

DOI :10.3880/j.issn.1006-7647.2011.04.016

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

李 炜¹, 李华军², 郑永明¹

(1. 中国水电顾问集团华东勘测设计研究院, 浙江 杭州 310014; 2. 中国海洋大学工程学院, 山东 青岛 266100)

摘要 采用数值模拟手段,对海上风电基础结构大直径钢管桩水平静载荷试验进行仿真,其中,仿真试验数值模型中桩土之间设置接触单元对桩土相互作用特性进行模拟。对仿真试验结果的处理与分析表明,桩土之间接触单元的设置更为真实地描述了桩土接触的性状,计算得到的 $p \sim y$ 曲线较与一些已有方法的结果相比存在差异。

关键词 海上风电; 桩土作用; $p \sim y$ 曲线; 水平静载荷试验; 数值模拟

中图分类号 :TU473.1 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-7647(2011)04-0069-04

Numerical simulation of horizontal load tests on large-diameter steel piles for offshore wind turbines//LI Wei¹, LI Hua-jun², ZHENG Yong-ming¹(1. HydroChina Huadong Engineering Corporation, Hangzhou 310014, China; 2. College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract : Numerical simulation was employed to study the horizontal load tests on large-diameter steel piles for offshore wind turbines. In the model, the pile-soil interaction was simulated by using the contact interface elements between the piles and the soils. The simulated data are processed and analyzed. The results reveal that it is reasonable to set the contact interface elements between the piles and the soils. The $p-y$ curves obtained by the numerical simulation are not in good agreement with those by the existing methods advised in the references.

Key words : offshore wind turbine; pile-soil interaction; $p-y$ curve; horizontal load test; numerical simulation

海上风电基础结构承受风、浪、流等水平荷载作用,基桩水平承载性能直接关系到结构整体的稳定性。水平静载荷试验是了解桩土相互作用及基桩水平承载性能最直接、有效的手段,而对于海上风电基础结构大直径钢管桩而言,进行现场原型试验存在很大难度。因此,通常只是进行室内模型试验或小尺寸试桩原位试验,再对实际尺寸基桩水平承载性能做出推测。

伴随着数值分析技术的日益完善,通过有限元途径对结构特性进行计算与分析已非常普遍^[1-7]。笔者借助数值模拟手段,通过大型通用有限元分析软件 ANSYS 仿效现场试验的原理与步骤对大直径钢管桩水平静载荷试验进行了仿真,并编制 MATLAB 程序对仿真结果进行了数据整理与分析。

1 基本原理

1.1 试验步骤

单向多循环加、卸载方法是常用的基桩水平静载荷试验方法, JGJ 106—2003《建筑基桩检测技术规

范》中给出方法的实施过程可以总结为:分级荷载应小于预估水平极限承载力或最大试验荷载的 1/10。每级荷载施加后,恒载 4 min 可测读水平位移,然后卸载至零,停 2 min 测读残余水平位移,至此完成 1 个加卸载循环。如此循环 5 次,完成 1 级荷载的位移观测。试验中间不得停顿。

鉴于海上风电基桩的特殊性,其原位水平静载荷试验步骤常推广为:①以加载步长加载至该级荷载,维持 20 min,按第 5 min、第 10 min、第 15 min、第 20 min 测读。②以 2 倍加载步长进行卸载,且每次卸载后维持 10 min,按第 5 min、第 10 min 测读,卸载至零后,维持 30 min 记录数据,按第 10 min、第 20 min、第 30 min 测读。③重复步骤①和②,每级试验荷载加、卸载 5 次,作为 1 个加载循环。以上为实际试验时(现场试验或室内模型试验)的具体操作步骤,本项研究中的数值仿真以其为参考,其中各级荷载的施加通过仿真程序中设定时间步,指定荷载‘出现’(加载)或‘消失’(卸载)来控制。

基金项目:中国水电顾问集团华东勘测设计研究院立项(KY2010-02-19)

