



# 钢混组合桩应用技术

卓杨, 邱松, 吴锋

(中交上海三航科学研究院有限公司, 上海 200032)

**摘要:** 钢混组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, 其上部的抗弯能力与钢管桩相当, 在一定程度上弥补了预应力混凝土大管桩抗弯能力不足的应用瓶颈, 在满足工程质量要求的前提下又达到了降低成本的目的。结合工程实例对钢混组合桩的设计方法、可打性以及综合经济成本进行分析, 为钢混组合桩的应用推广提供参考。

**关键词:** 钢混组合桩; 桩型设计; 可打性分析; 综合成本分析

中图分类号: U 655.55

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)07-0141-06

## Applied technology of the steel concrete composite pile

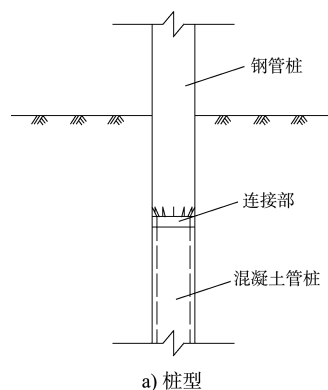
ZHUO Yang, QIU Song, WU Feng

(Shanghai Third Harbor Engineering Science & Technology Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

**Abstract:** Combined with low cost of concrete cylinder pile and good flexural performance of steel tubular pile, the flexural capacity of the steel-concrete composite pile's upper part is equivalent to steel tubular pile, to a certain extent, making up for the application bottleneck of large-diameter prestressed concrete cylinder pile's flexural capacity, under the premise of meeting the project quality requirements and achieving the purpose of reducing costs. combined with the engineering example, the paper analyzes the design method, drivability and the comprehensive economic cost of steel concrete composite pile, which provides reference for the application of steel concrete composite pile.

**Keywords:** steel concrete composite pile; pile type design; drivability analysis; analysis on comprehensive cost

钢混组合桩(图1)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桩型, 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。虽然目前对于钢混组合桩已积累了一定的经验, 但生产控制、施工技术规范化以及应用推广等方面还存在着一些问题。



收稿日期: 2016-02-03

作者简介: 卓杨(1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事港口工程结构、桩基工程、海上风电基础等方面的设计、科研工作。



b) 现场吊桩

图1 钢混组合桩

本文结合钢混组合桩的工程实例,研究钢混组合桩设计方法与可打性,分析钢混组合桩的适用范围,并对其综合经济成本进行分析。

## 1 钢混组合桩设计方法

### 1.1 钢管桩壁厚

#### 1) 等刚度要求。

钢混组合桩是将预应力混凝土管桩和钢管桩

组合在一起的新桩型,为满足桩基加工及吊运等结构变形的连续性条件,理想状态下要求桩身整体抗弯刚度一致,即混凝土管桩的抗弯刚度和钢管桩的抗弯刚度相等:

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

式中:  $E_s$  为钢管桩材料的弹性模量(MPa);  $I_s$  为钢管桩截面对中心轴的惯性矩( $m^4$ );  $E_c$  为混凝土管桩材料的弹性模量(MPa);  $I_c$  为混凝土管桩截面对中心轴的惯性矩( $m^4$ )。

选取后张法预应力混凝土大管桩<sup>[1]</sup>,根据上式计算钢管桩截面对中心轴的惯性矩和钢管桩的内径和壁厚,计算结果见表1。

从表1可以看出,对于等抗弯刚度条件,同直径大管桩相对应的钢管桩壁厚相差不到0.5 mm,因此可以对同直径钢混组合桩采用统一壁厚,以方便选型。根据表1,将钢管桩型号定为两个: D1200 $\delta$ 20、D1400 $\delta$ 21。

表1 等抗弯刚度时组合桩钢管壁厚

大管桩型号	大管桩 外径/mm	大管桩 壁厚/mm	大管桩截面 惯性矩/ $m^4$	混凝土弹性 模量/MPa	钢材弹性 模量/MPa	钢管桩截面 惯性矩/ $m^4$	钢管桩 壁厚/mm
D1200B32-2			0.070 9			0.012 4	19.2
D1200B48-1	1 200	145	0.072 3			0.012 6	19.5
D1200B36-2			0.071 2	36 000	206 000	0.012 4	19.2
D1400C40-2			0.121 5			0.021 2	20.6
D1400C60-1	1 400	150	0.124 0			0.021 7	21.0

