



海上风机安装综合基地 码头特殊桩型的设计应用

史建成, 何 凯

(浙江省交通规划设计研究院, 浙江 杭州 310006)

摘要: 随着码头优良岸线资源的减少, 新建码头面临着更多的不利条件, 典型不利因素如地质条件、风浪掩护条件等, 相对于传统意义上码头基础桩基设计提出了更高的要求, 如桩的受力性能、桩的长度等。某工程吊机墩上采用的钢混复合桩, 为不同于传统钢管桩、大管桩及PHC桩的新型桩基, 性能优异且成本相对较低, 可作为将来的候选桩型; 工程区域地质条件较差, 淤泥层及软弱层较厚, 部分桩型长径比大, 为保证超长桩安全施工, 从桩基吊运、沉桩等角度进行了深入分析。

关键词: 海上风机拼装; 钢混复合桩; 吊机墩; 超长桩; 吊桩

中图分类号: TU 473

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)04-0083-05

Design and application of special pile for offshore wind turbine installation base

SHI Jian-cheng, HE Kai

(Zhejiang Provincial Planning, Design & Research Institute of Communications, Hangzhou 310006, China)

Abstract: With the reduction of high-quality coastline resources, the construction of new wharves faces much more problems such as harmful unfavorable geologic conditions and complicated wind and wave conditions. So, the wharf's piles should be much longer and have better endurance capacity mechanical performance, which means the design of new wharfs have higher demands than the traditional design calls for higher requirements of wharf design. In this case, the combination pile of steel and concrete, as a new type of wharf pile, is employed as the foundation of crane's block. As a new type of future candidate pile, the pile combined of steel and concrete is which has a better performance and lower cost comparing with the the previous additional steel pipe pile, concrete pipe pile and the PHC pile with higher performance and low in cost, which was employed in the foundation of crane's block in this project. Additionally, the this place of geologic condition of the project site is very poor, where the soft silt-layer is thick, and which makes the length-diameter ratio of some piles's proportion of length to diameter so big. To guarantee the safe construction of the super long pile, we carry out an in-depth analysis on the pile's lifting, transportation and piling the process of lifting, transporting and piling is deeply analyzed.

Keywords: assemble offshore wind turbine; composite pile of steel and concrete; crane's block; super long pile; pile's lifting

1 工程概况

本项目场址选在浙江省舟山市岱山本岛西南临港经济开发工业园区, 项目总体规划为集海上风电组装、海洋工程钢结构制作及混凝土构件制

作的综合性基地。按照本项目的风机拼装工艺、装卸功效条件和吞吐量预测分析, 需设置2个风电机组拼装出运泊位、1个辅助泊位、2个预制构件出运泊位以满足其运量需求。码头建设规模等

收稿日期: 2015-10-29

作者简介: 史建成(1983—), 男, 工程师, 从事港航工程设计。

级为2 000吨级, 东侧风机拼装出运码头结构按1万吨级杂货船码头设计。

本工程码头设计桩型中 $\phi 800$ PHC桩、 $\phi 1\ 000$ PHC桩、 $\phi 1\ 200$ 大管桩目前使用较多, 制作工艺成熟。钢混复合桩(上部钢管桩+下部大管桩组合形式)目前使用经验较少, 为不同于传统钢管桩、大管桩及PHC桩的新型桩基, 性能优异且成本相对钢管桩低, 可作为将来的候选桩型; 本工程部分 $\phi 800$ PHC桩长达到65~75 m, 桩长径比达到77~94, 属于超过常规设计的超长桩, 如何保证超长桩的安全施工, 本文从桩基吊运、沉桩等施工角度进行了深入分析。

2 工程地质条件

根据《工程地质勘察报告》^[1], 本工程勘探深度范围内的地基土划分为5个工程地质层, 并细分为10个工程地质亚层。根据勘察结果, 本地层的地层结构由浅至深见表1。

