



# PHC-钢管组合桩 在潍坊地区沿海港口建设中的应用

杨晓松<sup>1</sup>, 倪晓雯<sup>2</sup>, 李春良<sup>1</sup>

(1. 山东省交通规划设计院集团有限公司, 山东 济南 250101;  
2. 山东省建筑工程质量检验检测中心有限公司, 山东 济南 250031)

**摘要:** 在中小型高桩码头设计中, PHC 预制管桩具有良好的抗腐蚀性和较高的承载力, 应用较为广泛, 但其穿透能力和耐打击能力较弱。如山东潍坊沿海地区地层中普遍存在一层埋深浅、厚度大、标贯高的粉砂层, 该土层使沉桩施工较为困难, 因此提出 PHC-钢管组合桩方案。结合某河口区 5 000 吨级多用途码头的桩基变更设计, 从桩基设计、有限元分析、静载荷试验、高应变检测方面综合论证方案的合理性, 并进一步提出桩基桩端承载力折减系数, 为该地区同类项目桩基垂直承载力计算提供了一定的依据。

**关键词:** 高桩码头; PHC-钢管组合桩; 桩端承载力折减系数

中图分类号: U65

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)03-0046-07

## Application of PHC-steel pipe composite pile construction of Weifang coastal ports

YANG Xiaosong<sup>1</sup>, NI Xiaowen<sup>2</sup>, LI Chunliang<sup>1</sup>

(1. Shandong Provincial Communications Planning and Design Institute Co., Ltd., Jinan 250101, China;

2. Shandong Construction Engineering Quality Inspection Center Co., Ltd., Jinan 250031, China)

**Abstract:** In the design of small and medium-sized high pile wharf, PHC prefabricated pile has good corrosion resistance and high bearing capacity, which is widely used, but its penetration ability and impact resistance are weak. In the coastal area of Weifang, Shandong Province, there is a silty sand layer with shallow burial depth, large thickness and high blow counts, which makes the pile penetration more difficult. Therefore, the PHC-steel pile composite pile is proposed. Based on the pile foundation modification design of a 5 000-ton multi-purpose wharf project in river estuary area, the rationality of the scheme is comprehensively demonstrated from the aspects of pile foundation design, finite element analysis, static load test and high strain detection. Furthermore, the reduction factor of pile end bearing capacity is proposed, which provides a certain basis for the calculation of vertical bearing capacity of similar projects in this area.

**Keywords:** high pile wharf; PHC-steel pile composite pile; reduction factor of pile end bearing capacity

高桩码头作为一种重要的码头结构形式<sup>[1]</sup>, 广泛应用于持力层埋深较深的地区。PHC 管桩具有一定的抗弯能力、较强的抗腐蚀性、造价低

的特点, 成为 1 万吨级及以下高桩码头的首选桩型; 但 PHC 管桩穿透能力和抗打击性较弱, 遇到需要穿透较厚砂层时, 施工较困难, 且易产生纵

收稿日期: 2023-07-19

作者简介: 杨晓松 (1981—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事港口与航道工程规划、设计工作。

向裂缝。为解决 PHC 管桩穿透能力和抗打击能力较弱的缺点, 侯建飞等<sup>[2]</sup>于 2012 年提出了 PHC-钢管组合桩, 利用 PHC 管桩抗腐蚀性强、造价低的优点以及钢管桩穿透能力、抗打击性强的优点。胡骏文等<sup>[3]</sup>运用 FLAC3D 软件对 PHC-钢管组合桩进行数值模拟, 研究桩身极限承载力的影响因素以及桩身轴力、侧摩阻力分布规律。山东潍坊沿海地区地层中普遍存在一层埋深浅、厚度大、标贯高的粉砂层, 该土层使得 PHC 管桩沉桩困难, 针对 PHC-钢管组合桩在该地区应用的可行性和合理性研究较少, 本文以该地区某 5 000 吨级多用途码头的桩基变更设计为例, 综合论证 PHC-钢管组合桩的可行性和合理性, 进一步提出 PHC-钢管组合桩在该地区应用时桩基轴向承载力计算的参考公式, 旨在为该地区 PHC-钢管组合桩桩基垂直承载力计算提供一定的依据。

