

· 地基与基础 ·



一种新型的水上大口径钢管桩自平衡法试验*

张开华¹, 龚维明^{2,3}, 戴国亮^{2,3}, 丁浩珉²

(1. 上海东海风力发电有限公司, 上海 200433; 2. 东南大学土木工程学院, 江苏南京 210096;

3. 东南大学混凝土及预应力混凝土结构教育部重点实验室, 江苏南京 210096)

摘要: 介绍了新型自平衡法试验原理。应用该方法时, 先将专用接头焊接在钢管桩自平衡点处随桩一起打入, 测试时清除荷载箱接头上部泥土, 将伸缩式荷载箱安装在接头处, 从而实现钢管桩自平衡法加载。基于钢管桩新型自平衡法试验, 对在上海市东海大桥海上风电场1.7 m的大直径钢管桩承载特性进行分析, 成功获得了大口径钢管桩总承载力以及侧摩阻力与端阻力, 取得了较好的测试效果和经济效益。

关键词: 钢管桩; 新型自平衡测试; 伸缩式荷载箱; 专用接头; 承载力

中图分类号: TU 473

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)06-0149-006

New self-balanced loading test of large-diameter steel pipe pile in water

ZHANG Kai-hua¹, GONG Wei-ming^{2,3}, DAI Guo-liang^{2,3}, DING Hao-min²

(1. Shanghai Donghai Wind Power Co., Ltd., Shanghai 200433, China; 2. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China; 3. Key Laboratory for RC and PRC Structures of Education Ministry, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: A retractable and extendable load cell and a special connection junction are developed for self-balanced test of steel pipe pile. Firstly the special connection junction is welded at the self-balanced position with the steel pipe pile when the pile is set up. Then, the inner soil above the junction is cleaned up and the retractable load cell is set up in the junction, which can load the upper and lower pile segments. Based on the new self-balanced method test of steel pipe pile, we analyze the bearing characteristics for a large-diameter steel pipe pile at Donghai bridge offshore wind farm, in which the gross bearing capacity is obtained as well as the side and base resistance. The results of the study show that the new self-balanced method testing technology achieves a good test effect and economic benefit.

Key words: steel pipe pile; new self-balanced testing; extendable and retractable load cell; special connection junction; bearing capacity

近年来, 水上码头、桥梁以及海上风电发展迅速。目前常用的基础类型主要有混凝土沉箱基础、钢管单桩基础、群桩基础、三脚架基础等。钢管桩基础, 由于基础自质量小、结构构造简单、受力明确, 为水运工程基础常用形式^[1-3]。

随着钢管桩朝着大直径、高承载力方向发展, 传统的桩基承载试验将很难解决钢管桩承载

力测试的问题。常规的钢管桩测试一般只能采用锚桩法或堆载法, 测试成本很高。而自平衡法用于钢管桩测试时, 由于钢管桩多数为打入桩, 且为开口的, 土会涌入钢管桩内部, 如将常规的荷载箱焊在钢管桩上会影响钢管桩的打入, 且会损伤甚至损坏荷载箱, 导致不能正常工作^[4]。另外荷载箱为一次性消耗品, 测试完后荷载箱不能取

收稿日期: 2012-11-11

*基金项目: 国家科技支撑计划项目(2011BAG07B01); 国家973计划课题(2013CB036304)

作者简介: 张开华(1963—), 男, 高级工程师, 主要从事风力发电工作。

出。为了解决此问题,笔者发明了一种专用于钢管桩自平衡测试法的可伸缩回收式荷载箱及专用接头,提供了一种新型自平衡测试法。本文将详细介绍这种新型自平衡测试在上海东海大桥风电场大直径钢管桩中的应用。

1 新型自平衡法原理

1.1 原理

钢管桩自平衡测桩法是在桩身平衡点位置安设荷载箱专用接头,与钢管桩焊接成整体沉桩。测试时通过钻孔或冲孔清除钢管桩内泥土,将伸缩式荷载箱以及位移量测装置吊入荷载箱专用接头处,通过高压油泵沿垂直方向加载,即可同时测得荷载箱上、下部钢管桩各自承载力,如图1所示。加载专用接头与可回收伸缩式荷载箱实物见图2,3。