表1 工程地质层划分

土层	土质	层厚/m
① ₁	素填土(meQ)	6.30~8.50
① ₂	淤泥质粉质黏土(mQ_4^2)	1.60~5.90
② ₁	淤泥质粉质黏土(mQ_4^1)	7.30~37.80
② ₂	淤泥质黏土(mQ_4^2)	7.50~29.00
③ ₁	粉质黏土(mQ_3^1)	3.00~24.50
③ ₂	黏土(mQ_4^1)	3.20~45.90
④ ₁	粉质黏土($al-lQ_3^2$)	2.50
④ ₃	粉质黏土(mQ_3^2)	1.70~5.00
⑤ ₁	粉质黏土($al-lQ_3^1$)	1.20~30.50
⑤ ₂	圆砾($dl-plQ_3^1$)	该层未揭穿

勘察资料表明: 拟建场地浅部分布的①₂、②₁、②₂层为淤泥质土层, 物理力学性质差, 具有高压缩性, 强度低, 不宜作为基础持力层; 中部分布的③₁层粉质黏土、③₂层黏土物理力学性质差, 具有高压缩性, 强度低, 不宜作为基础持力层; ④₁层粉质黏土、④₂层砾砂, 物理力学性质较好, 具有中等压缩性, 但是分布极少, 且厚度较薄, 不宜作为基础持力层; ④₃层粉质黏土具有高压缩性, 物理力学性质较差, 且分布极少, 厚度较薄, 亦不宜作为基础持力层; ⑤₁层粉质黏土及

⑤₂层圆砾物理力学性质好, 具有中等压缩性, 是本工程较理想的桩基持力层。

3 钢混复合桩的设计^[2]

3.1 钢混复合桩的特点

传统桩型钢管桩、大管桩及PHC桩目前在码头及桥梁工程中使用较多, 且制作工艺成熟。3种桩型中钢管桩受力性能最为突出、抗弯性能及强度最高, 同时桩的自质量最小, 缺点是工程造价高、防腐能力差; 大管桩、PHC桩虽然为传统的预应力高性能的混凝土管桩, 但受力(弯)性能与钢管桩相比还是存在较大的差距, 在较深的水域(通常水深达到20 m以上)布置采用大管桩或PHC桩时, 施工期单桩在水流、波浪及管桩自重的作用下就会显得抗弯能力不足, 上海国际航运中心洋山深水港、东海大桥、杭州湾大桥等国内著名工程均放弃了采用预应力混凝土管桩的桩基技术方案, 而采用大直径钢管桩技术方案。因此, 在桩基受力(弯)较大或工程水域水深较大的地方一般会优先使用钢管桩, 而钢管桩的工程造价一般为预应力管桩的2~3倍, 且一般码头整体工程造价基础桩基的费用往往占到50%以上, 因此以钢管桩作为基础桩基的工程项目整体造价均相对较高。

钢混复合桩为预应力混凝土大管桩和钢桩的组合桩, 即在预应力混凝土大管桩桩顶或者桩底锚接一段钢管桩组合成组合式大管桩, 通常使用较为普遍的组合形式为上部大管桩和下部钢管桩。本工程钢混复合桩设计思路是: 根据设计要求, 桩基嵌固点以下一定深度为界面, 上下部分分别采用不同材质作为桩基础材料, 上部钢桩发挥其抗弯能力强的特点, 能够很好地满足对桩基的抗弯性能要求; 下部预应力混凝土大管桩则充分发挥其垂直承载能力大、价格低的优势, 两者结合优势互补。从结构耐久性考虑, 钢管桩虽布置于泥面以上, 但可以采取成熟的防腐工程措施, 易于满足结构耐久性要求, 而混凝土管桩在海水环境中本身具有较好的耐久性, 且将其布置于嵌固点以下, 与空气隔绝, 腐蚀速率极其缓慢, 所以钢混复合桩可以满足结构耐久性要求。

