

筒形基础在海洋工程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。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；海洋工程；承载特性；破坏模式；研究进展

DOI：10.69979/3041-0673.25.10.021

引言

近年来，在陆地资源日趋紧张的背景下，海上风能作为重要的清洁能源受到全球各国的重点关注，其中欧洲地区在海上风电领域取得了显著发展^[1-4]。尽管海上风电具备多重优势，但其建设过程面临诸多挑战：施工易受恶劣天气和复杂海况制约，存在技术难度大、建设成本高昂、工程周期漫长等突出特点。随着风机设备制造技术的不断完善，机组成本已显著降低，但基础结构的建造安装费用在总造价中的占比却持续攀升，这一现象在海上风电项目中尤为明显，其基础成本远高于陆上风电^[5,6]。在此背景下，提高基础建造效率、降低工程造价成为推动海上风电产业发展的关键突破口。目前主流的海上风电基础结构主要包括以下几种类型：桩基础、单桩/多桩导管架基础以及重力式基础。其中，重力式基础适用于浅水区且地基条件良好的海域，而单桩/多桩导管架基础和桩基础则更适合水深较大、地基承载力较弱的区域。值得注意的是，筒型基础作为一种新兴的基础形式近年来备受关注。相较于传统基础形式，筒型基础展现出独特的竞争优势：施工周期短、对复杂海洋环境的适应性强、建造与施工成本效益显著等突出特点，使其成为极具发展潜力的技术方案^[7-9]。

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密不可分。早在二十世纪七十年代开始，挪威北海油田即开始使用裙板重力式基础，1973年由 Phillips 石油公司负责安装的 Ekofisk Doris 储油罐是首个裙板重力式基础结构物^[10,11]。

1.1 模型试验

在土力学研究中，模型试验是探究基础承载力特性的重要方法。然而，传统室内模型试验虽然能够揭示一般性规律，但由于尺度效应和边界条件的限制，难以准确模拟实际土体中的应力分布状态。为此，离心模型试验作为一项关键补充技术被广泛应用，其通过提高重力场的方式有效复现原型应力水平。这两种试验方法相互补充、有机结合，共同构成了土力学研究中完整而系统的试验体系^[12]。

施晓春等^[13]等通过室内外模型试验，研究了软土地区筒形基础的水平承载特性。采用土压力监测和位移测量技术，系统分析了水平荷载作用下筒形基础的变形机制及筒-土相互作用规律。试验结果表明：在筒体转动过程中，被动区筒壁土抗力呈抛物线型分布特征；周松望等^[14]通过模型试验，探究了软土地基中四筒组合基础在竖向静载-水平循环耦合荷载作用下的承载特性及破坏机理。试验结果表明：随着竖向荷载的增大，导致基础破坏的主要原因为竖向循环累积沉降。Allersma^[15,16]通过离心机模型试验结合有限元分析（FEA），系统研究了干砂和黏土地基中吸力桩与吸力锚在循环荷载及长期荷载作用下的承载特性。结果表明：当荷载作用倾角 $\alpha = 10^\circ$ 时，极限承载力较 $\alpha = 25^\circ$ 工况提升约 27%；水平承载力与土体相对密度呈显著线性关系。刘梅梅等^[17]研究了宽浅式筒型基础在竖向荷载下的承载特性，通过模型试验和有限元分析，发现其破坏模式主要为冲剪破坏，且顶盖阻力、内侧摩阻力和端阻力承担了 90% 以上的荷载。基于汉森理论提出了适用于宽浅式筒型基础的竖向承载力计算公式，验证表明其误差在 10% 以内（长

径比<1.0时)。杨少丽等^[18]通过模型试验研究了粉土中筒基负压沉贯过程,发现土塞现象普遍且显著,主要由渗流力作用导致。试验表明,筒内土体存在破坏安全机制,可防止液化和流土发生。不同尺寸筒基的沉贯行为相似,但比尺效应需进一步研究。Andersen等^[19]通过离心机试验研究了软黏土中吸力筒的安装特性,发现吸力筒可沉贯至直径的12.4至14.5倍深度。试验表明,沉贯过程中所有被筒壁挤出的黏土均进入筒内,且在达到最大沉贯深度一半时,土塞体积显著增加。丁红岩等^[20]通过可变形离散元法模拟了筒型基础负压沉贯过程中的土塞现象,开发了VC++程序SPSA进行可视化计算。研究分析了黏土、粉土和砂土三种土质下土塞的生成特性,发现黏土条件下的计算结果与试验值最为接近(误差4.9%),粉土收敛速度最快。

1.2 数值模拟

数值分析方法凭借其计算成本低、可重复性高,且可直观分析土体内部的破坏模式和应力应变状态等优势,成为研究岩土工程中基础承载力问题的有效方法之一^[21]。

Sukumaran^[22]研究采用有限元方法(FEM)系统研究了不排水软黏土中吸力式筒形基础的承载特性。基于von Mises屈服准则构建了二维和三维数值模型,并创新性地引入准三维傅里叶分析以优化计算效率。刘振纹等^[23]系统揭示了筒形基础的竖向承载特性,通过数值模拟方法深入分析了竖向荷载作用下的地基破坏机制,建立了表征其竖向承载机理的理论表达式。肖熙等^[24]提出了一种创新的耦合数值分析方法,用于精确模拟筒形基础与土体的相互作用机制。通过建立有限元-无限元-接触元耦合模型,系统研究了筒-土界面的复杂力学行为,并且推导了三种形式的单向无限元映射函数。Gourvennec等^[25]基于平面应变假设,运用修正剑桥模型系统研究了土体固结效应对浅基础竖向承载力的影响机制,重点探讨了不同竖向固结应力条件下基础承载力的演化规律。在此基础上,Fu等^[26]进一步将研究维度拓展至三维空间条件,采用相同的本构模型深入分析了筒形基础在土体反复固结过程中的承载力特性,并通过与离心机模型试验结果的对比分析,验证了所提简化计算方法的可靠性与准确性。林小静等^[27]采用数值计算方法对粉细砂地基中筒形基础的竖向及水平承载特性进行了系统分