1.2 清孔及设备安装

钢管桩作为打入桩,不可能事先把荷载箱安

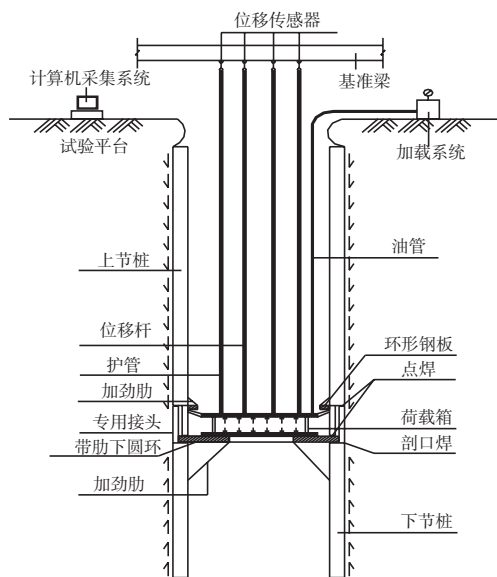


图1 钢管桩承载力自平衡试验示意图



图2 专用接头

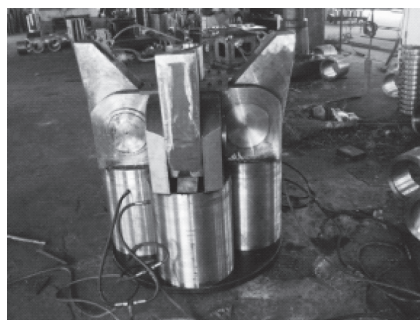


图3 荷载箱

装于钢管桩中再进行沉桩施工,只能先焊接荷载箱专用接头,沉桩完成后,再安装荷载箱。根据自平衡试验要求,需对已完成沉桩的钢管桩进行桩内清除土塞的施工,清孔完成后,再将试验用的荷载箱吊装到指定位置。

主要的施工工艺流程为:搭设施工平台→钢管桩部位加固→钻机就位→钻孔清土→验孔→吊装荷载箱→自平衡试验。

清孔过程:钻机施工原理是采用气举反循环钻孔清渣的原理,主要通过钻机转动动力传带钻杆和钻头,使土塞搅松,再用空压机的气压通过钻头和钻杆空心通道往上反压,使松散的土塞和水排往桩外,另外用大扬程的水泵抽水灌进桩内以补足桩内的水面高程,而形成一个气举反循环,以达到清除桩内土塞的目的。最后要保证专用接头箱上端往下至2.5 m深处空腔内无任何淤积物。清孔原理如图4所示。

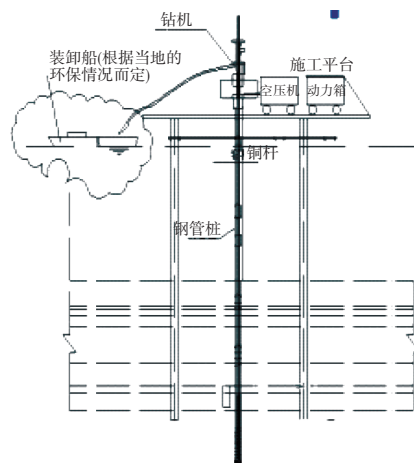


图4 清孔原理

桩内土塞清完后,需将荷载箱吊装到荷载箱专用接头里。整个吊装过程要求平稳,吊装过程中荷载箱不能发生旋转,以避免连接荷载箱的

液压油管及位置测量装置发生扭曲。吊装中,先在试验平台上把油管和位移测量装置安装好,然后用钢丝绳慢慢将荷载箱放入钢管桩内,采用控制钢丝绳的下放速度及方向,防止荷载箱产生旋转。吊装原理如图5所示。