钢混复合桩(上部钢管桩+下部大管桩组合形

式)在目前工程项目中使用经验较少, 通过前期大量的技术研究和结构优化, 以及进行试沉桩及跟

踪监测, 目前可靠性较强, 对于钢混复合桩(上部钢管桩+下部大管桩)已申请并拥有技术专利。

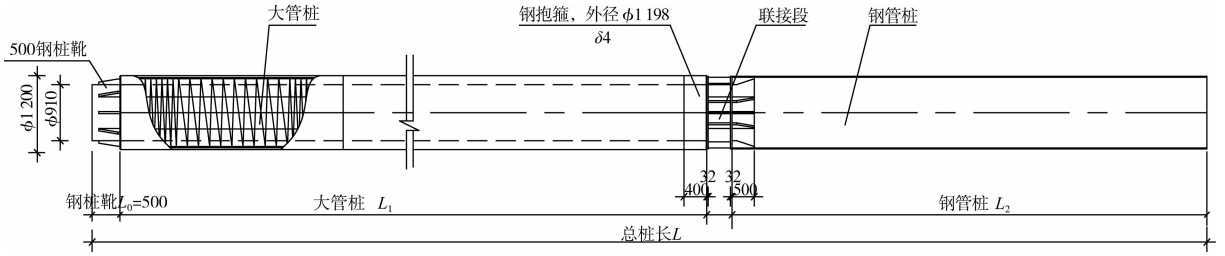


图1 钢混复合桩结构示意图(单位: mm)

3.2 钢混复合桩的设计

本工程的钢混复合桩主要应用于 320、500 t 吊机墩, 每个吊机墩布置 23 根钢混复合桩(320 t 吊机墩按满足 500 t 固定吊使用荷载要求设计)。由于 500 t 固定吊的作用荷载和力矩极大, 通常的设计思路会采用钢管桩作为基础桩基, 但钢管桩造价昂贵, 为进一步节省工程造价, 建设单位推荐采用钢混复合桩作为吊机墩基础桩基。通过对钢混复合桩的研究分析, 钢混复合桩受力性能突出(等同于钢管桩), 且造价较省, 可作为吊机墩基础桩基。

性能, 同时考虑到吊机基础墩的结构安全重要性较高, 故设计采用 φ1 200 mm 钢混复合桩(复合桩的钢桩段承受内力)。

表2 500 t(320 t)吊机基础墩部分最不利桩基内力计算成果

桩力/kN	弯矩/(kN·m)
7 283.21	343.23
6 856.31	758.09
-2 852.82	1 674.83
-3 127.70	882.42
6 950.64	839.15

3.2.2 抗弯能力计算

1) 钢管桩抗弯能力。

根据上海易工工程技术服务有限公司《高桩墩式码头 CAD》程序计算结果, 当钢管桩计算有效壁厚 14 mm 时, 最大应力为 243 MPa (< 295 MPa, Q345 钢), 满足设计要求。本工程钢管桩预留腐蚀厚度为 6 mm, 故钢管桩的管壁厚度取 20 mm。

2) 结构整体抗弯刚度。

为满足桩基加工及吊运等结构变形的连续性条件, 理想状况下要求桩身整体抗弯刚度一致, 预应力混凝土大管桩的抗弯刚度和钢管桩的抗弯刚度相等。即

$$E_s I_s = E_c I_c \quad (1)$$

式中: E_s 为钢管桩材料的弹性模量; I_s 为钢管桩截面对中心轴的惯性距; E_c 为预应力混凝土大管桩材料的弹性模量; I_c 为预应力混凝土大管桩截面对中心轴的惯性距。

