



PHC 钢管组合桩在复杂地质条件 港口中的应用

何军，武政

(中交水运规划设计院有限公司，北京 100007)

摘要：针对当前复杂地质条件下 PHC 管桩沉桩困难问题，以三亚某公务船码头工程为依托，结合 PHC 管桩和钢管桩的优点以及相关行业规范确定了 PHC 钢管组合桩的结构形式。针对 PHC 钢管组合桩的特点，从穿透较厚砂层角度出发，通过结构计算软件以及相关规范公式给出码头结构极限承载力状态，对结构计算、受力特性与桩基检测结果进行分析，提出桩基改进措施和沉桩控制条件，得出满足工程设计要求的 PHC 钢管组合桩。结果表明：该种 PHC 钢管组合桩方法满足桩基承载力及应变要求；PHC 钢管组合桩在穿透较厚砂层的条件下技术可行、经济合理。

关键词：PHC 钢管组合桩；高应变检测；低应变检测；厚砂层；试桩

中图分类号：U 655.54

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2022)S1-0075-05

Application of PHC-steel pipe composite pile in port under complicated geologic condition

HE Jun, WU Zheng

(CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: In view of the difficulty of PHC pipe pile sinking under complicated geologic condition, we determine the structural type of PHC-steel pipe composite pile based on an official ship wharf project in Sanya and combined with the advantages of PHC pipe pile and steel pipe pile and relevant industry specifications. According to the characteristics of PHC-steel pipe composite pile, from the perspective of penetrating thick sand layer, we propose the ultimate bearing capacity state of wharf structure by structural calculation software and related specification formulas. Analyzing the results of structural calculation, stress characteristics and pile foundation test, we put forward targeted pile foundation improvement measures and pile sinking control conditions, and obtain the PHC steel pipe composite pile meeting the engineering design requirements. The results show that the PHC steel pipe composite pile method meets the requirements of bearing capacity and strain of pile foundation, when penetrating the thick sand layer, the PHC-steel pipe composite pile is feasible and reasonable in economy.

Keywords: PHC-steel pipe composite pile; high strain test; low strain test; thick sand layer; test piling

传统 PHC 管桩(预应力高强度混凝土管桩)具有单桩承载力高、设计选用范围广、耐打性好、生产及施工速度快及监理检测方便等优点，目前已经广泛应用于高层建筑、桥梁、港口等行业中得到广泛应用^[1-3]。但该桩型难以在地质坚硬、软土较厚以及桩身较长的条件下使用，而 PHC-钢管组合桩由

上部预应力高强度混凝土管桩(简称 PHC 管桩)与下部开口钢管桩组合拼接而成，具有抗腐蚀性强、贯入性好及维护成本低等特点，较好地弥补了传统 PHC 管桩无法穿透较厚的坚硬夹层导致断桩、爆头等缺点^[4-6]。胡俊文等^[7]针对长江下游某通用码头处水体较深、软土较厚的不利岩土工程条件，

基于桩土模型确定了 PHC 钢管组合桩的各项载荷参数和管桩长度；高军会等^[8]以某吹沙填海场地进行 PHC 管桩工程施工为例，详细论述了传统 PHC 管桩硬层沉桩困难、易造成桩体疲劳破坏等缺点，基于不同水深和地质条件的试验提出 PHC-钢管桩的适用条件。可见，现有工程研究很少针对 PHC 钢管组合桩的特点，从穿透较厚砂层角度出发对打桩过程受力特性进行数字分析。

本文在分析三亚某公务船码头工程处的水深和地质条件的基础上，将 PHC 钢管组合桩技术应用于该码头的设计，通过将设计成果与桩基验收检测成果进行对比分析，验证了 PHC 钢管组合桩在该类地层情况中的可行性，提出针对性的桩基改进措施和沉桩控制条件，为 PHC 钢管组合桩在较厚砂层、较大水深以及较紧工期条件下的推广应用提供了借鉴。

1 工程概况

三亚某公务船码头位于三亚市南山港区。该工程新建码头泊位长度 724 m，水域布置分为外线码头、引堤及内线码头，外线泊位结构按万吨级设计，其中外线泊位外侧长 200 m，内侧长 185 m，引堤泊位长 195 m，内线泊位长 144 m。

