

拖曳锚实验及形态优化研究

张 炜^{1,2}, 李新仲¹, 李清平¹

(1. 中海油研究总院, 北京 100027; 2. 中国科学院力学研究所 博士后流动站, 北京 100190)

摘 要: 总结拖曳锚实验研究的基本情况 & 各类实验方法的优缺点, 指出拖曳嵌入技术及定位技术研究、多运动参数及运动轨迹测量、重复性及测试精度提高是实验研究的重点和难点。基于拖曳锚形态设计的演变历程, 提出锚板结构组成七大部分的功能特性和优化设计准则, 指出良好的嵌入性能及效率、加工性能、稳定性和承载性能是锚板形态设计力争达到的目标。

关键词: 拖曳锚; 模型实验; 现场实验; 工程应用; 形态优化

中图分类号: U664.4+2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-6982 (2013) 06-0043-04

Research on Experiment and Shape-Optimization of Drag Anchors

ZHANG Wei^{1,2}, LI Xin-zhong¹, LI Qing-ping¹

(1. General Research Institute, China National Offshore Oil Corporation, Beijing 100027, China; 2. Postdoctoral General of Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: *The general situation of experimental studies for drag anchors, and also the advantages and disadvantages of kinds of experimental methods are summarized. Based on the present study, it is pointed out that the researches for dragging and positioning techniques, the methods for measuring multi-parameters and kinematic trajectory and the approaches for improving the repeatability and precision are essential for the experimental studies and need to be investigated deeply. According to the evolution of anchor-shape design, the functional features and shape-optimization principles for the seven structural components of a drag anchor are proposed. It is suggested that good embedment performance and efficiency, favorable process ability, stability and bearing performance are the targets to be achieved in the shape design of drag anchors.*

Key words: drag anchor; model experiment; field experiment; field application; shape optimization

随着海上油气田开发水深的不断增加, 拖曳锚在深海工程中得到了广泛应用。作为一种新型的系泊基础, 其不仅具有较高的抗拔承载力和高效的锚固性能, 而且具备重量轻、材料省、易操作、易存储、可回收和重复使用等优点。目前, 国际上针对拖曳锚设计、施工和应用等方面还存在诸多问题有待深入认识和解决, 而国内更无自主应用拖曳锚的先例。

本文基于国内外拖曳锚模型实验、现场实验和工程应用的大量数据, 总结并评述了拖曳锚实验研究的基本情况和各类实验研究方法的优缺点, 指出了目前实验研究的难点。根据拖曳锚形态优化的演变历程, 首次将锚板结构组成分为七大部分, 详细阐述各组成部分的功能特性, 并提出相应的设计准则。该研究对指导拖曳锚实验研究, 认识拖曳锚的结构组成机理, 促进我国深水系泊基础的自主研发提供了技术参考。

1 拖曳锚实验研究

实验研究作为最为直观、可靠、经济的研究手段, 通过测量和考查拖曳锚的性能参数, 不仅能深入认识拖曳锚在海床土中的嵌入机理和运动特性, 还能帮助掌握有效的拖曳嵌入技术, 为工程应用奠定基础。拖曳锚的实验研究主要集中在模型实验、现场实验和工程应用三方面。

1.1 模型实验

拖曳锚模型实验研究主要有离心机实验和模型水槽实验两种。

1.1.1 离心机实验

早期的拖曳锚离心机实验主要围绕预埋置锚板的承载力测量与研究^[1]。自 20 世纪 90 年代开始, 针对拖曳锚嵌入以及承载性能的离心机实验研究才逐步推广^[2-5], 相关研究者针对不同的海洋土质和商用拖曳锚

收稿日期: 2013-05-20; 修回日期: 2013-07-05

作者简介: 张炜 (1983-), 男, 博士后。主要从事深水系泊系统系泊基础及深水浅层水合物风险评价研究。

缩尺模型,通过自主设计的锚板拖曳系统,测量了包括拖曳力和方位角等在内的锚板嵌入运动参数,获得了具有价值的研究成果。

拖曳锚离心机实验能较好反映土体的真实应力状态,接近锚板嵌入的实际环境,能满足实验重复性的要求。但离心机实验采用的实验比尺较大,锚板尺寸一般都在厘米级,不能真实反映锚板的形状特性及其嵌入性能。除此以外,离心机实验设备较为单一,一般仅提供锚板拖曳相关的必要设备,对锚板嵌入的多运动参数并未展开系统测量。

