

筒形基础在层状土中的应用与研究进展

梁红雨

河北科技大学建筑工程学院, 河北石家庄, 050018;

摘要: 本文系统综述了筒形基础在海洋工程领域的研究现状与发展趋势。筒形基础作为一种新型海洋基础结构, 具有施工便捷、承载性能优越、环境适应性强等特点, 近年来在港口工程、海上风电、跨海大桥和深远海养殖等领域得到广泛应用。我国沿海海床很多为饱和黏土, 饱和黏土海床一般通过沉积作用形成, 很多为饱和层状黏土。文章首先回顾了筒形基础的发展历程和技术特点; 然后从试验研究和数值模拟阐述了国内外研究进展; 最后指出了当前研究中存在的不足并对未来发展方向进行了展望。

关键词: 筒形基础; 层状黏土; 承载特性; 破坏模式; 研究进展

DOI: 10.69979/3060-8767.25.04.038

引言

近年来, 随着全球能源结构转型的加速推进, 海上风电作为清洁能源的重要组成部分, 其开发利用受到世界各国的广泛关注。欧洲作为海上风电发展的先驱区域, 已在技术研发和工程实践方面取得了显著成就^[1-4]。然而, 海上风电项目的开发建设仍面临诸多技术挑战: 首先, 海洋环境复杂多变, 施工窗口期受风浪条件严格限制; 其次, 海上作业技术难度大, 涉及大型设备的海上运输、精准定位和安装等关键技术环节; 再者, 项目建设成本居高不下, 特别是随着水深的增加, 基础结构的造价占比持续上升^[5,6]。值得注意的是, 虽然近年来风电机组设备成本通过规模化生产和技术进步实现了显著下降, 但基础结构的成本优化仍存在较大空间。在现有技术体系下, 海上风电基础结构主要分为三大类: 适用于浅水区且地基条件良好海域的重力式基础; 适用于中等水深条件的单桩/多桩导管架基础; 以及适用于深水区域的桩基础。其中, 筒型基础作为一种创新性的基础形式, 凭借其独特的结构特点和施工优势, 正逐渐成为海上风电基础工程的重要选择方案^[7-9]。与传统基础形式相比, 筒型基础具有安装速度快、环境适应性强、经济性优越等显著优势。特别是在中国沿海广泛分布的软土地基条件下, 筒型基础展现出良好的工程适用性, 为海上风电的大规模开发提供了新的技术路径。

1 筒形基础的研究现状

筒形基础的发展与裙板基础、吸力锚和吸力桩的发展历程密切相关。这一技术源头可追溯至20世纪70年代的北海油田开发, 1973年Phillips石油公司在Ekof

isk油田安装的Doris储油罐开创了裙板重力式基础应用的先河^[10,11]。我国沿海广泛分布的饱和黏土海床, 其形成主要源于沉积作用, 呈现出典型的层状结构特征^[12-15]。

在基础承载力特性研究方面, 土力学研究形成了多方法协同的研究体系。室内模型试验作为传统研究方法, 能够揭示基础力学行为的基本规律, 但受制于尺度效应和边界条件限制, 难以完全还原实际工程中的应力状态。为此, 离心模型试验技术应运而生, 通过提高重力加速度的方法有效解决了应力相似性问题^[16]。数值分析方法则凭借其参数可控、结果可重复的优势, 特别是能够直观展现土体内部破坏机理和应力应变分布的特点^[17], 为研究基础承载力问题提供了新的技术路径。这三种方法相互验证、优势互补, 共同构成了现代土力学研究的完整方法体系。

杨灿^[18]开展了上黏下砂层状土地基中筒形基础的竖向承载力离心机模型试验, 同时也开发了上黏下砂及层状黏性土地基中筒型基础竖向承载力下限解计算程序, 分析了上黏下砂地层中土层相对厚度、黏土层强度、砂土层内摩擦角, 以及层状黏性土地基中上硬下软和上软下硬等对筒型基础地基竖向承载力的影响。Chen等^[19]通过模型试验研究了砂土夹黏土层地基中的L型沉箱的稳定性, 发现黏土层位置和厚度显著影响其承载力, 最大降低41%, 并按照破坏面类型分为三种破坏模式。Hossain和Randolph^[20]通过离心机试验研究了硬-软层状黏土中桩靴基础的贯入特性, 揭示了桩靴在层状黏土中的四种土体流动机制, 包括土体下陷、硬黏土被携带至软黏土层、延迟回流及局部流动。Malik^[21]等通过模型