#### 2) 结构设计要求。

港口工程中钢管桩需进行防腐蚀处理,且一般采用预留腐蚀厚度与另一种防腐蚀措施(防腐涂层、阴极保护等)联合的防腐方案,根据JTS 167-4—2012《港口工程桩基规范》<sup>[2]</sup>,钢管桩

的预留腐蚀厚度可按下式计算,具体参数见规范:

$$\Delta\delta = V[(1-P_t)t_1 + (t-t_1)] \quad (2)$$

以  $V=0.5$  mm/a、 $P_t=70\%$ 、 $t_1=t=50$  a 为参数计算,得  $\Delta\delta=7.5$  mm。扣除此厚度后相应钢管桩的抗弯强度见表2。

表2 扣除预留腐蚀厚度后钢管桩抗弯强度设计值

大管桩型号	抗弯强度设计值 $M_c/(kN\cdot m)$	钢管桩 直径/mm	设计钢管桩 壁厚/mm	扣除预留腐蚀厚度后 钢管桩截面惯性矩/ $m^4$	扣除预留腐蚀厚度后 抗弯强度设计值 $M_s/(kN\cdot m)$	$M_s/M_c$
D1200B32-2	2 377					1.72
D1200B48-1	2 657	1 200	20	0.007 9	4 089	1.54
D1200B36-2	2 505					1.63
D1400C40-2	3 486					1.74
D1400C60-1	3 881	1 400	21	0.013 7	6 057	1.56

从表2可以看出,扣除预留腐蚀厚度后,钢管桩的抗弯强度设计值均在相应大管桩抗弯强度设计值的1.5倍以上,充分发挥了钢管桩抗弯性能好的优点,基本能满足工程需要。

### 1.2 钢管桩长度

为充分保证桩基质量,根据JTS 167-4—2012《港口工程桩基规范》,设计时宜将钢混组合桩接头部位放置于桩身弯矩零点以下,一般取 $Z \geq 4T$ ,其中 $Z$ 为弯矩零点距泥面深度, $T$ 为桩的相对刚度特征值,具体计算方法见规范。对于选定的两个钢管桩型号,可得 $T$ 值计算公式如下:

$$T \approx \begin{cases} \frac{16.8}{\sqrt[5]{m}} & D1200\delta 20 \\ \frac{18.3}{\sqrt[5]{m}} & D1400\delta 21 \end{cases} \quad (3)$$

对于JTS 167-4—2012《港口工程桩基规范》中所列 $m$ 取值范围,计算结果见图2。

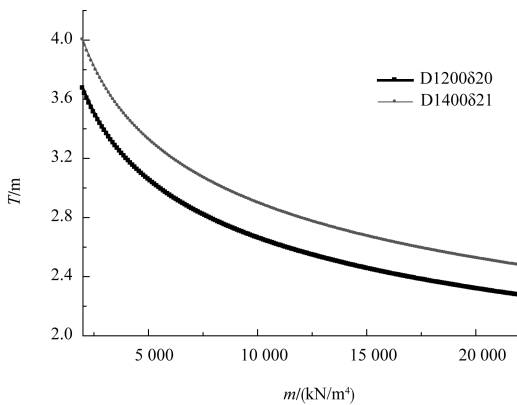


图2  $T$ 值随 $m$ 值变化曲线

从图2可以看出,对于不同地质条件,钢管桩伸入泥面以下距离相差大约1.4~1.5 m;对于两种不同直径桩型,钢管桩伸入泥面以下距离相差大约0.2~0.3 m。因此可统一将钢管桩在泥面以下长度 $Z$ 的计算式定为:

$$Z \geq \frac{73}{\sqrt[5]{m}} \quad (4)$$

### 1.3 钢混组合桩承载能力

钢混组合桩在上部以钢管桩承受水平荷载和弯矩,在下部以预应力混凝土管桩承受竖向荷载,根据JTS 151—2011《水运工程混凝土结构设计规

范》<sup>[3]</sup>中预应力混凝土管桩正截面受压承载力的计算公式,令 $M_u = 0$ 计算得大管桩桩身能承受的竖向荷载设计值(表3)。

表3 大管桩桩身能承受竖向荷载设计值

大管桩型号	竖向压力设计值/kN	竖向向上拔力设计值/kN
D1200B32-2	9 172	5 914
D1200B48-1	8 575	7 459
D1200B36-2	8 690	6 653
D1400C40-2	11 148	7 392
D1400C60-1	10 400	9 324

根据JTS 152—2012《水运工程钢结构设计规范》<sup>[4]</sup>中钢管桩轴心受拉、受压承载力的计算公式,假定钢管桩长度为30 m,计算得钢管桩(扣除预留腐蚀厚度)桩身能承受的竖向荷载设计值(表4)。

