

加装稳定翼的海上风电大直径单桩基础数值仿真

李 炜, 郑永明, 孙杏建, 罗金平, 赵生校

(中国水电顾问集团华东勘测设计研究院, 浙江 杭州 310014)

摘要: 针对海上风电机组大直径单桩基础水平位移不易控制等问题, 提出了一种加装稳定翼的单桩结构型式. 通过在近地表(泥面)一定范围内的桩身设置一组翼板, 充分利用浅层桩前土的抗力, 增强了基桩水平承载性能. 借助数值仿真计算结果, 采用指数拟合法、四阶多项式拟合法对水平荷载与基桩水平位移关系进行拟合, 进而求解单桩水平极限承载力. 结果表明, 四阶多项式拟合法精度更高; 加装稳定翼的单桩水平位移及桩身最大弯矩明显降低, 单桩水平极限承载力显著增强, 稳定翼安装位置会对基桩水平承载力的提高效果产生影响. 该结构形式可推广到其他海上风电基础结构小直径钢管桩的桩型改良中, 有利于减小相应的材料成本及施工成本.

关 键 词: 海上风电; 单桩; 稳定翼; 水平承载力

中图分类号: TU473.1

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2012)03-0056-08

在海上风电场的建设中, 基础结构是重中之重, 主要有以下三方面特点: 一是基础结构的成本占总造价的比例较高; 二是结构型式多样(高、低桩承台, 多桩导管架, 单桩等); 三是所处环境复杂(风、浪、流等动力循环荷载作用).

单桩基础通常由单根大直径钢管构成, 下部深入土中, 提供承载力; 中部浸于水中承受波浪、海流、潮汐等长期循环作用; 上部通过连接段与风机塔筒相连. 单桩基础是桩承基础结构中最简单的一种形式, 也是目前欧洲海上风电场的主导基础结构型式^[1-4].

单桩基础主要承受风、浪、流等水平荷载作用, 在设计中需要重点考虑其水平承载性能. 由于其整体刚度相对较小(“较柔”), 作为常规控制因素的桩身位移等往往较大, 且结构动力响应较大, 容易在风、浪、流等动力荷载的长期作用下产生疲劳损伤甚至失效. 如果单纯从加大桩径、壁厚或者采用变桩径等方面来调整桩身性能, 则可能使成本过量增加, 且增加沉桩施工难度.

桩的水平承载性能主要由桩的抗弯能力和桩侧土抗力控制, 而桩侧土抗力大部分由近地表的浅层土发挥, 鉴于此, 本研究给出了一种加装稳定翼的海上风电大直径单桩基础型式(已申请专利, 以下称为加翼单桩). 通过在常规单桩近地表范围内设置稳定翼, 使浅层土的抗力得到充分发挥, 由此对桩身位移、弯矩等进行控制, 提高基桩的水平承载性能, 降低基桩在动荷载作用下的动力响应.

本文借助数值模拟的结果, 分别采用指数模式、四阶多项式模式对水平荷载与基桩水平位移的关系进行了拟合, 进而求解基桩水平极限承载力^[4-8].

1 加翼单桩

1.1 基本构造

加翼单桩结构布置及细部构造见图1, 图中1为单桩; 2为稳定翼; 3为抛石防护; 4为稳定翼内侧(与单

收稿日期: 2011-09-22

基金项目: 中国水电顾问集团华东勘测设计研究院立项课题: 1. 海上风电基础结构关键技术研究(KY2010-02-19);
2. 海上风电基础结构动力响应及疲劳寿命分析(KY2011-02-07-02)

作者简介: 李 炜(1981-), 男, 山东淄博人, 高级工程师, 博士, 主要从事海上风电基础桩土作用及结构疲劳方面的研究. E-mail: li_w@ecidi.com

桩连接一侧);5 为稳定翼外侧;6 为加强支撑构件; L 为稳定翼长度; W 为稳定翼宽度; h 为稳定翼上缘距离计算泥面深度; θ_1 为减阻角(降低沉桩阻力); θ_2 为减缓应力集中坡角(降低应力集中)。

沉桩前,在预计的单桩近地表(海床泥面以下)一定范围内设置一组(4 个)钢板(稳定翼),以基桩为中心呈放射状以 90° 夹角布置,长度(L)方向与基桩轴向平行,宽度(W)方向与基桩轴向垂直,即钢板面法向与基桩轴线方向正交。单桩对冲刷较为敏感,翼板设计时应考虑冲刷影响。