1.1.2 模型水槽实验

在拖曳锚模型水槽实验研究初期同样围绕预埋置锚板的承载力展开研究^[6,7]。20世纪90年代,Bruce公司在实验中采用了半透明的合成锂皂石来模拟海床土,该方法能直接观测锚板在土中的运动轨迹和嵌入形态,但与真实情况相差较远。自2000年以来,Goncalves等^[8]和Liu等^[9]针对拖曳锚嵌入机理及运动特性展开了模型水槽实验研究,实验测量了锚板的多运动参数,获得了锚板在海床土中的运动轨迹。

拖曳锚模型水槽实验能真实反映锚板的形状特性和嵌入性能,通过采用新型的测量设备能测得锚板的多运动参数。但由于土体固结效应的影响,模型水槽实验重复性较差,同时由于实验环境、设备和选用材料的不同,实验结果相差较大。

1.2 现场实验

拖曳锚的现场实验研究主要分为小比尺实验、大

比尺实验和原型测试。根据不同的测试环境又分为海岸场地测试和近海场地测试两种。1994年至1996年,Petrobras及JIP Deepstar联合Vryhof公司发起全球关于拖曳锚的现场实验和原型测试,测试地点主要集中在墨西哥湾和巴西近海^[10],展开了拖曳锚嵌入性能及承载力研究。1999年,Dahlberg和Strom^[11]、Heyerdahl和Eklund^[12]分别针对商用锚板与自主设计的平板锚在挪威开展海岸场地测试,采用起重机、移动绞盘和拖缆组成拖曳系统,采用拉力传感器和角度传感器等获得了锚板的多运动参数及嵌入的实时位置,开展了拖曳-抗拔-回收整体连贯实验研究。

现场实验能真实地模拟实际介质环境,一般选用商用锚板或大比尺模型锚板,为锚板安装方法和定位技术提供了丰富的数据资源,为工程应用奠定了基础。但现场实验重复性较差,土体固结时间较长,前后实验相互影响,导致结果不够精确,同时由于各实验现场的环境差异和操作技术区别,实验结果相差较大。除此以外,针对锚板的定位技术和轨迹探测技术研究不够深入,尚未形成普适的拖曳嵌入技术。

1.3 工程应用

拖曳锚的工程应用共有29例,大部门用于浮式采油平台永久性系泊系统,水深范围310m~2600m,锚板面积8.7m²~16.4m²,主要分布在墨西哥湾和巴西近海。值得一提的是,随着研究的进一步深入,自1998年以来,新型拖曳锚即法向承力锚也实现了工程应用,如表1所示。

表1 法向承力锚的工程应用

年份	应用结构名称	地点	水深/m	锚的种类	锚板面积/m ²	承包方
1998	Voador P27 Semi-FPU	巴西近海	530	Stevmanta 锚	11	巴西石油公司
1998	Bijupira-Salema MODU	巴西近海	750	Stevmanta 锚	12	巴西石油公司
1998	Bijupira-Salema MODU	巴西近海	750	Stevmanta 锚	10	巴西石油公司
1999	Marlim South EPS FPSO- II	巴西近海	1215	Dennla 锚	10	巴西石油公司
1999	Roncador P36 Semi-FPU	巴西近海	1350	Stevmanta 锚	13	巴西石油公司
2000	Marlim P40 Semi-FPU	巴西近海	1080	Stevmanta 锚	13	巴西石油公司
2002	Roncador FPSO	巴西近海	1150-1475	Stevmanta 锚	14	巴西石油公司
2003	Fluminense FPSO	巴西近海	700	Stevmanta 锚	11	壳牌
2004	Marlim FPSO	巴西近海	1210	Stevmanta 锚	13	巴西石油公司
2010	Cascade and Chinook FPSO	墨西哥湾	2600	法向承力锚	-	巴西石油公司

1997年12月,巴西石油组织正式决定采用Vryhof公司的Stevmanta锚应用于Voador海域的P27平台系泊系统^[10],这是拖曳锚的首次工程应用。工程采用双缆安装法,调用三艘安装船持续施工18天,安装结束后,12块锚板的平均嵌入深度为23.5m,拖曳距离为45.2m。该工程统计结果表明,拖曳锚深水安装操作简单,施工迅速,耗资较低,锚板自重相当于吸力锚的15%,安装时间是吸力锚的1/3,工程耗资为吸力锚的50%。因此,拖曳锚的深水安装更为简捷易行,

