

· 施 工 ·



# 钢混复合桩吊运工艺分析

俞立新<sup>1</sup>, 卓 杨<sup>1</sup>, 方利国<sup>2</sup>

(1. 中交上海港湾工程设计研究院有限公司, 上海 200032; 2. 上海港湾工程质量检测有限公司, 上海 200032)

**摘要:** 钢混复合桩结合了混凝土管桩造价低和钢管桩抗弯性能好的优点, 在满足工程质量要求的前提下又达到了降低成本的目的。对钢混复合桩6点吊的设计计算方法进行推导并结合现场试验进行验证, 在此基础上探讨了吊桩参数的敏感性, 同时依托工程试验分析了钢混复合桩4点吊与6点吊之间的异同, 为钢混复合桩的吊运工艺提供参考。

**关键词:** 钢混复合桩; 6点吊; 4点吊; 敏感性分析

中图分类号: U 655.55<sup>\*1</sup>

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)11-0170-05

## Lifting technology for steel concrete composite pile

YU Li-xin<sup>1</sup>, ZHUO Yang<sup>1</sup>, FANG Li-guo<sup>2</sup>

(1. Shanghai Harbor Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200032, China;

2. Shanghai Harbor Quality Control & Testing Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

**Abstract:** The steel concrete composite pile combines the low cost of concrete pipe pile and good flexibility of steel pipe pile, and achieves the purpose of reducing the cost under the premise of meeting the project quality requirement. The design method of lifting steel concrete composite pile with six lift points is derived and compared with field test, based on which, the parameter sensitivity of lifting pile is discussed. Meanwhile, this paper analyzes the similarities and differences between six and four lift points based on field test. The study may serve as reference for the lifting technology of the steel concrete composite pile.

**Keywords:** steel concrete composite pile; six-points lift; four-points lift; sensitivity analysis

钢混复合桩是根据工程所处环境, 合理地将预应力混凝土管桩和钢管桩组合在一起的新型桩, 该桩型结合了混凝土管桩造价低和钢管桩抗弯性能好的优点, 在满足工程质量要求的前提下又达到了降低成本的目的。目前已在多个码头工程中得以应用, 较典型的有大麦屿港区多用途码头一期3万吨级码头试桩工程和舟山海洋工程有限公司综合基地项目。

对于混凝土长桩来说, 其强度和抗裂通常是由桩在吊立过程中的内力所控制, 而目前长桩吊运的计算主要是依据《港口工程桩基规范》<sup>[1]</sup>执行, 但规范中假定桩为均质长桩。由于钢混复合桩仍有较长的混凝土桩段, 其上、下桩段密度不同, 因此钢混复合桩吊运不能直接参照《港口工

程桩基规范》。

研究钢混复合桩吊运工艺及内力计算, 选取合理的吊桩参数, 可以使其在吊立过程中的内力尽可能减少, 降低吊桩风险, 具有较大的实用价值和经济效益。本研究在原6点吊计算公式<sup>[2]</sup>基础上重新推导并编制了相应的计算程序, 同时通过现场试验验证了程序的可靠性, 之后对吊桩参数的敏感性进行分析。

### 1 钢混复合桩6点吊运计算

如图1所示, 推导6点吊计算公式时依据下列计算假定: 1) 两根上吊索的拉力和桩的重力交于O点; 2) 桩的质心到O点距离H保持不变; 3) 忽略滑轮的摩擦力, 则动滑轮两边的吊索拉力

收稿日期: 2015-04-03

作者简介: 俞立新(1973—), 男, 高级工程师, 从事港口工程结构、桩基工程等方面的设计、科研工作。

相等, 由力的平衡可得  $GO$  平分角  $\alpha_G$ ,  $VO$  平分角  $\alpha_V$ ,  $GA$  平分角  $\alpha_A$ ,  $GF$  平分角  $\alpha_F$ ; 4) 吊索在桩轴方向产生的分力忽略不计; 5) 不考虑吊索变形, 即吊索长度不变,  $A$  点、 $F$  点、 $V$  点的运动轨迹为椭圆。