表4 钢管桩桩身能承受竖向荷载设计值

钢管桩型号	竖向压力设计值/kN	竖向向上拔力设计值/kN
D1200δ20	8 651	13 583
D1400δ21	12 358	17 159

对比表3、4可以看出,扣除预留腐蚀厚度后,钢管桩桩身竖向承载能力基本大于相应的大管桩,因此对于钢混组合桩本体承载能力方面,在设计时其大管桩部分应能满足竖向承载力要求、钢管桩部分应能满足抗弯承载力要求。

## 2 钢混组合桩可打性分析

基桩可打性分析是指在一定的场地条件下,采用相应的施工设备和工艺能否顺利、高效地将桩打到设计高程,而不会出现桩身质量问题及拒锤现象。钢混组合桩可打性分析与常规钢管桩、混凝土管桩类似,不同的是钢混组合桩是变截面、变材料桩,计算分析更加复杂。下面以舟山某综合基地项目为例,对比分析钢混组合桩与同条件的钢管桩和大管桩的可打性。

该项目共开展了2根钢混组合桩的高应变全程监控,其中320T-3、320T-10的打桩实测承载力分别为7 521、7 961 kN。假设现场在相同地质条件下用同样的锤型分别振沉3根桩型、桩长、壁厚等一致的钢管桩、大管桩、钢混组合桩,3根桩的计算参数见表5。可打性采用美国PDI公司开发的GRLWEAP软件进行分析。

表5 钢管桩、大管桩、钢混组合桩计算参数

桩型	桩长/m	壁厚/mm	锤型	钻孔	打桩阻力/kN
钢管桩	81	20	Delmag D100	CK12	8 000
大管桩	81	145	Delmag D100	CK12	8 000
钢混组合桩	28.5 钢管桩+52 混凝土桩+0.5 钢桩靴	10 钢+145 混凝土	Delmag D100	CK12	8 000

表6为总锤击数、最终贯入度计算结果汇总,表7为320T-3、320T-10两根钢混组合桩桩现场实测贯入度和总锤击数。

结合表6、7的可打性计算结果及现场实测结果,可以看出:

1) 相同地质条件下用同样的锤型分别振沉3根桩型、桩长、壁厚等一致的钢管桩、大管桩、钢混组合桩,总锤击数、最后贯入度等相差不大。说明振沉钢混组合桩时,能量能较好地通过钢管桩传递到大管桩上。钢混组合桩的可打性不低于大管桩。

2) 相比大管桩,钢混组合桩沉桩时,由于打桩锤不直接作用到桩身混凝土上,有了顶部一段钢管桩作为缓冲,大大缓解了大管桩顶部混凝土的局部压应力,使大管桩顶部被打坏的可能性大大降低,有利于桩身混凝土质量提高。

3) 钢混组合桩总锤击数、最后贯入度的计算值与实际情况较为接近但也存在一定出入,主要是因为波动方程法计算时采用了一些计算假定,另外打桩系统(锤的效率、锤垫、桩垫)、现场地质条件也存在不确定性。

表6 总锤击数、最终贯入度计算结果

桩型	总锤击数/击	最后贯入度/mm
钢管桩	2 847	3.2
大管桩	2 451	4.3
钢混组合桩	2 393	4.7

表7 钢混组合桩320T-3、320T-10两根桩现场实测贯入度和总锤击数

桩号	总锤击数/击	最后贯入度/mm
320T-3	2 539	6
320T-10	3 269	4

### 3 经济成本分析

#### 3.1 台州港某码头一期工程

##### 1) 桩型设计。

本工程试桩仅对其竖向抗压承载能力进行测试,根据前述分析结果,钢混组合桩竖向承载力由下部大管桩决定,因此试桩无法说明上部钢管桩的承载特性。本节以试桩理论轴向抗压承载力为控制条件,重新设计全大管桩、全钢管桩、钢混组合桩,并将4个桩型的水平承载特性进行对比分析。

根据JTS 167-4—2012《港口工程桩基规范》取地质参数,见表8。

表8 地质参数

土层描述	层厚/m	塑性指数 $I_p$	液性指数 $I_L$	侧摩阻力标准值 $q_f$ /kPa	端阻力标准值 $q_R$ /kPa	$m/(kN/m^4)$
淤泥	8.00	20.5	1.66	6.00		3 000
淤泥质黏土	17.00	18.5	1.20	18.50		5 000
黏土	24.50	20.4	0.23	92.05		10 000
黏土	30.55	19.6	0.27	73.64	2 350	9 000

