

中国石油集团工程技术研究院科研成果系列丛书

浅海桶形基础平台

QIANHAI TONGXING JICHU PINGTAI

袁中立 秦延龙 唐海燕 编著

石油工业出版社

中国石油集团工程技术研究院科研成果系列丛书

浅海桶形基础平台

袁中立 秦延龙 唐海燕 编著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书系统总结了中国石油集团工程技术研究院承担的中国石油重点科技项目“桶形基础平台研究”课题研究成果,并收集了国内外专家近几年对桶型基础的研究应用最新成果,内容包括:渤海湾地质、水域特性分析、桶形基础承载机理、桶形基础平台的设计建造、桶形基础下沉起升、海上安装与观测等,可供从事海洋工程、路堤岛建设工程、码头工程的工程技术人员及相关专业大专院校师生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

浅海桶形基础平台/袁中立,秦延龙,唐海燕编著.
北京:石油工业出版社,2010.12
(中国石油集团工程技术研究院科研成果系列丛书)
ISBN 978-7-5021-8212-0

I. 浅…

II. ①袁…②秦…③唐…

III. 海上平台

IV. TE951

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 254318 号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址: www.petropub.com.cn

发行部: (010) 64523620

经 销: 全国新华书店

印 刷: 保定彩虹印刷有限公司

2010 年 12 月第 1 版 2010 年 12 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 13.25

字数: 338 千字

定价: 45.00 元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

序

桶形基础外形像一只倒扣在土中的桶，因此称之为桶形基础。其实它是一种带裙的圆板基础，故也可视之为带裙的片筏基础或短桩基础。从 20 世纪 70 年代初期开始，人们在多次负压下沉成功的基础上，将桶形基础应用于海洋工程结构物中。特别是挪威国家石油公司 Statoil 于 1994 年 7 月将桶形基础首次应用于 70m 水深的欧洲北海管网 16/11-E 平台的工程中，被海洋工程界誉为“导管架基础工程技术新时代的曙光”。

本书结合我国渤海湾工程地质情况，系统总结了 1996 年以来中国石油集团工程技术研究院承担中国石油重点科技项目“桶形基础平台研究”系列课题的研究成果，内容包括：渤海湾地质、水域特性分析、桶形基础承载机理、桶形基础平台的设计建造、桶形基础下沉起升、多桶基础漂浮稳性与拖航、海上安装与观测等。研究内容广泛，试验项目系统配套，既有较深入的理论分析，又有较翔实的室内外实验总结，设计建造的桶形基础试验平台具有开创性指导意义。

本书收集的国内外专家学者对桶形基础的研究成果，是目前国内对桶形基础论述最全、最完整的专业技术专著，对桶形基础的研究设计、应用推广具有积极的借鉴意义；同时也是专业技术人员、大专院校学生开展浅海海工、港工技术创新很好的教材。

桶形基础是海洋工程中新兴的浅基础，工程实例与传统桩基、重力基础相比总量尚少，从新技术应用的历史长河看，有一个认识—应用—再认识—再推广的过程。我相信，随着理论研究的不断深入，随着海洋工程的不断发展，桶形基础这一新型基础，必将被工程技术界认识接受，在我国海工、港工工程领域得到更广泛的应用。

中国石油集团海洋工程有限公司 总经理



2010 年 11 月

前 言

中国石油集团工程技术研究院是一所集科研、技术开发、技术服务为一体的科研院所，主要从事海洋平台、滩海工程、海工建造与安装、海洋钻采、防腐、保温、焊接、特种材料等技术的研究开发与应用，拥有中国石油海洋工程重点实验室和中国石油石油管工程涂层材料与保温结构重点实验室。建院 30 年以来，共完成国家、中国石油天然气集团公司（以下简称集团公司）重点科研项目 570 项，有 46 项成果获得国家或集团公司科技进步奖，拥有专利 72 项，国家级重点新产品 15 项。服务范围覆盖国内各主要石油、石化企业，以及海上石油工程、西气东输、南水北调等重大工程项目，并受到客户的广泛好评。

中国石油集团工程技术研究院自 1996 年以来，先后开展了“滩海桶式负压桩基础钢制试采平台”、“滩海可移动式靠船采油简易平台研究”和“可移动式桶基试采平台建造新技术与工业示范”等中国石油科技项目的研究工作，形成了一套具有自主知识产权的桶形基础平台设计、建造及海上安装技术。中国石油集团工程技术研究院于 2007 年年底重组到中国石油海洋工程有限公司，为中国石油海洋石油的发展和重点工程的建设服务，是中国石油海洋石油工程和防腐保温等技术的研究创新基地和技术服务中心，是中国石油海洋工程有限公司一体化发展战略中科技创新、技术支持和服务、人才培养的基地。

本书为中国石油集团工程技术研究院科研成果系列丛书之一，是中国石油集团工程技术研究院“桶形基础平台研究”课题组在系统总结中国石油自主创新成果的基础上，收集了近几年国内外对桶形基础研究应用的最新成果，对渤海湾地质、水域特性进行了分析，研究了桶形基础承载机理、循环荷载下稳定、桶形基础下沉起升等许多前沿理论问题，通过实验总结了多桶基础漂浮稳性与拖航、海上安装技术问题，列举了国内外桶形基础的工程应用实例，结合渤海湾浅海工程需要而编写的。