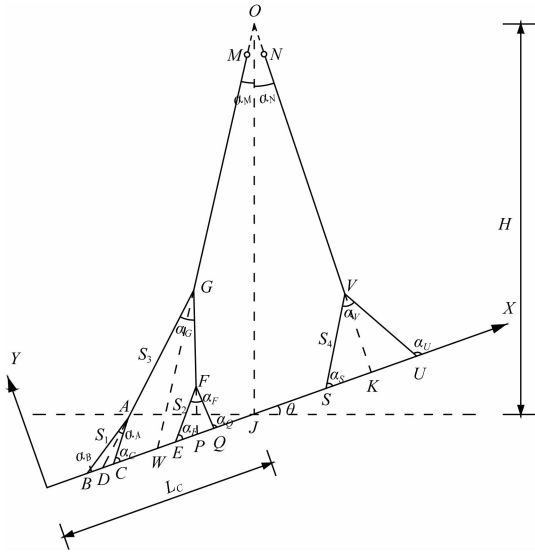


图 1 6 点吊计算示意图

主要推导过程如下:

1)  $O$  点坐标。

$$\begin{cases} x_O = L_c + H\sin\theta \\ y_O = H\cos\theta \end{cases} \quad (1)$$

2) 根据几何关系可得  $A$  点、 $F$  点、 $G$  点、 $V$  点坐标。

$$\begin{cases} x_A = \frac{x_B + x_C}{2} + \frac{S_1}{2}\cos t_1 \\ y_A = \frac{\sqrt{S_1^2 - (x_C - x_B)^2}}{2}\sin t_1 \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} x_F = \frac{x_E + x_Q}{2} + \frac{S_2}{2}\cos t_2 \\ y_F = \frac{\sqrt{S_2^2 - (x_Q - x_E)^2}}{2}\sin t_2 \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} x_G = \frac{y_F - y_A + k_{AD}x_A - k_{FP}x_F}{k_{AD} - k_{FP}} \\ y_G = k_{AD}(x_G - x_A) + y_A \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} x_V = \frac{x_S + x_U}{2} + \frac{S_4}{2}\cos t_3 \\ y_V = \frac{\sqrt{S_4^2 - (x_U - x_S)^2}}{2}\sin t_3 \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $t_1$  为  $A$  点位置的椭圆离心角,  $0^\circ < t_1 < 90^\circ$ ;

$t_2$  为  $F$  点位置的椭圆离心角,  $0^\circ < t_2 < 180^\circ$ ;  $t_3$  为  $V$  点位置的椭圆离心角,  $0^\circ < t_3 < 180^\circ$ ;  $k_{AD}$  为  $AD$  的斜率。

3) 通过编程求得能使各点坐标满足式 (6)、(7) 的  $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$  值, 即可确定各点坐标。

$$S_3 = \sqrt{(x_G - x_A)^2 + (y_G - y_A)^2} + \sqrt{(x_G - x_F)^2 + (y_G - y_F)^2} \quad (6)$$

$$\begin{cases} k_{GW} = \tan\left(\frac{\arctan k_{AD} + \arctan k_{FP}}{2}\right) \\ k_{VK} = \tan\left(\frac{\arctan k_{VS} + \arctan k_{VU}}{2}\right) \end{cases} \quad (7)$$

4) 索力计算。

在求得各点坐标以后, 由力的平衡即可求得各吊索力, 之后可相应求出桩各点弯矩。

## 2 钢混复合桩吊运试验

对在舟山海洋工程有限公司综合基地工程中应用的 320T-23 号钢混复合桩<sup>[2]</sup>进行了 6 点吊吊运试验, 对其吊立过程中, 桩身  $0^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $55^\circ$  倾角时各测点的应变值进行测量。同时, 对同型号的 320T-10 号钢混复合桩进行了 4 点吊吊运试验, 与 6 点吊试验结果进行对比。

试验桩桩长为 81 m, 其中钢管桩桩径 1 200 mm, 壁厚为 20 mm, 材料为 Q345 钢材。大管桩壁厚为 145 mm。6 点吊运试验根据吊点位置 (图 2、表 1) 在桩表面进行贴片, 共 26 个测点; 4 点吊运试验共 18 个测点 (表 2)。根据材料力学公式可由测试得到的应变值, 换算得到相应桩身的弯矩、应力值。