作者简介:李炜(1981—)男,山东淄博人,博士,从事海上风电基础桩土作用及结构疲劳研究。E-mail:li_w@ecidi.com

1.2 数据提取及处理步骤

a. 提取各指定深度桩截面的拉、压应变 $\varepsilon_1(z)$ 和 $\varepsilon_c(z)$;

b. 由式(1)计算相应的截面曲率 $\Phi(z)$:

$$\Phi(z) = \frac{\varepsilon_1(z) - \varepsilon_c(z)}{D} \quad (1)$$

c. 由式(2)计算桩身弯矩 $M(z)$:

$$M(z) = EI\Phi(z) = K \frac{\varepsilon_1(z) - \varepsilon_c(z)}{D} \quad (2)$$

式中: E 为弹性模量; I 为惯性矩; K 为抗弯刚度, $K = EI$; D 为计算宽度。

d. 拟合弯矩与深度 z 关系式, 本文采用 6 阶多项式拟合。

e. 根据第 d 步中拟合的关系式, 由式(3)计算桩侧土抗力 p :

$$p(z) = \frac{d^2 M(z)}{dz^2} = EI \frac{d^2 \Phi(z)}{dz^2} \quad (3)$$

f. 根据第 d 步中拟合的关系式, 由式(4)计算桩身位移(挠度):

$$y(z) = \iint \frac{M(z)}{EI} dz^2 = \iint \Phi(z) dz^2 \quad (4)$$

g. 桩身转角计算式如下:

$$\alpha(z) = \int \frac{M(z)}{EI} dz = \int \Phi(z) dz \quad (5)$$

h. 泥面转角可根据规范^[8]的式(6)由桩顶转角推算:

$$\theta_0 = \theta - \frac{H_0 h_0^2}{2EI} \quad (6)$$

式中: H_0 为水平荷载; h_0 为水平加载位置至泥面的距离。

i. 桩身剪力由式(7)计算:

$$S(z) = \frac{dM(z)}{dz} = EI \frac{d\Phi(z)}{dz} \quad (7)$$

2 水平静载荷试验仿真

2.1 问题描述

本项研究中选用的算例为直径 2 m、壁厚 28 mm

的钢管桩(Q345C), 土层选用单层均质土。土性参数如下: 黏聚力为 20 kPa, 摩擦角为 32°, 密度为 1960 kg/m³。

由于本项研究中为数值仿真模拟, 因此对于加载的极限不做强制控制, 从 50 kN 开始以 50 kN 加载步长施加各级水平荷载直至 2500 kN。1.2 节数据提取及处理步骤采用编制的 MATLAB 数据处理程序获取, 限于文章篇幅及图表表达的清晰度, 以下选取其中 5 个级别的水平荷载($F_1 = 400$ kN, $F_2 = 1000$ kN, $F_3 = 1150$ kN, $F_4 = 1500$ kN, $F_5 = 2500$ kN)作用情况展示分析结果。

2.2 有限元模型

有限元模型如图 1 所示。

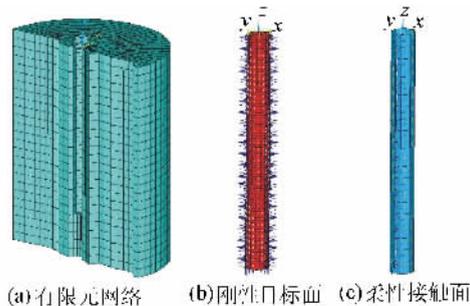


图 1 有限元模型

2.3 接触单元影响作用分析

桩土相互作用的处理直接关系到仿真的合理性, 设置桩土接触单元是常见且有效的仿真方法, 为比较接触单元的仿真效果, 笔者以水平荷载 F_1 和 F_3 作用时为例, 比较不考虑接触面滑移脱开的接触面绑定情况与考虑接触面滑移脱开的非绑定情况的桩身弯矩 M 、桩侧土抗力 p 及桩身挠度 y , 如图 2 所示。

无论是水平荷载较小时(F_1)还是较大时(F_3), 2 种处理方式皆存在差异: 考虑接触面滑移脱开时, 桩身弯矩、桩侧土抗力及桩身挠度的最大值皆有所提高, 且提高的幅度随水平荷载的增大而增大。随着荷载的增大, 实际桩土接触面的滑移或脱开程度将增大, 因此, 考虑接触面滑移、脱开的桩土接触处理方式在大荷载情况下的合理性尤为突出。鉴于