中国石油集团工程技术研究院 院长



2010 年 11 月

目 录

1 绪 论	(1)
1.1 桶形基础的由来	(1)
1.2 桶形基础的前期研究	(2)
1.3 国内对桶形基础的研究	(6)
2 软土地基与桶形基础	(10)
2.1 渤海湾滩海地区油气资源与环境	(10)
2.2 关于渤海湾滩、浅海的软土地基	(15)
2.3 滩海地区施工特殊装备的探索	(15)
2.4 桶形基础的特点	(19)
2.5 桶形基础承载能力对比	(21)
2.6 工作机理及基本结构	(22)
3 桶形基础承载力	(27)
3.1 单桶基础竖向极限承载力	(27)
3.2 单桶基础水平极限承载力	(47)
3.3 多桶基础承载力试验	(64)
3.4 桶形基础循环极限承载力	(73)
4 桶形基础平台的下沉与起升	(82)
4.1 单桶下沉、起升实验	(82)
4.2 桶形基础平台下沉与起升原理	(86)
4.3 影响桶形基础下沉的因素	(89)
4.4 四桶基础平台下沉起升模型试验	(94)
4.5 砂性土中桶形基础负压试验研究	(102)
4.6 深水负压锚的下沉技术	(111)
5 桶形基础平台的漂浮稳性	(113)
5.1 圆桶结构气浮原理	(113)
5.2 桶形基础平台的浮稳性	(115)
5.3 桶形基础平台湿拖水槽实验	(117)
5.4 桶形基础模型平台现场拖航试验	(130)
5.5 三桶形基础系缆平台模型拖航试验	(132)
5.6 桶形基础气浮稳性理论分析和试验比较	(134)
5.7 桶形基础防波堤拖航、下沉实例	(137)
6 先导性桶形基础平台的设计建造	(141)
6.1 桶形基础平台设计	(141)
6.2 大港桶形基础先导试验平台设计	(151)

6.3	桶形基础先导试验平台建造	(161)
6.4	桶形基础平台的拖航与就位	(167)
7	桶形基础平台的自动控制	(171)
7.1	控制参数与选择	(171)
7.2	PID 控制的原理和特点	(171)
7.3	监测控制技术	(173)
7.4	平稳度的监测技术	(174)
7.5	现场试验数据和曲线分析	(174)
7.6	桶基贯入深度与下沉速度的关系曲线	(175)
7.7	倾角与时间的数据分析	(176)
8	桶形基础平台的长期观测	(177)
8.1	堆载试验	(177)
8.2	沉降测量	(178)
8.3	桶形基础码头沉降观测	(179)
8.4	平台抗冰观测	(180)
9	桶形基础平台应用展望	(182)
9.1	浅海桶形基础平台的技术特点	(182)
9.2	桶形基础系统平台	(182)
9.3	浅海桶形基础在码头建设中的应用	(183)
9.4	浅海桶形基础在滩海道路建设中的应用	(186)
9.5	桶形基础在滩海人工岛中的应用	(187)
9.6	海上结构系泊用桶形负压锚	(190)
9.7	采用桶形负压的浮标系泊系统和火炬塔	(195)
9.8	桶形基础在海底管道修复中的应用	(196)
9.9	桶形基础隔水套管底座隔水套管平台	(199)
9.10	滩海可靠船桶形基础试采平台	(200)
	结束语	(202)
	参考文献	(203)

1 绪 论

1.1 桶形基础的由来

桶形基础外形像一只倒扣在土中的桶，因此称之为桶形基础。其实它是一种带裙的圆板基础，故也可称之为带裙的片筏基础或短桩基础，近来也有人称之为板裙基础。从承载特性看，桶形基础具有片筏基础和短桩基础的共同特点。

关于对桶形基础的报道可追溯至 1958 年，Mackereth 在英国一湖中水底软泥湖床上，用负压桶锚定土样取芯器。此后，相继在 20 世纪 70 年代初由美国海军水下工程部和海军设施工程司令部，委托 Rhode Island 大学做了负压锚桩在砂中的性能以及负压桩相关土壤剪切强度的实验室试验研究。1972 年荷兰 Shell Research 公司开发成功负压海底土壤贯入技术，并在北海应用于水下锚定。20 世纪 70 年代末由荷兰 Shell Offshore Research 公司在砂和黏土中进行了直径为 3.8m 的负压桩原型试验研究。

从 20 世纪 70 年代初期开始，人们在北海一些近海结构物中多次使用带裙的片筏基础。1973 年菲利普斯（Phillips）石油公司的 Ekofisk Doris 储油罐第一个使用了重力式板裙基础。在随后的 5 年中，先后在致密的砂土和超固结黏土中，建成了 12 个重力式的板裙基础结构物，根据地域土质情况，这些板裙设计深度均不足 4.5m。

1982 年 Senpere 和 Auvergne 应用负压技术设计施工了 12 根负压桩。1989 年 4 月，挪威国家石油公司（Statoil）在深海软粘土地区成功地建成了直径为 20~30m、板裙深为 22m 的 Gullfaks C 重力式平台（图 1.1.1）。在同年年底，挪威国家石油公司的首席基础工程师 Tor Inge Tjelta 和首席结构工程师 Morten Barheim，提出了发展桶形基础钢导管架的新构想。

1992 年 4 月在水深 310m 的 Snorre 油田，建造了以吸力锚为张拉基础的张力腿平台。在 335m 的深水区建造了裙板结构的混凝土负压桩基础的海底卫星操作平台（The Subsea Satellite Production System）。随着这一系列负压基础结构的成功安装，人们对桶形基础的承载力特点和施工方法有了更多的理解和认识。

