



# 不同侧支孔布置形式下的 船舶系缆力数值模拟\*

王蛟<sup>1</sup>, 杨斌<sup>2</sup>, 陈明<sup>2</sup>

(1. 南京水利科学研究院, 江苏南京 210029; 2. 重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074)

**摘要:** 对于闸底长廊道侧支孔输水系统的水动力学研究, 目前主要采用物理模型试验和现场原型观测方法, 均需消耗大量的人力和物力; 采用方便快捷且不受试验条件及尺度效应影响的数值计算方法的研究成果相对较少。通过闸室船舶系缆力数值模拟对不同侧支孔布置形式下输水系统水动力学特性进行系统性研究, 总结分析其布置原则, 可为船闸闸底长廊道侧支孔输水系统的设计和优化提供理论依据, 并为类似工程提供借鉴, 具有较重要的学术价值和实际意义。

**关键词:** 物理模型试验; 数值模拟; 系缆力; 布置原则

中图分类号: TV 662

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)04-0094-06

## Numerical simulation of mooring force under different arrangements of collateral holes

WANG Jiao<sup>1</sup>, YANG Bin<sup>2</sup>, CHEN Ming<sup>2</sup>

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;

2. School of River & Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

**Abstract:** Nowadays, the water dynamic researches about collateral hole of bottom-brake and long-corridor filling and emptying system mainly use the physical model test and field prototype observation method, which need to consume a large amount of manpower and material resources. There are relative few researches with numerical calculation method which is fast and convenient and not affected by test conditions and the achievement effect of scale. Therefore, it is of important academic value and practical significance to do the water dynamic researches about collateral hole of bottom-brake and long-corridor filling and emptying system through the ship mooring force of lock chamber by numerical simulation, get the dynamic characteristic of systemic study and summarize the principles of arrangement, provide the theoretical basis for the design and optimization of the filling and emptying system, and provide reference for similar engineering design and construction.

**Keywords:** physical model experiment; numerical simulation; mooring force; principles of arrangement

船闸灌泄水过程中最重要的组成部分是输水系统, 一般包括进水口、输水廊道及(闸)阀门、出水口和消能设施等。输水系统的布置与设计需满足两大条件: 一是控制输水时间, 以满足船闸的通过能力和营运效益要求; 二是合适的水流条件, 保证船舶在闸室及引航道内停泊和航行安

全<sup>[1]</sup>。可见, 要保证船闸高效和安全运行, 就必须解决好输水系统的消能问题<sup>[2]</sup>。

目前, 针对闸底长廊道侧支孔输水系统闸室船舶系缆力在不同侧支孔布置形式下系统性研究的相关成果不多, 尤其是便捷省时、节省成本的数值模拟成果甚少<sup>[3-4]</sup>, 而闸室船舶系缆力能客观

收稿日期: 2015-10-14

\*基金项目: 重庆市教委科学技术研究项目(KJ1400322)

作者简介: 王蛟(1989—), 男, 博士研究生, 从事船闸及升船机应用研究。

地反映不同侧支孔布置形式的优劣及闸室水流的分布情况。因此, 通过闸室船舶系缆力数值模拟方法系统研究不同侧支孔布置形式下输水系统水动力学特性是一个急需填补又意义重大的课题, 对于船闸闸底长廊道侧支孔输水系统的设计和建设具有实际意义。

本文基于典型闸底长廊道分散式输水系统, 选择代表船型, 建立“船舶-水流”耦合动力响应的三维数学模型, 采用三维紊流模拟方法、动网格技术以及闸室船舶系缆力并行计算程序, 借助 fluent 软件对不同侧支孔布置形式下的闸室船舶系缆力进行数值模拟计算, 取得了一定的研究成果, 可供类似工程借鉴。

### 1 计算原理及建模

在船闸闸室内, 船舶由于缆绳的作用, 相应地自由度受到限制。在此约束条件下, 船舶发生的纵摇和横摇不明显, 而参与最为显著的运动为沿竖向( $y$  轴)的平动, 即升降运动。本文主要考虑的即是船舶的升降运动, 从而简化了计算方程组。采用的是已有的计算方法<sup>[5]</sup>。