析。数值计算结果与离心模型试验数据具有良好的一致性。研究结果表明:在水平极限荷载工况下,筒形基础呈现典型的整体倾覆破坏模式,具体表现为主动区侧壁与土体发生显著分离,而被动区土体则产生明显的剪切塑性变形。张宇等^[28]采用非线性数值分析方法对筒形基础竖向受荷特性进行数值模拟研究。成功再现了室内模型试验的荷载-位移响应特性,数值计算结果与试验数据表现出良好的一致性。系统分析了筒形基础各结构部件(包括筒内外壁、顶板及筒端部)在竖向荷载作用下的荷载分担机制,进一步的对比研究表明,由于筒内土塞效应的存在,筒形基础与实体基础在荷载传递机制和破坏模式上表现出显著差异。

2 结论与展望

筒形基础作为一种创新的基础形式,在理论和应用研究方面都取得了重要进展。尽管仍存在一些科学问题和技术挑战需要解决,但随着研究的深入和工程经验的积累,筒形基础必将在更广泛的领域发挥重要作用。未来的研究应注重多学科交叉融合,推动筒形基础技术向更高效、更智能、更可持续的方向发展。但仍存在若干亟待解决的问题。在理论方面,复杂荷载组合作用下的承载机理尚不明确,特别是地震、波浪等动力荷载与竖向荷载的耦合效应需要深入研究。在设计方法上,现有规范对筒形基础的规定还不够完善,缺乏统一的设计标准和可靠度评估方法。未来研究应重点关注以下几个方向:

(1)发展更精确的理论模型和数值方法,特别是考虑土体非线性、大变形和固结效应的耦合分析;(2)加强长期性能和耐久性研究,评估筒形基础在全寿命周期内的性能演变;(3)探索新型材料和结构形式,如复合材料筒形基础、可回收筒形基础等;(4)开发智能监测技术,实现筒形基础工作状态的实时评估和预警。

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, Christoffersen 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]. Géotechnique, 1998, 48(5): 637-655.
- [12] 王元战, 马楠, 尹利强. 荷载作用下超固结比对软土抗剪强度指标影响[J]. 水道港口, 2016, 37(4): 439-444.
- [13] 施晓春, 徐日庆, 龚晓南, 等. 桶形基础单桶水平承载力的试验研究[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(6): 723-726.
- [14] 周松望, 王建华. 组合桶形基础水平循环承载力模型试验[J]. 海洋工程, 2014, 32(1): 106-111.
- [15] Allersma H G B, Kierstein A A, Maes D. Centrifuge modelling on suction piles under cyclic and long term vertical loading[C]//ISOPE International Ocean and Polar Engineering Conference. ISOPE, 2000: ISOPE-I-00-159.
- [16] Allersma H G B, Kierstein A A, Brinkgreve R B J, et al. Centrifuge and numerical modelling of horizontally loaded suction piles[C]//ISOPE International Ocean and Polar Engineering Conference. ISOPE, 1999: ISOPE-I-99-107.
- [17] 刘梅梅, 练继建, 杨敏, 等. 宽浅式筒型基础竖向承载力研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(2): 379-384.
- [18] 杨少丽, 李安龙, 齐剑峰. 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.
- [19] Andersen K H, Jeanjean P, Luger D, et al. Centrifuge tests on installation of suction anchors in soft clay[J]. Ocean Engineering, 2005, 32(7): 845-863.
- [20] 丁红岩, 张浦阳. 筒型基础安装过程中筒内土塞生成的可视化模拟计算[J]. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2007, 37(6): 1034-1038.
- [21] 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.
- [22] Sukumaran B, McCarron W O, Jeanjean P, et al. Efficient finite element techniques for limit analysis of suction caissons under lateral loads[J]. Computers and Geotechnics, 1999, 24(2): 89-107.
- [23] 刘振纹, 王建华, 袁中立, 等. 负压桶形基础地基竖向承载力研究[J]. 中国海洋平台, 2001, 16(2): 1-6.
- [24] 肖熙, 王秀勇. 桶型基础结构与土壤相互作用的有限元无限元接触元耦合线性分析[J]. 海洋工程, 2001, 19(3): 25-31.
- [25] Gourvenec S M, Vulpe C, MURTHY T G. A method for predicting the consolidated undrained bearing capacity of shallow foundations[J]. Géotechnique, 2014, 64(3): 215-225.
- [26] Fu D, Gaudin C, Tian C, et al. Effects of preloading with consolidation on undrained bearing capacity of skirted circular footings[J]. Géotechnique, 2015, 65(3): 231-246.
- [27] 林小静, 张建红, 孙国亮. 张力腿平台吸力式基础承载力有限元分析[J]. 第十二届中国海岸工程学术讨论会论文集, 2005.
- [28] 张宇, 王梅, 楼志刚. 竖向载荷作用下桶形基础与土相互作用机理研究[J]. 土木工程学报, 2005, 38(2): 97-101.