

吸力锚土塞在粉质粘土中形成的模型试验研究

Model tests on soil plug formation in suction anchor for silty clay

丁红岩, 刘振勇, 陈 星
(天津大学 建筑工程学院, 天津 300072)

摘 要: 介绍在室内粉质粘土土槽中进行吸力锚土塞形成试验, 给出了部分试验结果。通过模拟海上吸力锚沉放过程, 研究土塞形成和发展的规律及模型沉放过程中压力差、沉放速度等因素对土塞形成产生的影响。并对一些试验现象和结果进行了初步分析, 得出了一些结论。

关键词: 吸力锚; 土塞; 粉质粘土

中图分类号: TU 47

文章标识码: A

文章编号: 1000-4548(2001)04-0441-04

作者简介: 丁红岩, 男, 1963年生, 1994年于天津大学获得博士学位, 现为天津大学建筑工程学院副教授。

DING Hong-yan, LIU Zhen-yong, CHEN Xing

(The School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: A series of model tests designed to present the formation of soil plugs in the process of penetration of suction anchors in silty clay is introduced, and some test results are put forward. By simulating the practical situation of penetration of suction anchors in sea, the relations between the height of soil plug and the factors such as pressure, penetration speed of anchor models, etc are studied. Some phenomena and results of tests are analyzed and some valuable conclusions are primarily obtained in this paper.

Key words: suction anchor; soil plug; silty clay

1 引 言*

在经历长期的理论和试验研究之后, 1981年吸力锚被首次成功运用于欧洲北海的 GORM^[1] 油田。1994年9月在渤海 CFD16-1 油田延长测试系统中吸力锚在我国首次运用取得成功。目前国内外已多次完成吸力锚沉放和回收工程。吸力锚作为一种新型海上结构设施, 其方便、经济、可靠的特点正逐步被人们所认识和接受。

吸力锚是一种顶端封闭的桶型结构。锚筒侧壁材料为钢材, 顶盖一般为钢材或钢筋混凝土材料。锚筒顶盖留有抽水孔以连接抽水管路, 用于系泊的吸力锚根据具体的受力特点和系泊位置的要求, 系缆点可选在锚的顶盖或侧壁位置。

由于吸力锚技术出现、发展的时间较短, 在如何更充分地掌握和利用其实际功能、如何进一步提高其技术可靠性以及使其经济性得到更合理地体现等方面, 还有许多工作要结合具体的海区自然条件和工程要求进行开拓和改进, 在设计和施工安装中还存在着一些问题亟待解决。其中, 土塞现象就是近年来困扰吸力锚(吸力式基础)技术的难题之一。

所谓土塞现象, 是指沉锚过程中, 锚筒内泥面在筒内外压差或渗流力作用下向上壅高, 并在沉锚后期提前和锚顶接触, 使锚筒不能下沉至设计深度。在渤海进行的几项吸力锚安装工程中, 发生的土塞高度一般

为 10~30 cm。1981年在 GORM 油田进行的吸力锚沉放工程中, 也遇到了土塞问题(沉放吸力锚的海底土质主要为砂土, 锚内土塞的最大高度可达近 3 m), 土塞的发生使吸力锚不能沉到预定的设计深度, 除给安装施工带来了困难, 延长了海上安装作业的时间外, 还在一定程度上降低了吸力锚的承载力。同时, 由于土塞使锚顶高出海底泥面, 引起锚附近流场的改变, 形成对锚周围土体的冲刷, 进一步降低了吸力锚的承载力, 对于象渤海等浅海水域, 这种影响尤为显著。它给吸力锚带来的危害是不容忽视的(从回收吸力锚的泥痕可以看出, 这种局部冲刷的深度可达 1.5 m)。因此开展土塞形成机理方面的理论和试验研究是必要的。

为了在试验条件下重现吸力锚土塞现象, 研究典型土中土塞形成和施加的吸力(即锚筒内外压力差)、沉锚速度等因素的关系, 在室内土槽中进行了 4 组模型试验。试验选用三种有代表性的土为砂土、粉土^[2] 和粉质粘土, 本文介绍在粉质粘土中进行试验研究的过程。为便于比较, 各组试验重复选用了两个尺寸的吸力锚模型, 模型尺寸(直径×高)分别为 300 mm×600 mm 和 300 mm×300 mm。进行试验的各测点土质大体相同, 试验分为稳压下沉和快速下沉两种。试验测量了各时刻沉锚参数以及沉锚前后土的部分物理力

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50079016)