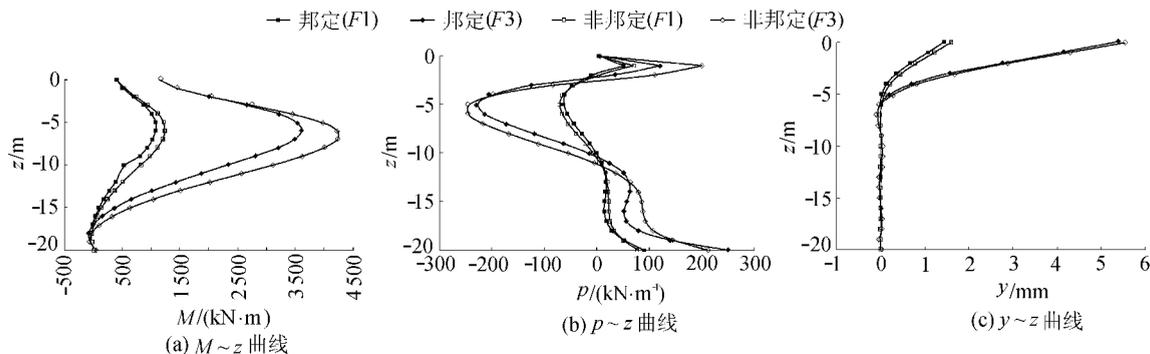


图 2 计算结果

此 笔者采用考虑桩土滑移、脱开的接触单元(非绑定)处理方式展开相关研究。

2.4 仿真结果分析

依照 1.2 节数据处理步骤 通过多项式拟合 得到各级水平荷载作用下桩身的弯矩如图 3 所示。分析结果表明 6 阶多项式拟合效果良好 桩身弯矩最大值出现在 3~4 倍桩径范围内 在 8 倍桩径附近出现弯矩反弯点 伴随水平荷载的增大 桩身弯矩增大 且弯矩最大值向土层深处发展。

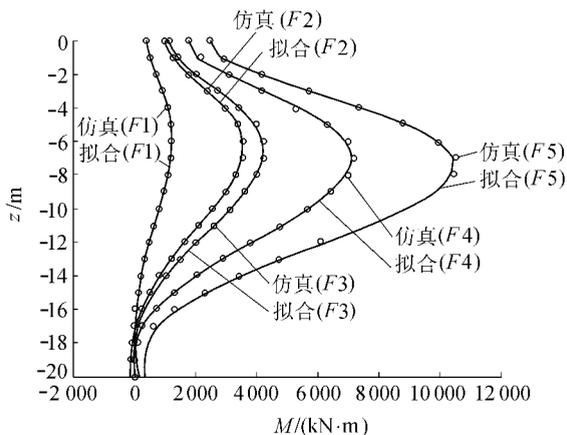


图 3 $M \sim z$ 曲线

水平荷载作用下 p 随 z 变化曲线如图 4 所示。分析结果表明 桩侧土抗力沿深度方向被 2 倍桩径深度位置和 7 倍桩径深度位置划分为较为明显的 3 个阶段 且各阶段的极值随荷载的增大而增大。

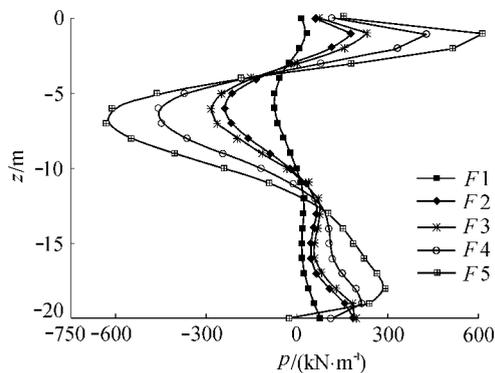


图 4 $p \sim z$ 曲线

水平荷载作用下 y 随 z 变化曲线如图 5 所示。分析结果表明 桩身挠度泥面处最大 且随沿深度方向递减 在 5 倍桩径之后基本消失 桩身挠度随荷载的增大而增大。