### 1 工程概况

某 5 000 吨级多用途泊位<sup>[4]</sup> (2015 年建成) 位于山东潍坊沿海河口区, 设计使用年限为 50 a, 安全等级为 II 级。码头总长 849 m、宽 24 m, 共布设 5 000 吨级多用途泊位 6 个, 码头结构采用高桩梁板结构, 排架间距 7 m, 顶高程 5.00 m, 前沿底高程-8.00 m。接岸采用 L 形挡土墙, 码头桩台与接岸挡土墙采用简支板搭接, 码头下方岸坡坡度 1:2, 采用块石护面。桩基采用  $\phi 800$  mm PHC 桩(C 形)。每榀排架布置 7 根桩(3 根直桩, 2 对叉桩), 桩长 45 m。上部结构为现浇横梁上搁置预制纵梁、预制混凝土面板及现浇迭合面板结构。经计算: 单桩垂直极限承载力标准值为 4 580 kN, 其中桩侧摩阻力为 3 073 kN、桩端阻力为 1 507 kN; 单桩抗拔极限承载力标准值为 3 246 kN。码头结构见图 1。

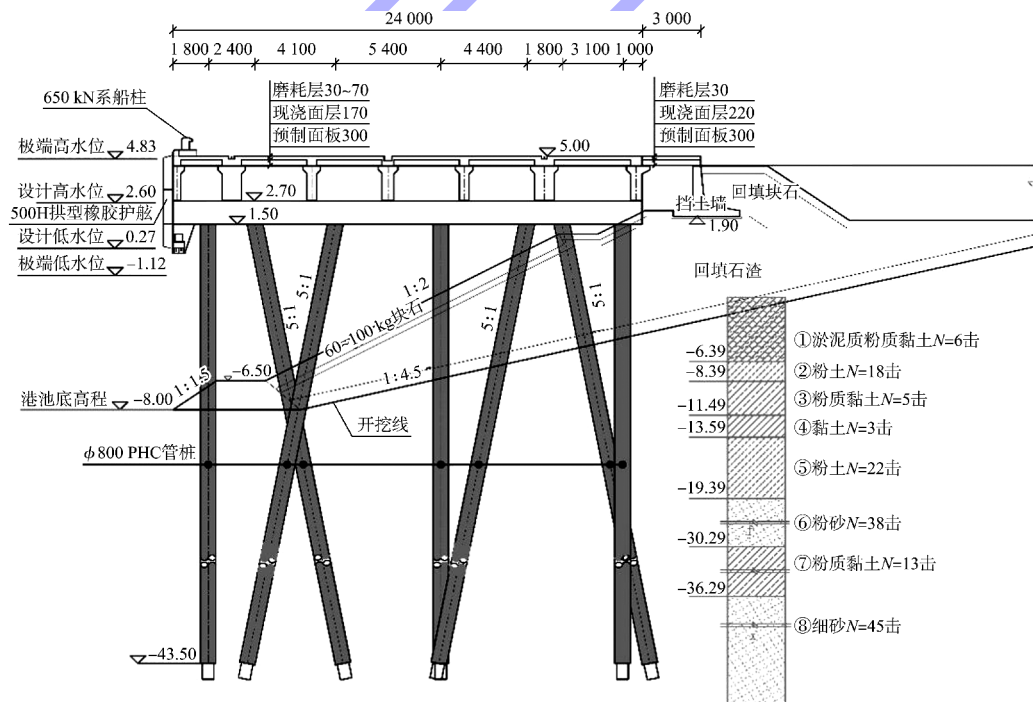


图 1 码头原设计结构断面 (尺寸: mm; 高程: m)

