

文章编号: 1000-7598 (2011)增刊 2-0115-07

海上风电机高桩基础关键参数试验研究

龚维明, 黄 挺, 戴国亮

(东南大学 土木学院, 南京 210096)

摘 要: 针对东海大桥近海风电场钢管桩高桩基础的相关工程参数开展了试验研究。通过水平静载荷现场试验测得了海上钢管直桩及斜桩的水平承载力, 并采用自平衡测试法测得了桩基的竖向承载力。对波流力作用下连接及未连接平台的钢管桩进行了测试, 获得了加速度时程曲线以及钢管桩固有频率。试验结果分析显示, 正斜桩的水平承载性能优于直桩和反斜桩; 钢管桩未连接平台时, 在波流作用下的位移明显大于连接平台后; 钢管桩的实测固有频率在 1.05~1.3 Hz 之间, 斜桩的固有频率略高于直桩。试验结果已直接应用于该工程高桩基础设计中。

关 键 词: 海上风机基础; 钢管桩; 关键参数; 现场试验; 承载力; 动力反应

中图分类号: TU 473.1

文献标识码: A

Experimental study of key parameters of high piled foundation for offshore wind turbine

GONG Wei-ming, HUANG Ting, DAI Guo-liang

(School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: In order to investigate the key parameters of high-piled foundation for Donghai Bridge offshore wind turbine, a series of field tests were conducted. The horizontal bearing capacity of offshore steel-pipe vertical pile and batter pile was achieved by the horizontal static load field test; and the vertical bearing capacity of pile was tested by the Osterberg method. The wave force on the steel-pipe pile which was connected and unconnected to the test platform was tested; and the acceleration versus time data and natural vibration frequency were obtained. The results show that the horizontal bearing capacity of the positive batter pile is better than that of the negative batter pile. When the pile is not connected to the test platform, the wave-induced displacement of pile is obviously greater than that of the pile connected to the test platform. The natural vibration frequency of steel-pipe pile is between 1.05 Hz and 1.3 Hz, among which the natural vibration frequency of batter pile is higher than that of vertical pile. The research results are applied to the design for high-piled foundation in this project.

Key words: foundation for offshore wind turbine; steel-pipe pile; key parameters; field test; bearing capacity; dynamic response

1 前 言

近年来, 我国海上风电场建设得到大力发展。但在设计建设过程中面临诸多问题, 例如在海上风机运行中基础需承受巨大的风机倾覆力矩和波浪、水流荷载, 且风机设备对基础的承载和变形有很高的要求^[1-3]。海工构筑物常采用斜桩基础, 由于承载性能与直桩存在区别, 一直来颇受学者关注: Meyerhof 等^[4]采用模型试验方法, 对斜桩以及直桩承受倾斜荷载或偏心荷载进行了研究, 并得到了一些经验公式; Zhang 等^[5]也通过模型试验方法研究

了斜桩承受水平荷载的; 吕凡任等^[6]假设地基土体为半无限弹性体, 从理论上分析了斜桩桩顶受任意平面荷载作用下的受力变形。Rahimi^[7]利用有限元模拟一个采用 21 根直桩与 4 根斜桩的码头结构, 研究斜桩布置位置不同造成的承载差异。Padrón^[8]则对斜桩深基础的动力特性进行了模拟研究。Chen^[9]等对两个在卡特里娜飓风中幸存的海洋结构的桩基础进行了调查, 认为直桩与斜桩共同发挥出的承载性能远超 API 的预期。

总体而言, 海上斜桩承载性能的试验研究较为缺乏, 无法为工程设计提供足够的参数支持。为

收稿日期: 2011-04-14

基金项目: 江苏省自然科学基金 (No. BK2008315)。

第一作者简介: 龚维明, 男, 1963 年生, 博士, 教授。主要从事地基基础的研究。E-mail: wmgong@seu.edu.cn

确保东海大桥近海风电场工程施工和风机运行的安全可靠,在工程实施前应对直桩、斜桩基础的水平、竖向承载特性及相关动力参数进行试验研究。

2 工程概况

东海大桥近海风电场位于上海市东海大桥东部海域,距岸线 8~13 km,总装机容量 102 MW。其高桩混凝土承台采用 C45 的高性能海工混凝土。基础结构底面高程为 0.50 m(国家 85 高程,下同),基础封底混凝土底面高程为-0.30 m。基础顶面高程为 5.00 m。每个基础设置 8 根直径为 1.70 m 的钢管桩,采用 6:1 的斜桩。桩顶高程为 2.20 m,桩底高程为-75.00 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,上段管壁厚为 30 mm,下段管壁厚度为 20 mm。

