

# 响水海上风电钢管桩基础水平承载特性对比研究

翟恩地<sup>1</sup>, 徐海滨<sup>1,2</sup>, 郭胜山<sup>1</sup>, 金 华<sup>1</sup>, 杜修力<sup>2</sup>

(1. 中国长江三峡集团公司, 北京 100038; 2. 北京工业大学城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124)

**摘 要:** 结合江苏响水海上风电场2 m桩径钢管桩水平试验工程,以ANSYS有限元软件为平台建立海上风力机钢管桩的单桩基础模型,根据设计提供土层参数,采用API规范建议的 $p$ - $y$ 曲线法、港口工程桩基规范的 $m$ 法和 $m$ 折减法进行水平承载力计算,与实测的桩顶荷载-位移曲线、桩身变形和弯矩曲线进行对比分析,结果表明,API(American Petroleum Institute)规范建议的 $p$ - $y$ 曲线计算结果偏于安全, $m$ 法和 $m$ 折减法偏于不安全,总体上 $m$ 折减法与实测值更接近。上述几种分析方法的对比研究尚需更多的试验数据和计算分析工作。

**关键词:** 海上风电; 承载特性; 钢管桩;  $p$ - $y$ 曲线;  $m$ 法

**中图分类号:** TU473.1

**文献标识码:** A

## 0 引 言

近年来,中国海上风电建设发展迅速,与欧洲国家海上风电建设相比,我国尚处于起步阶段,在设计建设过程中遇到很多关键问题,如水平荷载作用下大直径钢管桩的承载特性尚不明确。目前桩基水平受力变形分析的常用方法主要有 $m$ 法和 $p$ - $y$ 曲线法; $m$ 法是一种线弹性地基反力法,它忽略了土体非线性,不能确切反映桩土间的非线性关系。 $p$ - $y$ 曲线法在工程界和学术界广为应用,该法在土体弹性区采用弹性地基反力法,塑性区采用极限地基反力法,可以很好地模拟土体相互作用。

大直径钢管桩因其整体性能好、承载能力强、沉桩工艺简便等优点从20世纪末至今,大量学者对其进行了深入的研究。朱照清等<sup>[1]</sup>对大直径钢管桩的水平承载力进行现场试验研究,采用单向单循环加载法,测试了直桩、正反斜桩的水平承载力及水平位移;吴桐坤等<sup>[2]</sup>开展了水平荷载作用下高桩基础的大比例模型试验研究,并采用有限元软件进一步研究了高桩水平承载力特性的主要影响因素;龚维明等<sup>[3]</sup>进行大直径钢管桩的现场水平试验,分

别与API规范 $p$ - $y$ 曲线和Sørensen修正的 $p$ - $y$ 曲线的计算结果进行对比,取得了一些建议性的结果。

本文以江苏响水海上风电项目现场水平桩承载力试验为背景,根据《港口工程桩基规范》(JTS 167—2012)的 $m$ 法和API建议 $p$ - $y$ 曲线法进行水平荷载的数值模拟计算,与现场试验数据进行比较分析,以检验现有桩基础水平承载力设计的合理性和适用性,可对海上风电桩基设计起到一定的指导作用。

## 1 桩土作用有限元分析方法

### 1.1 $m$ 法

$m$ 法假定地基反力与水平位移成线性关系,可采用解析法和数值方法求解。本文采用数值方法模拟 $m$ 法,将桩分段施加弹簧单元,计算时水平向弹簧弹性系数 $K_s$ 取为<sup>[4]</sup>:

$$K_s = mB_0zh \quad (1)$$

式中, $m$ ——土的反力模量随深度变化的地基土水平抗力系数的比例系数, $\text{kN/m}^4$ ;  $B_0$ ——桩的计算宽度,桩截面为圆形时取 $B_0 = 0.9(D+1)$  ( $D$ 为桩径, $\text{m}$ );  $z$ ——桩在泥面以下的深度, $\text{m}$ ;  $h$ ——所取土层高

度, m。

## 1.2 $p$ - $y$ 曲线法基本原理

### 1.2.1 砂土

API<sup>[5]</sup>、DNV<sup>[6]</sup>规范给出的砂土极限土抗力计算公式为:

$$\begin{cases} p_{us} = (C_1 H + C_2 D) \gamma H \\ p_{ud} = C_3 D \gamma H \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $p_u$ ——极限土抗力, kN/m, 下标 s 代表浅层, d 代表深层;  $H$ ——深度, m;  $D$ ——桩径, m;  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ ——内摩擦角的函数值, 可通过规范查图取得。