考虑到沉桩过程中稳定翼入土时所受阻力,在稳定翼与单桩连接处增设加强支撑构件;并对稳定翼先入泥一侧翼缘进行坡度化处理(设置减阻角 θ_1);考虑到稳定翼上翼缘与单桩连接处会出现应力集中,可在此增设减缓应力集中坡脚(θ_2)。

1.2 结构说明及实施方式

单桩主体部分与常规海上风电单桩基础的钢管桩无异;稳定翼为与基桩同材质的钢材(例如 Q345C);以上缘距离地表距离(h)定位,以长度(L)、宽度(W)、厚度(T)等几何尺寸定型。其中:稳定翼上缘原则上与地表(泥面)齐平。实际设计中,考虑冲刷影响,可从冲刷后泥面计(取 $h>0$)或考虑翼板的裕量;稳定翼厚度(T)可选与基桩壁厚等同或略微加大;鉴于单桩本身桩径已较大及翼板所增加的沉桩阻力,建议稳定翼宽度(W)以基桩桩径(D)为参照,取 $D/2 \leq W \leq D$,当应用于其他小直径桩,且沉桩能力允许时,可考虑宽度适当加大;稳定翼长度(L)也以基桩桩径(D)为参照,取 $D \leq L \leq 3D$ 。同时,上述 4 个指标(h, L, W, T)的具体取值,需根据有限元计算并配合试验进行调整或优化。

本研究中加翼单桩的具体实施方式如下:

(1) 预制及加工 包括选材、选型、加工和装配等环节。需注意的是:具体设计时需配合有限元计算、试验等手段进行优化选型。

(2) 沉桩施工 沉桩施工与无稳定翼的普通单桩相同,在沉桩后期,稳定翼的入泥会增加沉桩阻力,因此,需对打桩锤击力等进行适当调整。

(3) 上部构件施工 由于沉桩施工完成后稳定翼位于泥面以下,因此不会对上部结构的施工及海床处的抛石处理等造成任何影响。对于出现冲刷后翼板出露的情况,应注意避免抛石对翼板的损坏。

1.3 有益效果

加翼单桩有益效果可以总结为:

(1) 单桩整体较柔,自振频率易低于允许频率域的下限,翼板的设置增强了单桩近地表段刚度,可在一定程度上提高结构整体固有频率;

(2) 充分发挥近地表浅层桩前土的抗力,增强基桩水平承载性能;

(3) 达到与无稳定翼普通基桩同等的水平承载力,加装稳定翼的基桩桩长或桩径可以减小,钢材用量明显减少,相应的材料、施工成本得以降低;

(4) 不会影响沉桩施工,且由于沉桩后稳定翼位于海床泥面以下,因此不会对上部结构的安装、海床的必要抛石处理等产生影响;

(5) 对于控制表层冲刷具有一定的积极效果。

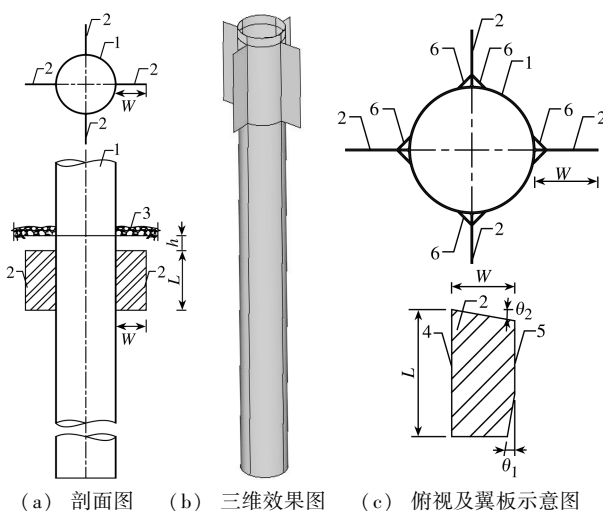


图1 基本构造示意图

Fig. 1 Basic structure

2 水平承载力计算

假设基桩受到水平荷载(H_0)作用,产生的相应桩身位移(X_0)可表示为: $X_0 = f(H_0)$ (1)

由此,曲率计算式可写为: $K = \frac{|X_0''|}{(1 + (X_0')^2)^{3/2}}$ (2)

通过解 $dK/dH_0 = 0$ 可得其数学意义上的理论极值(实际工程应用中,需要对求解结果进行校核).文献[9]给出的 H_0 与 X_0 的指数关系模式: $X_0 = c \exp(dH_0)$ (3)

水平极限承载力解析解为: $H_U = -\ln[2(cd)^2]/2d$ (4)

假定 H_0 与 X_0 为多项式关系模式,例如可假设 $X_0 = aH_0^4 + bH_0^3 + cH_0^2 + dH_0 + e$.