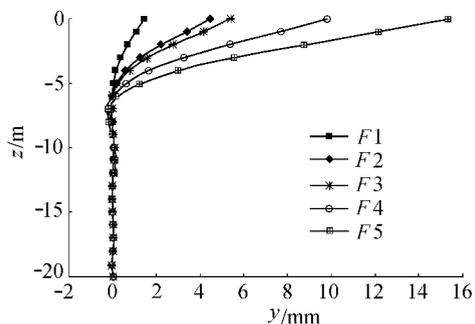
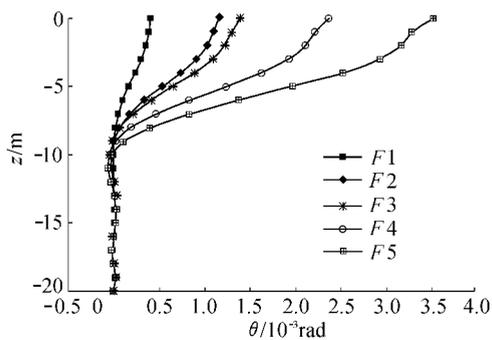
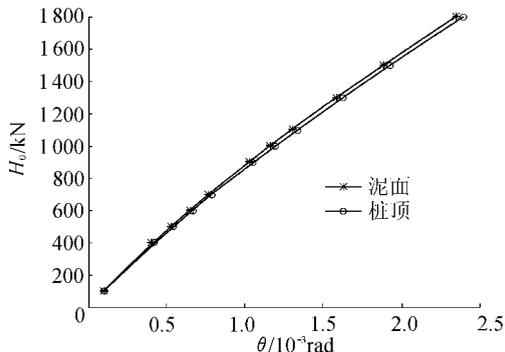


图 5 $y \sim z$ 曲线



(a) 桩身 $\theta \sim z$ 曲线



(b) 桩顶及泥面 $\theta \sim H_0$ 曲线

图 6 荷载作用下的 θ 变化情况

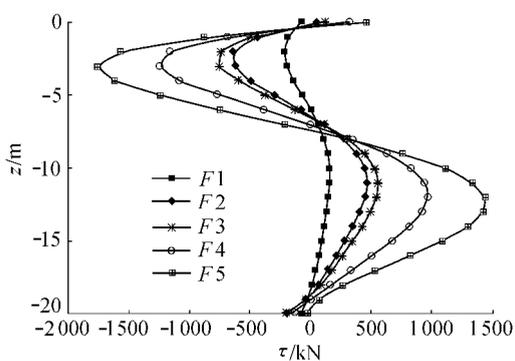


图 7 $\tau \sim z$ 曲线

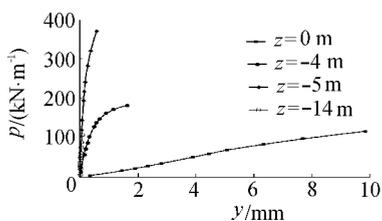


图 8 $p \sim y$ 曲线

各荷载作用下 桩身转角见图 6 (a), 桩顶及泥面处转角见图 6 (b)。可见 桩身转角呈现的趋势与桩身弯矩相近。

各荷载作用下桩身剪力如图 7 所示。

取泥面以下 4 个点(0 m, 4 m, 5 m, 14 m)的土抗力和桩身挠度绘制 $p \sim y$ 曲线如图 8 所示。可见 土层较浅时($z = 0$ m, $z = -4$ m)非线性特征相对明显;

随着深度的增加, $p \sim y$ 曲线基本呈现较陡的线性特征, 说明深层土依然处于“弹性”阶段, 承载力可以继续发挥。

与规范^[8-9]给出的 $p \sim y$ 曲线计算方法相比较的计算结果如图 9 所示。较软、较硬黏土的 $p \sim y$ 曲线按照规范及某些文献方法^[4, 10-13] 绘制。可见, 本文仿真方法获取的 $p \sim y$ 曲线与规范方法存在差异, 其规律为: 桩身位移较小时, 有限元仿真结果与规范^[8-9] 中软黏土 $p \sim y$ 曲线计算方法一致性较好, 且略低于其值(见图 9(a)中 $y = 0 \sim 2.5$ mm 区域、图 9(b)中 $y = 0 \sim 0.2$ mm 区域、图 9(c)中 $y = 0 \sim$

0.5 mm 区域、图 9(d)中 $y = 0 \sim 0.08$ mm 区域)。随着桩身位移的增加, 有限元计算结果逐渐向规范中关于硬黏土的计算方法靠拢, 且在一定桩身位移之后将超越其计算值并攀升(见图 9(a)中 $y = 2.5$ mm 之后的区域、图 9(b)中 $y = 0.28$ mm 之后的区域、图 9(c)中 $y = 0.5$ mm 之后的区域)。由于深层($z = -14$ m)桩身位移很小, 因此所获得的 $p \sim y$ 曲线范围较小($y = 0 \sim 0.08$ mm 区域), 因此还未到达上述有限元计算结果逐渐向硬黏土靠拢并超越的范围。