挪威国家石油公司于 1994 年 7 月将桶形基础首次应用于欧洲管网 16/11-E 平台的建设中（图 1.1.2）。Europipe16/11-E 平台位于北海挪威区域，导管架由 4 个直径 12m、桶高

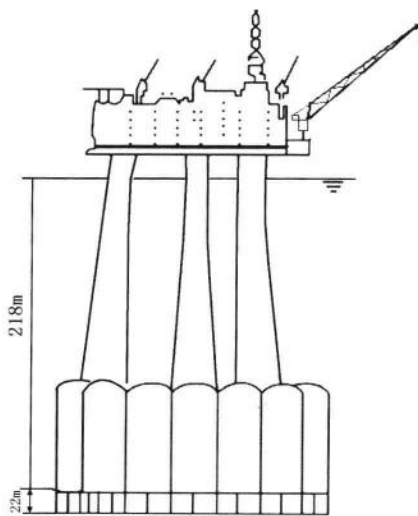


图 1.1.1 Gullfaks C 重力式平台

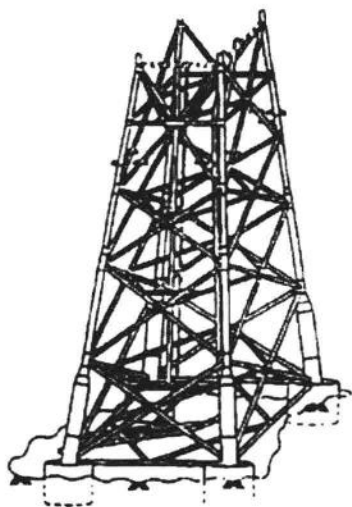


图 1.1.2 欧洲管网 16/11-E 平台

9.5m 的桶形基础。甲板尺寸 40m × 40m，平台总高度 101m，平台总重量 5240t。平台安装地点水深 231ft。Europipe16/11-E 平台与附近 16/11-S 平台通过 79.5m 的栈桥连接。Europipe16/11-E 平台按 100 年一遇风暴潮设计，最大波高 27m，安装场地工程地质条件：海底面到 25m 深处为较坚硬的黏土、砂土和致密砂土。

桶形基础导管架平台的提出是由挪威国家石油公司的基础工程师 Torlunge Tielte 和结构工程师 Morten Baerheim 在 1989 年年底首先提出的。为验证桶形基础的可靠性，1992 年下半年在实际海域进行了包括下沉试验、承载力试验在内的现场实验。1993 年完成了 Europipe16/11-E 平台的设计。1993—1994 年在挪威中部的

Aker Verdel 工厂建造，1994 年 6 月用 M44 运输船拖至预定海域，使用当时世界上最大的 M7000 半潜式浮吊进行海上安装。吊装重量达到 5240t。安装周期较桩基础减少 3 ~ 4d，节省钢材 2000 ~ 3000t。

海上首次安装桶形基础平台的成功，被海洋工程界誉为“导管架基础工程技术新时代的曙光”。1996 年春天，在 SLT (Sleipner Vest SLT) 天然气处理平台导管架的建设中（图 1.1.3），再次应用了桶形基础作为平台的基础。

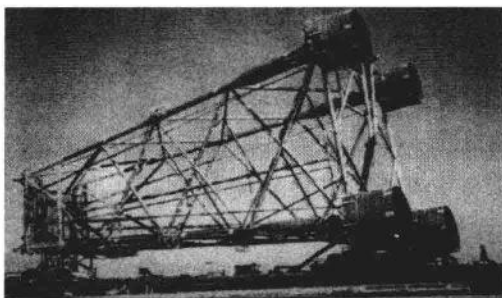
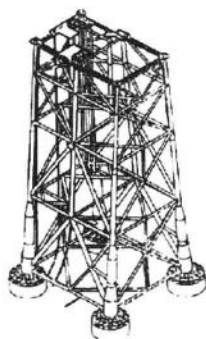


图 1.1.3 Sleipnr Vest SLT 天然气处理平台

1.2 桶形基础的前期研究

在桶形基础技术发展期间，挪威土工研究所做了大量的研究工作。1985 年在北海格尔范克斯油田超过 220m 水深的区域作了大量的沉入试验。该试验结构由两个高为 2.3m 直径为 6.5m 的钢桶组成，分别于黏性土和中密砂中，沉入深度为 2.2m，该试验记录了大量有关土体摩擦力、土压力和孔隙水压力的数据。

1988 年 Rune Dy - vik、Knut H. Andrsen 和 Christian Madshus 等人对带裙的重力式基础结构在黏性土中进行了静力和动力的室内模型试验研究，并对承载力、用于动力结构分析的土的弹性刚度、重力式基础结构物周期及位移和沉降作了实验分析，研究了风暴、波浪对上述性能的影响，提出了重力式基础土体的破坏模式。1993 年 Rung Dy - viic、Knut H. Andrsen 和 veirs borg Hansen 等人对黏土中的吸力锚进行下沉、静力、动力的现场模型试验研究（图 1.2.1），分别分析了在静力和动力作用下土体的抗剪强度，提出了动力和静力抗拔力的计算方法与基础破坏模式。这些试验，有助于了解桶形基础的工作机理，为桶形基础的设计和施工提供了实验依据。