3 加翼单桩效果检验

3.1 数值仿真及研究内容

以假定的某海上风电场大直径单桩基础为例,进行数值仿真计算,以验证单桩加翼后效果.假定单桩基础为直径 $D=6$ m(壁厚 $t=70$ mm)的大直径钢管桩,入土 50 m.

3.1.1 静力分析 按最不利加载方向分析:取 $L=1.5D$, $W=D/2$, $T=t$,埋深 $h=0$;加载方向如图 2 所示,分为 0° 和 45° 两种.按埋深影响作用分析,取 $L=1.5D$, $W=D/2$, $T=t$,埋深 $h=0, 3$ 和 6 m;按翼板长度影响作用分析,取 $L=D$ 和 $1.5D$, $W=D/2$, $T=t$,埋深 $h=0$;按翼板宽度影响作用分析,则取 $L=1.5D$, $W=D/2, D, T=t$,埋深 $h=0$.

3.1.2 动力分析 有模态分析、谐响应分析、瞬态分析和波浪谱分析.为采用上述单桩水平极限承载力计算理论及计算式,研究中仿效水平载荷试验过程进行数值模拟,进而获取水平荷载 H_0 与相应位置桩身水平位移 X_0 的数据.其中,桩、土模型采用实体建模.土体选取 DP 本构模型.水平荷载 H_0 取 $(0.1 \sim 22)$ MN 递增.

3.2 计算结果比较

3.2.1 静力分析(水平载荷试验仿真) 数值仿真所得 H_0-X_0 关系曲线见图 3.可见,对于图 2 所示的两种加载方向而言,同桩型、同级荷载作用下, 0° 加载方式产生的位移较大,从而判断该加载方向对于结构最不利;加翼能够显著减小基桩水平位移,这种效果在荷载较大时最明显,稳定翼与土的接触面积越大,土压力的利用率越大,降低位移作用越明显;稳定翼设置过深则效果不甚明显.

提取 3 MN 和 17 MN 两节荷载作用下的土中桩体桩身位移、弯矩随深度变化曲线($Y-z$ 曲线和 $M-z$ 曲线)如图 4.

从图 4(a)可见,桩身位移最大值出现在泥面位置,沿深度方向递减,至 $3D=18$ m 左右出现第 1 零点,且负向反弯,至 $6D=36$ m 出现第 2 零点,且其下深度处桩身位移为零.

加翼后,翼板影响范围内的浅层土中桩身位移降低,降低最为显著的是泥面位移,在翼板影响范围以下,桩身位移几乎无影响;其中翼板参数的影响规律为:翼板长度(L)或宽度(W)越大,桩身位移减小幅度越大,原因是 L 或 W 的增加使得桩-土接触面积增加,桩前土压力得到充分发挥,但在实际设计中要充分考虑施工中翼板对沉桩阻力的增加以及可能出现的屈曲破坏,建议取值范围: $D \leq L \leq 3D$; $D/2 \leq W \leq D$;翼板以充分发挥浅层土的土抗力为主,因此,当翼板的设置深度增加时,其作用效果将明显降低.以本例而言,当 $h=3$ 和 6 m 时,翼板对于桩身位移的降低幅度非常有限.