收稿日期: 2001-01-28

学指标。通过对试验结果的比较分析,得出了一些结论。

2 试验设备

试验用土槽为高 1.0 m, 直径 1.5 m 的钢质圆筒, 土槽底部设有进水管、排水管和阀门, 以便在制备和养护土时对进水排水进行控制。土槽底部还铺设了含有土工布的反滤层, 以致在进水排水时土料不会被水冲动。

试验通过一台射流泵提供使吸力锚模型下沉所需的吸力。在连接射流泵和锚模型之间的管路上还设有稳压箱和真空压力表。射流泵工作时通过抽气而在锚模型内形成一定的真空, 其最大工作负压为 0.9 Atm。

试验采用的吸力锚模型为透明有机玻璃结构(图 1), 模型 A 尺寸(直径×高)为 300 mm×600 mm, 模型 B 尺寸(直径×高)为 300 mm×300 mm。筒顶设有三根有机玻璃管, 用以容纳测量土塞表面上升高度的标尺系统。其中两根管顶端分别连接着真空压力表和抽气管路, 另一根封闭。

土塞形成试验需要测量的两类参数是土质参数和沉锚控制参数。粉质粘土强度指标的测量采用轻型十字板剪力仪。土质参数的测量设备还包括其他常规土试验所用的设备等。而沉锚参数的测量设备除前述的标尺系统和负压测量装置外, 还包括用来测量模型沉入深度的标尺系统和渗流量测量装置等。

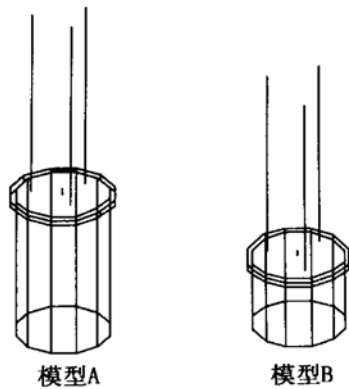


图 1 吸力锚模型
Fig. 1 Model of suction anchor

3 试验用土

为使本试验所用土尽可能地具有代表性, 在充分调查以往的工程资料的基础上, 经过广泛取样, 根据土的类别和分类指标(塑、液限和颗粒级配)选定了粉质粘土等三种有代表性的土。然后以土的状态指标(容重、含水率、渗透系数、不排水剪强度)为控制条件, 在土槽中制做养护试验用土。有关粉质粘土的部分土质参数见表 1~ 3。

表 1 粉质粘土的含水率(模型沉放试验前测量)

Table 1 Water content of silty clay(before penetration of anchor)

取样深度 / m	土的含水率/ %				
	测点 1	测点 2	测点 3	测点 4	平均
0.1~ 0.4	24.1	24.0	24.3	24.7	24.3
0.5~ 0.8		23.9		24.1	24.0

表 2 粉质粘土的浮容重(模型沉放试验前测量)

Table 2 Submerged unit weight of silty clay(before penetration of anchor)

取样深度 / m	土的浮容重/(kN·m ⁻³)				
	测点 1	测点 2	测点 3	测点 4	平均
0.1~ 0.4	10.4	10.50	10.43	10.36	10.42
0.5~ 0.8		10.45		10.21	10.33

表 3 粉质粘土不排水十字剪抗剪强度 c_u
(模型沉放试验前测量)

Table 3 Undrained shear strength c_u (before
penetration of anchor)

测点标号	测点离泥面距离 / cm	不排水抗剪强度 c_u / kPa
1	34.6	8.8
	69.6	11.6
	36.2	8.8
2	71.2	9.9
	34.6	9.0
3	69.6	10.4
	34.6	10.4
4	69.6	9.9

4 试验过程描述

全部试验重复选用了前述的两个模型, 共进行 4 个点的沉放试验如图 2 所示。为分析施加吸力大小和沉锚速度对土塞形成的影响, 试验采用了稳压下沉和快速下沉(即适当提高下沉压力)的办法。沉锚时控制吸力和下沉速度在要求的范围内。试验中测量了各时刻土塞高度、模型下沉深度和施加吸力大小, 对沉锚前后土的部分物理力学指标也进行了量测参见表 4~ 5。各测点选用模型情况、沉锚方法和部分沉锚记录见表 6。

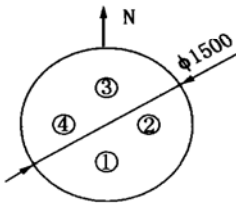


图 2 模型试验点位置示意图

Fig. 2 Position of model testing

表 4 粉质粘土的含水率(试验后)

Table 4 Water content of silty clay (after penetration of anchor)

取样深度 / m	土的含水率/ %				
	测点 1	测点 2	测点 3	测点 4	平均
0.1~ 0.4	24.1	24.2	24.0	24.1	24.1

表5 粉质粘土的浮容重(试验后)