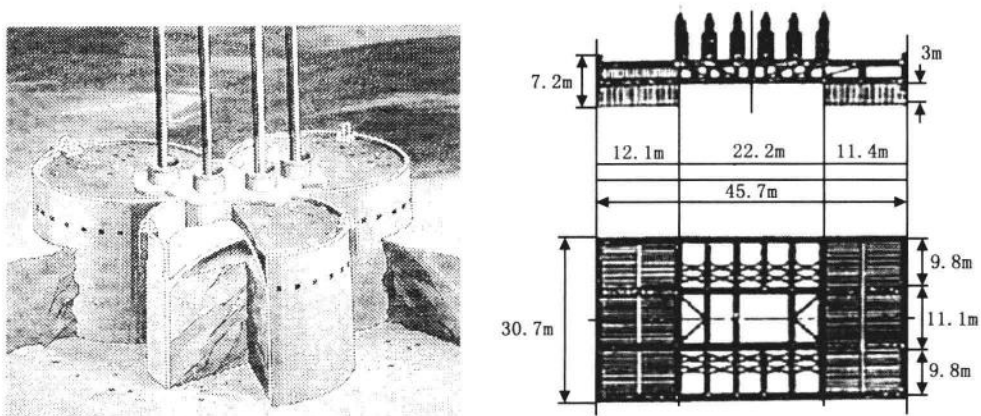


图 1.2.1 用于张力腿平台的吸力锚试验

研究发现桶形基础模型试验与现场原型存在一定误差，主要是基础的比例尺小，如挪威土工研究所选择的桶模型直径 550mm，贯入深度 210mm；试验土模型直径 1600mm，土层厚度 800mm，因此，模型土受到扰动，固结度难以把握。为此，在进行天然气处理平台导管的架的建设前，挪威土工实验室（NGI）和牛津大学，在模型试验上做了大量工作。NGI 试验用土均采于现场原型土，通过施加离心力和超载水压力模拟原位土中的应力。但是，受黏滞系数的制约，孔隙水的流动和土体的固结精度极难模拟。后来他们选择了一种叫 Baskarp Cyclohe 砂土替代材料，试验证明 Baskarp Cyclohe 砂土优于原位砂土，当相对密实度达到 80% 时，进行的单调加载、循环加载和三轴试验与原状土结果是一样的。

相比之下，牛津大学的实验模型较小（大约是 NGI 模型的 1/3）。为了获得相当的应力条件，采用了超载水压以提高土体应力。采用硅油代替孔隙水，试验时采用慢加速加载方式。三轴试验显示，硅油可以减少土的膨胀率，减少土摩擦角峰值。对比 NIG 和牛津大学的实验，虽然土体的基本性能特征一致，但两者的差异是明显的。

在单调加载试验分析中，NGI 测试了垂直加载情况并运用 Abaqus 有限元计算程序对土模型进行了分析。计算分析中采用的土参数由 Cyclone 砂的常规实验得出。

由于海洋平台所受荷载绝大多数是周期荷载，NGI 研究了施加在桶形基础上的周期荷载，重点探讨了孔隙水的聚集对基础的影响。研究发现即使是比较密实的砂土，在周期荷载作用下，都会产生由松散到密实的变化，都会有不同程度的压缩，从而会产生较大的孔隙压力。如果施加的周期荷载足够大、循环次数足够多，基础会出现液化，抗剪强度会急剧降低。如果土体受剪产生的应变足够大，则土体的强度可以恢复，但土体的变形是永久性的。

为了验证桶形基础下沉阻力和抗拔性能,1992年12月在挪威16/11-E海域进行了沉贯试验。试验桶直径1.5m,桶高1.7m,壁厚12mm。于自重和水压作用下在预定位置形成了封闭体。通过抽吸负压试验桶比较顺利地下沉到设计深度。试验测得了下沉阻力中桶端阻力与侧摩阻力的相关系数,发现在桶体下沉过程中由于负压形成的压差,土体渗流的作用会使端阻力大大降低。

现场实验是从桶体距离海底1.5m位置开始的,此时桶体在水流作用下处于运动状态,目前尚未有计算程序可以有效模拟这种运动,难以分析附连水的大小,难以确定阻尼的大小。当桶体接触海床时运动迅速减少,直到停止。尽管事前做了大量研究和现场试验,但Europipe16/11-E平台下沉表明,实际下沉阻力仍高出估算值40%。这一方面说明小比例尺给试验带来的误差,另一方面说明土力学与基础学科的特点。

桶形基础静态抗拔计算是以传统承载力理论为基础的,在进行现场抗拔实验中发现,对于砂性土其剪胀性大小对桶体抗拔能力影响较大;土体的排水能力对抗拔持续时间影响较大。

为了使Europipe16/11-E平台顺利安装,Tjelta做了大量研究工作,由挪威国家石油公司与安装承包商组成了专家小组,专家包括岩土专业、结构专业和海上富有经验的安装工程师。他们先后进行了安装静力分析、动力分析、风险分析,制定了详细的安装技术流程,规定了操作要领。通过分析得出以下结论:

(1) 当浮吊将桶基平台吊至距离海底1.5m时,在悬浮过程中平台不会对海底造成扰动。如果不大于1.5m,由于局部水流作用有可能引起海底扰动,引起平台横向摆动。在距离海底十分靠近的情况下,由平台的横向摆动可能造成的桶壁底部的碰撞变形,对负压下沉的影响将是灾难性的。

(2) 浮吊将桶形基础平台放下速度应控制在合理范围内,速度过快时会遇到较大压力,自动记录的最大速度是5.4m/s,这是维持平台垂直姿态漂浮的必须值。最好的推荐放下速度为2.4~3.6m/s。