在节省人力、物力、财力的同时也节约了时间。

作为一种新型的系泊基础,拖曳锚应用时间不长,由于世界各海域地质情况的复杂性,拖曳锚施工和安装困难迭出。目前,拖曳锚的工程应用均在地质情况较为简单的区域实施,同时由于锚板的定位技术和嵌入性能的研究匮乏,国际上缺乏统一的标准,尚存许多技术问题需要认识 and 解决^[13,14]。

1.4 拖曳锚在我国的研究概况

我国针对拖曳锚研究起步较晚,目前国内采用拖

曳锚的工程实例仅有两起: 1) 流花 11-1 采油平台, 采用 Bruce 公司的 FFTS-Mk4 锚; 2) 海洋石油 981 深水半潜式钻井平台, 采用拖曳锚作为临时系泊基础。而国内更无自主应用拖曳锚的先例。由于技术保密, 国外关于拖曳锚研究的关键技术不会在公开的文献中发表, 目前的商用拖曳锚在关键技术均受专利保护, 国内在此方向的研究尚任重而道远。

2 拖曳锚形态优化研究

从传统拖曳锚概念的提出到新型拖曳锚的工程实践, 锚板的形态发生了显著变化。总体而言, 锚板的大小或面积决定锚板的承载力和工作性能; 锚板特殊的细部构造与结构形态决定锚板的嵌入性能和嵌入效率。拖曳锚在工作状态和施工阶段良好的双重性能, 应在拖曳锚形态优化设计中得以综合体现。

拖曳锚的发展历程主要分为三个阶段, 如图 1~图 3 所示^[15]。尽管不同的锚板有不同的形态特征, 但整体构成大致相同, 将锚板的结构组成分为七大部分: A、锚尖; B、锚板主平面; C、锚板支架; D、锚板翼; E、锚板边缘; F、尾部形状; G、锚胫。

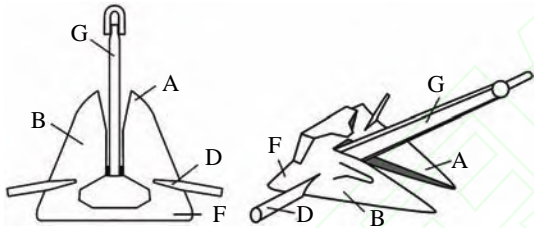


图 1 第一阶段锚板形态示意图 (Stevin 锚)

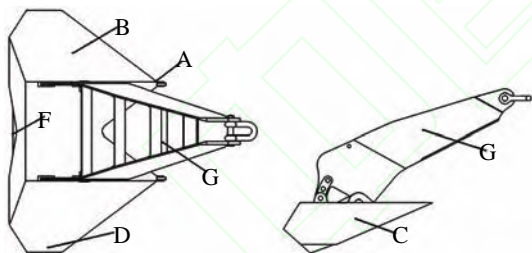


图 2 第二阶段锚板形态示意图 (Stevpris 锚)

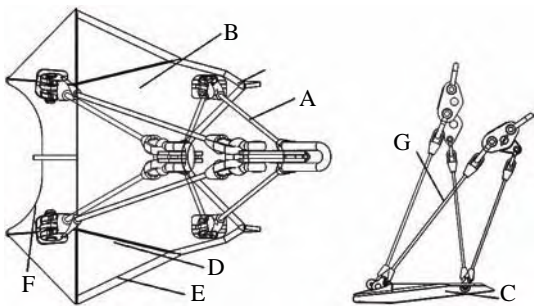


图 3 第三阶段锚板形态示意图 (Stevmanta 锚)

2.1 锚尖与锚板主平面

锚尖如图中 A 所示, 其作用主要有: 1) 减少迎土面积, 有助于锚板下嵌; 2) 足够锋利, 具有破土作用, 同时锚尖与水平面的夹角能引导嵌入方向; 3) 锚尖对称设计以保证抛锚后锚板落在海床面时及锚板嵌入过程中的稳定性; 4) 锚尖夹角的大小将直接影响土体是否易于通过, 若夹角过小, 土体不易通过, 迎土面积增大, 导致产生过大的端阻力, 对下嵌不利; 若夹角过大, 则破土力不够集中, 也不利于锚板下嵌。