依据表8数据,计算得试桩轴向抗压承载力为10 406 kN,则以此设计其它桩型(表9),为区分明显,以 $m$ 法计算得出的桩顶位移-荷载关系曲线见图3。

从图3可以看出,试桩与大管桩位移-荷载曲线接近,钢混组合桩与钢管桩位移-荷载曲线接近。以水平外载80 kN为例,其桩身最大弯矩位于桩顶

以下17 m左右,约为1 270 kN·m,小于大管桩开裂弯矩,桩身抗弯性能还未充分发挥,但泥面位移此时已达10 mm,说明桩基水平承载力以泥面位移为控制指标。由于试桩钢管桩长度仅有8 m,未达到最大弯矩点位置,因此其桩身挠曲线与大管桩基本相同,同理钢混组合桩钢管桩长度已超过最大弯矩点位置,相应桩身挠曲线与钢管桩基本一致。

表 9 同抗压承载力的其它桩型

桩型	桩径/mm	桩长/m	桩尖高程/m
大管桩	φ1200δ145	76.5	-70.6
钢管桩	φ1200δ20	79.4	-73.5
钢混组合桩	φ1 200δ20 钢管桩 + φ1 200δ145 大管桩	32 m 钢管桩+44 m 大管桩+0.5 m 钢桩靴	-70.6

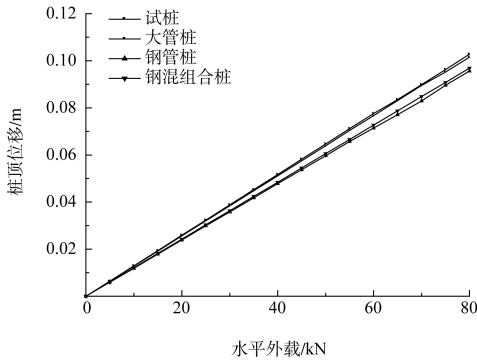


图 3 桩顶位移-荷载关系曲线

2) 经济性比较。

现阶段 D1200B32-2 型大管桩单价约为 0.14 万元/m, 钢管桩单价约为 0.33 万元/m, 连接部结构增加的费用约 1.6 万元, 防腐涂层按 55 元/m<sup>2</sup>计算, 相应各桩型费用见表 10。

表 10 各桩型费用

桩型	桩长/m	单桩造价/万元	防腐涂层/万元
试桩	8 m 钢管桩+68 m 大管桩	13.76	0.17
大管桩	76 m 大管桩	10.64	
钢管桩	79 m 钢管桩	26.07	0.58
钢混组合桩	32 m 钢管桩+44 m 大管桩	18.32	0.58

从表 10 可以看出, 对于大管桩能满足设计要求的工程, 采用钢混组合桩并不具有经济性; 但对于大管桩不能满足设计要求的工程, 采用钢混组合桩与采用钢管桩相比具有较大的经济效益, 按表 10 计算结果, 单桩造价可节约 7.75 万元, 减少成本约 29%。D1200B32-2 大管桩比 φ1 200δ20 钢管桩单位长度制桩费用少约 0.19 万元/m, 而连接部结构增加的费用约 1.6 万元, 即当替换长度约大于 8.4 m 时钢混组合桩成本开始低于相同长度钢管桩。

在本工程实际施工中, 大管桩下部含有钢桩靴, 施工顺利, 与钢管桩相比, 未出现沉桩困难的情况。

3.2 舟山某综合基地项目

1) 桩型设计。

根据设计单位内力计算结果, 极端工况下桩基的内力已接近或超过 φ1 200 mm 大管桩设计性能, 考虑到该吊机基础墩的结构安全重要性高, 故不宜采用 φ1 200 mm 大管桩, 设计采用 28 m 钢管桩+52 m 大管桩+0.5 m 钢桩靴的钢混组合桩。