Table 5 Submerged unit weight of silty clay (after penetration of anchor)

取样深度 /m	土的浮容重/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)				
	测点1	测点2	测点3	测点4	平均
0.1~0.8	10.40	10.49	10.48	10.44	10.45

表6 粉质粘土沉锚纪录

Table 6 Penetration record of the anchor in silty clay

测点 标号	下沉 时间 /s	下沉 深度 /cm	土塞 高度 /cm	锚筒最 大内压 /MPa	渗流 流量 / cm^3	备注
1	386	20.7	8.6	0.05		出现流土, 卸压后土塞下沉
2	3609	36.4	16.0	0.075		土塞出现横向裂纹并上涌
3	864	38.1	18.4	0.08	很少	土塞出现横向裂纹并上涌
4	3010	17.9	9.3	0.05	很少	

试验沉放点1, 3的土塞高度、沉锚深度和吸力大小的历时曲线见图3~8。图9~12给出了模型沉放试验的部分现象。

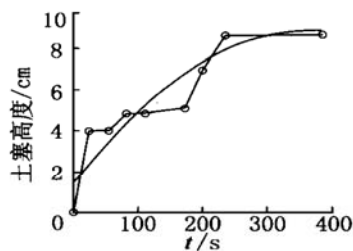


图3 粉质粘土测点1土塞高度历时曲线

Fig. 3 The height of soil plug versus time curve at measuring point one

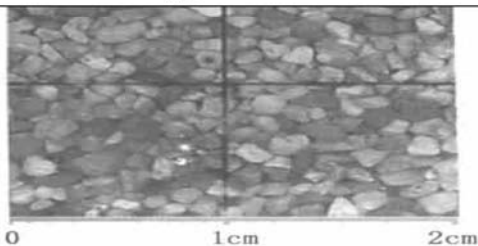


图4 粉质粘土测点1锚下沉深度历时曲线

Fig. 4 The curve of penetration depth and time at measuring point one

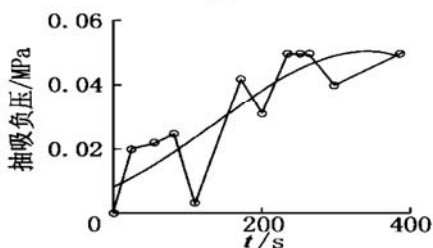


图5 粉质粘土测点1抽吸负压历时曲线

Fig. 5 The curve of pressure and time at measuring point one

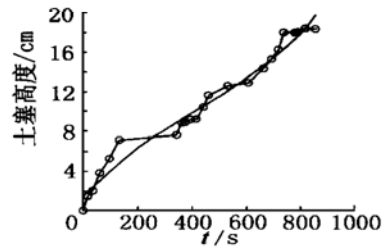


图6 粉质粘土测点3土塞高度历时曲线

Fig. 6 The height of soil plug versus time curve at measuring point three

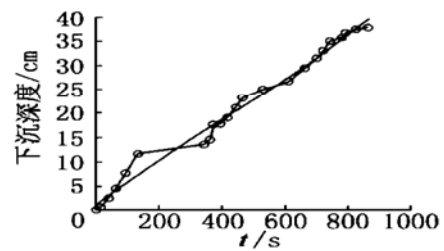


图7 粉质粘土测点3锚下沉深度历时曲线

Fig. 7 The curve of penetration depth and time at measuring point three

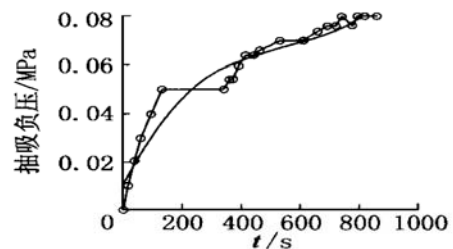


图8 粉质粘土测点3抽吸负压历时曲线

Fig. 8 The curve of pressure and time at measuring point three



图9 粉质粘土吸力锚模型沉放中横向裂纹

Fig. 9 The transverse crack of soil plug

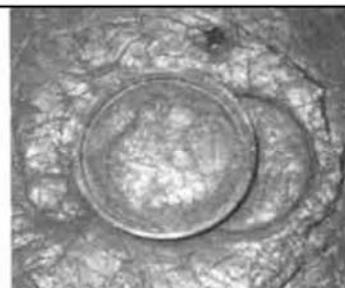


图10 粉质粘土锚筒外土体开裂和下陷(一)

Fig. 10 The crack and sink of silty clay outside suction anchor (1)



图 11 粉质粘土锚筒外土体开裂和下陷 (二)