表 1 320T-23 桩吊运试验测点布置

测 (吊) 点	至桩尖距离/m
1	4.00
2( $R_1$ )	8.00
3	13.00
4( $R_2$ )	18.00
5	27.25
6( $R_3$ )	36.50
7	41.50
8( $R_4$ )	46.50
9	50.75
10( $R_5$ )	55.00
11	60.00
12( $R_6$ )	65.00
13	73.00

注: 表中  $R_i$  ( $i=1 \sim 6$ ) 为吊点。

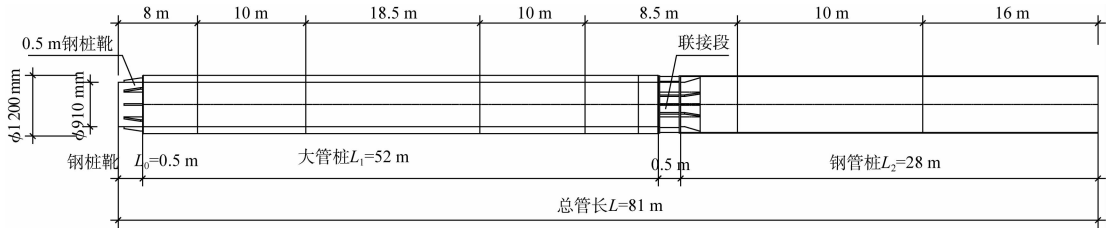


图2 6点吊吊点

表2 320T-10 桩吊运试验测点布置

测(吊)点	至桩尖距离/m
1	4.50
2( $R_1$ )	9.00
3	16.50
4( $R_2$ )	24.00
5	35.25
6( $R_3$ )	46.50
7	54.25
8( $R_4$ )	62.00
9	71.50

注:表中 $R_i$  ( $i=1\sim 4$ )为吊点。

2.1 6点吊运试验结果与分析

根据吊运试验测试结果,计算得320T-23桩的6点吊弯矩分布见图3,图中桩顶和桩尖弯矩均为0。

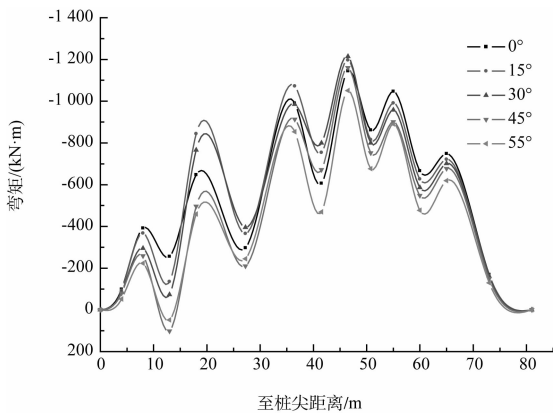


图3 320T-23 桩吊运弯矩值

从图3可以看出,320T-23桩6点吊的吊运弯矩随倾角的增大呈现出先增大后减小的趋势,最大负弯矩出现在 $R_4$ 吊点位置上,倾角为 $30^\circ$ 时其值为 $-1\,215.0\text{ kN}\cdot\text{m}$ ,相应最大混凝土压应力为 $10.33\text{ MPa}$ ;最大正弯矩出现在 $R_1$ 与 $R_2$ 吊点跨中处,倾角为 $45^\circ$ 时其值为 $101.7\text{ kN}\cdot\text{m}$ ,相应最大混凝土拉应力为 $0.86\text{ MPa}$ 。