2.1 试桩参数

该工程试桩共 4 根,2 根直桩,2 根 6:1 斜桩。其中,两根斜桩-30.00 m 高程以上桩身内填灌 C30 混凝土。试桩于 2008 年 7 月施工(锤击)完成,经检测施工质量符合工程要求。试桩其他参数见表 1。现场采用正方形布桩,桩顶高程为 7.10 m,桩顶桩中心距为 6 m,详情见图 1。

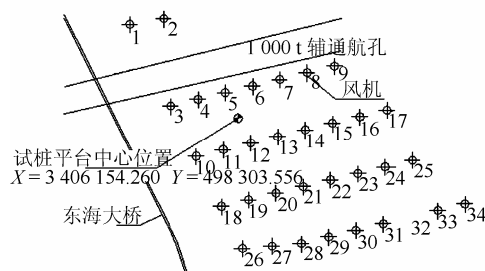
表 1 钢管试桩参数
Table 1 Parameters of steel-pipe piles

试桩号	桩长/m	桩型	泥面标高/m	桩顶标高/m	桩底标高/m
Px1	83.2	正斜	-11.00	+7.10	-75.00
Px2	83.2	反斜	-11.00	+7.10	-75.00
Pz1	82.1	直桩	-11.00	+7.10	-75.00
Pz2	82.1	直桩	-11.00	+7.10	-75.00

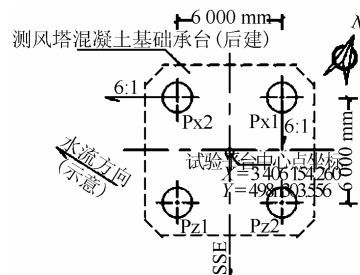
2.2 地质条件

工程区位于南汇区海域,海底较平缓,海底滩面高程在-10.00~-12.87 m,滩地表层主要为淤泥,局部夹薄层粉土。未发现深大断裂和活动性断裂通过,区域构造稳定性较好。

本场地最大勘探揭露深度为 80.45 m,揭露的地基土层按地质时代、成因类型、土性和物理力学性质的差异可分为 7 个大层,根据场地地层特性及分布将本场地分为 I、II、III 3 个工程地质区,本次试桩位于 II 区。II 区(古河道,缺失第⑥层,有第⑤③层分布):上部为饱和的软弱黏性土;标高约-31.5 m 有第⑤③层分布,厚度 3.0~22.5 m;第⑦层顶部约-38.5 m,厚度约 40 m,⑦2 标贯击数大于 50 击,标贯击数随深度增大;往下即为第⑨层,呈密实状态,低压缩性。试桩桩端持力层为⑦2-2 为



(a) 试验平台位置图



(b) 试验桩位俯视图



(c) 试验平台

图 1 试验现场布置
Fig.1 Test site layout

粉细砂,密实,低等压缩性,颗粒均匀,砂质纯。详细的土层分布及相关物理参数见表 2。

工程区海水对混凝土结构有结晶分解复合类弱腐蚀性,对钢筋混凝土中钢筋长期浸水为弱腐蚀性,对钢筋混凝土中钢筋在干湿交替时为强腐蚀性,对钢结构具有中等腐蚀性。

根据国家标准《建筑抗震设计规范》(GB50011-2001)对建筑场地的划分标准,本建筑场地属于 IV 类,场区地震加速度值为 0.10g,相对应的地震基本烈度为 VII 度。本场地不存在地震液化问题。

2.3 水文资料

本场地相应设计高潮位为 2.55 m,设计低潮位为-2.09 m。本区域潮流呈往复流,涨潮流主要方向为 270°左右,落潮流方向为 100°左右;落潮平均流速稍大于涨潮平均流速,涨潮最大流速稍大于落潮最大流速。本海区设计潮流流速见表 3。