结合工程建设目标、荷载要求、地质条件以及经济性等因素综合分析比选，确定采用高桩梁板结构。

2 地质条件

拟建区域海上部分地貌单元属海漫滩、浅海，地势由陆域向海域倾斜，总体东高西低，拟建码头前沿天然泥面高程为 -0.99~2.67 m，近岸坡度变化大，高差约 3.66 m。在拟建场地海域勘探深度范围内，②~③粉细砂、淤泥混砂平均标贯击数小于 5 击；④粉质黏土平均标贯击数小于 15 击；④~⑤中砂、粗砾砂平均标贯击数为 22~35 击；⑥~⑦局部中砂、粉质黏土平均标贯击数达到 50 击。勘察报告中建议外线高桩采用⑥粗砾砂层及以下各岩土层作为桩端持力层，若以⑥粗砾砂

层及以下各岩土层作为桩端持力层时，桩端须穿越表层不均匀分布的较致密的②胶结砂、中密的④中砂层、密实的④粗粒砂层及④卵石层。

对拟建区域地质勘察报告进一步分析得知，在桩长范围内表层存在厚约 10 m 的软弱粉细砂和粉质黏土，下部存在厚约 30 m 的中、粗砾砂及粉质黏土混合层，其中局部含卵石夹层或孤石。可见，该地质条件具有局部坚硬、干强度高、沉桩困难等特点。另外，该区域近岸地势条件具有坡度较陡、泥面较厚和水深较大的特点。

3 设计方案

3.1 PHC 管桩方案

码头桩基采用 $\phi 1000 \text{ mm}$ PHC 桩，桩长约 32 m，单根 PHC 桩造价约为 3 万元。虽然造价较低，但结合地质勘察资料，桩端须穿越表层不均匀分布的较致密的②胶结砂、中密的④中砂层、密实的④粗粒砂层及④卵石层，且卵石层可能存在孤石，沉桩较困难，容易出现桩长不够、桩身大幅度倾斜、桩头打破及桩身折断等质量事故，进而影响码头结构安全。

3.2 钢管桩方案

码头桩基采用 $\phi 1000 \text{ mm}$ 钢管桩，桩长约 32 m，单根钢管桩费用约为 6.2 万元。为满足桩基耐久性使用要求，须采用防腐涂层与牺牲阳极阴极保护的联合防腐措施，在后续使用过程中须定期对桩基的防腐蚀措施进行检查维护，极为不便。

针对桩基须穿透较厚砂层的地质特点，单一桩型的设计方案难以满足该码头的使用需求，因此确定既安全又经济的桩基形式成为本工程的关键技术难点。

4 解决方案

4.1 桩基选型

依据 JTS 167-4—2012《港口工程桩基规范》^[9]、JTS 133—2013《水运工程岩土勘察规范》^[10]和 JTS 147-1—2010《港口工程地基规范》^[11]，考虑 PHC 桩及钢管桩的优、缺点和地质条件，通过工

程造价、施工便捷度、后续维护等方面的综合比选, 确定采用 PHC 桩+钢管桩的组合桩方案: PHC 桩外径 $\phi 1000$ mm, 内径 $\phi 740$ mm, 混凝土强轻度等级 C80; 钢管外径为 $\phi 790$ mm, 壁厚 16 mm, 钢材选用 Q345B, PHC 桩长 18 m, 钢管长 14 m, 根据试桩结果确定实际桩长, 桩尖持力层为粉质黏土(局部黏土)层。根据施工图预算,

单根组合桩造价约为 4.1 万元。

4.2 桩基布置及计算

码头每个横向排架下布置 5 根基桩, 港池外侧纵梁下布置 1 对叉桩, 其余 3 根均为直桩, 所有桩型均为 $\phi 1000$ mm PHC+钢管组合桩, 共计 130 根, 其中斜桩 46 根, 直桩 84 根。码头桩基平面布置和结构断面分别见图 1、2。

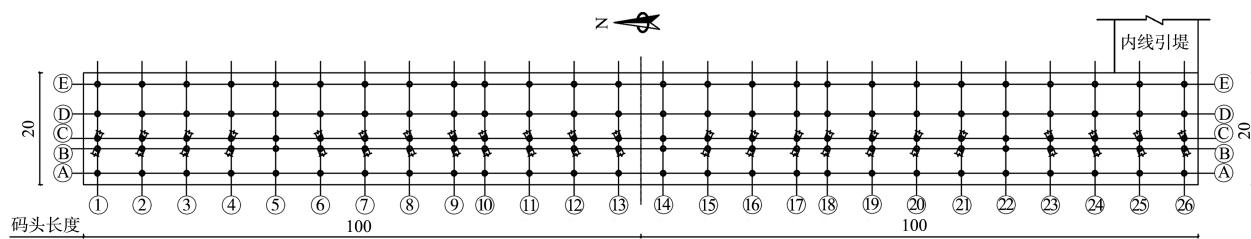


图 1 高桩码头桩位平面布置 (单位: m)