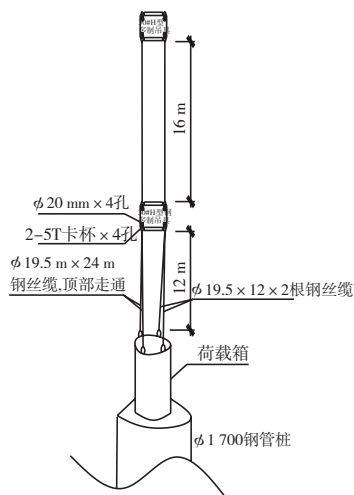


图5 吊装原理

吊索用 $\phi 19.5$ 钢丝绳,该钢丝绳破张力为200 kN。整个吊装过程采用分段式,第一段4点,保持荷载箱平稳起吊,第二段以后采用两点吊,保证载箱吊装过程不旋转。吊装过程中,当吊具到达钢管桩顶部位置时,利用钢管桩顶作为平

台,用两段30H钢扣住吊具,以连接下一段吊索及吊具,一直到荷载箱吊到指定位置。

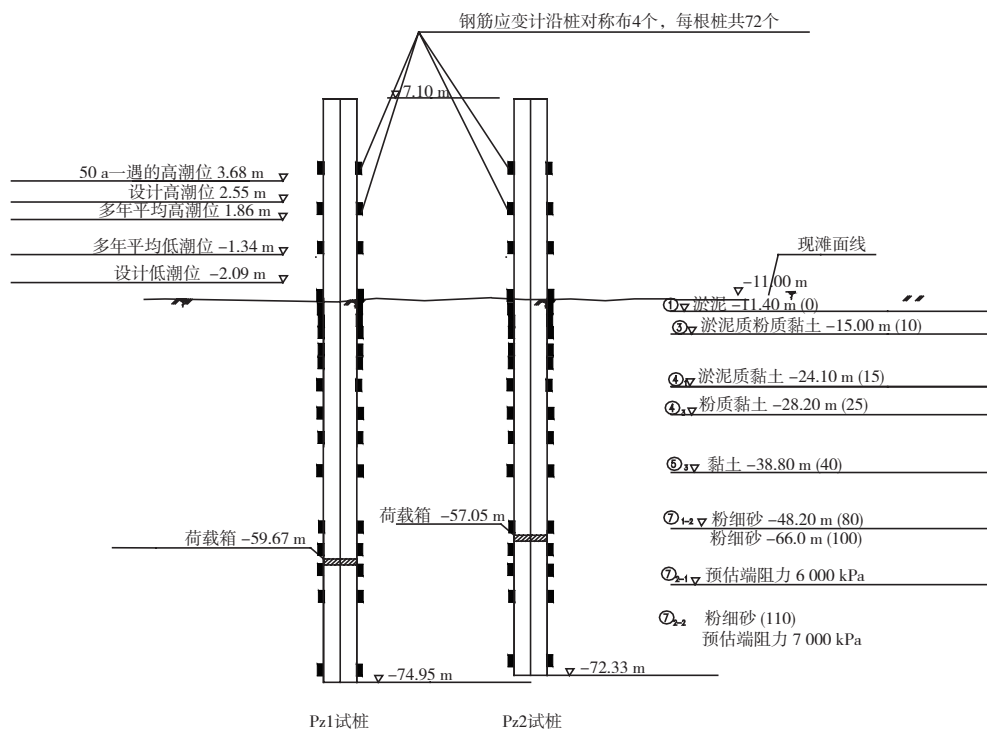
2 试验验证

2.1 工程概况

东海大桥近海风电场为中国第一个海上风电场地,工程位于上海市东海大桥东部海域。

风机基础形式采用高桩混凝土承台,每个风机设置一个基础,共34个基础。每个基础设置8根直径1.70 m的钢管桩,采用6:1的斜桩。桩顶高程2.20 m,桩底高程-75~-80 m。8根桩在承台底面沿以承台中心为圆心、半径为5.00 m的圆周均匀布置。钢管桩管材为Q345C,上段管壁厚30 mm,下段管壁厚度25 mm。-30.00 m高程以上桩身内填灌C30混凝土。