锚尖的形状受土质和过土能力等诸多因素影响, 根据不同的施工条件需设计成不同形状, 需遵循以下原则: 1) 对称设计, 以保证嵌入稳定性; 2) 足够锋利, 利于嵌入破土; 3) 具有一定的立面设计角度, 以引导嵌入方向; 4) 夹角设计合适, 既具备过土能力又不能削弱破土力。

锚板主平面如图中 B 所示, 其作用主要有: 1) 作为锚板主体部分, 按承载力设计要求, 保证足够设计面积; 2) 主平面形状影响嵌入稳定性和嵌入效率, 不能过于狭长或过于宽扁。

早期锚板主平面大多是三角形, 面积较小, 而后逐渐由矩形代替, 面积相应增大, 随着新型拖曳锚的发展, 锚板主平面演变为不规则形状, 面积较大且趋于流线型, 具有较高的嵌入性能和较大的承载力。锚板主平面设计需遵循以下原则: 1) 面积按承载力设计要求确定; 2) 对称设计, 以保证嵌入稳定性; 3) 设计成流线型, 以提高嵌入效率。

2.2 锚板支架与锚板翼

锚板支架如图中 C 所示, 主要用于提供锚板落在海床面的初始角度, 以减少拖曳距离, 提高拖曳和嵌入效率。早期锚板没有支架, 主要通过拖曳锚胫使锚板倾倒形成初始嵌入角, 靠锚尖破土嵌入。由于倾倒方向和初始状态的不确定性, 拖曳较易失败。后期的锚板均带有左右对称且侧向较薄的支架, 利于破土的同时也能保证初始嵌入的稳定性。锚板支架的设计中需遵循以下原则: 1) 根据海床土质设计支架角度及宽度, 以保证锚板初始坐落稳定且不会下陷; 2) 流线型设计, 以减少嵌入端阻力; 3) 对称设计, 利于稳定。

锚板翼如图中 D 部分所示, 主要用于保证锚板侧向稳定性, 防止嵌入时发生侧向翻转, 避免安装失败。早期锚翼又称稳定器, 左右对称设计, 如图 1 所示。随后稳定器逐渐发展为锚板翼, 如图 2 和图 3 所示。锚翼具有一定的倾斜度, 作为锚板主结构的构成, 起到稳定作用的同时还能提供承载力。在锚板翼设计中需遵循以下原则: 1) 流线型设计, 利于嵌入; 2) 对称设计, 保证稳定; 3) 作为附属结构, 面积不宜过大。

2.3 锚板边缘与尾部形状

锚板边缘如图中 E 所示, 从完全钝性设计发展成刀刃状和流线型设计, 其主要作用是减少锚板在运动中的板侧摩擦力, 利于嵌入。

锚板尾部如图中 F 所示, 由不做尾部处理发展为将锚板尾部设计成凹状, 其主要用于安装回收装置, 在回收过程中其作用与锚尖一样, 在保证锚板整体稳定的前提下, 利于破土, 提高锚板的回收效率。

2.4 锚脰

锚脰如图中 G 所示, 是锚板重要的附属结构, 主要用于施加拖曳力, 带动锚板嵌入, 锚脰分为刚性锚脰 (如图 1、图 2 所示) 和软索锚脰 (如图 3 所示)。刚性锚脰安装在锚板中后端, 产生绕重心的倾覆弯矩, 阻碍锚板迅速抬平, 提高嵌入效率, 但稳定性较差。软索锚脰左右对称, 能保证嵌入的稳定性, 但受力相对复杂。锚脰必须利于土体通过, 否则将大大增加端阻力, 不利于锚板深嵌。在锚脰的设计中需遵循以下原则: 1) 根据需要选用不同的锚脰类型, 对应不同受力模式; 2) 应利于土体通过, 减少嵌入抗力; 3) 对称设计, 保证稳定; 4) 依据土体条件设计锚脰与锚板的夹角及长度, 提高效率。

在锚板的工程设计中, 应综合以上设计原则, 基于实际工况, 通过理论分析、模型实验和现场实验等手段寻求最佳组合。锚板形态优化的总目标为: 具有良好的嵌入性能, 易于调整且适用于各种施工工况, 保证锚板的嵌入效率; 具有良好的加工性能, 设计和组装不能过于复杂; 具有良好的稳定性能, 保证锚板的嵌入稳定性, 不侧翻, 不倾覆; 具有良好的承载性能, 易于操作、安装、回收和贮藏等。