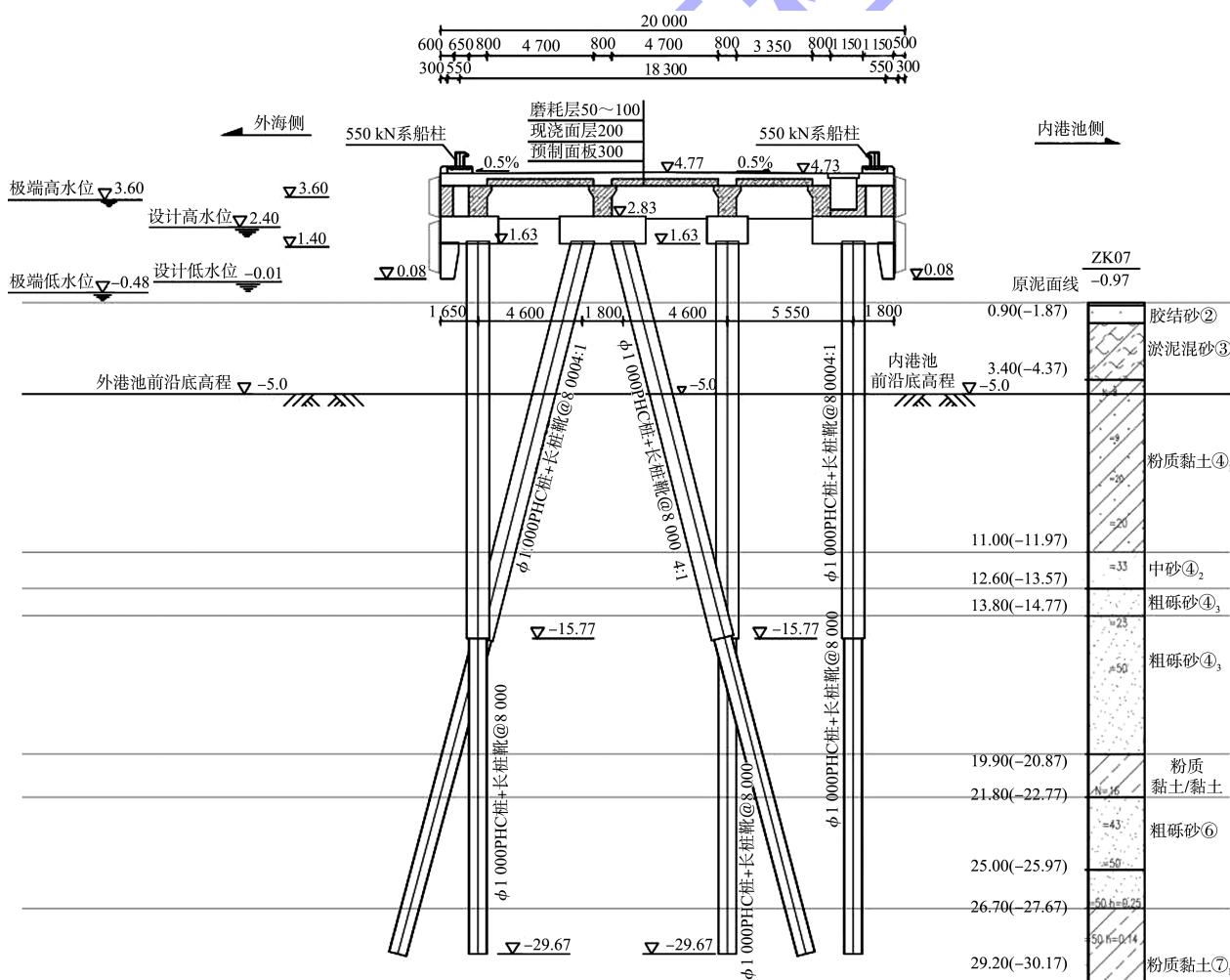


图 2 高桩码头结构断面 (高程: m; 尺寸: mm)

结构内力计算涉及到的波浪力等外力荷载的计算按相关规范公式计算，按照 JTS 167-1—2010《高桩码头设计与施工规范》^[12]、JTS 167-4—2012《港口工程桩基规范》选取相应的荷载分项系数，根据码头设计荷载组合得本工程外线码头结构及码头、栈桥桩基承载力设计值计算结果(表 1)。