与上节相似, 设计其它桩型见表 11; 为区分明显, 以 *m* 法计算得出的桩顶位移-荷载关系曲线见图 4。

表 11 同抗压承载力的其它桩型

桩型	桩径/mm	桩长/m	桩尖高程/m
大管桩	φ1 200δ145	81.0	-78.8
钢管桩	φ1 200δ20	81.0	-78.8

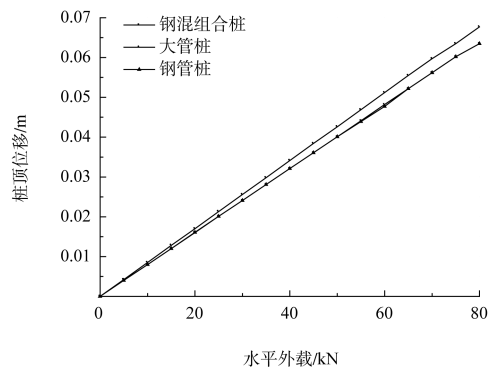


图 4 舟山某综合基地项目桩顶位移-荷载关系曲线

从图 4 可以看出, 相同荷载作用下, 大管桩桩顶位移最大, 而钢混组合桩与钢管桩位移-荷载曲线基本一致。以水平外载 80 kN 为例, 其桩身最大弯矩约为 1 060 kN·m, 位于桩顶以下 15 m 左右, 在钢混组合桩钢管段长度范围以内。

2) 经济性比较。

与上节相同, 相应各桩型费用见表 12。

表 12 舟山某综合基地项目各桩型费用

桩型	桩长/m	单桩造价/万元	防腐涂层/万元
钢混组合桩	28 钢管桩+52 大管桩	18.12	0.48
大管桩	80 大管桩	11.20	
钢管桩	80 钢管桩	26.40	0.48

由于采用大管桩安全系数较低, 因此仅将钢混组合桩与钢管桩进行对比, 按表 12 中计算, 钢

混组合桩单桩造价可节约 8.28 万元，减少成本约 31%，采用钢混组合桩与采用钢管桩相比具有较大的经济效益。在工程实际施工中，钢混组合桩也未出现沉桩困难的情况。

#### 4 结语

钢混组合桩上部的抗弯能力与钢管桩相当，在一定程度上弥补了预应力混凝土大管桩抗弯能力不足的应用瓶颈，可以扩大预应力混凝土管桩在相关工程中的应用。本文对钢混组合桩的设计方法、可打性以及综合经济成本进行了分析，得到以下结论：

- 1) 针对不同型号的大管桩，钢管桩型号可统一为两个：D1200δ20、D1400δ21。
- 2) 针对钢混组合桩接头部位放置于桩身弯矩零点以下的要求，钢管桩在泥面以下长度  $Z$  的计算式可统一为  $Z \geq 73/\sqrt[5]{m}$ 。
- 3) 在钢混组合桩设计时，其大管桩部分应能满足竖向承载力要求、钢管桩部分应能满足抗弯承载力要求。

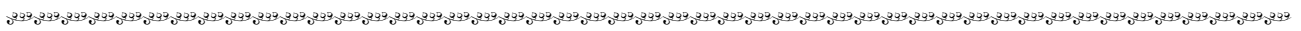
4) 振沉钢混组合桩时，能量能较好地通过钢管桩传递到大管桩上，钢混组合桩的可打性不低于大管桩；钢混组合桩沉桩时，大大缓解了大管桩顶部混凝土的局部压应力，使大管桩顶部被打坏的可能性大大降低，有利于提高桩身混凝土质量。

5) 按前述方法设计的钢混组合桩与相应钢管桩相比，具有较高的性价比，在本文算例中减少成本约 30%，在外海深水区工程桩基用钢混组合桩代替钢管桩使用将产生十分可观的经济效益和社会效益。

#### 参考文献：

- [1] JTS 167-6—2011 港口工程后张法预应力混凝土大管桩设计与施工规程[S].
- [2] JTS 167-4—2012 港口工程桩基规范[S].
- [3] JTS 151—2011 水运工程混凝土结构设计规范[S].
- [4] JTS 152—2012 水运工程钢结构设计规范[S].

(本文编辑 武亚庆)



## · 消 息 ·

### 四航局获得 1 项国家发明专利授权

近日，经国家知识产权局评定，四航局研发的“基于温度应力试验的同条件模拟养护试验方法及反演模拟养护试验方法及系统”取得国家发明专利证书。

该成果开发了一种混凝土模拟养护试验方法，通过该方法可结合混凝土温度应力试验对混凝土性能进行综合评价，为分析评估实际工况下混凝土材料的性能发展提供了试验方法和手段，为研究考虑温度条件的混凝土性能提供了具体的思路。通过该成果，不仅能得到温度条件下各项混凝土性能，还能够为具体混凝土工程的相关计算分析、数值模拟等计算参数的取值提供重要参考。

[http://en.ccccltd.cn/pub/ccccltd/xwzx/zgsdt/201607/t20160701\\_49129.html](http://en.ccccltd.cn/pub/ccccltd/xwzx/zgsdt/201607/t20160701_49129.html) (2016-07-04)