(3) 桶基平台安装时必须要有较好的天气条件和足够的时间窗口(Europipe16/11-E平台安装时,实测波高0.4m,海上实际安装时间19h)。

(4) 依靠自重插入泥土必须有足够深度。计算Europipe16/11-E平台自重插入泥土深度为1.25~1.70m之间。

(5) 平台吊装坐底必须一次完成,设计要求定位误差不大于2m,旋转角度误差不大于20°,坐底后如果因定位误差需要重新起吊将是很困难的,因为由于负压作用,起吊力会超过浮吊的起重能力。

(6) 桶基平台进行负压下沉时必须控制合理速度。一方面可以防止桶内土体的凸起,另一方面可以有足够时间调节平台的姿态,使平台保持垂直,测得Europipe16/11-E平台负压下沉平均速度为0.33m/h。

(7) 海床表面的平整程度以及是否存在碎石、杂物会直接影响桶形基础的下沉。因此,在下沉前必须对施工海域进行扫测海底的作业,包括声呐扫测、ROV探测。

(8) 抽吸负压用的关键设备、主要检测仪表要有防止因施工被破坏的措施,最好有备用设备和备用监测仪表。

为了使平台下沉过程始终在监测下进行,研究小组花费了大量资金,设置了平台整体姿态监测、桶内土体凸起回声监测、桶内压力监测、沉降速度监测、孔隙水监测和下沉阻力监

测等。两台双轴测斜仪用于测量导管架的倾斜；12个回声探测仪，其中4个安装在桶内用于测量桶顶与海底的净空，8个安装在桶外用于测量桶下沉深度；在每个桶内都安装了一个机械臂用于测量桶内土体的隆起；每个桶内、桶外安装了水压力传感器，测量桶内外压力和压力差；12个孔隙水压力传感器安装在桶壁端部和桶壁侧面，测量下沉过程中孔隙水的变化；此外在腿柱的底舱部位安装了水压力传感器，测量给腿柱注水时底舱的压力；对每台泵安装了流量计，测量注水数量；在腿柱和主要支撑杆件上预先安装了48个应变仪，监测下沉过程中结构的应变。此外，现场安装时还使用了水下机器人（ROV）配合作业。

Europipe16/11-E平台每个桶都安装了一个30in（1in=0.0254m）的单向回止阀，通过导线控制其开、闭状态。为了保险起见，单向回止阀还可以用ROV进行开、闭作业。平台的负压由独立的液压泵等装置产生，管线与4个桶体连接，腿柱就成了排水通道。每台泵都有一台主泵和一台备用泵，两者平行连接。泵体支架安装在高程-26m的腿柱外部，每小时额定排水量400m³。Europipe16/11-E平台腿柱在高程-26m处设置了分割舱，-26m以下为抽吸负压的通路；-26m以上为腿柱注水调节舱，在负压下沉完成后（或起吊尚未放下前），通过对腿柱的注水微调平台的姿态。

由于Europipe16/11-E平台吊装下沉操作没有可借鉴的工程先例，负压安装存在一定风险，因此承担安装任务的承包商不愿承担负压下沉工作，该项工作由Statoil公司自己承担。即海上吊装座底由安装公司负责；负压下沉由Statoil公司负责；负压施工完成后其他安装再由安装公司负责。施工过程的责任变换给安装带来了许多麻烦。

为了使海上安装顺利，M7000与M44两条船上的工作人员花费了4h检查阀门、管路及监测仪器。将软管摆放成较大的弯曲半径，使吊装时不致造成死弯。吊装时使用EDM电子测量仪对导管架的位置进行监测，用安装在桶上的回声仪监测导管架的垂直度。在距离海底10m时现场测量导管架的倾斜角度为1.6°，将进水阀门开启向处于高端的桩腿充水80m³，导管架倾斜度变为0.8°，在距离海底2.2m时监测海上波高0.4m，微风，导管架摆动极小，几乎没有垂向振动，然后以2.1m/min的速度缓慢放入海底。

Europipe16/11-E平台依靠自重插入海底的深度比预期的多出2倍，通过开启桩腿溢水阀门调节导管架姿态，倾斜角度控制在0.4°，使平均插入深度达到1.87m，桶形基础形成了良好的封闭体。然后关闭了8个单向阀，按预先计算抽水速度的90%进行抽水作业。由于4个腿柱都是独立的抽水系统，因此通过监测系统要时时纠正桶体下沉过程中的不同步性。

负压作用下，桶内泥面的隆起是一个不确定因素。预先设计的最大允许隆起高度为0.5m，Europipe16/11-E平台实际观测到隆起高度为0.2m。这说明负压下沉速度设置是合理的。经过12h的抽吸，桶形基础到达了预定位置，观测两个方向倾斜角度均为0°，导管架姿态达到了最佳状态。记录的平均贯入速度为0.33m/h。

Europipe16/11-E平台海上安装为今后桶基平台安装作业积累了丰富的经验，但最终结果证明，Europipe16/11-E平台的造价比普通桩基平台还要贵，原因有三：

（1）桶基平台是一种新型基础平台，无成功先例可借鉴，为此前期先后进行了模型试验、船池试验和大量的计算分析，前期投入大。

（2）为了获得现场下沉作业中的参数，安装了复杂的监测系统。

（3）从可靠度考虑，研究小组决定对下沉完成后的桶基灌注水泥浆。其中桶内累计灌注483m³，桶外顶部灌注775m³，灌浆作业历时80h。海上灌浆作业时间是桶形基础平台下沉时间的4倍！因此，大量的灌注水泥浆作业掩盖了桶形基础的优越性。