本工程风机基础承受巨大的风机倾覆力矩和波浪、水流荷载,风机设备对基础的承载和变形有很高的要求。因此,本工程桩基础直径大、入土深度大、承载力要求高。为确保工程设计和施工的安全可靠,需要在工程实施前在工程海域进行桩基承载力试验。对其中两根直桩Pz1和Pz2桩进行自平衡测试,试桩土层见图6。

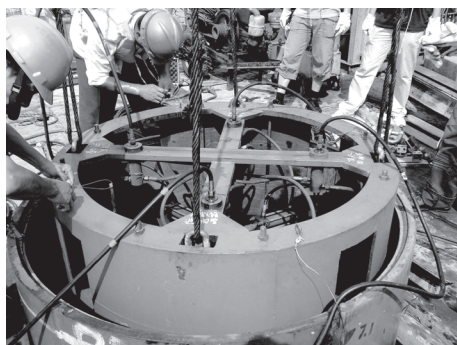


注:括号里为土预估侧阻力(kPa)

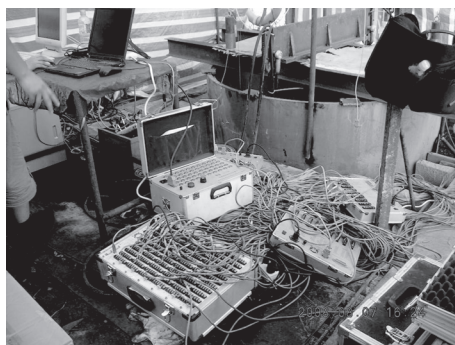
图6 试桩荷载箱位置、钢筋计以及土层

2.2 试验结果及分析

本次试验主要是为了测试Pz1和Pz2试桩的单桩



a) 荷载箱下放



b) 测试现场

图7 现场测试照片

1) Q - s 曲线与等效转换曲线。

图8为桩的 Q - s 曲线, 对于Pz2试桩从向上 Q - s 曲线可以看出, 前7级荷载下, 向上位移增加量较小, 第7级荷载下只有1.81 mm的位移, 前7级荷载下累计位移也只有7.56 mm。在第8级荷载后, 位移陡然增加。而向下 Q - s 曲线的变化特征与向上不同, 位移量始终较小, 没有发生突变, 向下位移始终小于向上位移。Pz1试桩曲线变化情况与Pz2试桩相似。上述情况说明在这次试桩中, 大部分阶段呈现为弹性状态, 在加载后期, 桩端阻力潜力较大。尤其是在第8级荷载后, 向下位移并未发生较大变化, 向上位移则呈陡增状态, 最终可以认为是上部桩侧位移过大导致不能稳定承载, 桩在达到最大加载值时, 压力平衡的状况下, 上下位移则呈现一定“不平衡”状态, 桩土承载力破坏呈现一定的突变性。