1974 年, Reese 等<sup>[7]</sup>和 Cox 等<sup>[8]</sup>对埋入砂土中的钢管桩进行水平荷载试验, 提出的砂土中  $p$ - $y$  曲线计算公式为:

$$p(y) = A p_u \tanh\left(\frac{k H_z}{A p_u} y\right) \quad (3)$$

式中,  $p_u$ ——水平极限承载力, kN/m;  $k$ ——初始地基反应模量;  $H_z$ ——泥面以下桩的入土深度, m;  $A$ ——不同荷载型式和埋深的修正系数, 静荷载和循环荷载时,  $A=0.9$ , 当埋深大于 2.625 倍的桩径时, 静荷载和循环荷载的修正系数  $A$  是相同的。

### 1.2.2 软黏土

API 规范规定的软黏土(不排水抗剪强度标准值  $C_u$  小于 96 kPa)极限土抗力计算公式为:

$$\begin{cases} p_u = 3C_u + \gamma' X + J \frac{C_u X}{D}, & X > X_z \\ p_u = 9C_u, & X \leq X_z \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $p_u$ ——极限土抗力, kPa;  $C_u$ ——黏土不排水抗剪强度, kPa;  $\gamma'$ ——土的有效重度, kN/m<sup>3</sup>;  $J$ ——无因次经验常数;  $X$ ——泥面以下深度, m;  $X_z$ ——泥面以下到土抗力减少区域底部的深度, m。

DNV 规范给出的  $p_u$  为乘以桩径  $D$  的算式, 单位为 kN/m。获得极限土抗力  $p_u$  后, 进而计算得到  $p$ - $y$  曲线。API 规范给出了  $p/p_u$  与  $y/y_c$  的关系( $p$  为实际的土抗力, kPa;  $y$  为实际的水平位移, m;  $y_c = 2.5\varepsilon_c D$ ,  $\varepsilon_c$  为实验室进行原状样的不固结不排水压缩试验时, 最大主应力差 1/2 时的轴向应变;  $D$  为钢管桩直径, m); DNV 规范给出了相近的关系算式, 国内外众多研究人员对  $p$ - $y$  曲线的计算公式进

行了修正和改进<sup>[9,10]</sup>。

API 规范对硬黏土( $C_u$  大于 96 kPa)没有给出明确的计算公式。Reese 等<sup>[7]</sup>建议的硬黏土  $p_u$  的计算公式为:

$$\begin{cases} p_u = \left(3(C_u)_{\text{avg}} + \gamma' X\right) D + 2.83(C_u)_{\text{avg}} X \\ p_u = 11C_u D \end{cases} \quad (5)$$

## 2 试验简介

江苏响水近海风电场项目位, 风电场中心与岸线最近点的直线距离约 10 km, 沿海岸线方向长约 18 km, 垂直于海岸线方向宽 2.5~5.5 km, 风电场涉海面积 34.7 km<sup>2</sup>, 场区水深 8~12 m (平均海平面起算)。

海上风力机基础受风荷载、波浪荷载、潮流力的作用, 水平荷载大、变形要求高, 这对风力机基础结构的承载力也具有较高的要求。但目前国内有关风力机钢管桩基础承载力的研究成果较少, 响水附近海域亦缺乏类似已建成项目经验, 仅以地质勘探资料作为设计依据不能保证项目设计的可靠性与合理性, 因此, 本项目开展试桩工程是必要的。试桩为直桩(钢管桩), 管材为 Q345, 本次试桩位置的地质钻孔柱状图如图 1 所示。