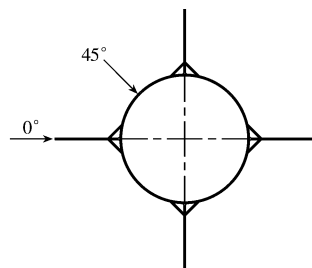


图2 加载方向
Fig. 2 Direction of H_0

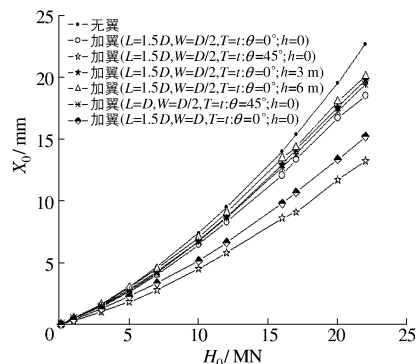
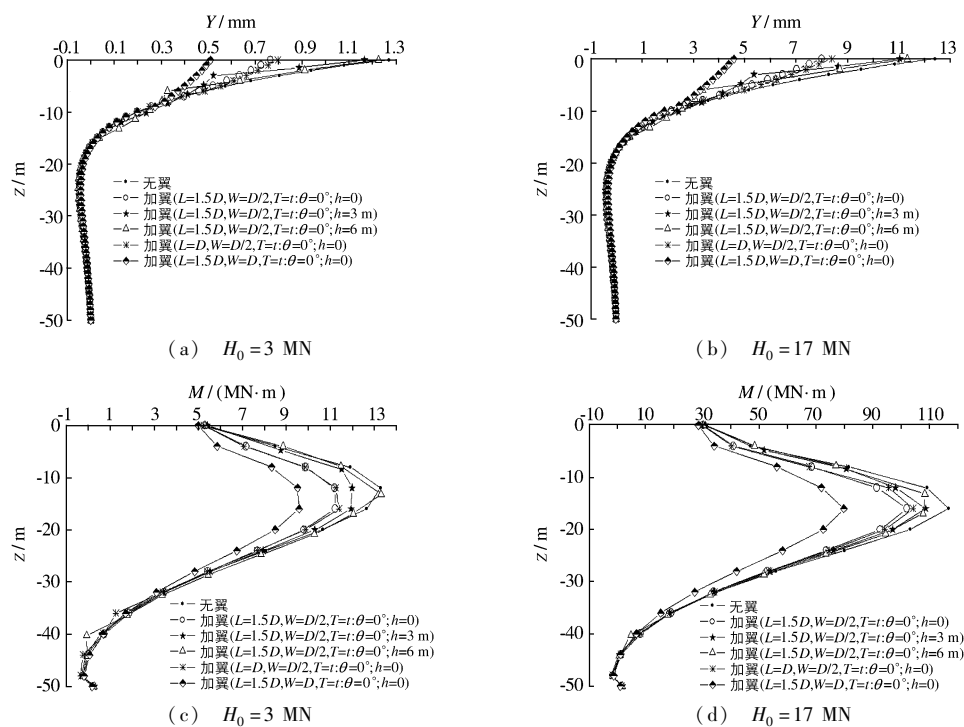


图3 H_0-X_0 关系
Fig. 3 H_0-X_0 curves

图4 Y - z 和 M - z 曲线Fig. 4 Y - z and M - z curves

从图4(c)可见,桩身弯矩最大值出现在约 $3D$ 位置;加翼后,桩身最大弯矩显著降低;其中翼板参数的影响规律为:翼板长度(L)或宽度(W)越大,桩身最大弯矩减小幅度越大,同样考虑到实际施工中翼板对沉桩阻力的增加以及可能出现的屈曲破坏,对 L 和 W 的取值依然需要通过相关计算和优化确定;翼板以充分发挥浅层土的土抗力为主,因此当翼板的设置深度增加时,其作用效果将明显降低,本例中当 $h=3$ 和 6 m时,翼板对于桩身最大弯矩的降低幅度很小。

采用前述方法计算单桩极限承载力并选取 3 MN与 16 MN两级水平载荷作用情况下的单桩桩身最大弯矩列于表1。 H_0 - X_0 关系拟合效果见图5。由图5可见,四阶多项式拟合效果更好。从表1可见,对于本例,当桩型一定时,四阶多项式拟合方式计算得到的基桩水平极限承载力大于指数拟合方式的计算结果。在这种情况下,指数拟合法低估了基桩具备的水平极限承载力,可能造成设计过分冗余,进而导致材料的浪费和相应施工成本的增加;加装稳定翼之后,单桩水平极限承载力明显提高(提高 $16.7\% \sim 19.5\%$),且稳定翼从计算泥面开始($h=0$)时的值比从计算泥面以下 2 m开始($h=2$ m)的情况高;桩身弯矩最大值显著降低(降低 $4.2\% \sim 15.6\%$),且稳定翼从计算泥面开始($h=0$)时的值比从计算泥面以下 2 m开始($h=2$ m)的情况降低幅度大。

表1 计算结果

Tab. 1 Calculation results

桩 型	H_U / kN		$M / (\text{MN} \cdot \text{m})$	
	指数拟合法	四阶多项式拟合法	$H_0 = 3 \text{ MN}$	$H_0 = 16 \text{ MN}$
单 桩	21 485.169	25 863.283	13.279	106.936
$L=1.5D, W=D/2, T=t, h=0$	25 691.670 (+19.579%)	30 861.630 (+19.326%)	11.202 (-15.641%)	94.285 (-11.830%)
$L=1.5D, W=D/2, T=t, h=3$	25 093.076 (+16.793%)	30 594.846 (+18.295%)	12.249 (-7.756%)	102.399 (-4.242%)