表 2 地质资料
Table 2 Geological conditions

土层 编号	土层 名称	顶面高程 /m	层厚 /m	预估侧阻力 /kPa	压缩模量 /MPa	孔隙比	重度 /(kN/m ³)	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /(°)	标贯/ N 击
①	淤泥	-11.00	0.40	0						
③	淤泥质粉质黏土	-11.40	3.60	10	3.18	1.220	17.4	13	19.0	0.7
④1	淤泥质黏土	-15.00	9.10	15	2.13	1.454	16.7	13	10.5	1.6
④3	淤泥质粉质黏土	-24.10	4.10	25	3.21	1.194	17.3	13	18.0	3.8
⑤3	黏土	-28.20	10.60	40	2.91	1.244	17.2	16	14.0	5.7
⑦1-2	粉砂	-38.80	9.40	80	15.48	0.756	19.0	0	34.0	43.6
⑦2-1	粉砂	-48.20	17.80	100	15.89	0.700	19.3	0	33.5	59.0
⑦2-2	粉细砂	-66.00	25.35	110	15.85	0.625	19.8	0	34.0	64.0

表 3 设计潮流流速
Table 3 Design current velocity

表层		中层		底层		平均值	
流速 /(cm/s)	流向 /(°)	流速 /(cm/s)	流向 /(°)	流速 /(cm/s)	流向 /(°)	流速 /(cm/s)	流向 /(°)
315	72	257	72	148	67	239	70

本海域波浪以风浪以及风、涌兼俱的混合浪为主，纯涌浪出现频率较低。本海域设计波浪要素见表 4。

表 4 设计波浪要素
Table 4 Design wave parameters

平均波高 /m	波周期 /s	波长 /m	波速 /(m/s)	H _{1%} /m	H _{4%} /m	H _{5%} /m	H _{13%} /m
2.83	7.76	74.1	9.55	5.81	5.06	4.92	4.24

3 钢管桩水平承载力现场试验研究

3.1 试验方法

使用中型卧式千斤顶（YXYG340-363）分别对 Px1、Px2、Pz1 3 根单桩施加水平荷载。试验中未测试的 3 根试桩与试验平台连接，试验桩的水平反力则由其余 3 根桩及测试平台共同提供，其中 Px2 桩水平试验布置见图 2。同理对 Px1 和 Pz1 试桩进行水平加载试验。

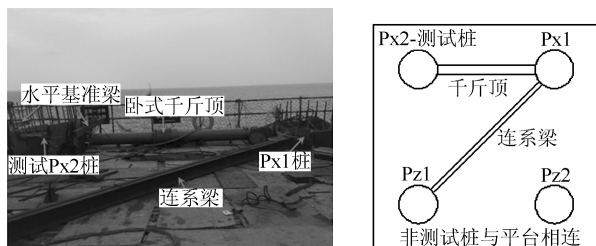


图 2 Px2 桩水平静载试验布置
Fig.2 Layout of horizontal static load test on pile Px2

试验采用单向单循环水平维持荷载法，依据《港口工程桩基规范》（JTJ 254-98）^[10]，试验加载

共进行 15 级，最大加载值为 300 kN，卸载分 7 级，卸载取 2 倍加载级。加载每级维持 20 min，卸载每级维持 10 min，每隔 5 min 测读一次。在某级荷载下，横向变形急剧增加、变形速率明显加快时终止加载。

在试验进行中，采用量程为 50 mm（可调）电子位移传感器（YBD-50）测量水平位移，共 4 只，主要测量单桩作用力的水平面水平位移以及水平面上 50 cm 处水平位移。并架设位移百分表用以校核电子数据。桩身应变则通过在钢管外壁沿深度布置应变计（见图 3）获得。



图 3 钢管桩应变计布置
Fig.3 Layout of strain gauge on steel-pipe pile

3.2 试验结果及分析

测试过程天气以晴天为主，气温 32℃~38℃左右，海风 3~4 级，浪高 0.5~1.5 m。所检桩周围 10 m 范围内无较大震动，现场测试环境符合测试要求。

当加载至第 15 级荷载（300 kN）时，Px1、Px2 及 Pz1 试桩受力点水平向位移分别 226.14、263.25、262.25 mm，此时位移达到量程的极限，无法继续加载，故停止加载。卸载完后，3 桩残余实测变形为 61.33、71.43 和 79.11 mm。实测的荷载-位移曲线见图 4。