利用式(1), 计算钢管桩截面对中心轴的惯性距 I_s 和钢管桩的内径和壁厚, 计算结果见表 3。

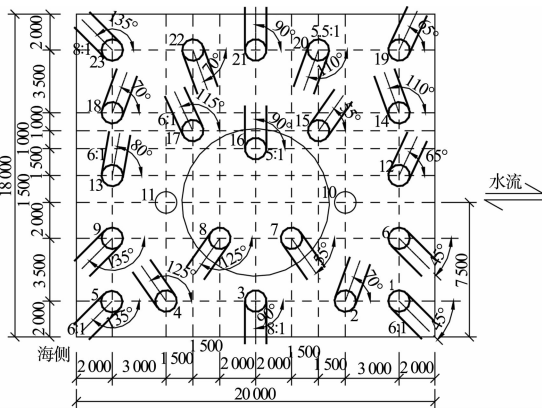


图2 吊机基础墩桩位(单位: mm)

3.2.1 桩基内力计算^[2]

本工程墩台按桩两端嵌固的刚性承台建模, 根据 JTS 167-1—2010《高桩码头设计与施工规范》^[3]墩式码头设计原理, 采用上海易工工程技术服务有限公司《高桩墩式码头 CAD》程序进行计算。

根据桩基内力的计算结果(表 2), 桩基的轴力、弯矩关系超出了 φ1 200 mm 预应力管桩设计

表3 等抗弯刚度时复合桩钢管桩壁厚

大管桩	外径 D/mm	内径 d/mm	管桩壁厚/ mm	大管桩截面惯性距 I_c/m^4	钢管桩截面惯性距 I_s/m^4	钢管理想壁厚/ mm
DI200B32-2	1 200	910	145	0.070 6	0.012 293 5	19

注：预应力混凝土大管桩 C60 的 E_c 为 36 000 MPa；钢管桩的 E_s 为 206 000 MPa。

根据表 3 计算结果，理想状态下钢管桩采用 19 mm 壁厚时满足等抗弯刚度的要求。由于钢混复合桩实际使用时其锚固联接段位于桩基嵌固点以下，由钢管桩的抗弯刚度决定复合桩的抗弯能力。钢管壁厚取上述两个壁厚计算值中的较大值，即 20 mm。

3.2.3 钢管节及混凝土管节长度计算

为充分保证桩基质量，根据 JTJ 167-4—2012《港口工程桩基规范》^[1]，将钢混复合桩接头位置放置于桩基嵌固点以下的桩身弯矩约为 0 处，即 $Z \geq 4T$ 。

$$T = \sqrt[5]{\frac{E_p I_p}{mb_0}} \quad (2)$$

式中： T 为桩的相对刚度特征值； E_p 为桩材料的弹性模量 (kN/m^2)； I_p 为桩截面的惯性矩 (m^4)； m 为桩侧地基土的水平抗力系数随深度增长的比例系数 (kN/m^4)； b_0 为桩的换算宽度 (m)：

$$b_0 = k_f(d+1) \quad (3)$$

经计算， $b_0 = 1.98 \text{ m}$ ， $T = 3.68 \text{ m}$ ， $Z \geq 14.72 \text{ m}$ 。即接头位置应位于泥面 14.72 m 以下位置。设计桩顶高程为 2.2 m，设计泥面高程为 -6 ~ -10 m，考虑预留打桩超高 1 m、表面淤泥层 2 m，故设计接头位置位于桩顶以下约 30 m 处，综合考虑取上节钢管长度为 30 m。

根据桩基轴力及地基承载力计算结果，桩长为 81 m (代表值)，因此混凝土管节 (包括桩靴) 长度为 51 m。

4 超长径比混凝土管桩的设计应用

本工程水上沉桩桩基为 $\phi 800\text{PHC}$ 桩、 $\phi 1\ 200$ 大管桩和 $\phi 1\ 200$ 钢混复合桩。 $\phi 800\text{PHC}$ 桩分布在引桥及码头，常用的 $\phi 800\text{PHC}$ 桩设计桩长一般不大于 60 m，由于本工程区域地质条件较差 (淤泥及软土层较厚)，地质持力层较深，导致桩基普遍相对较长。 $\phi 800\text{PHC}$ 桩由于桩径较小，桩身的截面惯性矩及截面刚度较小，长径比较大，在施工期