试验研究了螺旋桩在松砂和密砂中的性能,重点探讨了推进比(AR)对承载力和安装荷载的影响。结果表明,AR=1.0时性能最优,但实际施工中难以实现;AR在0.5-0.75范围内可平衡安装效率与承载力。研究提出了估算承载力和安装功的经验公式。Tian^[22]等基于静力触探试验(CPT),针对砂-砂和砂-粘土两种分层土中的贯入阻力、触探仪直径和土层相对强度之间的关系进行了系统的实验研究。定量分析了土层强度对两层交界处锥尖阻力及两个感知阶段特性的影响。建立预测层状土中静压桩极限端阻的统一方法。通过在野外观测和实验室多层土体中使用不同直径触探仪的实例,验证了这些方法的适用性。

舒健等^[23]研究了层状土中锚板基础的承载力,结果表明:在硬黏-软黏土体中,随着抗剪强度比、层厚比的增加,极限承载力均显著增加;在砂土-软黏土体中,极限承载力同样随着层厚比的增加而增加,当下层软黏土中的锚板破坏进入局部破坏后,层厚比对承载力的影响逐渐减弱。Zhou等^[24]采用大变形有限元方法(CEL),研究了沉箱基础在非均质黏土夹砂层中的贯入特性,提出了预测沉箱基础在非均质黏土夹砂层中贯入阻力的经验公式。Wei等^[25]通过有限元方法和塑性极限分析,研究了吸力式沉箱基础在黏土-砂-黏土三层土体中的竖向承载力。提出了一种基于Hill型破坏机制的新模型,分析了夹层厚度和间隔距离对承载力的影响。Wang等^[26]通过大变形有限元分析(LDFE)研究了桩靴基础在黏土覆盖砂层中的贯入阻力,揭示了挤压机制对承载力提升的作用。同时提出了一种简化表达式,用于预测桩靴基础在黏土-砂界面附近的贯入阻力,并通过离心机试验验证了其准确性。Zhao等^[27]通过数值模拟研究了黏土覆盖砂层地基中改进吸力式沉箱在水平荷载下的承载特性,发现外裙长度比和宽度显著影响承载能力,黏土厚度增加会降低承载力但MSC始终优于传统吸力式沉箱。Xia等^[28]通过三维小应变有限元分析,研究了软-硬黏土中筒形基础在复合荷载下的承载力特性。研究发现,上层软黏土显著降低基础的竖向承载力(降幅达25%),而基础几何参数(如裙板长度比)和土层特性对破坏包络线形状影响较大。基于数值结果,提出了适用于复杂荷载条件的经验设计公式。Xia等^[29]通过有限元分析研究了硬-软黏土中筒形基础在复合V-H-M荷载下的承载能力。研究探讨了上层黏土厚度、筒形基础裙长、垂直荷载及土体性质对承载力的影响,发现硬-软黏土

中的破坏机制与均质黏土显著不同,承载力显著提高。提出了基于数值结果的半经验设计方法,用于预测不同荷载条件下的破坏包络线。

2 结论与展望

筒形基础作为一种创新性的基础结构形式,其理论研究和工程应用均取得了显著突破。当前研究虽已解决部分关键技术难题,但仍存在若干关键科学问题有待深入探索。在基础理论方面,复杂荷载工况(尤其是地震、波浪等动力荷载与静力荷载的耦合作用)下的承载机制仍需系统研究。工程设计层面面临的主要挑战包括:现有设计规范对筒形基础的适用性不足,缺乏统一的设计准则和可靠性评估体系。

展望未来,筒形基础技术的发展应重点关注以下几个方向:首先,加强多学科交叉研究,融合岩土工程、结构工程和海洋工程等领域的先进理论;其次,推动智能化技术的应用,发展基于大数据和人工智能的设计优化方法;最后,注重可持续发展理念,探索环境友好型的新型筒形基础结构。通过持续的理论创新和技术突破,筒形基础有望在更广阔的工程领域实现规模化应用。