由船舶受力(图1)可知, 船舶在水平面( $xz$  平面)上受到纵向系缆力  $F_L$ 、船尾横向系缆力  $F_{T1}$  (简称后横向系缆力)和船首横向系缆力  $F_{T2}$  (简称前横向系缆力)、纵向水压力  $F_{p_x}$  和横向水压力  $F_{p_z}$ 、纵向黏滞力  $F_{v_x}$  和横向黏滞力  $F_{v_z}$ 。若将水流作用力均移至船舶质心上时, 则同时产生相应的力矩  $M_{p_y}$  和  $M_{v_y}$ 。水流作用力的计算如下:

$$F_{p_x} = \int_{A_s} p_x dS \quad (1)$$

$$F_{p_z} = \int_{A_s} p_z dS \quad (2)$$

$$F_{v_x} = \int_{A_s} \tau_x dS \quad (3)$$

$$F_{v_z} = \int_{A_s} \tau_z dS \quad (4)$$

$$M_{p_y} = M_0(F_{p_x}) + M_0(F_{p_z}) = \int_{A_s} p_x(z - z_0) dS + \int_{A_s} p_z(x_0 - x) dS \quad (5)$$

$$M_{v_y} = M_0(F_{v_x}) + M_0(F_{v_z}) = \int_{A_s} \tau_x(z - z_0) dS + \int_{A_s} \tau_z(x_0 - x) dS \quad (6)$$

式中:  $p_x$ 、 $p_z$  分别为船舶任意表面上的水压力在  $x$ 、 $z$  方向上的分量;  $A_s$  为船舶表面;  $\tau_x$ 、 $\tau_z$  分别为船舶任意表面上的黏滞应力在  $x$ 、 $z$  方向上的分量;  $(x_0, y_0, z_0)$  为船舶质心坐标;  $(x, y, z)$  为船舶表面上任意一点坐标。

根据船舶在  $xz$  平面上的受力平衡, 可建立以下表达式:

$$\begin{cases} \sum F_x = 0 \\ \sum F_z = 0 \\ \sum M_y = 0 \end{cases} \quad (7)$$

从而, 可得:

$$\begin{cases} F_{p_x} + F_{v_x} + F_L = 0 \\ F_{p_z} + F_{v_z} + F_{T1} + F_{T2} = 0 \\ F_{T1}(x_0 - x_1) + F_{T2}(x_0 - x_2) + M_{p_y} + M_{v_y} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

在上式中, 关于水流作用力易于求出, 则仅剩3个未知数, 即纵向系缆力  $F_L$ 、前横向系缆力  $F_{T1}$  和后横向系缆力  $F_{T2}$ 。因此, 通过方程组便可求出船舶所受的纵、横向系缆力。

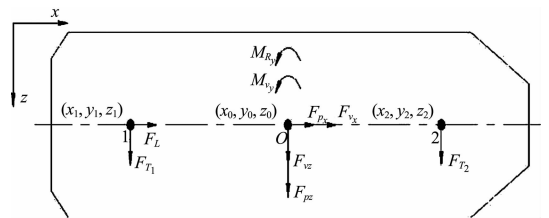


图1 船舶水平方向受力

向闸室灌水时, 船舶随闸室水位的上升而上升。此时船舶参与的运动为船体和水体间的耦合运动, 闸室水位上升, 则船舶浸水面积加大, 势必引起船体所受浮力增加, 从而打破原有平衡状态, 改变原有加速度。本文只考虑船舶竖直方向( $y$  方向)的运动, 根据上述分析, 在船闸灌水过程中, 船舶总体上是做变加速的曲折上升运动。船舶在竖直方向上的受力见图2。根据牛顿第二运动定律, 可建立相应的运动控制方程组:

$$\begin{cases} F_{p_y} + F_{v_y} - m_s g = m_s \dot{v}(t) \\ F_{p_y} = \int_{A_s} p_y dS \\ F_{v_y} = \int_{A_s} \tau_y dS \end{cases} \quad (9)$$

式中： $F_{p_y}$ 和 $F_{v_y}$ 分别为水压力和黏滞力在 $y$ 方向上的分量； $m_s$ 为船舶质量； $g$ 为重力加速度； $v(t)$ 为 $t$ 时刻船舶运动速度； $p_y$ 和 $\tau_y$ 分别为船舶任意表面上的水压力和黏滞应力在 $y$ 方向上的分量。

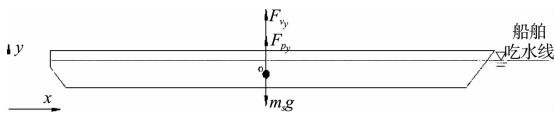


图2 船舶在竖直方向上的受力

选择代表船型，建立的“船舶-水流”耦合动力响应三维数学模型及边界条件（图3）。在船闸灌水过程中，船体将随闸室水位不断上升，为适应新的计算区域形状，需要在每个时间步上更新网格，就需要动网格技术<sup>[6]</sup>。为兼顾计算精度和减小计算量，网格剖分时将闸室区域划分成多块区域，并对船舶附近动区域进行网格加密（图4）。