在对于桩身水平位移的研究中，由于长桩的侧斜管理设难度大，系统误差也大，因而将会引起较

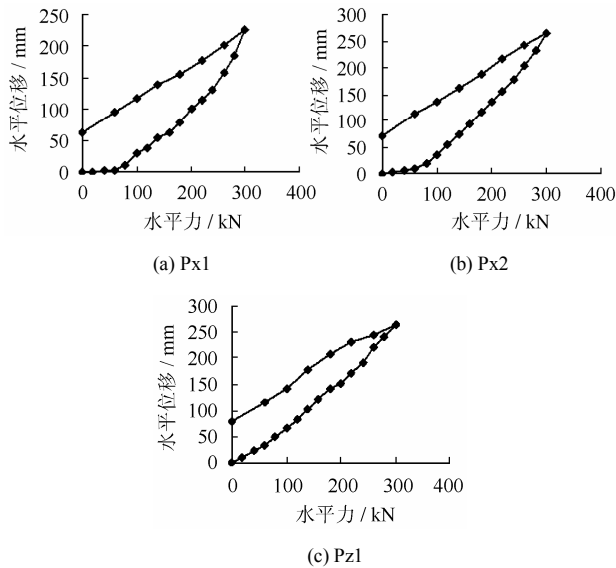


图4 水平静载试验荷载-位移曲线
Fig.4 Load-displacement curves of horizontal static load test

大的量测误差。利用应变计测得各断面的弯曲应变来推算桩轴线的挠曲变形, 具体方法见下。

设各相邻测试断面间弯矩应变按直线分布, 即差分段内离 i 节点距离为 x 处的应变为

$$\Delta\varepsilon = \Delta\varepsilon_i + (\Delta\varepsilon_{i+1} - \Delta\varepsilon_i)x / l_i \quad (1)$$

由材料力学得知:

$$EI(d^2 y / dx^2) = -M = -EI\Delta\varepsilon / b_0 \quad (2)$$

将式(1)代入式(2), 分别积分1次、2次得各断面转角及位移:

$$\theta_{i+1} = \theta_i - (\Delta\varepsilon_{i+1} + \Delta\varepsilon_i)l_i / 2b_0 \quad (3)$$

$$y_{i+1} = y_i + \theta_i l_i - (\Delta\varepsilon_{i+1} + 2\Delta\varepsilon_i)l_i^2 / 6b_0 \quad (4)$$

式中: EI 为桩的抗弯刚度; b_0 为测试断面2测点之间的间距; $\Delta\varepsilon_i$ 、 $\Delta\varepsilon_{i+1}$ 分别为 i 、 $i+1$ 断面弯曲应变; θ_i 、 θ_{i+1} 为分别为 i 、 $i+1$ 断面转角; y_i 、 y_{i+1} 分别为 i 、 $i+1$ 断面横向位移; l_i 为 i 单元的长度。

试桩为长桩, 以实测应变0处为积分起点, 其初始位移和转角可认为0, 挠度求至泥面位置。泥面标高为-11.00 m以上, 由于钢筋计布点较少, 波浪、水流和潮位等因素对斜桩的影响较大, 挠度计算会有较大误差, 因此, 泥面以上的挠度不予给出。泥面下桩身水平位移沿深度分布见图5, 试桩Px1、Px2、泥面处最大位移分别为13.63、18.96 mm。

从荷载与桩身位移的关系曲线上来看, 3根试桩的水平承载能力存在差异。其中, 正斜桩Px1的水平承载性能优于反斜桩Px2与直桩Pz1。考虑到直桩的钢管内未灌注混凝土, 自身刚度较小, 所以在同等条件下直桩水平承载性能应优于反斜桩。