在后来的工程总结时,项目小组认为桶形基础的安装可以更简化些,比如可以尝试不用浮吊的办法,可以省去水泥浆灌注的环节,抽吸系统、监测系统进一步简化等。项目小组认为类似安装完全可以在 36h 内完成。

1.3 国内对桶形基础的研究

国内在负压基础研究方面可以追溯到 1986 年,当时由天津大学与海军某部合作在舟山群岛附近,曾进行过较小尺度的吸力锚现场试验,吸力锚直径 1.5m、高 3.5m,试验地点水深 17m,对吸力锚的下沉作了较全面的检验,对吸力锚的工作原理,作了初步探讨。为今后吸力锚进入工程设计提供了重要的经验。1992 年大港油田建造了三桶式负压基础火炬塔,通过负压下沉完成了火炬塔海上安装。

国内第一个吸力锚是 1994 年由天津大学徐继祖、史庆增等为中国海洋石油总公司渤海工程部研究设计的 CFD1-6-1 的吸力锚。该吸力锚布置在钻井装置的旁侧,按两点系泊 5000t 级油轮设计。海域平均水深 17.83m (海图水深 15.8m),高潮位水深 19.86m,低潮位水深 15.53m,在 8 级风浪条件下油轮可解脱。该地域工程地质条件是 -1.7m 为极软黏土,1.7~6.7m 为粉砂质黏土,再往下为粉砂。设计最大系泊力为 60t,单锚重量 45t。

1997 年中国石油天然气总公司工程技术研究院与大港油田滩海公司、大港油田勘察设计院,针对大港浅海海域条件,开展了“滩海桶式负压桩基础钢制试采平台”系统研究工作。项目组利用取自大港滩涂地区的泥土在塘沽建立了土模型试验室,在塘沽工程技术研究院室内建立了 6m×4m 的室外实验室,制作的四桶平台模型在大港“港 8 井”滩涂进行了实验。他们从单桶试验着手,共完成了 6 个子项、23 项室内外模型试验、研究,其中包括:单桶下沉试验,单桶起升试验,单桶承载力试验(竖直承载力、水平承载力),单桶循环荷载试验,四桶下沉试验,四桶下沉试验,四桶起升试验,四桶承载力试验(竖向承载力、水平承载力),四桶拖航试验(室内水槽拖航、室外 1:5 模型拖航和原型平台拖航);研究了负压下沉的条件、负压下沉的设备配置,开发了负压下沉的自动控制,取得大量数据(图 1.3.1,图 1.3.2)。解决了软黏土条件下,桶形基础的极限承载力等土力学若干计算问题,提出了桶形基础的推荐计算方法,探索了循环荷载条件下桶基稳定问题。创新使用了平衡罐压力平衡技术和潜水泵低置技术,使四桶基础浅海平台起升和下沉平稳易行,操作可控;通过 1:25 整体水池模型试验和 1:5 整体模型现场拖航试验(图 1.3.3,图 1.3.4)证明四桶浮体在浅水区域具有良好的浮稳性,在四级风浪条件下可实现平台整体湿拖。

该项目组经过 3 年的潜心研究取得了 4 项国家专利,这些成果为工程平台设计、建造奠定了基础。2000 年在中国石油天然气集团公司科技发展部支持下,中国石油集团工程技术研究院与大港油田勘察设计院完成了四桶基础先导平台设计、建造,经过 30n mile 的湿拖成功将桶形基础先导平台坐落在大港张巨河(图 1.3.5)。

中国石化集团公司胜利油田钻井工艺研究院在国家“863”计划的资助下,与国家海洋局第一海洋研究所等单位合作,针对胜利油田浅海海域地基条件,1998 年开展了桶形基础平台研究。国家海洋局第一海洋研究所朱儒弟和胜利石油管理局王运安等制作了桶外径 600mm、桶高 1200mm,桶外径 420mm、桶高 840mm,桶外径 300mm、桶高 610mm,桶外径 240mm、桶高 480mm,桶外径 180mm、桶高 370mm 五种桶体模型,在长 5m、宽 5m、深