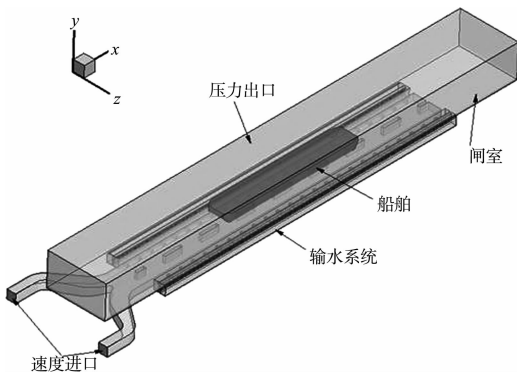


图3 计算模型全域三维立体图

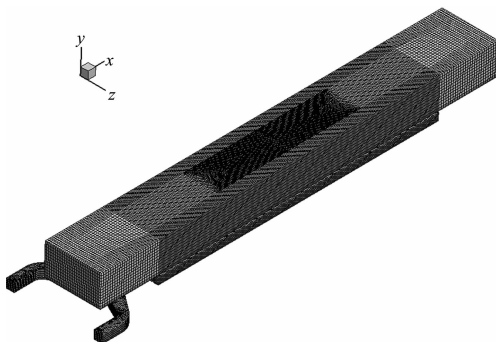


图4 计算全域网格剖分

模型验证采用计算值与物理模型实测值对比的方式。实测值来源于本研究依托工程的物模试验<sup>[7]</sup>。图5比较了船舶纵向系缆力数值计算与实测值的过程线，从图中可清晰看出，数值模拟得出的船舶纵向系缆力的变化曲线与试验中测得的情况基本一致，但也存在一些错峰现象；从量值上，船舶纵向系缆力的计算值与实测值存在一定差距，但从模拟的要求来看，这样的失真程度是可以接受的。通过验证充分说明了所采用的船舶系缆力数值模拟方法的可行性，以及数值模拟结果的可靠性和合理性。

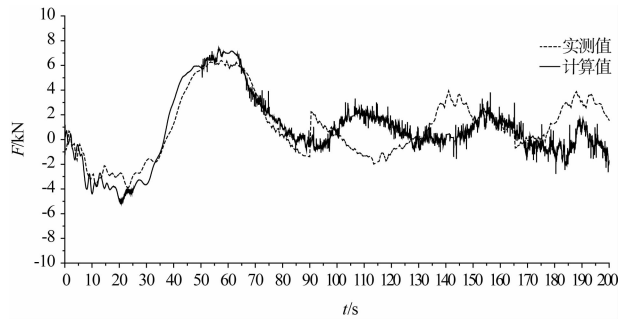


图5 船舶纵向系缆力过程

## 2 成果分析

闸底长廊道输水系统的侧支孔布置形式变换主要分3类：1) 支孔面积变化；2) 支孔高宽变化；3) 支孔个数变化。

为保证成果对比的可行性，进行对比的布置形式、支孔总出流面积需保持一致。基于以上3种基本变换，选取较大的变换尺度，以便发现支孔变换对输水特性影响的大致趋势和规律，最终确定了9种布置形式(表1)。

表1 侧支孔布置形式具体尺寸

编号	侧支孔形式(高×宽×个数)/(m×m×个)
1	0.9×0.75×24
2	0.9×0.85×8+0.9×0.75×8+0.9×0.65×8
3	1.2×0.75×24
4	0.9×1×24
5	0.72×1.25×24
6	0.5×1.8×24
7	0.9×1.3×18
8	0.9×0.8×30
9	0.9×0.65×8+0.9×0.75×8+0.9×0.85×8

对各种侧支孔布置形式均进行船闸灌水前 200 s 的三维数值模拟研究, 通过对比分析闸室船舶系缆力, 以及特征断面的水力特性来说明侧支孔布置形式的优劣, 进而总结该输水系统布置形式下的侧支孔基本布置原则。在此仅以支孔面积变换为例, 选取部分代表性图表说明成果分析过程, 主要从以下 4 方面进行(图中均以相应编号代表不同布置形式):