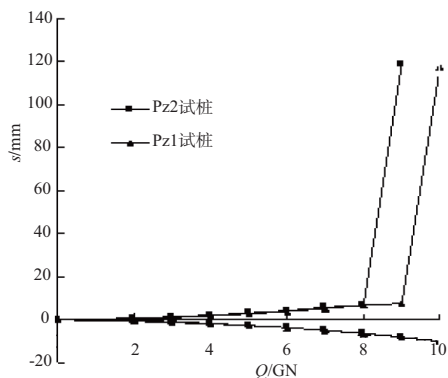


图8 试桩 s - lgQ 曲线

图9为等效转换曲线, Pz1试桩在最大荷载 2 2201 kN下, 桩端位移值为57.38 mm, Pz2试桩在

抗压、抗拔极限承载力及土体分层侧阻、端阻力和桩身的应力及变形情况, 图7为现场测试图片。

最大荷载19 090 kN下, 桩端位移值为58.32 mm。从转换后的曲线来看, 总体上两根试桩承载能力仍未充分发挥。

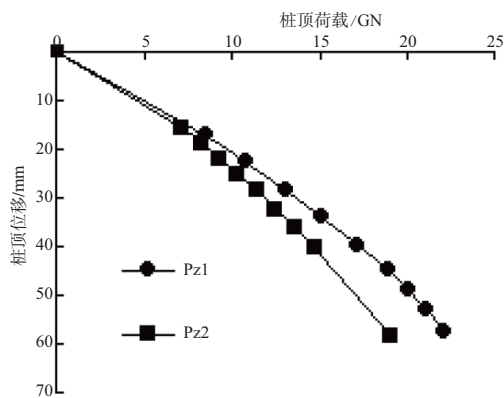


图9 试桩等效桩顶荷载-位移

2) 规范计算承载力与实测值对比。

《港口工程桩基规范》^[5]规定, 桩径小于600 mm的开口钢管桩, 当桩端进入良好持力层的深度大于5倍桩径时, 可认为桩端土的闭塞效应得到充分发挥, 按闭口桩计算。并没有对桩径大于600 mm的开口钢管桩的计算做出规定。现依据《建筑桩基技术规范》^[6]5.3.7, 桩径大于600 mm桩的竖向承载力计算公式如下:

$$Q_{uk} = Q_{sk} + Q_{pk} = u \sum q_{sik} l_i + \lambda_p q_{pk} A_p \quad (1)$$

$$\text{当 } h_b/d < 5 \text{ 时, } \lambda_p = 0.16 h_b/d \quad (2)$$

$$\text{当 } h_b/d \geq 5 \text{ 时, } \lambda_p = 0.8 \quad (3)$$

式中: q_{sik} 为桩侧第 i 层土极限侧阻力标准值; q_{pk} 为极限端阻力标准值; λ_p 为桩端土塞效应系数, 对于闭口钢管桩取1, 对于开口钢管桩按照式(2)和(3)取值; h_b 为桩端进入持力层深度; d 为钢管桩外径。

规范计算结果与自平衡测试结果对比见表1。从表中看出规范计算方法得出数据偏大。

表1 承载力计算对比

方法	总桩力/kN	桩端阻力/kN	桩侧阻力/kN
Pz1桩规范计算方法	22 725	4 205	18 520
Pz1桩自平衡测试法	22 201	3 167	19 034
Pz2桩规范计算方法	22 725	4 205	18 520
Pz2桩自平衡测试法	19 090	2 755	16 335

3) 上段桩抗拔承载力分析。

根据桩周土层侧阻力来确定上段桩的极限抗拔承载力,根据规范^[6]5.4.6式,基桩的极限抗拔承载力按下式确定:

$$T_{uk} = \sum \lambda_i q_{sik} u_{li} \quad (4)$$

式中符号含义见规范。计算结果见表2, T_{uk0} 表示未考虑抗拔系数的计算值,表中采用的侧阻力参数按规范取值或按试验实测值取值,可反算出抗拔系数 λ 的值。

表2 上段桩抗拔承载力分析

试桩号	按规范计算 T_{uk0}/kN	按实测值计算 T_{uk0}/kN	实测 T_{uk}/kN	抗拔系数 λ
Pz1	14 341	8 999	9 000	0.63
Pz2	14 341	7 993	8 000	0.56

上段抗拔桩折减系数为:

$$\xi = \frac{P_{f拉}}{p_{f压}} \quad (5)$$

式中: $p_{f拉}$ 为拉桩时桩侧极限摩阻力(kPa); $p_{f压}$ 为压桩时桩侧极限摩阻力(kPa)。

按照规范^[5]规定, ξ 一般取0.8,但是对于不同地区的不同土质,适应性不同。贾德庆^[7]对广东沿海地区60多根试桩统计数据进行分析,试桩主要有桩径500 mm×500 mm的混凝土管桩与 ϕ 800~ ϕ 1 200的钢管桩,分析得出:桩侧是黏性土为主的桩,受拉桩折减系数与规范建议值是比较接近的,一般取0.7~0.8,桩侧是砂性土,受拉桩折减系数比规范建议值较小,一般取0.4~0.5。由于砂性土取值偏差较大,又专门对砂性土为主的打入桩进行试验得出^[8]:抗拔桩折减系数宜取0.4~0.5。王玉琳^[9]对连云港地区海淤地基为主的钢管混凝土桩进行试验得出:海淤地质条件下抗拔桩折减系数一般取0.65。