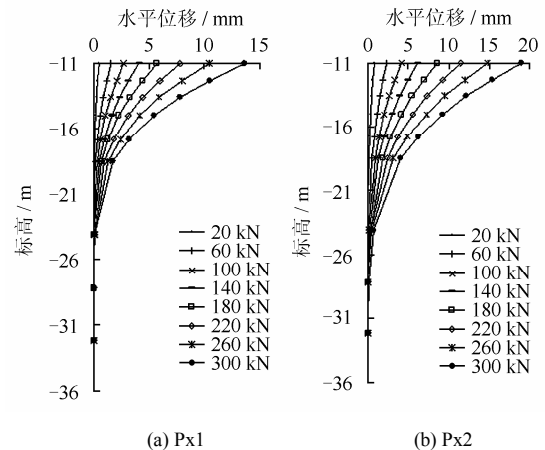
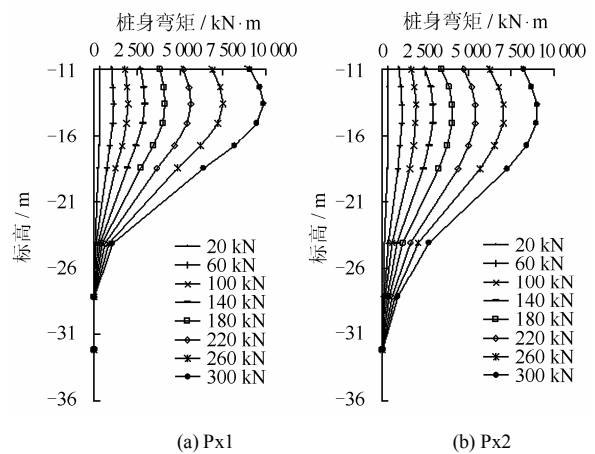


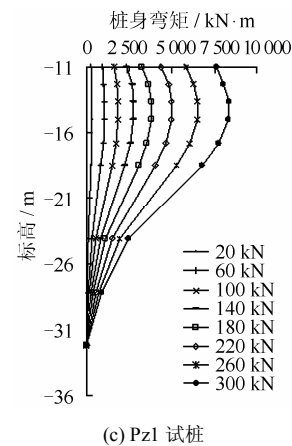
图5 桩身水平位移

Fig.5 Piles' horizontal displacements



(a) Px1

(b) Px2



(c) Pz1 试桩

图6 桩身弯矩图

Fig.6 Bending moment diagrams of test piles

根据实测的桩身应变值, 计算得到了泥面以下的桩身弯矩, 如图6所示。由图可知, 3根试桩的最大弯矩均在标高为-13.6 m左右处, 随着加载水平的提高, 正斜桩弯矩最大, 反斜桩其次, 直桩最小。由弯矩与土抗力的微分关系可知, 正斜桩的土抗力也最大。

m 法计算中水平地基系数随深度增长的比例系数 m 的取值对计算的影响较大, 实际工程设计中选

择合适的 m 值十分重要。现通过水平试验结果反推 m 值。

由于水平荷载作用在泥面以上, 将在桩身泥面处产生附加弯矩, 规范^[10]公式没有考虑附加弯矩对 m 值的影响, 应按文献^[11]方法迭代计算。求得的结果见图 7。

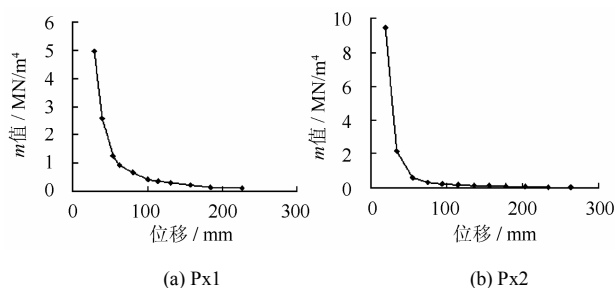


图 7 m 值-位移曲线
Fig.7 m value-displacement curves

可见 m 值随着桩顶水平位移的增大近似呈双曲线减小。建议通过水平试验确定的 m 值以求得试桩相应的弯矩分布图, 并与实测弯矩图比较, 取弯矩最接近实际情况时相应的 m 值作为分析本地区工程桩受力特性的依据。