1) 系缆力对比(图 6)。通过对比系缆力, 可以直观地得出不同布置形式下船舶系缆力的幅值、对称性及稳定性(表 2), 对布置形式的相对优劣情况作出初步判断。

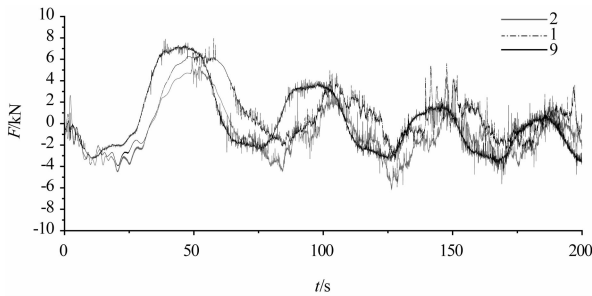


图 6 船舶纵向系缆力对比

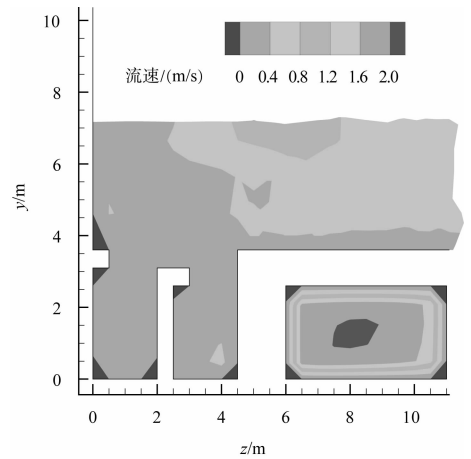
表 2 系缆力对比

布置形式 编号	前横力 幅值/kN	后横力 幅值/kN	纵向力 幅值/kN	横向力 稳定性	纵向力 稳定性
1	-12 ~ 5	-11 ~ 8	-4 ~ 7	较差	较差
2	-3 ~ 3	-5 ~ 5	-5 ~ 5	一般	较好
9	-2 ~ 2	-3 ~ 3	-4 ~ 8	较好	一般

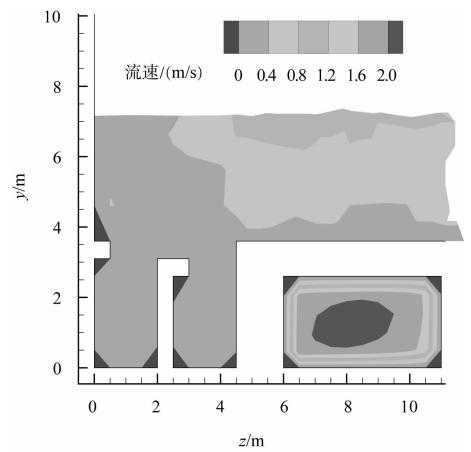
由图表可知, 沿水流方向, 单支孔面积按由大到小的方式布置能取得更好的出流效果, 不仅能明显减小船舶所受横向系缆力、增加对称性, 还可提高船舶系缆力变幅的稳定性。

为进一步分析系缆力有所不同的原因, 选取了特征时间点, 对特征断面做水力特性分析。

2) 闸室特征横断面流速分布比较(图 7)。特征断面取在前、中、后部分, 能充分说明船体周围流速的分布情况(表 3)。



a) 布置形式2



b) 布置形式1

图 7 横断面流速对比 (t = 115 s, x = 30 m)

表 3 船体周围流速值

t/s	布置形式 编号	船体周围流速 (m/s)		
		x = 30 m	x = 60 m	x = 90 m
60	1	1.0	0.8	0.4
	2	1.0	0.8	0.4
	9	0.4	0.3	0.2
115	1	0.8	0.8	0.8
	2	0.6	0.6	0.6
	9	1.0	1.0	0.4
200	1	2.0	1.0	1.5
	2	1.0	1.0	1.8
	9	0.7	0.7	1.0

由图表可知, 布置形式 9 按水流方向支孔面积渐大的方式布置, 闸室中后排支孔出流面积较大, 而灌水初期流量较小, 导致通过支孔进入闸室中部的的水体流速较其余两种形式更小。

3) 闸室特征水平剖面流速分布比较(图8)。特征断面取在侧支孔水平剖面、船底紊动区域水平剖面以及闸室水面,能充分说明侧支孔的出流情况及船体周围流场的分布情况(表4)。