本次试桩地基土质是黏性土与砂性土为主,

折减系数分别为0.63与0.56,与文献[7~9]中得出的数据还是比较接近的。

4) 桩身轴力分布。

从桩身轴力分布来看,由于加载方式的不同,桩身轴力呈现中部大两端小的折线型分布,在荷载箱处轴力最大。向上、向下则逐渐衰减,如图10和11所示。与传统加载方式不同,在自平衡测试中,桩身上部桩侧摩阻力并未充分发挥,桩端分配轴力较小,桩呈现明显的摩擦桩承载特性。

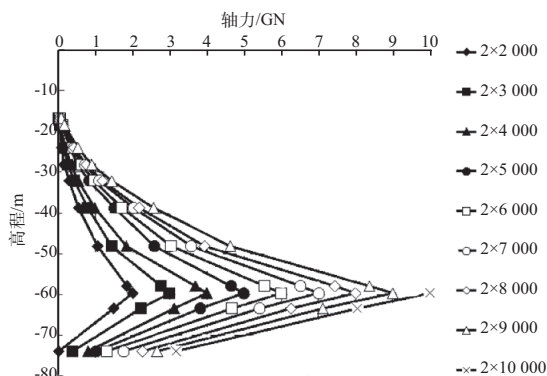


图10 Pz1桩轴力分布

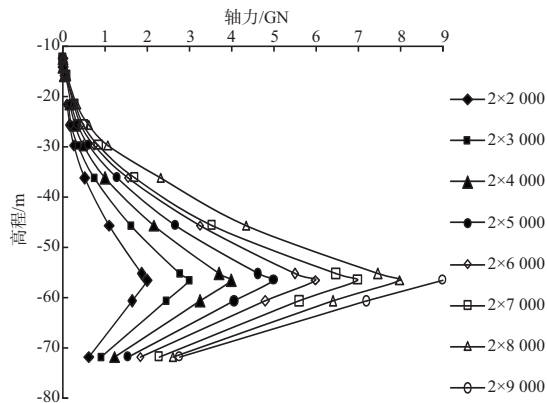


图11 Pz2桩身轴力分布

图12和13为分级荷载下摩阻力与位移的关系。侧摩阻力的发挥程度不一,各层土体的桩土相对位移也呈现中部较大,两端较小的情况。对于Pz1试桩-38 m以上的侧摩阻力-位移曲线基本呈现直线状,而-38 m以下的侧摩阻力-位移曲线呈现直线+曲线状。对于Pz2试桩-36 m以上的侧摩阻力-位移曲线基本呈现直线状,而-36 m以下的侧摩阻力-位移曲线呈现直线+曲线状,对于大部分的黏土层来说,桩土位移在3.2~3.6 mm,桩侧阻力就能基本发挥峰值。