注: 括号中数值为与单桩相比的提高(+)或降低(-)幅度。

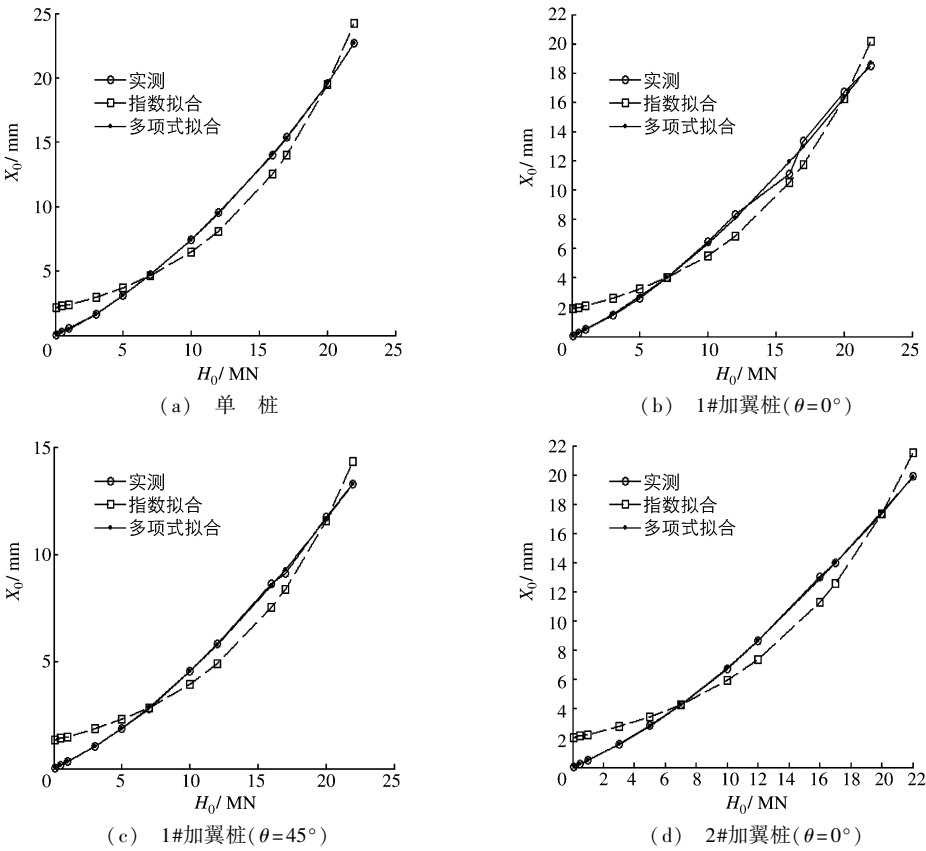


图 5 H_0 - X_0 关系拟合
Fig. 5 Fitting curves

3.2.2 动力分析 动力分析中,选用下列 3 种参数组合进行计算和分析:单桩,无翼单桩;1#加翼单桩, $L=1.5D$, $W=D/2$, $T=t$,埋深 $h=0$;2#加翼单桩, $L=1.5D$, $W=D/2$, $T=t$,埋深 $h=3$ m;3#加翼单桩, $L=1.5D$, $W=1.5D$, $T=t$,埋深 $h=0$.

(1)模态分析 结构固有频率计算结果见表 2. 表 2 中 1 阶,2 阶和 3 阶振型所对应的固有频率分别为结构在 YZ 平面内横摇、在 XZ 平面内横摇及绕 Z 轴的扭转. 其中,1,2 阶振型为平面内横摇的振型,所对应的固有频率为需校核的结构固有频率.

表 2 模态分析
Tab. 2 Mode analysis

桩 型	固有频率/ Hz		
	1 阶	2 阶	3 阶
单桩	0.274 43	0.275 87	1.237 1
1#加翼桩	0.282 65(+2.995%)	0.284 20(+3.020%)	1.238 0(+0.073%)
2#加翼桩	0.278 82(+1.600%)	0.280 31(+1.609%)	1.237 8(+0.057%)
3#加翼桩	0.283 91(+3.454%)	0.285 47(+3.480%)	1.237 9(+0.065%)

注: 括号中数值为与单桩相比的提高(+)幅度.