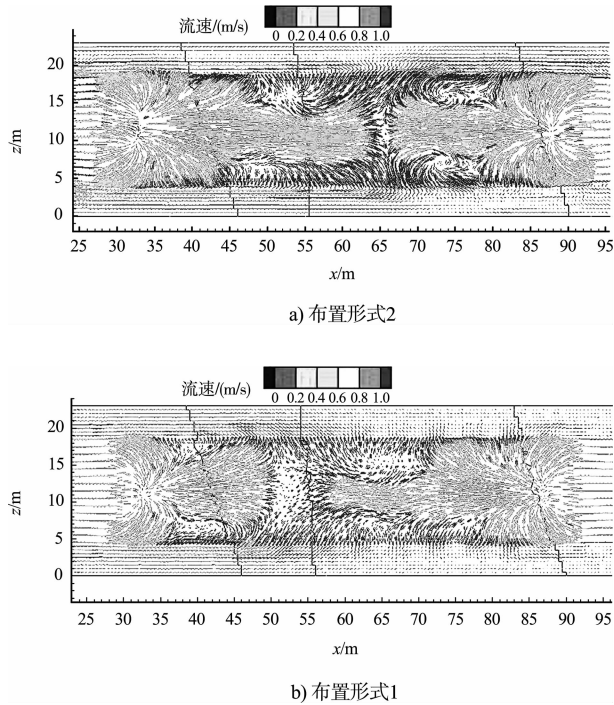


图8 水平断面流速对比 ( $t = 60\text{ s}$ ,  $y = \text{船底}$ )

表4 特征断面流速值

特征断面	布置形式编号	流速/(m/s)			对称性
		60 s	115 s	200 s	
支孔断面	1	1.5	4.5	8.0	
	2	1.2	5.0	7.0	
	9	1.0	4.2	6.0	
船底断面	1	0.6	0.5	0.3	一般
	2	0.6	0.6	0.4	较好
	9	0.2	0.2	0.2	较差
闸室水面	1	1.0	0.6	0.5	一般
	2	1.0	0.4	0.6	较好
	9	0.5	0.2	0.2	较差

由图表可知,布置形式9特征断面上任意时刻流速均为最小,但船体周围流速对称性最差。这是因为灌水初期,输水流量不大,虽然形式9前排支孔出流面积较小,但能满足出流要求。

4) 船舶纵中剖面紊动能比较(图9)。特征断面取在闸室纵中剖面,能说明船体首尾两端的紊动情况(表5)。

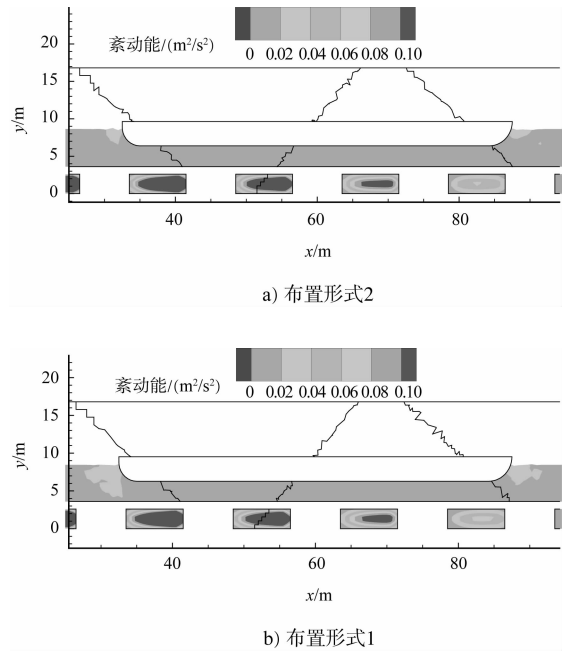


图9 纵断面紊动能对比 ( $t = 115\text{ s}$ )

表5 特征断面紊动能值

特征断面	布置形式编号	紊动能/( $\text{m}^2/\text{s}^2$ )			对称性
		60 s	115 s	200 s	
廊道内	1	0.03	0.09	0.05	
	2	0.02	0.08	0.05	
	9	0.04	0.10	0.05	
船体周围	1	0.03	0.04	0.02	一般
	2	0.02	0.02	0.01	较好
	9	0.01	0.01	0.005	较差

由图表可知,灌水初期,输水流量不大,虽然形式9前排支孔出流面积较小,却依然满足出流要求。中后排支孔面积逐渐增大,水体能量沿程逐渐降低,通过支孔分流,能量将得到明显消耗。相对而言,布置形式2较9紊动能稍大,但紊动能分布对称性明显较好。