依据编制的计算程序对320T-23桩6点吊时各点弯矩进行理论计算,为方便对比,取倾角为 $0^\circ$ 时计算结果与实测值对比见图4。

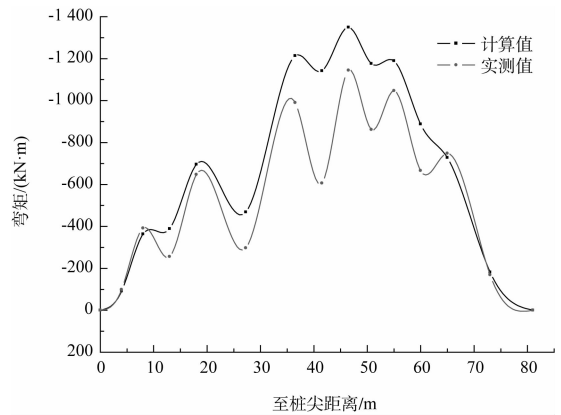


图4 320T-23 桩吊运弯矩设计值与实测值对比

从图4可以看出,计算得出的弯矩值略大于实测值,但其趋势与实测值一致,说明该设计方法能较好地反映出吊桩时的钢混复合桩的受力性能,且计算结果偏安全,满足设计需要。

2.2 4点吊运试验结果与分析

根据吊运试验测试结果,计算得320T-10桩的4点吊弯矩分布见图5,图中桩顶和桩尖弯矩均为0。

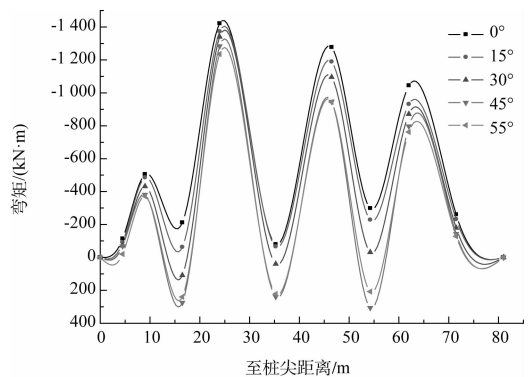


图5 320T-10 桩吊运弯矩值分布

从图 5 可以看出, 320T-10 桩 4 点吊的吊运弯矩随倾角的增大同样呈现出先增大后减小的趋势, 最大负弯矩出现在  $R_2$  吊点位置上, 其值为  $-1\,421.3\text{ kN}\cdot\text{m}$ , 相应最大混凝土压应力为  $12.08\text{ MPa}$ ; 最大正弯矩出现在  $R_3$  与  $R_4$  吊点跨中处, 倾角为  $45^\circ$  时其值为  $305.4\text{ kN}\cdot\text{m}$ , 相应最大混凝土拉应力为  $2.6\text{ MPa}$ 。以上测试值均未超过钢混复合桩混凝土桩段抗裂弯矩设计值, 但安全系数较低, 因此不建议使用 4 点吊进行长桩吊运。

### 3 钢混复合桩吊运参数敏感性分析

本节依据编制的钢混复合桩 6 点吊计算程序, 对钢混复合桩吊桩各参数进行分析, 讨论其参数敏感性。

#### 1) 吊高 $H$ 影响。

下面通过改变吊运时的高度  $H$ , 研究其高度变化对钢混复合桩受力性能的影响, 将吊高  $H$  设置在  $50\sim 70\text{ m}$  变化。图 6 为钢混复合桩吊高  $H$  与吊运弯矩的关系曲线。

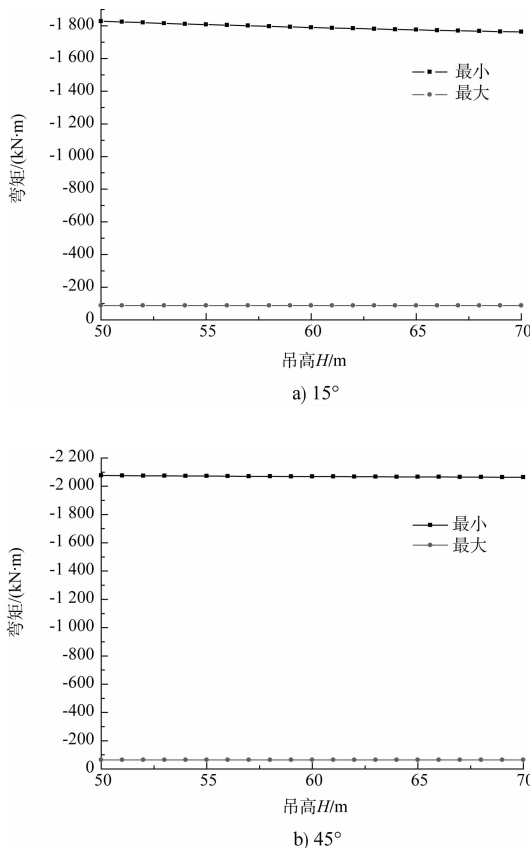


图 6 吊高  $H$  与吊运弯矩关系曲线

从图 6 可以看出, 吊运弯矩随着吊高  $H$  的变化其值变化不大,  $15^\circ$  时最大负弯矩值在吊高从  $50\text{ m}$  变为  $70\text{ m}$ , 仅减少了  $3.5\%$ ,  $45^\circ$  时最大负弯矩值在吊高从  $50\text{ m}$  变为  $70\text{ m}$ , 仅减少了  $0.6\%$ , 说明吊高对钢混复合桩吊运时的受力性能影响不大。