假定风机转速范围为 6.63~15.99 r/min,则可得其 1P 频率范围为 0.110 5~0.266 5 Hz,3P 频率范围为 0.331 5~0.799 5 Hz,以±5%为控制指标,则可得允许频率范围为 0.279 9~0.314 9 Hz. 显然,对于本例而言,未加稳定翼时的单桩固有频率(0.274 43 Hz)略低于允许范围的下限(0.331 5 Hz),存在产生共振的风险;加翼后固有频率得以提高,稳定翼尺寸一定时,向土的深层设置对结构固有频率的提升幅度减小;其他

条件一致时,结构固有频率随稳定翼宽度的增加而增加,上述规律均与桩体刚度的变化态势对结构固有频率的影响规律一致;其中1#和3#较2#提高幅度大,且其固有频率均在允许频率范围,避免了共振的产生。

同时可见,加翼对于单桩固有频率的提高幅度不大(本例仅3%),但鉴于单桩基础较柔,固有频率往往低于允许频率范围下限,这3%的提高幅度有可能是使其避免共振的关键,这也为通过“加翼微调”的方式优化单桩固有频率提供了思路。

(2) 谐响应分析 其他复杂荷载情况一般可通过 Fourier 变换近似成简谐荷载的求和形式,在系统线性的假定条件下,单自由度体系承受简谐荷载时的特性可以方便地推广到任意荷载条件下单自由度系统的情况,研究简谐荷载的情况是开展其他荷载情况的基础^[10],鉴于此,本研究只进行谐响应分析来证明加翼单桩降低结构动力响应的效果。

谐响应分析采取在海平面位置施加水平向(X 方向)简谐荷载作用。沿简谐荷载作用点向塔筒顶部方向,提取法兰和塔筒顶部的水平方向(X 方向)位移响应如图6所示。

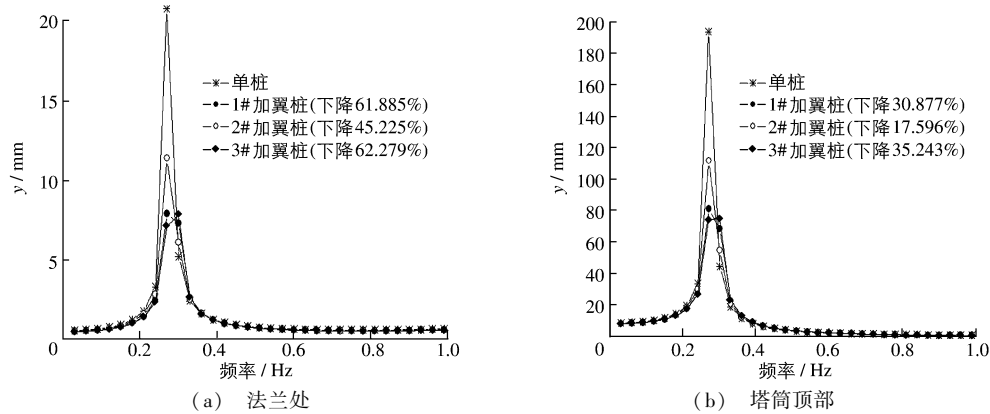


图6 位移响应(简谐荷载)

Fig.6 Displacement response (harmonic disk load)

可见, X 方向位移响应峰值与结构一阶自振频率对应。加翼后 X 方向位移响应峰值明显降低,其中1#和3#降低幅度比2#大;稳定翼加宽后,峰值响应降低。

(3) 瞬态分析——冲击荷载作用 假定结构受 X 方向冲击荷载作用,荷载时程如图7所示,提取法兰及塔筒顶部的 X 方向位移响应如图8所示。

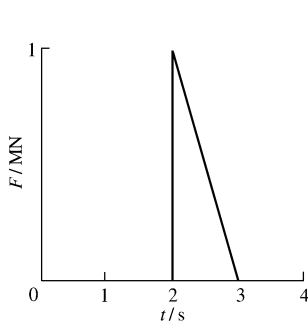


图7 冲击荷载时程曲线

Fig.7 Time history of impact load

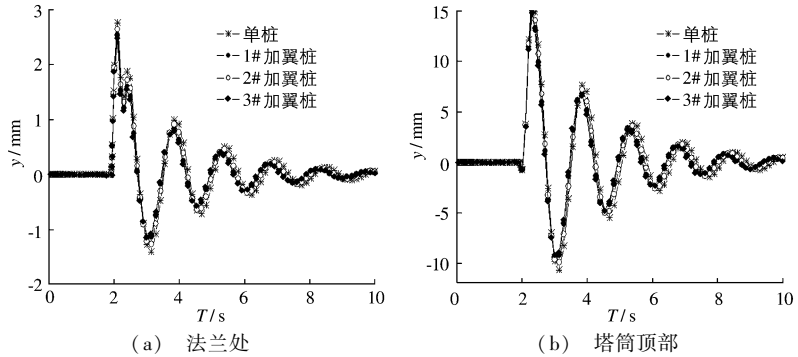


图8 位移响应(冲击荷载)