4 钢管桩竖向承载力现场试验研究

4.1 试验方法

对该工程试桩 Pz1、Pz2 采用自平衡法^[12-13]进行竖向静载试验, 其荷载箱标高分别为 -59.67 m 和 -57.05 m。

测试按《港口工程桩基规范》及《桩承载力自平衡测试技术规程》^[14]进行。桩顶及荷载箱位移由电子位移传感器量测, 桩身轴力用应变计量测。

4.2 试验结果及分析

测试过程天气以晴天为主, 气温 33℃~38℃左右, 所检桩周围 10 m 范围内无较大震动, 现场测试环境符合测试要求。

自平衡荷载-位移曲线实测结果如图 8 所示, Pz2 在各级荷载下的桩身轴力如图 9 所示。采用精确转换法对自平衡测试结果进行转化, 得到试桩等

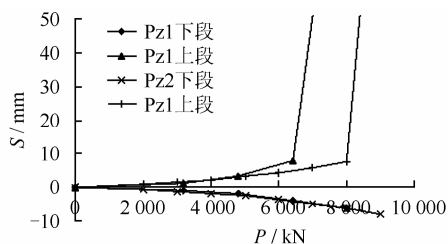


图 8 自平衡试验曲线
Fig.8 Self-balanced load test curves

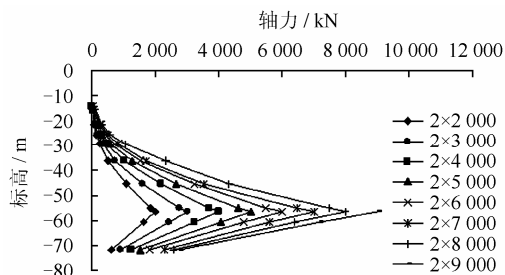


图 9 PZ2 轴力图
Fig.9 Axial force test curves of PZ2

效桩顶荷载-位移曲线, 如图 10。图 11 则为实测的桩端阻力与位移关系曲线。

根据规程^[14], 得到 Pz1 试桩极限抗压承载力为 15 939 kN, 相应位移为 49.76 mm; Pz2 试桩极限抗压承载力为 19 090 kN, 相应位移为 58.32 mm。其中, Pz1、Pz2 试桩的桩端阻力分别为 2 207 kN 和 2 755 kN, 对应的桩端位移分别为 3.59 mm 和 5.09 mm。端阻力、侧摩阻力所占抗压极限承载力的比例见表 5。

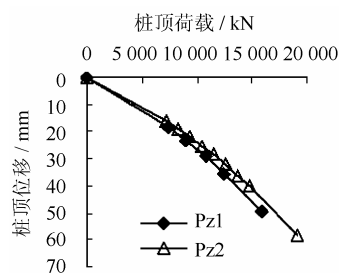


图 10 等效桩顶荷载-位移图
Fig.10 Equivalent load-displacement curves

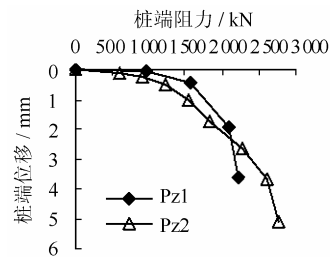


图 11 桩端阻力-位移图
Fig.11 Tip resistance-displacement curves

表 5 极限承载力构成表

Table 5 Composition of limiting bearing capacity

试桩编号	桩侧摩阻力		桩端阻力	
	数值/kN	比例/%	数值/kN	比例/%
Pz1	13 733	86.16	2 207	13.84
Pz2	16 335	85.57	2 755	14.43

5 钢管桩动力响应现场试验研究

5.1 试验方法

在结构动力响应研究中, 可基于结构的加速度

响应推算结构的其他响应。现场采用在试桩桩顶沿桩周均匀布置 8 个 941 型加速度传感器的方式,如图 12 所示,对波流力作用下钢管桩的动态响应(桩顶加速度和振动频率)进行测试。其他主要仪器还有:采集仪、放大器、动态信号测试分析系统、计算机等。

实际工程中钢管桩在波流力作用下产生动力损害,是发生在钢管单桩施加横向支撑之前,因此,试验分别对与平台相连和脱离时的试桩进行测试。测试时首先对与平台相连的钢管桩进行测试,测得其在波浪作用下的动态反应。测试完成后,通过切割将桩与平台脱离,对独立桩进行测试。综合考虑安全、实际操作和试验内容等因素,试验选择在平潮阶段进行。