间会因自身重力或振晃动产生的弯矩而导致桩的开裂损坏。如果增大桩径，则会增加工程建造成本。如何在不增大桩径的同时，保证桩基的正常施工，是本工程超长桩应用的关键。本工程引桥 PHC 桩 (B 型) 共 332 根，桩长为 62 ~ 71 m；码头 PHC 桩 (B 型) 共 245 根，桩长为 65 ~ 75 m。 $\phi 800\text{PHC}$ 桩长径比达到 77 ~ 94，属于超长径比的桩型 (一般意义的超长桩是指长径比大于 60)。

本文主要从保障施工期安全的角度，论证超长桩的设计应用，超长桩在施工过程中容易产生破坏的过程一是吊运、二是沉桩。

4.1 桩基吊运分析

预制桩一般通过 2 点吊、4 点吊、6 点吊进行吊运，通常吊点越多桩基吊运的安全性越高 (吊运过程中桩基产生的弯矩小)，但同时会增加吊运操作步骤，降低施工效率。本工程原设计考虑将所有桩基采用 6 点吊的吊装工艺，考虑现场施工效率及本工程的进度要求，后改为将部分桩型 (小于 65 m) 由 6 点吊改为 4 点吊，以提高现场施工效率。通过对吊运过程中桩基产生的弯矩进行分析，判断是否能安全吊运。

4.1.1 4 点吊设计

1) 4 点吊吊桩吊点位置及内力计算。

根据 JTS 167-4—2012《港口工程桩基规范》^[4]，吊点位置 (图 3) 为： $L_1/L = 0.05$ ， $L_2/L = 0.28$ ， $L_3/L = 0.31$ ， $L_4/L = 0.23$ ， $L_5/L = 0.13$ 。弯矩计算公式为：

$$\text{吊立过程} \quad M = \alpha\beta\gamma qL^2 \quad (3)$$

$$\text{水平吊运} \quad M = 0.011\ 15\alpha\gamma qL^2 \quad (4)$$

式中： M 为计算最大弯矩设计值 ($\text{kN}\cdot\text{m}$)； α 为动力系数，水平吊运取 1.3，吊立过程取 1.1； β 为桩的吊立弯矩系数，取 0.013 4； γ 为作用分项系数，取 1.2； q 为桩的单位长度重力标准值 (kN/m)； L 为吊运长度 (包括桩尖) (m)。

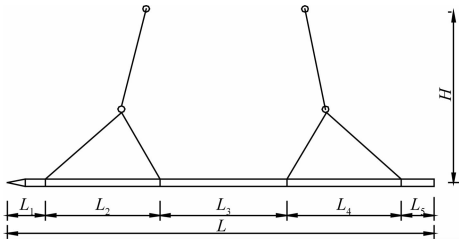


图3 4点吊示意

根据以上公式, 计算得到4点吊时各吊点弯矩(表4)。

表4 四点吊吊点位置和吊桩最大弯矩

桩长/m	L_1	L_2 /m	L_3 /m	L_4 /m	L_5 /m	最大弯矩/($\text{kN}\cdot\text{m}$)
62	2.3 m + 桩靴	17.0	18.8	14.0	7.9	402.2
63	1.9 m + 桩靴	17.1	19.0	14.1	8.0	407.4
64	1.5 m + 桩靴	17.2	19.1	14.2	8.0	412.6
65	1.2 m + 桩靴	17.3	19.2	14.2	8.1	417.8
66	0.8 m + 桩靴	17.5	19.3	14.3	8.1	423.0
67	0.5 m + 桩靴	17.5	19.4	14.4	8.2	428.3
68	0.5 m + 桩靴	17.5	19.4	14.4	8.2	433.6
69	0.5 m + 桩靴	17.5	19.4	14.4	8.2	438.9
70	0.5 m + 桩靴	17.5	19.4	14.4	8.2	444.3
71	0.5 m + 桩靴	17.5	19.4	14.4	8.2	449.7