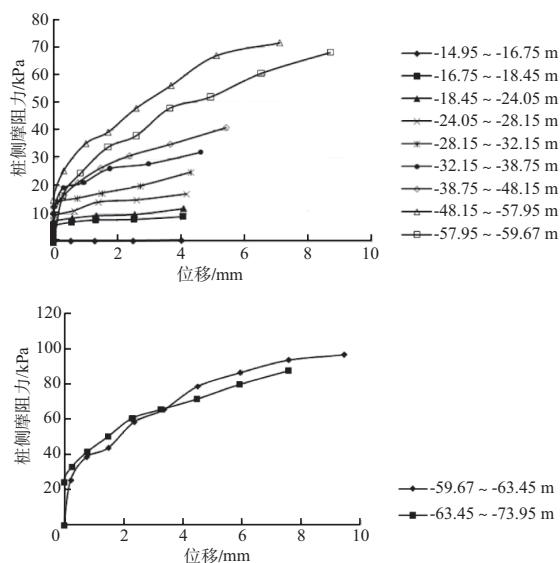


图12 Pz1桩侧摩阻力-位移曲线

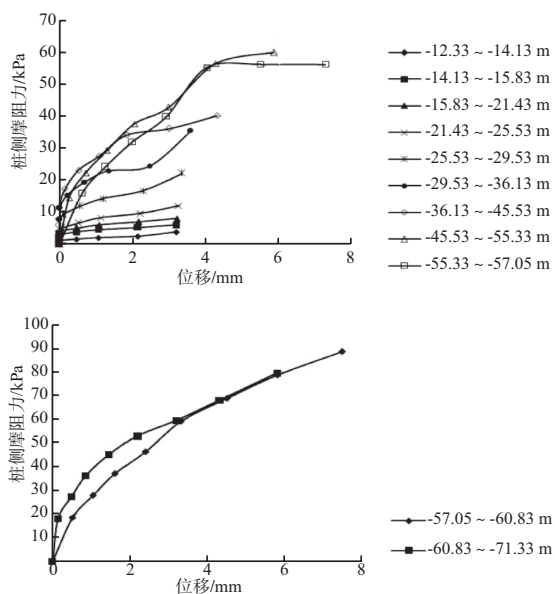


图13 Pz2桩侧摩阻力-位移曲线

3 结论

针对传统的桩基承载试验在大口径钢管桩承载力测试存在质量大、场地难以实施以及费用高等问题；以及常规自平衡法荷载箱用于钢管桩测试时，存在荷载箱的安装损坏以及荷载箱不能重复利用等问题，笔者发明了一种荷载箱专用接头和可伸缩式荷载箱，可成功实现水上大口径、高承载力钢管桩的测试。结合上海东海大桥近海风电场钢管桩原位测试的验证，可得如下结论：

1) 对于Pz1和Pz2试桩桩侧阻力分别占总桩力得85.7%和85.6%。桩端承担荷载较小，桩呈现

明显的摩擦桩承载特性。在上海东海大桥近海区域，测试显示土体侧摩阻力较小，Pz1桩桩侧阻力所需位移较小，在8 mm时，即可以基本达到峰值；Pz2桩桩侧阻力所需位移在6 mm时，可基本达到峰值。

2) 钢管桩不但具有很好的抗压强度，同时也具备一定的抗拔承载力。抗拔桩桩侧极限摩阻力折减系数，对于桩侧是黏性土为主的桩，折减系数与规范建议值是比较接近的，一般可取0.7~0.8；桩侧是砂性土为主的桩，折减系数比规范建议值较小，一般可取0.4~0.5。

3) 基于开发的新型伸缩式荷载箱以及专用接头，自平衡法在大口径钢管桩承载力测试中成功应用，取得了显著的经济效益，可为以后类似的工程提供参考。

参考文献:

- [1] Zambrano T, Maccready T, Kiceniuk, et al. Dynamic modeling of deepwater offshore wind turbine structures in Gulf of Mexico storm condition[G]//Proceedings of 25th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. Hamburg:[s,n], 2006: 156-198.
- [2] Chen J Y, Materek B A, Carpenter J F, et al. Analyses of pile capacity for offshore structures in Hurricane Katrina[G]//Proceedings of Selected Papers of the 2009 International Foundation Congress and Equipment Expo. Orlando: [s. n.], 2008: 58-66.
- [3] Padrón L A, Aznárez J J, Maeso O, et al. Dynamic stiffness of deep foundation with inclined piles[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2010, 39(12): 1 343-1 367.
- [4] 姚丽章, 匡翠萍, 徐明磊. 自平衡法测试钢管桩承载力的可靠性探讨[J]. 华南港工, 2008(2): 70-74.
- [5] JTJ 254—1998 港口工程桩基规范[S].
- [6] JGJ 94—2008 建筑桩基技术规范[S].
- [7] 贾德庆. 广东沿海主要土层桩侧摩阻力和桩尖阻力的分析[J]. 水运工程, 2004(2): 22-25.
- [8] 贾德庆. 砂土中受拉桩桩侧摩阻力折减系数的探讨[J]. 水运工程, 1984(3): 3-5.
- [9] 王玉琳. 海淤地质条件下钢管混凝土桩抗拔系数试验研究[J]. 建筑科学, 2008(9): 38-41.

(本文编辑 武亚庆)