在实际工程中, 能够通过现场试验获取 $p \sim y$ 曲线是较为理想的。倘若只是通过文献方法推求, 则可能偏离实际。如果能够配合本文所述的水平静载荷试验数值仿真, 则能够为实际工程中 $p \sim y$ 曲线的计算或选用提供相应的参考。

3 结 语

通过建立桩土全实体有限元模型, 设置桩土接触单元, 并配合计算过程中的时间步设定, 对大直径钢管桩水平静载荷试验进行了仿真, 并仿效现场原型监测流程对数据进行了提取和处理。本文成果可为类似工程提供有益的参考。

参考文献:

- [1] 姚兴佳, 隋红霞, 刘颖明, 等. 海上风电技术的发展与现状[J]. 上海电力, 2007(2):111-118.
- [2] 李炜, 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.
- [3] 李炜, 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.
- [4] 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.
- [5] 傅中秋, 吉伯海, 陈晶晶, 等. 钢管轻集料混凝土组合界面黏结滑移性能[J]. 河海大学学报:自然科学版, 2009, 37(3):317-322.
- [6] 程恒, 张燎军, 林斌, 等. 水电站厂房钢管混凝土排架结构抗震性能[J]. 河海大学学报:自然科学版, 2009, 37(5):586-590.
- [7] 苏静波, 邵国建, 刘宁. 基于 P - Y 曲线法的水平受荷桩非线性有限元分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(10):1781-1785.
- [8] SY/T 10030—2004 海上固定平台规划、设计和建造的推荐作法:工作应力法[S].
- [9] JTJ 255—2002 港口工程基桩静载荷试验规程[S].
- [10] 田平, 王惠初. 黏土中横向周期性荷载桩的 P - Y 曲线统一法[J]. 河海大学学报:自然科学版, 1993, 21(1):9-14.
- [11] 张建伟. 分布荷载推力桩计算的 P - Y 曲线法研究[D]. 福州:福州大学, 2005.
- [12] 杨国平, 张志明. 大变位条件下横向受力桩 P - Y 曲线的研究[J]. 水运工程, 2007(7):40-45.
- [13] 张舒羽. 水平承载桩静载 P - Y 曲线研究[D]. 南京:河海大学, 2001.

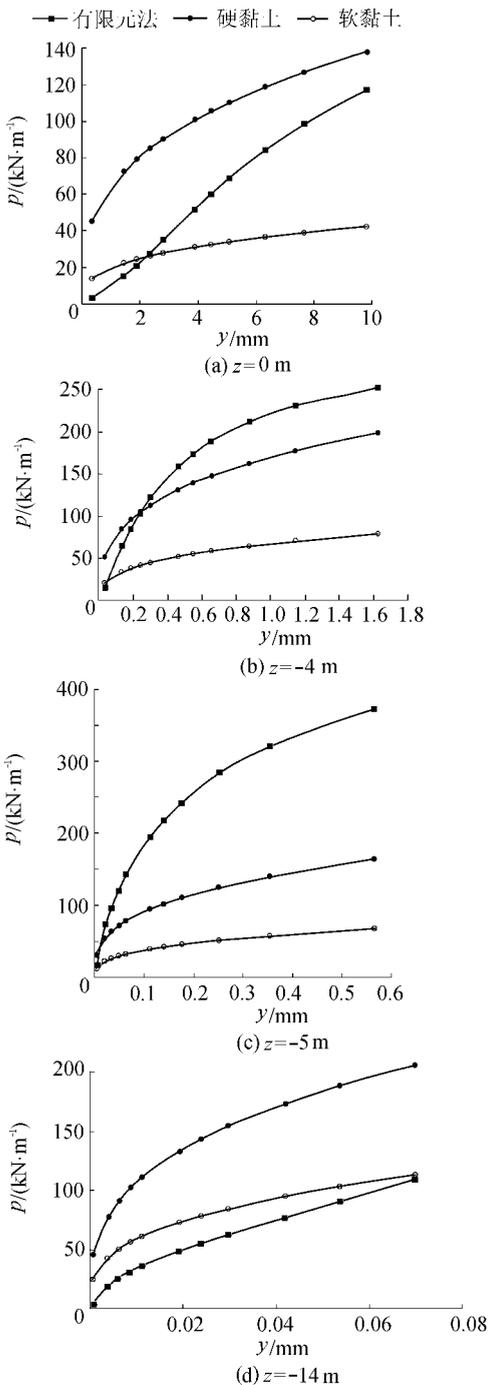


图 9 $p \sim y$ 曲线比较