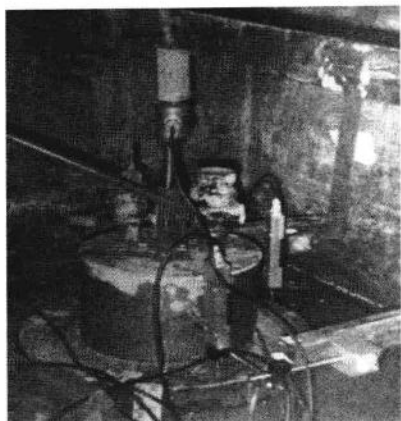


图 1.3.1 室内单桶试验

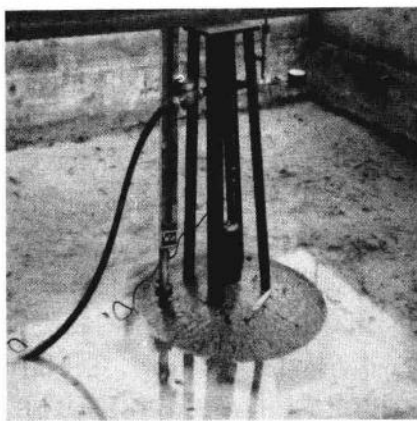


图 1.3.2 室外单桶试验

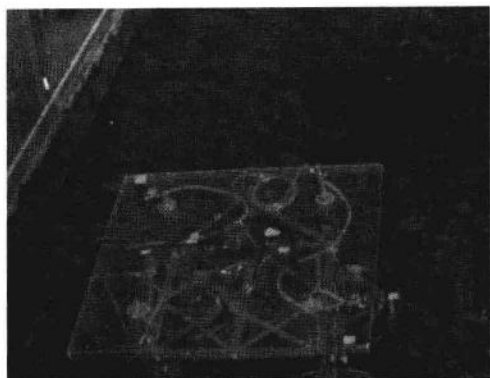


图 1.3.3 水池模型试验

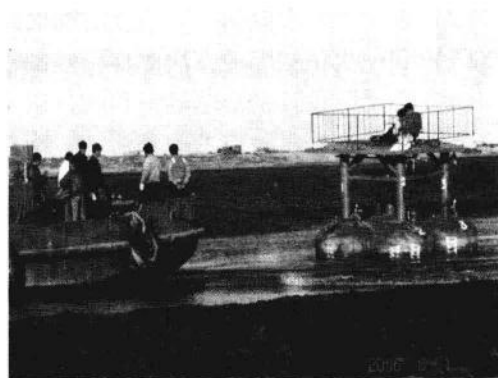


图 1.3.4 整体模型现场拖航试验

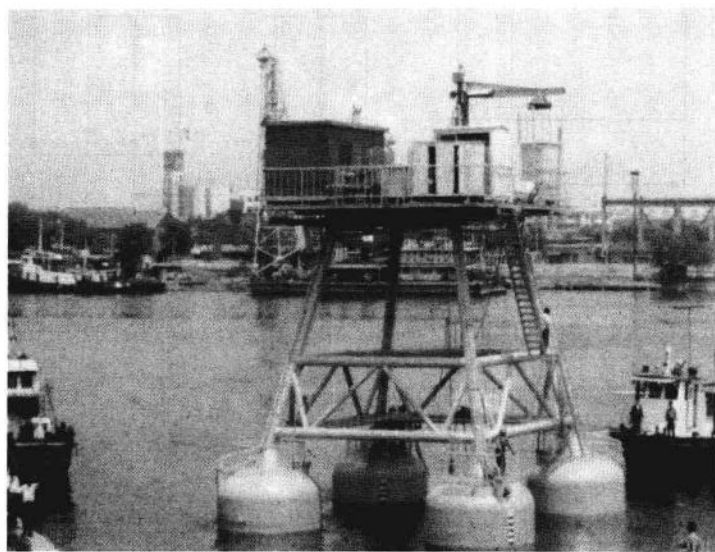


图 1.3.5 桶形基础先导平台

1.6m 的砂性土池中做了压力压贯试验和负压沉贯试验，试验表明：由于孔隙水在砂性土的流动，负压沉贯法较压力压贯法可大大减小粉质砂土的下沉阻力（负压沉贯阻力为压力压贯阻力的 $1/5 \sim 1/8$ ）为桶形基础采用负压沉贯法顺利地将其沉贯到位提供了依据。同时指出负压应控制在合适的范围内，建立起可靠的产生负压封闭的条件是至关重要的。为进一步探索砂性土负压沉特性，孙东昌等通过试验得出了以下结论：

- （1）负压可显著降低桶形基础的沉贯阻力，有利于平台顺利就位。
- （2）随着贯入深度的增加，负压值也增大。两者呈弱正相关关系。
- （3）沉贯阻力与加压历程有关，负压施加越快、越大，阻力也越大。
- （4）用有限元计算所得到的最大控制负压，可控制土体的稳定性。

洪学福等人于 1998 年 8 月在胜利油田桩 101 海域做了现场中间试验。试验模型由四只相同的桶体组成，模型见图 1.3.6，桶外径 820mm，桶高 1200mm，壁厚 8mm，平台模型总高度 3000mm。通过现场试验得出以下结论：

- （1）在保证平台一定垂直度的情况下，平台可以下沉到形成密封的状态。
- （2）在平台发生倾斜时，应及时加以纠正，否则可能出现密封被破坏的现象。
- （3）利用负压抽吸的方法对桶形基础进行海上施工的方法是可行的。
- （4）在实际设计桶形基础平台时，应充分考虑其抗拔能力，以保证平台的稳定性。
- （5）在海上施工时应考虑到海流、海浪等海况对平台影响，保证平台在接触海底时的垂直度。

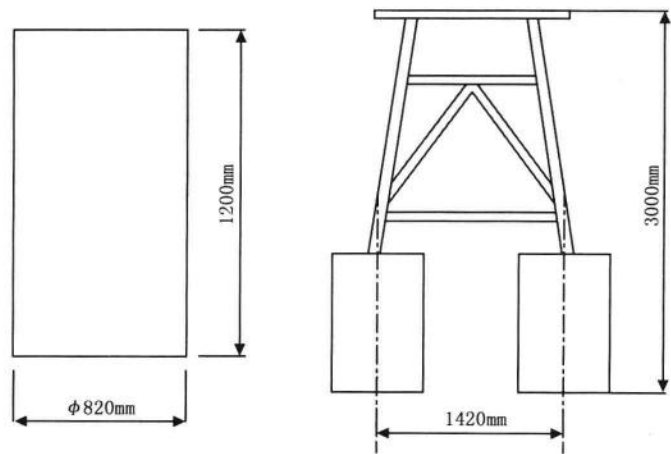


图 1.3.6 胜利油田单桶模型和整体模型

该研究小组先后完成了砂土条件下桶基下沉、承载力试验、动荷载稳定等试验研究，1999 年 10 月建成了胜利埕北 CB20B 井口试验平台。

在以后的几年中，国内许多科研单位和天津大学、浙江大学、上海交通大学等高等院校，对桶形基础的破坏模式、极限承载力、极限承载力的敏感因素等进行了分析研究。通过实验与理论结合，提出了桶形基础承载力计算方法；通过动三轴实验分析了循环荷载下的桶基稳定性；通过模型试验分析了桶形基础在黏土、砂土中负压下沉上阻力分析，提出了不同土质条件下的负压下沉的条件等。