Fig. 11 The crack and sink of silty clay outside suction anchor (2)



图 12 粉质粘土吸力锚模型沉放中管涌

Fig. 12 The piping during penetration of anchor into silty clay

5 结 论

(1) 吸力锚模型粉质粘土的负压沉放过程中产生土塞。

(2) 锚模型下沉速度 v_{pe} ($v_{pe} = dD_{pe}/dt$, D_{pe} 为锚模型下沉深度) 和土塞表面上升速度 v_{pl} ($v_{pl} = dH_{pl}/dt$, H_{pl} 为土塞表面升高高度) 在粉质粘土中的变化是一致的。土塞高度与模型锚的下沉深度有较好的相关性, 而与沉锚速度的相关性较差。

(3) 为了保证吸力锚沉放成功, 在各沉锚阶段正确施加负压力是必要的。在沉锚初期, 负压力值不应过高, 否则将破坏初始封闭条件; 在沉锚过程中, 必须施加足够的负压力以使吸力锚下沉, 同时负压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。发生整体失稳破坏的极限压力值可能和土质条件和沉锚状态等因素有关, 这方面还需要深入研究。

(4) 从试验前后的粉质粘土的含水率对比看出, 试验前后粉质粘土的密实度除上层 0~2 cm 处变疏松外, 其底层部分基本无变化。

(5) 锚模型在沉放后期, 由于较大的负压影响, 土塞出现了明显的横向断层, 这些断层加大了土塞的高度。同时随着沉锚终止负压的消失, 土塞高度有了一定的回缩 (约 2 cm), 参见图 9。

(6) 试验过程中, 吸力锚模型周围土体出现小范围凹陷, 而锚内土塞中央部分则比周边略高 (参见图 10)。渗流作用、锚模型的冲切和边壁摩擦可能是造成这一因素的主要原因。

参考文献:

- [1] Senpere D, Auvergne G A. Suction anchor piles— A proven alternative to driving or prilling [A]. Proc 14th Offshore Technology Conf [C]. Houston, 1982. 483~ 493.
- [2] 丁红岩, 等. 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.

《城市环境岩土工程》介绍

——国家“九五”重点图书出版规划项目

随着我国城市化进程的不断加快, 工程规模向长、大、深、群方向发展。城市大规模岩土工程活动引起的地面变形、地基和深基坑稳定性、路堑边坡和岸坡稳定性以及抗震防灾等环境岩土工程问题日益突出。城市环境岩土工程是 21 世纪我国重要的研究课题。罗国煜教授等撰写的《城市环境岩土工程》, 从一个新的高度对城市建设中所涉及的主要环境岩土工程问题进行剖析, 并以优势面学术观点为主线, 兼容并蓄各家之长进行深入系统的研究, 努力揭示这些问题的内在联系和发生发展规律, 得出了许多新的认识和有益的结论。这对于解决我国城市建设环境岩土工程问题具有十分重要的意义。罗国煜教授在本书中提出的“两类环境问题”的概念具有创新性, 他将环境岩土工程问题与污染和生态破坏问题作为等价的环境问题看待, 从而拓宽了环境问题的内涵, 也确立了环境岩土工程问题研究的重要地位。这对推动环境岩土工程问题研究有着重要意义。罗教授提出的“全球悬河化”和“两类悬河问题”的概念及其明确的研究思路, 对于解决我国日益突出的悬河断流和堤防安全问题具有指导意义。岩土工程优势面理论的学术思想贯穿

于书中的相关章节, 已成为解决环境岩土工程问题的一个重要方法, 荣获 2000 年教育部科技进步一等奖。本书以优势面理论为主线展开对环境岩土工程问题的研究, 并引用该理论在许多大型工程的关键岩土工程问题应用中所取得的多项研究成果, 使这一专著具有鲜明特色并达到国际先进水平。加之兼容并蓄又系统地反映环境岩土工程国内外有关新的研究成果, 使本书更具有先进性、完整性和应用性。对此, 张宗祜院士、钱七虎院士、王思敬院士在书中作序言, 吴中如院士、周君亮院士、宰金珉教授在本书评审意见中均给予了充分肯定和高度评价。

由于本书为环境岩土工程领域第一部综合性著作, 并且理论先进性和工程实用性俱佳, 该书刚刚出版就受到高等院校、科研设计单位和勘察施工单位的大力欢迎。一些著名高校已将本书选作硕士或博士研究生的教材, 有些勘察设计单位还制订了专题培训计划。

欲购此书者请与南京大学出版社发行部联系, 联系电话: (025) 3596923。

(南京大学出版社 薛志红供稿)