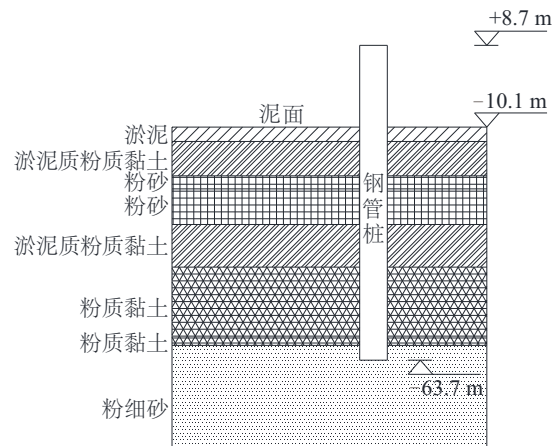


图 1 试桩及地质剖面图

Fig. 1 Test pile and geological profile

桩位布置见图 2 所示, 由 1 根试验桩(ZK01)、6 根锚桩(M1~M6)及 2 根基准桩(J1 和 J2)组成。ZK01 试桩为桩径 2.0 m 的开口钢管桩, 桩长 72.4 m, 锚桩和基准桩均为桩径 1.8 m 开口钢管桩, 桩身斜

度为 6:1,所有锚桩及基准桩在试验完成后作为工程桩使用,泥面标高-10.1 m,桩顶标高+8.7 m,桩底标高-63.7 m。

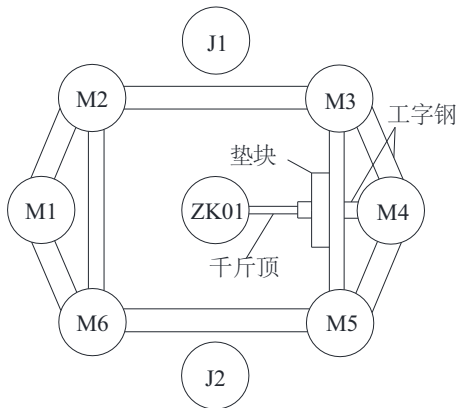


图2 试验反力架安装示意图  
Fig. 2 Sketch of anti force frame

试验平台如图 3 所示,试验采用顶推法,反力系统采用 2000 kN 级反力梁系统如图 4,由锚桩提供试验反力,加载系统由 1 只 2000 kN 级卧式油压千斤顶、70 MPa 超高压油路和油泵组成,数据采集由 RS-JYC 静态测试系统自动完成。加卸载时荷载由 2000kN 级 BHR-4 型压力传感器控制。荷载通过卧式油压千斤顶-压力传感器-球形铰传递至桩身。试验前对桩顶局部受力部位进行加强处理。

海上风电场所处海域的地质资料见表,表 1 中  $m$  值根据勘探参数按《港口工程桩基规范》(JTS 167—2012)中建议取值;设计单位给出的  $p-y$  曲线参数见表 2。



图3 试验平台  
Fig. 3 Test platform



图4 水平力试验反力装置  
Fig. 4 Anti force device for horizontal force test

表 1 天然地基及设计参数

Table 1 Natural foundation and design parameters

编号	土层编号	土层名称	土层厚度/m	承载力特征值/kPa	地基土水平抗力系数的比例系数 $m/\text{MN}\cdot\text{m}^{-4}$
1	①-2	淤泥	3.3	75~80	2.00
2	②	淤泥质粉质黏土	7.9	40~50	3.25
3	③-2	粉砂	3.0	110~120	8.00
4	④	粉砂	8.2	160~180	16.00
5	⑤	淤泥质粉质黏土	9.8	50~65	5.25
6	⑦-1	粉质黏土	16.3	100~110	5.25
7	⑦-2	粉质黏土	1.7	150~170	8.00
8	⑧-2	细砂	23.4	230~250	16.00

表2  $p$ - $y$  曲线设计参数建议值

Table 2 Recommended design parameters of  $p$ - $y$  curve

编号	土层编号	土层名称	有效重度/ $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$	内摩擦角/ $(^\circ)$	不排水剪切 强度/ $\text{kPa}$	$\varepsilon_{50}$
1	①-2	淤泥	7.3	—	12	0.032
2	②	淤泥质粉质黏土	7.6	—	18	0.025
3	③-2	粉砂	9.0	29	—	—
4	④	粉砂	9.6	33	—	—
5	⑤	淤泥质粉质黏土	8.1	—	20	0.022
6	⑦-1	粉质黏土	8.8	—	35	0.015
7	⑦-2	粉质黏土	9.9	—	70	0.007
8	⑧-2	细砂	9.8	37	—	—