一些工程单位结合具体工程开展了多桶基础浮稳性实验研究、桶体结构受力分析研究和

桶形基础海上安装技术研究，桶形基础在工程上有了长足的发展。例如：天津大学与中港一航局一公司合作，将桶形基础浮运的方式拖至工程现场，通过负压下沉，应用在天津港北大防波堤工程东外堤南端的延长线上。此后，由四桶组成的桶形基础应用到大港庄海 4×1 人工岛靠船码头结构工程中。

天津海王星海上工程技术公司在负压技术方面做了诸多工程实践，曾在渤海湾西南部为海洋石油 QHD 32-6-4 水深 20m 的区域设计、安装了桶直径 6.0m、高度 3.2m，单个锚重 35t 的吸力锚。2002 年在中国南海西部海区，为挪威石油公司承担的文昌 13-1、文昌 13-2 油田安装了 9 个吸力锚。该锚工作水深 115m，锚体直径 5m，高度 11.5m，单个锚重量 50t，用于浮式生产存储、卸油系统（FPSO）系泊。

从桶形基础技术短短十几年的发展过程中可以看到，人们对桶形基础的认识在不断深入，对桶形基础的承载机理、负压下沉、负压作用下的土壤特性研究不断细化，设计计算方法、安装就位等方面不断深入完善，建立了可以满足工程需要的设计、建造、安装就位的整套方法和作业程序，为工程应用奠定了基础。在渤海湾海洋工程、港口工程中，桶形基础的大量使用，有力证明了桶形基础的可行性和经济性，为进一步推广这一技术奠定了基础。

2 软土地基与桶形基础

2.1 渤海湾滩海地区油气资源与环境

2.1.1 渤海湾滩海地区自然环境油气资源

渤海湾是中国三大海湾之一，渤海湾三面环陆，与河北、天津、山东的陆岸相邻，东以滦河口至黄河口的连线为界与渤海相通。其北部是著名的北戴河旅游和度假区，西部的塘沽是中国重要港口，是京津的海上门户，是华北地区的海运枢纽。渤海湾面积 $1.59 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，约占全渤海面积的 $1/5$ 。

(1) 地质与地貌。渤海湾处在中生代古老地台活化地区，位于冀中、黄骅、济阳三坳陷边缘，经历了各个地质时期的构造运动和地貌演变，形成湖盆。在其上覆有 $1 \sim 7 \text{ km}$ 巨厚松散沉积层。沿岸几乎全为古近纪和新近纪沉积物，形成典型的粉砂淤泥质海岸。又因几经海水进退作用，使海湾西岸遗存有沿岸泥炭层和 3 条贝壳堤。海底沉积物均来自河流挟带的大量泥沙，经水动力的分选作用，呈不规则的带状和斑块状分布。一般来说，沿岸粒度较粗，多粉砂和黏土粉砂，东北部沿岸多砂质粉砂；海湾中部粒度较细，多黏土软泥和粉砂质软泥。此外，渤海湾湾口亦有从大清河口到黄河口的划法。海底地势由岸向湾中缓慢加深，平均水深 12.5 m 。

(2) 水文与气候。沿岸河流含沙量大，滩涂广阔，淤积严重。流入海湾的主要河流有黄河、海河、蓟运河和滦河。

① 黄河以水少沙多著称。年均径流量 $440 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，年平均输沙量约 $16 \times 10^8 \text{ t}$ ，约占渤海输沙量的 90% 以上，是渤海湾现代沉积物主要来源。

② 海河水系年均径流量为 $211.6 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，年均输沙量 $600 \times 10^4 \text{ t}$ 。1958 年海河建闸后，径流量锐减，年均径流量仅 $7.1 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，年输沙量不足 $30 \times 10^4 \text{ t}$ ，对渤海湾地貌发育的影响已大为减小。

③ 蓟运河为蓄泄河道，1922—1957 年年均径流量 $7.4 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，年均输沙量 $(70 \sim 100) \times 10^4 \text{ t}$ 。1958 年建闸后，年径流量和年输沙量分别为 $0.66 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $1.56 \times 10^4 \text{ t}$ 。

④ 滦河年均径流量 $47.9 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，年输沙量 $2210 \times 10^4 \text{ t}$ 。由上可见，黄河大量泥沙的入海和扩散，是渤海湾泥沙主要来源。滦河入海泥沙的向西南运移，虽为数不多，但仍不容忽视，使渤海湾水下不断淤浅，滩面扩增。如北堡—涧河的滩面，1958—1984 年年均向海延伸 1.5 km ，沉积厚度年均增 11.5 cm ，为其他海区所罕见。

大陆性季风气候显著，水文状况变化复杂。由于渤海湾为三面环陆的半封闭性海湾，位于中纬度季风区，离蒙古高原较近，因此，气候有显著“大陆性”特征：一是季风显著；二是冬寒夏热，四季分明，春秋短促，气温年变差大；三是雨季很短，集中在夏季，7、8