参考文献

- [1]黄东风. 欧洲海上风电的发展[J]. 能源工程, 2008(2): 24-27.
- [2]胡其颖. 欧洲海上风电技术的发展现状[J]. 可再生能源, 2005, 23(2): 67-69.
- [3]朱小毅. 欧洲海上风电发展趋势分析及启示[J]. 风能, 2016(9): 36-41.
- [4]邱颖宁, 李晔. 海上风电场开发概述[M]. 北京: 中国电力出版社, 2018.
- [5]吕斌. 海上风电场降低成本前景分析[J]. 上海电力, 2007, 20(4): 429-437.
- [6]黄维平, 刘建军, 赵战华. 海上风电基础结构研究现状及发展趋势[J]. 海洋工程, 2009, 27(2): 130-134.
- [7]丁红岩, 章李卉, 张浦阳, 等. 海上临坡宽浅式筒型基础承载特性研究[J]. 太阳能学报, 2021, 42(2): 163-171.
- [8]张浦阳, 黄宣旭. 海上风电吸力式筒型基础应用研究[J]. 南方能源建设, 2018, 5(4): 1-11.
- [9]贾楠. 海上风电单筒多舱型筒型基础沉放调平机理及沉贯阻力研究[D]. 天津: 天津大学, 2017.

- [10] Andreasson B, Christophersen H P, Kvalstad T J. Field model tests and analyses of suction installed long-skirted foundations[J]. 1988.
- [11] Bransby M F, Randolph M F. Combined loading of skirted foundations[J]. *Geotechnique*, 1998, 48(5): 637-655.
- [12] MS Hossain, MF Randolph. Deep-Penetrating Spudcan Foundations on Layered Clays: Numerical Analysis[J]. *Geotechnique*, 2010, 60(3): 171-184.
- [13] X Zou, C Zhou, X Cao, et al. Experimental Studies on the Behaviour of Single Pile under Combined Vertical-Torsional Loads in Layered Soil[J]. *Applied Ocean Research*, 2021, 106: 102457.
- [14] L He, X Chen, Z Wang, et al. A Case Study on the Bearing Characteristics of A Bottom Uplift Pile in a Layered Foundation[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1): 22457.
- [15] 邹新军, 周长林. 上砂下黏地基中竖向力-扭矩联合受荷单桩承载特性[J]. *湖南大学学报(自然科学版) 中文版*, 2022, 49(9): 126-135.
- [16] 王元战, 马楠, 尹利强. 荷载作用下超固结比软土抗剪强度指标影响[J]. *水道港口*, 2016, 37(4): 439-444.
- [17] 赵少飞, 栾茂田, 范庆来, 等. 非均质地基承载力及破坏模式的FLAC数值分析[J]. *岩土力学*, 2006, 27(11): 1909-1914.
- [18] 杨灿. 基于有限元极限分析下限法的筒型基础承载特性研究[D]. 天津大学, 2022.
- [19] S Chen, W Guo, Y Ren, et al. Model Test of L-S shaped Caisson Quay Wall in Sand Foundation with Clay Interlayer[J]. *Applied Ocean Research*, 2024, 150: 104128
- [20] MS Hossain, MF Randolph. Deep-Penetrating Spudcan Foundations on Layered Clays: Centrifuge Tests[J]. *Geotechnique*, 2010, 60(3): 157-170
- [21] AA Malik, SI Ahmed, U Ali, et al. Advancement Ratio Effect on Screw Pile Performance in the Bearing Layer[J]. *Soils and Foundations*, 2024, 64(6): 101537
- [22] Y Tian, BM Lehane. The Influence of Soil Layering and Penetrometer Diameter on Penetration Resistance[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2025(ja)
- [23] 舒健, 毋晓妮, 唐超, 等. 上硬下软层状土中锚板抗拔承载特性研究[J]. *海洋工程*, 2024, 42(05): 54-67
- [24] S Zhou, M Zhou, X Zhang, et al. Installation of Caisson in Non-Uniform Clay Interbedded with A Sand Layer[J]. *Computers and Geotechnics*, 2021, 140: 104439
- [25] T Wei, X Zhang, Y Liu, et al. The Upper-Bound Solution for Vertical Bearing Capacity of the Suction Caisson in A Three-Layer Soil Seabed[J]. *Ocean Engineering*, 2024, 311(Part1): 15
- [26] Y Wang, MJ Cassidy, B Bienen. Evaluating the Penetration Resistance of Spudcan Foundations in Clay Overlying Sand[J]. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 2021, 31(2): 243-253
- [27] J Zhao, D Li, Y Zhang, et al. Bearing Capacity of Modified Suction Caissons in Clay Overlying Sand under Monotonic Horizontal Loading[J]. *Ocean Engineering*, 2024, 309: 118602
- [28] Xia H, Zhou M, Niu F, et al. Combined bearing capacity of bucket foundations in soft-over-stiff clay[J]. *Applied Ocean Research*, 2022, 126: 103299.
- [29] Xia H, Zhou X, Zhou M, et al. Capacity of caissons in stiff-over-soft clay under combined V-HM loadings[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 229: 109007.