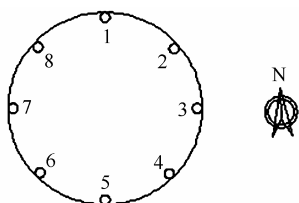


图 12 通道编号及布置

Fig.12 Channel number and arrangement

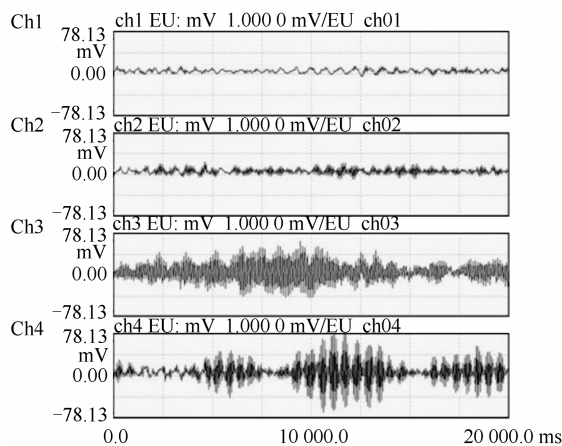


图 13 Px2 桩通道 1-4 加速度时程曲线

Fig.13 Acceleration versus time data of Px2 pile from 1-4 channels

5.2 试验结果及分析

图 13 为部分实测的加速度时程曲线。对测得的加速度进行 2 次积分,可以得到在波浪单独作用下桩顶的位移值。对积分所得的位移数据进行整理,去除其中因各种误差产生的峰值,得到结果如表 6 所示。

将各个方向位移矢量叠加,得到沿潮流方向,连接平台和未连接平台的各桩桩顶位移如表 7 所示。

表 6 桩与平台脱离(独立)或连接时试桩各通道位移有效值(单位: mm)

Table 6 Effective values of channel on non-independent (independent) pile (unit: mm)

连接情况	桩号	通道							
		1	2	3	4	5	6	7	8
与平台脱离(独立)	Pz1	2.5	2.5	1.8	5.7	2.1	2.3	2.8	6.2
	Pz2	2.2	2.4	1.9	5.8	2.0	2.4	2.6	6.0
	Px1	1.6	1.7	1.3	4.9	1.5	1.6	1.4	4.7
	Px2	1.8	1.6	1.4	4.9	1.6	1.4	1.5	4.8
与平台相连接	Pz1	1.1	1.4	1.2	2.1	1.2	1.3	1.9	1.1
	Pz2	1.2	1.2	1.1	2	1.3	1.1	2.1	1.2
	Px1	1.3	1.1	1.1	1.8	1.2	1.2	1.9	1.0
	Px2	1.1	1.2	1.2	1.9	1.2	1.1	1.8	1.3

表 7 沿流向各试桩桩顶位移(单位: mm)

Table 7 Downstream-displacements of pile top (unit: mm)

连接情况	桩号			
	Pz1	Pz2	Px1	Px2
与平台脱离	9.202	8.975	6.850	7.077
与平台连接	3.509	3.615	3.344	3.474

从实测结果可以看出,钢管桩与平台连接后,在波浪作用下的位移远小于连接前,安全性得到很大提高。实际施工过程中应尽量减少单桩(未横向连接)的存在时间。

根据加速度传感器测得的频谱图,利用模态频率统计平均法可计算模态参数频率。表 8 为 Px1 试桩的频率统计,其中 1.3 Hz 出现次数最多($n = 6.22$),所以所测的 Px1 试桩固有频率为 1.3 Hz。

表 8 Px1 桩取数频率统计

Table 8 Frequency statistics of pile Px1

通道号	频率/Hz				
	1.3	10.8	11.2	12.5	13.55
1	0.61	0.68	0.34	0.41	0.23
2	0.61	1.1	0.25	0.1	0.07
3	1.06	1.86	0.56	0.18	0.15
4	1.32	0.74	2.66	0.16	0.11
5	0.68	0.47	0.69	1.89	0.86
6	0.38	0.1	0.12	0.72	0.22
7	0.65	0.13	0.19	0.25	1.79
8	0.91	0.07	1.07	0.52	0.17
出现次数和	6.22	5.06	5.88	4.23	3.6