注： $\varepsilon_{50}$ —实验室进行原状样的不固结不排水压缩试验时，最大主应力差 1/2 时的轴向应变。

3 模型建立与结果分析

Zk01 试验桩实测加载点和泥面处水平荷载-位移( $H$ - $y$ )关系曲线如图 5、图 6 所示，水平静载试验采用单向单循环水平荷载法，试桩每级加载量按不小于 100 kN 控制，最大加载到 800 kN，试桩受力点实测位移为 476 mm，泥面处的位移为 89.8 mm。

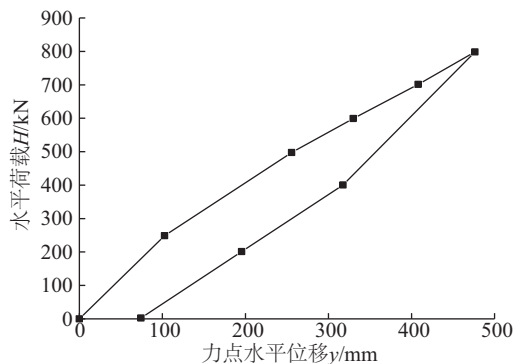


图5 Zk01 桩水平力试验  $H$ - $y$  关系曲线

Fig. 5  $H$ - $y$  curve of lateral test for pile ZK01

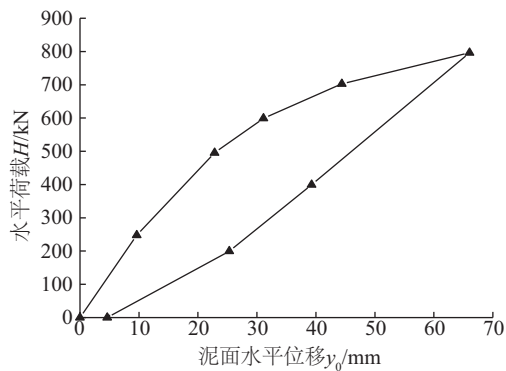


图6 Zk01 桩水平力试验  $H$ - $y_0$  关系曲线

Fig. 6  $H$ - $y_0$  curve of lateral test for pile ZK01

图 7 为实测的桩身弯矩曲线，由图 7 可知最大的桩身弯矩点高程约在-16.1 m，位于泥面以下 3 倍桩径的深度。试桩水平加载过程中，根据试桩自带的采集数据软件经弯矩积分求得每级荷载下的桩身水平位移如图 8 所示。

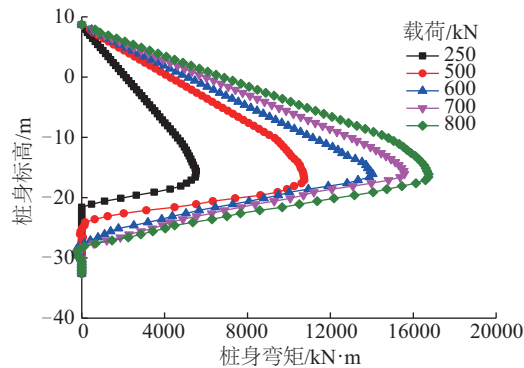


图7 桩身实测弯矩

Fig. 7 Measured bending moment of pile

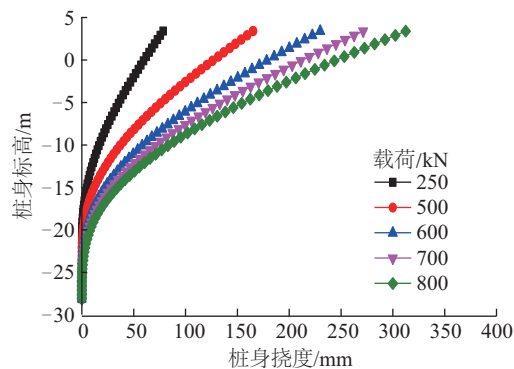


图8 Zk01 水平力试验桩身挠度  $y$  分布曲线

Fig. 8 Lateral displacement of test pile ZK01

本文采用 ANSYS 建立桩土相互的计算模型如



图9所示,桩采用 pipe 单元模拟, $m$ 法中土采用线性弹簧单元(combin14)模拟, $m$ 值按表1采用。按照《港口工程桩基规范》,当水平力为长期荷载时 $m$ 值应适当降低,根据《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008),表1中 $m$ 值乘以0.4降低采用即 $m$ 法(折减);API规范建议的 $p$ - $y$ 法中土采用非线性弹簧单元combin39进行模拟,并根据 $p$ - $y$ 曲线定义水平向弹簧的属性,计算时以1m为间隔,将地基土壤分成 $N$ 段,按表2中设计参数计算各土层的 $p$ - $y$ 曲线关系。