3 结论

本文针对拖曳锚实验和形态优化展开研究, 得到如下结论: 1) 拖曳锚各类实验方法均具有不同优缺点, 有的放矢、综合应用是进一步研究的趋势; 2) 拖曳嵌入技术及定位技术研究、多运动参数及运动轨迹测量、重复性及测试精度提高是实验研究的重点和难点; 3) 锚板七大组成部分各有其特定功能和形态特性, 在形态设计中需把握主要构成同时兼顾次要构成; 4) 良好的嵌入性能及效率、加工性能、稳定性能和承载性能是锚板形态优化设计力争达到的目标。

拖曳锚实验及形态优化研究, 是一项非常复杂和具有挑战性的研究课题, 尚有以下工作有待进一步深入开展: 1) 多参数变化对锚板嵌入性能的影响还需通过大量实验进行考查; 2) 锚板拖曳嵌入关键技术研究还需通过实验形成统一和普适的原则和方法; 3) 锚板定位技术及运动轨迹研究还需深入开展; 4) 逐步明确锚板形态优化方向, 完善设计原则, 提高嵌入效率。

参考文献:

[1] Le Lievre B, Tabatabaee J. Holding Capacity of Marine Anchors in Sand [C]// Proceedings of the 1st Canadian Conference on Marine Geotechnical Engineering, Calgary,

1979: 301-311.

[2] Dunnavant TW, Kwan CTT. Centrifuge Modelling and Parametric Analyses of Drag Anchor Behaviour [C]// Proceedings of the 25th Offshore Technology Conference, Houston, 1993: 29-37.

[3] Neubecker SR, Randolph MF. Model Testing and Theoretical Analysis of Drag Anchors in Sand [C]// Proceedings of the 1994 International Conference in Centrifuge, Rotterdam, 1994: 765-770.

[4] O'Neill MP, Randolph MF. Modelling Drag Anchors in a Drum Centrifuge[J]. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 2001, 2(1): 29-41.

[5] Elkhatib S, Lonnie B, Randolph MF. Installation and Pull-out Capacities of Drag-in Plate Anchors [C]// Proceedings of the 12th International Offshore and Polar Engineering Conference, Kitakyushu, 2002: 648-654.

[6] Rowe RK, Davis EH. The Behaviour of Anchor Plates in Clay[J]. *Geotechnique*, 1982, 32(1): 9-23.

[7] Das BM, Moreno R, Dallo KF. Ultimate Pullout Capacity of Shallow Vertical Anchors in Clay[J]. *Soils and Foundations*, 1985, 25(2): 148-152.

[8] Goncalves E, Nunes Dias CA, Fernandes AO, *et al.* Vertical Load Anchor Project [C]// Proceedings of the 10th International Offshore and Polar Engineering Conference, Seattle, 2000: 445-451.

[9] Liu HX, Zhang W, Zhang XW, *et al.* Experimental Investigation on the Penetration Mechanism and Kinematic Behavior of Drag Anchors[J]. *Applied Ocean Research*, 2010, 32(4): 434-442.

[10] Ruinen RM, Degenkamp G. First Application of 12 Stevmanta Anchors (VLA) in the P27 Taut Leg Mooring System [C]// Proceedings of the 11th Deep Offshore Technology Conference, Stavanger, 1999: 1-14.

[11] Dahlberg R, Strom PJ. Unique Onshore Tests of Deepwater Drag-in Plate Anchors [C]// Proceedings of the 31st Offshore Technology Conference, Houston, 1999: 1-11.

[12] Heyerdahl H, Eklund T. Testing of Plate Anchors [C]// Proceedings of the 33th Offshore Technology Conference, Houston, 2001: 1-11.

[13] Ruinen RM. Penetration Analysis of Drag Embedment Anchors in Soft Clays [C]// Proceedings of the 14th Offshore and Polar Engineering Conference, Toulon, 2004: 531-537.

[14] Murff JD, Randolph MF, Elkhatib S, *et al.* Vertically Loaded Plate Anchors for Deepwater Applications [C]// Gourvenec and Cassidy, *Frontiers in Offshore Geotechnics*, London: Taylor and Francis Group, 2005: 31-48.

[15] Vryhof Anchors. Anchor Manual 2005[M]. The Netherlands: Krimpen ad Yssel, 2005.