根据同样方法可以确定 Px2、Pz1 和 Pz2 的固有频率分别为 1.3、1.15 Hz 和 1.05 Hz。

现场试验结果显示,海洋结构的振动频率在振动过程中是变化的。同一次测试的数据样本不同时段的分析结果不同,不同时段上的响应频率是不同的。一般来说,固有频率只与结构和边界条件有关,

与环境激励无关。但由于流体的黏性, 波浪对桩的刚度可能会产生影响, 使得桩固有频率发生变化。4 根试桩的固有频率在 1.05~1.3 Hz 之间。其中, 斜桩的固有频率略高于直桩。

6 结 论

(1) 针对东海大桥风电场高桩基础展开研究, 通过现场水平、竖向静载荷试验以及动力测试, 获得了海上钢管直、斜桩的承载力、固有频率等关键工程参数。试验结果可以直接应用于该工程高桩基础设计中。

(2) 从荷载-位移曲线来看, 3 根试桩的水平承载能力存在差异。其中, 正斜桩的水平承载性能优于直桩与斜桩。随着加载水平的提高, 正斜桩的实测弯矩最大, 表明其获得的土抗力最多。

(3) 钢管桩未与平台连接时, 在波流作用下的位移明显大于连接后, 故实际施工过程中应尽量减少单桩(未横向连接)的存在时间。4 根钢管桩的固有频率在 1.05~1.3 Hz 之间。其中, 斜桩的固有频率略高于直桩。

参 考 文 献

- [1] ZAMBRANO T, MACCREADY T, KICENIUK T, et al. Dynamic modeling of deepwater offshore wind turbine structures in Gulf of Mexico storm conditions[C]//Proceedings of 25th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. Hamburg: [s. n.], 2006.
- [2] KIMON A, MARCUS K. Interaction of load analysis and structural design of offshore wind turbines[C]//Proceedings of 25th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. Hamburg: [s. n.], 2006.
- [3] BARBARO G, IERINO B, MARTINO M C. Maximum force produced by wind generated waves on offshore maritime structures[C]//Proceedings of the 26th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. San Diego: [s. n.], 2007.
- [4] MEYERHOF G G. Behaviour of pile foundations under special loading conditions: 1994 R. M. Hardy keynote address[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1995, 32: 204—222.
- [5] ZHANG L M, MICHAEL C, LAI P W. Centrifuge modeling of laterally loaded single battered piles in sands[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1999, 36: 1074—1084.
- [6] 吕凡任, 陈云敏, 陈仁朋, 等. 任意倾角斜桩承受任意平面荷载的弹性分析[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2004, 38(2): 191—194.
LÜ Fan-ren, CHEN Yun-min, CHEN Ren-peng, et al. Analysis of batter pile under arbitrary inclined loads in semi-infinite solid[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2004, 38(2): 191—194.
- [7] RAHIMI M R, BARGI K. Efficient arrangement of batter piles of a pile-supported wharf in sand[J]. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, 15: 1—10.
- [8] PADRÓN L A, AZNÁREZ J J, MAESO O, et al. Dynamic stiffness of deep foundations with inclined piles[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2010, 39(12): 1343—1367.
- [9] CHEN J Y, MATEREK B A, CARPENTER J F, et al. Analyses of pile capacity for offshore structures in Hurricane Katrina[C]//Proceedings of Selected Papers of the 2009 International Foundation Congress and Equipment Expo. Orlando: [s. n.], 2009.
- [10] 中华人民共和国交通部. JTJ254-98 港口工程桩基规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 1998.
- [11] 桩基工程手册编写委员会. 桩基工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1995.
- [12] OSTERBERG J. New device for load testing driven piles and drilled shaft separates friction and end bearing[J]. *Piling and Deep Foundations*, 1989, 1: 421—427.
- [13] 龚维明, 戴国亮, 蒋永生, 等. 桩承载力自平衡测试理论与实践[J]. *建筑结构学报*, 2002, 23(1): 82—88.
GONG Wei-ming, DAI Guo-liang, JIANG Yong-sheng, et al. The theory and practice of self-balanced test[J]. *The Journal of Architecture Structure*, 2002, 23(1): 82—88.
- [14] 江苏省建设厅. DGJ32/TJ77-2009 基桩自平衡法静载试验技术规程[S]. 南京: 江苏科学技术出版社, 2009.