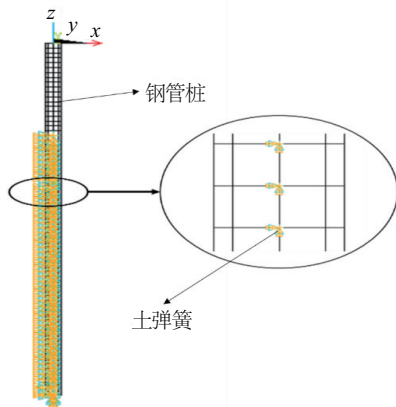


图9 结构有限元模型  
Fig. 9 Finite element model

图10为桩身最大弯矩的对比曲线,从图10中可看出 $m$ 法和 $m$ 法(折减)计算桩身最大弯矩几乎吻合,且与实测结果吻合的较好。 $p$ - $y$ 曲线法的计算结果与实测结果也较吻合,当水平荷载超过250 kN时,其计算桩身最大弯矩较实测结果偏大些。图11为加载点的荷载-位移曲线,从图11中可看出当水平荷载不超过250 kN时, $m$ 法计算的桩顶位移结果与实测结果吻合的很好, $m$ 法(折减)和 $p$ - $y$ 曲线法计算

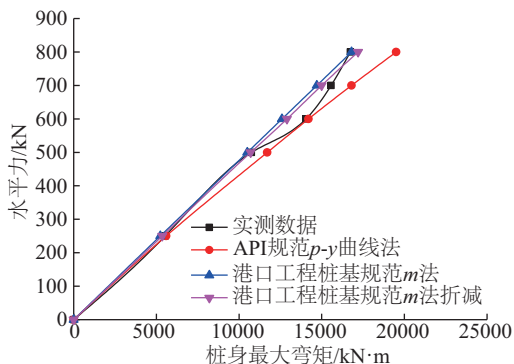


图10 Zk01桩身最大弯矩曲线  
Fig. 10 Maximum bending moment of pile Zk01

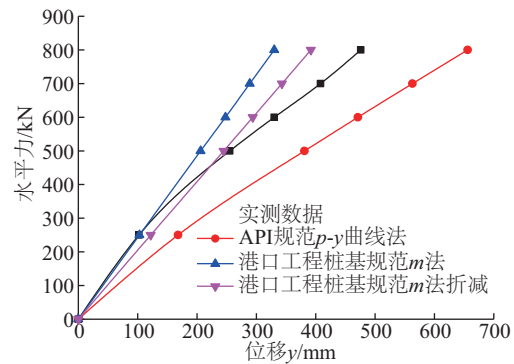


图11 Zk01桩顶荷载-位移曲线  
Fig. 11 Loading-displacement curve of pile Zk01 head

位移值都偏大,随着水平荷载的增加 $p$ - $y$ 曲线法计算的位移结果更大些;当水平荷载超过250 kN时, $m$ 法的计算位移值偏小, $p$ - $y$ 曲线计算的位移值偏大即更偏于保守, $m$ 折减法与实测值更吻合,但是当水平荷载增大到一定程度(图中大于500 kN)时, $m$ 折减法比实测值偏小,这时 $m$ 法和 $m$ 折减法偏于不安全,主要由于此时的土体已进入塑性阶段, $m$ 法和 $m$ 折减法依然按照弹性法计算土体的变形。

## 4 结论与建议

本文以响水1号试桩为例,开展了海上风电钢管桩基础水平单循环加载试验及其数值模拟研究,得出以下建议:

1) Zk01试桩受力点最大实测位移为476.0 mm,泥面处的位移为89.8 mm,最大弯矩点位于泥面以下3倍桩径的深度。

2) 针对响水海上风电项目采用设计提供的土层参数,根据API规范 $p$ - $y$ 曲线法计算位移值相比实测值偏大,计算结果偏于保守; $m$ 法在水平荷载较小时(即土体处于弹性阶段), $m$ 法计算的桩顶位移结果与实测结果更接近,随着水平荷载的增加 $m$ 法计算的位移值相比实测值偏小,偏于不安全;当荷载较大时, $m$ 折减法比实测值偏小,总体上 $m$ 折减法与实测值更接近。

