M]. Lending: Taylor & Francis Group, 2005.
- [3] KWANG J, CHO H, BANG S, et al. Embedded suction anchors for mooring of a floating breakwater[J]. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 2010, **132**: 1 - 5.
- [4] FELD T. Suction buckets, a new innovative foundation concept, applied to offshore wind turbines[D]. Aalborg: Aalborg Univ, 2001.
- [5] HOULSBY G T, BYRNE B W. Suction caisson foundations for offshore wind turbines and anemometer masts[J]. *Wind Engineering*, 2000, **24**(4): 249 - 255.
- [6] ISKANDER M, EI-GHARBAWY S, OLSON R. Performance of suction caissons in sand and clay[J]. *Can Geotech J*, 2002, **39**(3): 576 - 584.
- [7] TRAN M. Installation of suction caissons in dense sand and the influence of silt and cemented layers[D]. Sydney: University of Sydney, 2005.
- [8] WANG M, NACCI V, DEMAARS K. Behavior of underwater suction anchor in soil[J]. *Ocean Engineering*, 1975, **3**: 47 - 62.
- [9] ANDERSEN K, JEANJEAN P, LUGER D, et al. Centrifuge tests on installation of suction anchors in soft clay[J]. *Ocean Engineering*, 2005, **32**: 845 - 863.
- [10] HOULSBY T, BYRNE W. Design procedures for installation of suction caissons in sand[J]. *Geotechnical Engineering*, 2005, **158**(3): 135 - 144.
- [11] HOULSBY G T, BYRNE B W. Suction caisson foundations for offshore wind turbines and anemometer masts[J]. *Wind Engineering*, 2000, **24**(4): 249 - 255.
- [12] 丁红岩. 粉土中吸力锚土塞形成模型试验[J]. 华北石油设计, 1999(4): 8 - 12. (DING Hong-yan. Model tests on soil plug formation in suction anchor for silty clay[J]. *North China Petroleum Design*, 1999(4): 8 - 12. (in Chinese))
- [13] 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 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): 441 - 444. (in Chinese))
- [14] 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. (in Chinese))
- [15] 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. (in Chinese))
- [16] 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. (in Chinese))
- [17] 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]. *The Ocean Engineering*, 2011, **29**(1): 111 - 115; 148. (in Chinese))