#### 2) 吊索长度 $S$ 影响。

下面通过改变吊运时的各吊索长度  $S$ , 研究其长度变化对钢混复合桩受力性能的影响, 将索长  $S$  设置在  $20\sim 40\text{ m}$ 。图 7 为钢混复合桩吊索长度  $S$  与吊运弯矩的关系曲线, 限于篇幅, 仅以典型的  $S_3$ 、 $S_4$  为例,  $S_1$ 、 $S_2$  的变化规律与  $S_3$  相同。

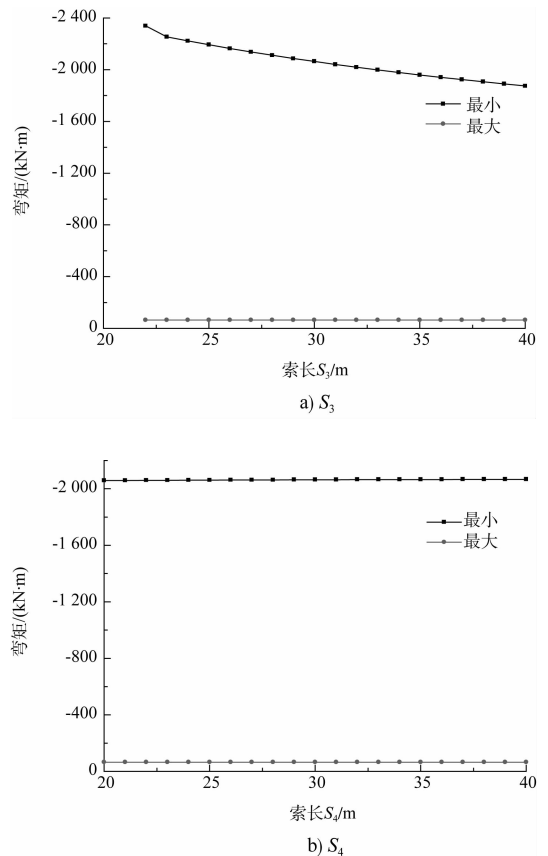


图 7 吊索长度  $S$  与吊运弯矩关系曲线

根据计算结果, 最大负弯矩随着吊索  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$  长度的增大而减小, 其中由吊索  $S_3$  长度变化引起的减小幅度最大, 达  $19.9\%$ ; 最大负弯矩随着吊索  $S_4$  长度的增大而增大, 但其幅度很小, 仅有  $0.4\%$ , 说明吊索  $S_3$  的长度对钢混复合桩吊运时的受力性能影响较大, 在条件允许的情况下应尽量增大吊索  $S_3$  长度。

### 3) 吊点位置影响。

下面研究各吊点位置变化对钢混复合桩受力性能的影响，将原吊点位置设置在  $-0.5 \sim 0.5$  m 变化。图 8 为钢混复合桩吊点位置与吊运弯矩的关系曲线，限于篇幅，仅以典型的  $B$  点、 $Q$  点为例，其余点的变化规律基本一致。