表5 6点吊吊点位置和吊桩最大弯矩

桩长/m	L_1	L_2 /m	L_3 /m	L_4 /m	L_5 /m	L_6 /m	L_7 /m	最大弯矩/($\text{kN}\cdot\text{m}$)
62	4.2 m + 桩靴	5.5	9.5	10.9	13.5	11.1	5.3	220.3
63	3.8 m + 桩靴	5.5	9.6	11.0	13.6	11.1	5.4	223.6
64	3.4 m + 桩靴	5.5	9.7	11.1	13.7	11.2	5.4	226.9
65	3.1 m + 桩靴	5.6	9.7	11.1	13.7	11.3	5.5	226.9
66	2.8 m + 桩靴	5.6	9.8	11.2	13.8	11.3	5.5	230.3
67	2.5 m + 桩靴	5.6	9.8	11.3	13.9	11.4	5.5	233.6
68	1.9 m + 桩靴	5.7	9.9	11.4	14.0	11.5	5.6	237.0
69	1.6 m + 桩靴	5.7	10.0	11.4	14.1	11.6	5.6	240.4
70	1.4 m + 桩靴	5.7	10.0	11.5	14.2	11.6	5.6	247.2
71	0.8 m + 桩靴	5.8	10.1	11.6	14.3	11.7	5.7	250.7

4.1.3 其他吊桩参数对内力的影响

在实际操作过程中, 吊立情况下的内力比水平吊运复杂, 而影响吊运内力的主要参数也有很多, 包括吊高 H 、入水长度 L_v 、下索长度 S (不包括捆绑长度)、吊点位置、实心段长度、空心段直径等。在实际吊桩操作中, 桩的质心不会在一定的高度保持不变, 入水长度也随实际情况确定,

4.1.2 6点吊吊桩内力计算

1) 6点吊吊点位置及内力计算

根据 JTS 167-4—2012《港口工程桩基规范》^[4], 吊点位置(图4)为: $L_1/L = 0.098$, $L_2/L = 0.077$, $L_3/L = 0.153$, $L_4/L = 0.163$, $L_5/L = 0.197$, $L_6/L = 0.229$, $L_7/L = 0.083$ 。水平吊运弯矩计算公式为:

$$M = 0.005 8\alpha\gamma qL^2 \quad (5)$$

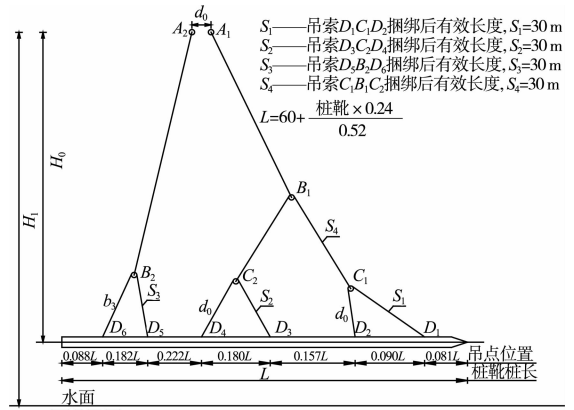


图4 长桩6点吊示意

根据以上公式, 计算得到6点吊时各吊点弯矩(表5)。

因此以上各项因素对实际操作有着一定的影响。

4.2 沉桩期桩基内力分析

沉桩期间产生斜桩桩身内力的主要原因有: 1) 桩体越长、斜度越大, 桩自重产生的弯矩、挠度越大; 2) 桩体在水面以下因水流、波浪等因素产生的弯矩; 3) 桩身振、晃动产生弯矩。通常 $\phi 800$ PHC 桩的沉桩斜率一般不大于 1:4, 本工程打