表 1 码头结构承载力极限状态及 $\phi 1000$ mm PHC 桩桩基承载力计算结果

压桩力/ kN	拔桩力/ kN	桩身弯矩/ (kN·m)	单桩垂直承载 力设计值/kN	单桩抗拔承载 力设计值/kN
3 595	1 600	940	3 875	-1 840

4.3 桩基长度

基于桩基的受力特性分析开展试桩试验。试桩检测结果表明，2 根工程桩大应变、小应变及复打承载力均满足要求，桩身完整性为 I 类。最终确定停锤标准如下：

- 1) 当贯入度已达控制高程(最终 10 击平均贯入度 ≤ 4 mm/击)、桩尖高程已达设计高程时，可以停锤。
- 2) 当贯入度已达控制贯入度、桩尖距设计高程 < 2 m 时，应继续锤击 30 击，贯入度不大于控制贯入度时，可以停锤。
- 3) 当贯入度已达控制贯入度，桩尖距设计高程为 $2\sim 3.5$ m 时，继续锤击直至最后 30 击贯入度 ≤ 100 mm/击时，可以停锤。
- 4) 当桩尖已达设计高程，而平均贯入度 > 4 mm/击时，继续锤击直至满足最终 10 击平均贯入度 ≤ 4 mm/击或桩顶打至设计高程且最终 10 击平均贯入度 ≤ 8 mm/击，可以停锤。
- 5) 不满足以上控制标准时，应停锤并及时报设计单位会同有关单位讨论。

根据试桩结果，设计明确直桩 PHC 桩长 17.40 m，钢管长 13.90 m，斜桩 PHC 桩长 18.15 m，钢管长 14.40 m，并开始大面积制桩用于施工。

4.4 桩基检测结果

经对桩基沉桩记录进行统计分析得知，所有桩基施工均达到设计桩顶高程，总锤击数平均为 812 击，最终 10 击平均贯入度为 3.62 mm。根据设计技术要求，单桩垂直承载力设计值为

3 875 kN，设计动测承载力为 4 675 kN。对码头桩基的应变动力检测结果表明桩基实际检测承载力均满足要求，平均极限承载力为 4 902 kN，桩身完整性均为 I 类，桩身完好且满足设计和使用要求(图 3)。

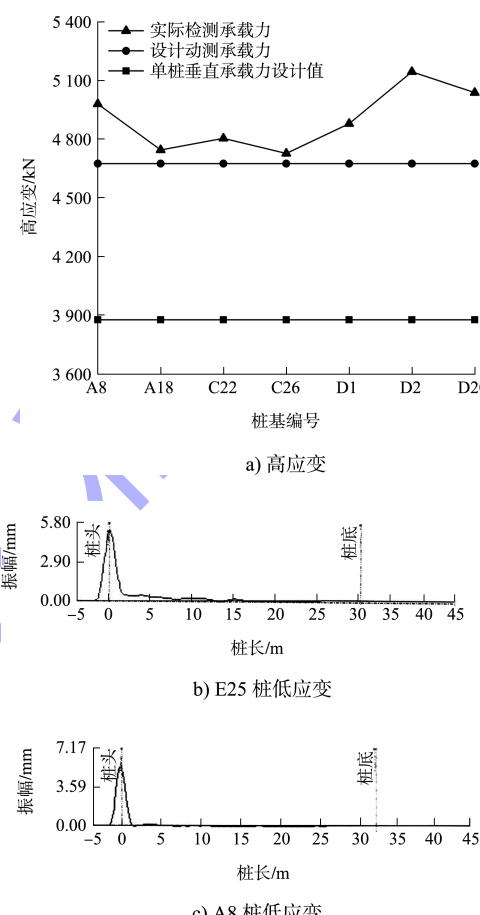


图 3 桩基检测结果

4.5 造价对比

桩基工程造价对比见表 2。沉桩施工过程及试验检测结果表明，PHC 钢管组合桩完整性好，承载力满足技术要求，进一步验证了在复杂地质条件下港口工程采用 PHC 钢管组合桩的合理性，提出该组合桩基条件下的桩基改进措施和沉桩控制条件。同时，根据桩基工程造价对比可知，该组合桩基础形式大大降低了工程造价，节约了工程成本。

表 2 桩基工程造价对比

桩基形式	工程量/km	综合单价/(元·m ⁻¹)	总价/万元
钢管桩	4.126 5	1 937.50	799.51
PHC-钢管组合桩	4.126 5	1 281.25	528.71