综上所述,在闸底长廊道分散式输水系统布置形式下,采用沿水流方向渐小的支孔设计,能更有效地消耗水体能量,使得进入闸室的水体均匀度更高,减小船体所受的横向系缆力;相对而言,这种支孔变换方式对纵向系缆力的影响较小。

同理进行支孔高宽、个数变换的数值模拟成果分析,总结侧支孔布置形式的基本原则。

### 3 结语

本文通过一系列不同侧支孔布置形式下的船舶系缆力研究,大致得出了侧支孔布置形式变换对闸室船舶系缆力的影响趋势,并通过特征断面水动力特性分析,总结了侧支孔形式的一般布置原则:

1) 侧支孔布置形式的优劣可以很好地通过系缆力来反映。

2) 在分散式输水系统布置形式下,侧支孔的改变对纵向系缆力的影响较小,对横向系缆力的影响较大。

3) 当改变单支孔面积时,支孔面积沿水流方向渐小的布置形式能取得更好的分流效果。其渐变程度取决于闸室有效尺度以及灌水强度。

4) 当支孔高宽取值较接近时,水体能取得更好的出流消能效果。但高宽比是否为“1”时效果最好,还需进一步研究,并可能与闸室有效尺度及作用水头等因素有关。

5) 当改变侧支孔个数时,侧支孔个数选取存在一个最优值。其主要影响因素有闸室有效尺度及出流强度等。

由于计算资源有限,本文模型网格划分还不够精细,计算结果只能说明支孔变换对系缆力影响的大致趋势,而对于支孔个数最优值的确定等内容还有待进一步研究。

### 参考文献:

- [1] JTJ 306—2001 船闸输水系统设计规范[S].
- [2] 吴澎,宣国祥. 船闸设计的新进展[J]. 水利水运工程学报, 2009(4): 122-127.
- [3] 赖子机,宁子秋,宣国祥,等. 右江那吉航运枢纽船闸闸底长廊道侧支孔输水系统方案水力学模型试验研究[J]. 水运工程, 2007(2): 68-73.
- [4] 宣国祥,黄岳,李君. 桂平二线船闸闸底长廊道输水系统布置研究[J]. 水运工程, 2009(3): 109-115.
- [5] 陈明. 船闸集中输水系统水力特性与闸室船舶系缆力数值模拟研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2013.
- [6] Morton K W, Baines M J. Numerical methods for fluid dynamics[M]. USA: Academic Press, 1982.
- [7] 宣国祥,黄岳. 江西省峡江水利枢纽船闸闸底长廊道输水系统水力学模型试验研究报告[R]. 南京: 南京水利科学研究院水工所, 2013.

(本文编辑 武亚庆)

(上接第 87 页)

桩船选用三航 18 打桩船,吊桩点至水面的最大值可达到 79 m,设计将大于 70 m 长度的  $\phi 800\text{PHC}$  超长桩最大斜率定为 1:5.5,以减少桩体因自身重力产生的弯矩、挠度。

### 4.3 工程实施情况

根据上述 4 点吊及 6 点吊的内力计算结果,4 点吊的最大吊桩弯矩为 449.7 kN·m,6 点吊的最大吊桩弯矩为 250.7 kN·m,内力设计值均未超过本工程  $\phi 800\text{PHC}$  桩(B型)的抗裂弯矩 535.7 kN·m。但考虑现场施工安全,在前期试打的 71 m 超长桩采用了 6 点吊,后期 62~65 m 桩均改为 4 点吊。在吊、沉桩过程中,桩身平直,未出现明显挠度。完成的 245 根桩未发生任何断桩事故,且大应变及小应变检测结果均显示桩身完整度好。

### 5 结语

本工程应用于吊机墩上的钢混复合桩受力性能较强(等同钢管桩)且成本相较于钢管桩低,性能和成本优势突出,是一种不同于常规桩型的新型桩基;如何保证超长桩的安全使用,本文提出了明确的设计思路,为将来同类型的工程提供了参考。

### 参考文献:

- [1] 浙江省工程勘察院. 工程地质勘察报告[R]. 浙江: 浙江省工程勘察院, 2012.
- [2] 中交三航局宁波分公司. 钢混复合桩的研制与开发[R]. 宁波: 中交三航局宁波分公司, 2008.
- [3] JTS 167-1—2010 高桩码头设计与施工规范[S].
- [4] JTS 167-4—2012 港口工程桩基规范[S].

(本文编辑 武亚庆)