Fig.8 Displacement response (impact load)

从图8可见,响应曲线趋势方面:对于距离冲击位置较近的法兰处而言,在冲击荷载开始作用的 $t=2\text{s}$ 时刻,结构即出现明显的峰值位移响应,而对于距离冲击位置较远的塔筒顶部而言,其位移响应峰值将滞后

于 $t=2\text{ s}$ 时刻,这是符合实际的;响应曲线峰值滞后,随着荷载的逐渐消失,位移响应渐趋平缓. 响应曲线峰值方面:加翼后单桩的位移响应得到降低,且对于本例而言,1#和 3#对位移响应峰值的降低幅度比 2#大;稳定翼加宽后,减低效果更为明显.

(4) 波浪谱分析 假定结构受到图 9 所示波浪谱作用,作用方向为 X 方向,法兰及塔筒顶处的 X 方向位移响应如图 10 所示.

从图 10 可见,响应曲线出现 2 个较为明显的峰值,且分别与波浪谱频率及结构 1 阶自振频率对应;加翼后单桩的位移响应得到降低,且对于本例而言,1#和 3#对位移响应峰值的降低幅度比 2#大;稳定翼加宽对于降低响应的效果更为明显.

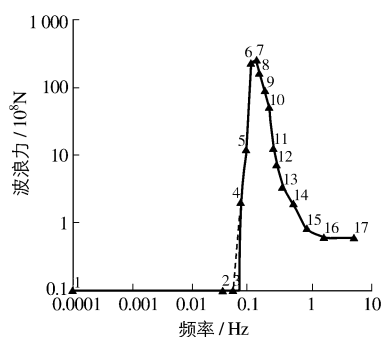


图 9 波浪力谱

Fig. 9 Wave load spectrum

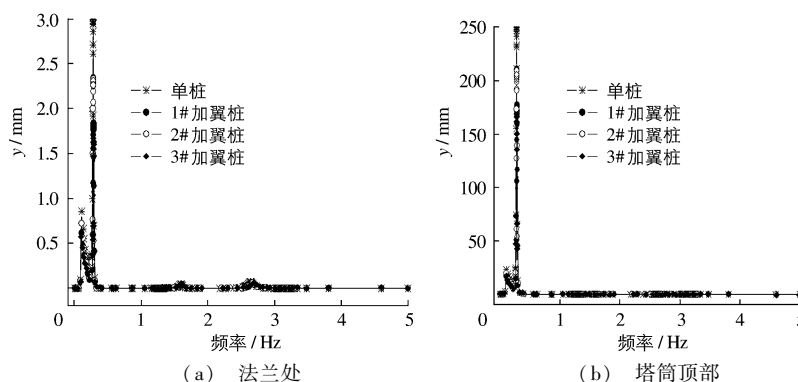


图 10 位移响应(波浪荷载)

Fig. 10 Displacement response (wave load)

4 结 语

介绍了一种加装稳定翼的海上风电大直径单桩基础型式,详述了其构造、作用机理、效果及具体实施方法. 并通过有限元仿真对其水平极限承载力等进行了计算,证明了加翼单桩在减小基桩水平位移、桩身弯矩,提高单桩水平极限承载力方面的效果;通过模态分析、谐响应分析、冲击荷载作用下的瞬态分析;波浪荷载作用下的波浪谱分析,对加翼单桩的动力特性进行了对比分析,证明了其能够减小单桩的动力响应.

针对具体工程问题,须根据工程实际并考虑施工条件、能力等方面的因素,借助数值计算对稳定翼位置、尺寸及单桩桩径、壁厚、桩长等具体取值进行优化,以达到最佳效果.