3) 限于本文的研究只以响水1号试桩为例(图1),针对上述几种分析方法的对比研究尚需更多的试验数据和计算分析工作。

## [参考文献]

- [1] 朱照清, 龚维明, 戴国亮. 大直径钢管桩水平承载力现场试验研究[J]. 建筑科学, 2010, 26(9): 36—39.
- [1] Zhu Zhaoqing, Gong Weiming, Dai Guoliang. Field test research of horizontal bearing capacity of large diameter steel pipe pile[J]. Building Science, 2010, 26(9): 36—39.
- [2] 吴桐坤, 鲁子爱, 窦德功, 等. 海洋高桩水平承载特性模型试验及有限元分析[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(26): 7697—7702.
- [2] Wu Tongkun, Lu Ziai, Dou Degong, et al. Modal tests and finite element analysis of behaviors of ocean and offshore elevated piles under lateral load[J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(26): 7697—7702.
- [3] 龚维明, 霍少磊, 杨超, 等. 海上风力机大直径钢管桩基础水平承载特性试验研究[J]. 水利学报, 2015, (Sup 1): 34—39.
- [3] Gong Weiming, Huo Shaolei, Yang Chao, et al. Experimental study on horizontal bearing capacity of large diameter steel pipe pile for offshore wind farm[J]. Shuili Xuebao, 2015, (Sup 1): 34—39.
- [4] 邹彩云, 姜贞强, 罗金平. 桩土相互作用模拟方法对海上风力机整体结构模态分析的影响[J]. 水电能源科学, 2013, 31(1): 236—238.
- [4] Huan Caiyun, Jiang Zhenqiang, Luo Jinping. Influence of pile-soil interaction simulation method on modal analysis of offshore wind turbine structure[J]. Water Resources and Power, 2013, 31(1): 236—238.
- [5] SY/T 10030-2004. Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms—Working stress design[S].
- [6] DNV-OS-J101. Offshore standard DNV-OSJ101 Design of offshore wind turbine structures[S].
- [7] Reese L C, Welch R C. Lateral loading of deep foundation in stiff clay[J]. Journal of Geotechnical Engineering Division, American Society of Civil Engineers, 1975, 101(6): 633—649.
- [8] Cox W R, Reese L C, Grubbs B R. Field testing of laterally loaded piles in sand[A]. Proceedings of the Sixth Annual Offshore Technology Conference[C], Houston, Texas, 1974.
- [9] Sørensen S P H, Brødbæk K T, Møller M, et al. Evaluation of the load-displacement relationship for large diameter piles in sand[A]. Proceedings of The Twelfth International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing[C], Funchal, Madeira, Portugal, 2009.
- [10] 杨国平, 张志明. 对大变位条件下横向受力桩  $p-y$  曲线的研究[J]. 水运工程, 2002, (7): 40—45.
- [10] Yang Guoping, Zhang Zhiming. Research on  $p-y$  curve of laterall bearing piles under large displacement[J]. Port & Waterway Engineering, 2002, (7): 40—45.

## COMPARATIVE STUDY ON HORIZONTAL BEARING CAPACITY OF STEEL PIPE PILE FOR XIANGSHUI OFFSHORE WIND FARM

Zhai Endi<sup>1</sup>, Xu Haibin<sup>1,2</sup>, Guo Shengshan<sup>1</sup>, Jin Hua<sup>1</sup>, Du Xiuli<sup>2</sup>

(1. China Three Gorges Corporation, Beijing 100038, China; 2. The Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering, Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** The in-situ tests on lateral monotonic loading are performed for offshore large diameter pipe piles which diameter is 2 m based on Xiangshui offshore wind farm. Monopile model is established by ANSYS, comparative analysis between the test results and API curve,  $m$  method and  $m$  correction method of code for pile foundation of harbor engineering are carried out basing the soil parameters from designer. It is shown that the results of API  $p-y$  curve method is conservative, the results of  $m$  method and  $m$  correction method are non conservative, but the results of  $m$  correction method is agreed with the tests. More tests data and computational analysis are needed for the comparative study of the above methods needs

**Keywords:** offshore wind; bearing capacity; steel pipe pile;  $p-y$  curve;  $m$  method