5 结语

1)以三亚某公务船码头工程为依托,结合 PHC 管桩和钢管桩的优点以及相关行业规范确定了 PHC-钢管组合桩的结构形式。

2)通过结构计算软件以及相关规范公式给出码头结构极限承载力状态,将结构计算成果与桩基检测结果进行验证和分析,得知该组合桩的单桩承载力、桩身完整性均满足工程设计要求。

3)通过工程实例验证了 PHC 钢管组合桩在较厚砂层以及孤石和障碍物较多的复杂地质情况下使用的可行性,打破了 PHC 桩在复杂地质条件下沉桩困难的应用瓶颈,为推广该组合桩在港口工程以及其他领域的应用提供了参考。

参考文献:

- [1] 施峰,郝世龙. PHC 管桩水平承载力试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(S2): 617-622.
- [2] 刘锐. 预应力混凝土大直径管桩在北方港口工程中的应用实践[J]. 中国港湾建设, 2007(2): 58-61.
- [3] 李书华. 黄骅港综合港区多用途码头工程大直径管桩施工工艺[J]. 水运工程, 2012(1): 183-186.
- [4] 王永强,刘军保,孙义. 天津港东突堤北侧集装箱码头

(上接第 68 页)

4 结语

1)4 个方案的装卸工艺流程、系统通过能力及其他主要技术参数均基本满足生产作业要求,但是在工程投资、生产运营成本以及仓顶设备利用率等方面存在较大差异,经综合比选分析,确定方案 3 为推荐方案。

2)对于大型煤炭装船码头,筒仓群进仓场端线宜布置在端部;适当减少筒仓群排数,增加单排筒仓数量,可有效减少带式输送机总长度、仓顶设备和转运站数量,从而明显降低工程投资和设备装机容量,并有效提高仓顶设备利用率。

3)由于筒仓排数减少,可通过增加单条出仓带式输送机的能力保证足够的出仓线数量;单排筒仓数量的增加提高了堆存和配煤工艺系统的灵活性。

PHC 管桩打桩应力试验研究[J]. 中国港湾建设, 2004(4): 42-44.

- [5] 张慧旭. PHC 桩穿越较厚中密砂夹层的施工技术研究_张慧旭[J]. 江苏建筑, 2010(2): 71-72, 94.
- [6] 师玉龙. PHC 管桩在高桩码头厚密实砂基础中的沉桩施工技术[J]. 工程建设与设计, 2021(5): 113-115.
- [7] 胡骏文,邹玉光,汤雷,等. PHC-钢管组合桩竖向荷载传递机理研究[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(1): 136-142.
- [8] 高军会,王伟,宋鹏波. 某吹沙填海场地 PHC 管桩施工的难点及处理措施研究[J]. 岩土工程技术, 2016, 30(5): 238-242.
- [9] 中交第三航务工程勘察设计院有限公司. 港口工程桩基规范: JTS 167-4—2012[S]. 北京: 人民交通出版社, 2012.
- [10] 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 长江航道规划设计研究院. 水运工程岩土勘察规范: JTS 133—2013[S]. 北京: 人民交通出版社, 2013.
- [11] 中交天津港湾工程研究院有限公司. 港口工程地基规范: JTS 147-1—2010[S]. 北京: 人民交通出版社, 2010.
- [12] 中交第三航务工程勘察设计院有限公司. 高桩码头设计与施工规范: JTS 167-1—2010[S]. 北京: 人民交通出版社, 2010.

(本文编辑 郭雪珍)

参考文献:

- [1] 梁孝诚,崔建勋. 日照煤炭筒仓装卸工艺系统设计[J]. 港工技术, 2021, 58(4): 16-20.
- [2] 中国神华能源股份有限公司. 港口工程煤炭筒仓储运系统设计导则[R]. 北京: 中国神华能源股份有限公司, 2018.
- [3] 中交水运规划设计院有限公司. 黄骅港(煤炭港区)四期工程初步设计[R]. 北京: 中交水运规划设计有限公司, 2014.
- [4] 中交水运规划设计院有限公司. 黄骅港(煤炭港区)五期工程工可研[R]. 北京: 中交水运规划设计院有限公司, 2015.
- [5] 苏志国,李云军,商剑平. 煤炭码头生产作业计划仿真推演技术[J]. 水运工程, 2014(1): 97-101.
- [6] 中交水运规划设计院有限公司, 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 海港总体设计规范: JTS 165—2013[S]. 北京: 人民交通出版社, 2013.

(本文编辑 王传瑜)