参 考 文 献:

- [1] 李伟, 郑永明, 周永. 海上风电基础 ANSYS 数值模拟[J]. 水运工程, 2010(8): 125-128. (LI Wei, ZHENG Yong-ming, ZHOU Yong. Computer simulation of offshore wind turbine using ANSYS[J]. Port & Waterway Engineering, 2010(8): 125-128. (in Chinese))
- [2] 李伟, 郑永明, 周永. 近海风电基础桩土作用 3D 有限元模拟[J]. 水电能源科学, 2010, 28(8): 162-164. (LI Wei, ZHENG Yong-ming, ZHOU Yong. 3D-FEM simulation of soil pile interaction for offshore wind power generation[J]. Water Resources and Power, 2010, 28(8): 162-164. (in Chinese))
- [3] KUO Y S, ACHMUS M, KAO C S. Practical design considerations of monopile foundations with respect to scour [C]//Global Wind Energy Council. Global Wind Power 2008, Peking: Global Wind Energy Council, 2008: 104.
- [4] 李伟, 李华军, 郑永明. 海上风电基础结构大直径钢管桩水平静载荷试验数值仿真[J]. 水利水电科技进展, 2011, 31(4): 69-72. (LI Wei, LI Hua-jun, ZHENG Yong-ming. Numerical simulation of horizontal load test on large-diameter steel piles for offshore wind turbines[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2011, 31(4): 69-72. (in Chinese))

- [5] LI Wei. Study on the fuzziness in fatigue life estimation of the foundation of offshore wind turbine[J]. *Advanced Materials Research*, 2011(243-249): 4741-4745.
- [6] 章钊, 过超, 龚维明. 单桩水平承载性能研究. 路基工程, 2010(5): 56-58. (ZHANG Zhao, GUO Chao, GONG Wei-ming. Study on horizontal bearing capacity of single pile[J]. *Subgrade Engineering*, 2010(5): 56-58. (in Chinese))
- [7] 李炜, 李华军, 郑永明, 等. 海上风电基础结构疲劳寿命分析[J]. 水利水运工程学报, 2011(3): 70-76. (LI Wei, LI Hua-jun, ZHENG Yong-ming, et al. Fatigue life analysis of the foundation structure of offshore wind turbine[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2011(3): 70-76. (in Chinese))
- [8] 武科, 孙岩, 李术才. 大型海上风力发电机组单桩基础水平承载力数值分析[C]//崔京浩. 第17届全国结构工程学术会议论文集, 北京:《工程力学》杂志社, 2008. (WU Ke, SUN Yan, LI Shu-cai. Numerical analysis of horizontally loading of monopile foundation of large scale offshore wind turbine[C]//CUI Jing-hao. *Proceedings of the 17th National Conference on Structural Engineering*, Beijing: Engineering Mechanics Press, 2008. (in Chinese))
- [9] 刘晓红, 邓友生. 确定单桩水平承载力的数解法[J]. 南方冶金学院学报, 2003, 24(4): 21-24. (LIU Xiao-hong, DENG You-sheng. The number solutions to determination of horizontal bearing capacity of single pile[J]. *Journal of Southern Institute of Metallurgy*, 2003, 24(4): 21-24. (in Chinese))
- [10] 张枢文. 海洋平台结构损伤识别与健康监测技术研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2007. (ZHANG Shu-wen. *Studies on structure damage identification and health monitoring technology for offshore platforms*[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2007. (in Chinese))

Numerical simulation of a new type of large-diameter monopile with wings for offshore wind turbine structure

LI Wei, ZHENG Yong-ming, SUN Xing-jian, LUO Jin-ping, ZHAO Sheng-xiao
(*HydroChina Huadong Engineering Corporation, Hangzhou 310014, China*)

Abstract: The horizontal displacement control of a monopile with a large diameter is the main difficulty for offshore wind turbine. A new type of large-diameter monopile with steel-wings set in the region of the pile near the mudline, named the wing-monopile, is investigated. With the help of wings, the shallow soil reaction in front of the pile is taken full advantage of; and the horizontal bearing capacity of the monopile is enhanced. The relationships between the horizontal load and the horizontal displacement are fitted by adopting an exponential model and a 4-order polynomial model based on data obtained by numerical simulation. The simulated results show that the 4-order polynomial model is more accurate than the exponential model; because of the setting of steel-wings, the horizontal displacement and the maximum moment of a pile are decreased observably; the horizontal bearing capacity of a pile is increased markedly and the increment is influenced by the setting-position of the wings. The method to improve the horizontal bearing capacity of steel-pile by the wings can be used for other types of a small-diameter pile of foundation structure of the offshore wind turbine so as to decrease the construction cost.

Key words: offshore wind turbine; monopile; wing; horizontal bearing capacity