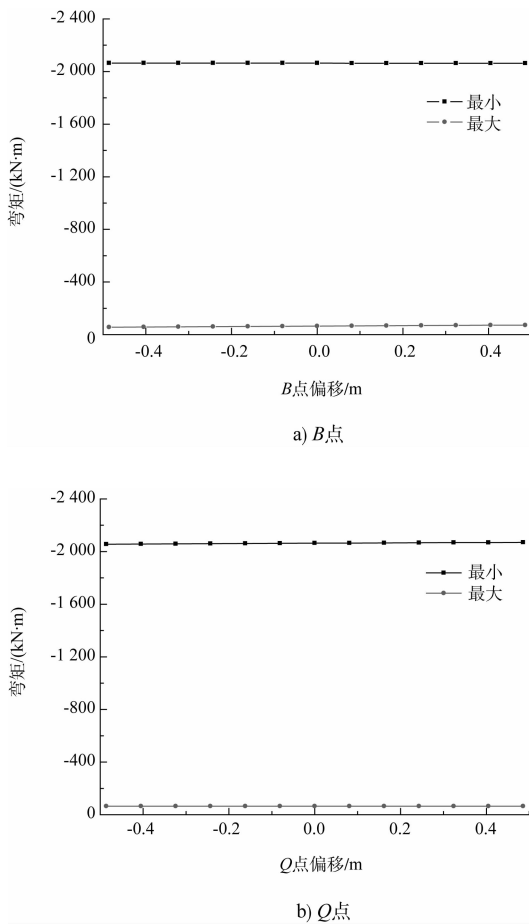


图 8 吊点位置与吊运弯矩关系曲线

根据计算结果， $B$  点位置偏差对其影响较大，最大可达 27.5%；最大负弯矩位于吊点  $Q$ ，各吊点位置偏差对其影响较不明显，其最大幅度仅为 3.3%，综合来说吊点位置对钢混复合桩吊运时的受力性能影响不大。

### 4) 质心位置影响。

下面通过改变钢混复合桩混凝土桩段的长度，使复合桩质心位置发生偏移，研究其对钢混复合桩受力性能的影响，将混凝土桩段长度设置在  $40.0 \sim 60.0$  m 变化。图 9 为混凝土桩段长度与吊运弯矩的关系曲线。

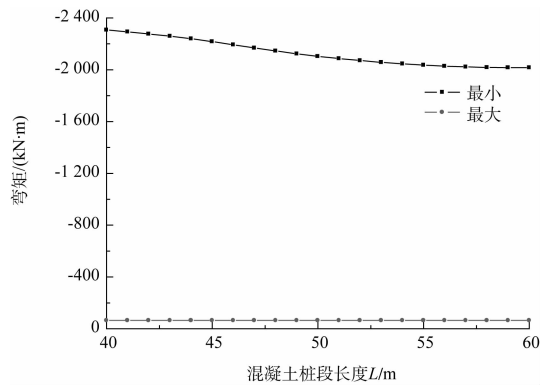


图 9 混凝土桩段长度与吊运弯矩关系曲线

从图 9 可以看出，随着混凝土桩段长度的变化，复合桩最小负弯矩基本无变化；最大负弯矩随着混凝土桩段长度的增大而逐渐减小，但混凝土桩段达到一定长度后趋于稳定，减小幅度为 12.6%，说明钢混复合桩质心的位置对其吊运时的受力性能影响较大，在满足设计要求的情况下可适当增大混凝土桩段长度，以减小钢混复合桩吊运时的最大负弯矩。

## 4 结语

1) 钢混复合桩吊桩理论计算方法能较好地反映出吊桩时的钢混复合桩的受力性能，且计算结果偏安全，满足设计需要；

2) 钢混复合桩吊运弯矩随倾角的增大呈现出先增大后减小的趋势，4 点吊时吊运过程中的弯矩大于 6 点吊时相应倾角的吊运弯矩，虽未超过钢混复合桩混凝土桩段抗裂弯矩设计值，但安全系数较低，因此不建议使用 4 点吊进行长桩吊运；

3) 6 点吊时，吊高、各吊点位置对钢混复合桩吊运时的受力性能影响不大；吊索  $S_3$  的长度、钢混复合桩重心位置对钢混复合桩吊运时的受力性能影响较大，在条件允许的情况下应综合考虑确定吊索  $S_3$  和混凝土桩段的长度。

### 参考文献：

- [1] JTS 167-4—2012 港口工程桩基规范[S].
- [2] 王保兴. 预应力钢筋混凝土长桩六点吊运研究[J]. 中国港湾建设, 1996(5): 34-40.
- [3] 刘永辉. 钢混复合桩在舟山综合基地工程中的应用[J]. 港工技术与管理, 2013(S1): 8-12.