典型钻孔深度 55 m 范围内地基划分为 9 个工程地质层。土层厚度及埋深变化不大, 以粉土、粉质黏土、粉砂为主, 其中第 6 层粉砂层埋深 19 m、

厚 10 m、标贯 38 击, 第 8 层细砂层埋深 35 m、厚 14 m、标贯 45 击。桩基持力层选第 8 层细砂层。典型钻孔柱状见图 2。

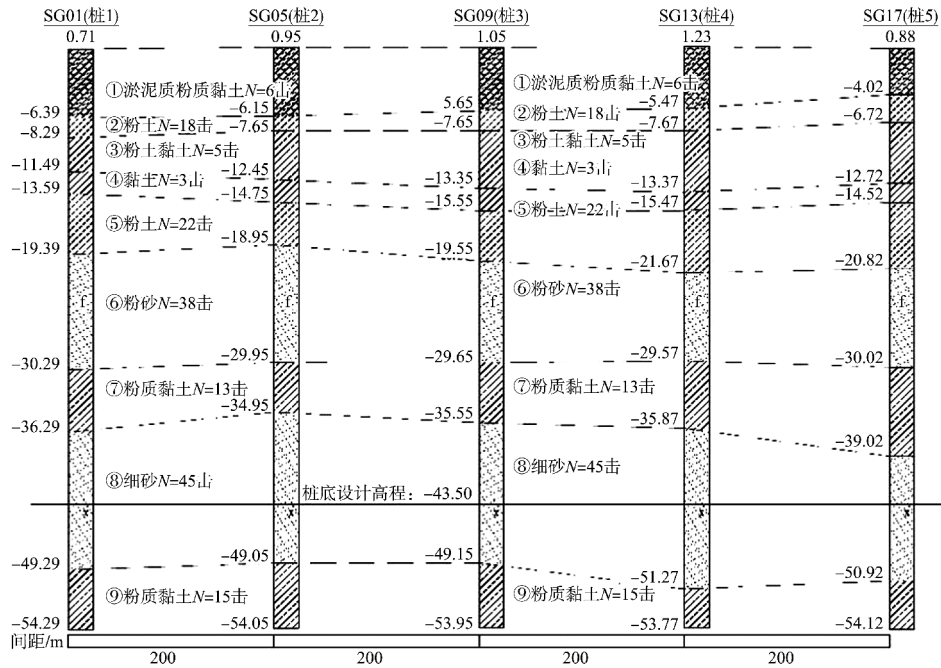


图 2 典型钻孔地质柱状图 (单位: m)

## 2 沉桩情况

施工时采用 D-80 柴油锤进行沉桩, 第 1 根基桩沉桩至 -37.20 m 后桩头破裂, 导致沉桩困难, 为了解场地的整体情况, 依次选取 4 根基桩进行试

打。5 根基桩依次间距 200 m, 整个码头区域地质变化不大, 基桩附近地质情况见图 2。基桩沉桩信息见表 1。第 1 根基桩沉桩完成 2 周后进行高应变检测, 测得桩垂直极限承载力标准值约为 3 425 kN。

表 1 沉桩信息

桩号	设计桩底高程/m	实际桩底高程/m	设计桩顶高程/m	最终贯入度/mm	锤击数/击	备注
1	-43.50	-37.20	1.50	3.5	2 271	桩头破裂
2	-43.50	-37.50	1.50	3.5	2 167	桩头破裂
3	-43.50	-37.10	1.50	3.5	2 275	桩头破裂
4	-43.50	-36.90	1.50	3.5	2 286	桩头破裂
5	-43.50	-36.50	1.50	3.5	2 298	桩头破裂、桩顶裂纹发育

## 3 变更方案

由 5 根基桩沉桩情况可知, 工程基桩沉桩困难, 已施工的 5 根基桩底高程距离设计底高程 6.00~7.00 m, 最终贯入度较小, 桩基锤击数较大, 桩头破坏严重。

对码头桩基进行变更, 采用穿透性强、抗打击能力强的钢管桩。 $\phi 800$  mm PHC 桩市场价格约

900 元/m,  $\phi 800$  mm 钢管桩(壁厚 20 mm)市场价格约 2 700 元/m, 从节省投资方面考虑, 上部易沉桩段采用 PHC 管桩, 下部不易沉桩段采用钢管桩, 钢管桩部分设计长度 10 m, PHC 段桩长 35 m, PHC 和钢管组合桩之间采用外接方式。码头变更结构方案见图 3。

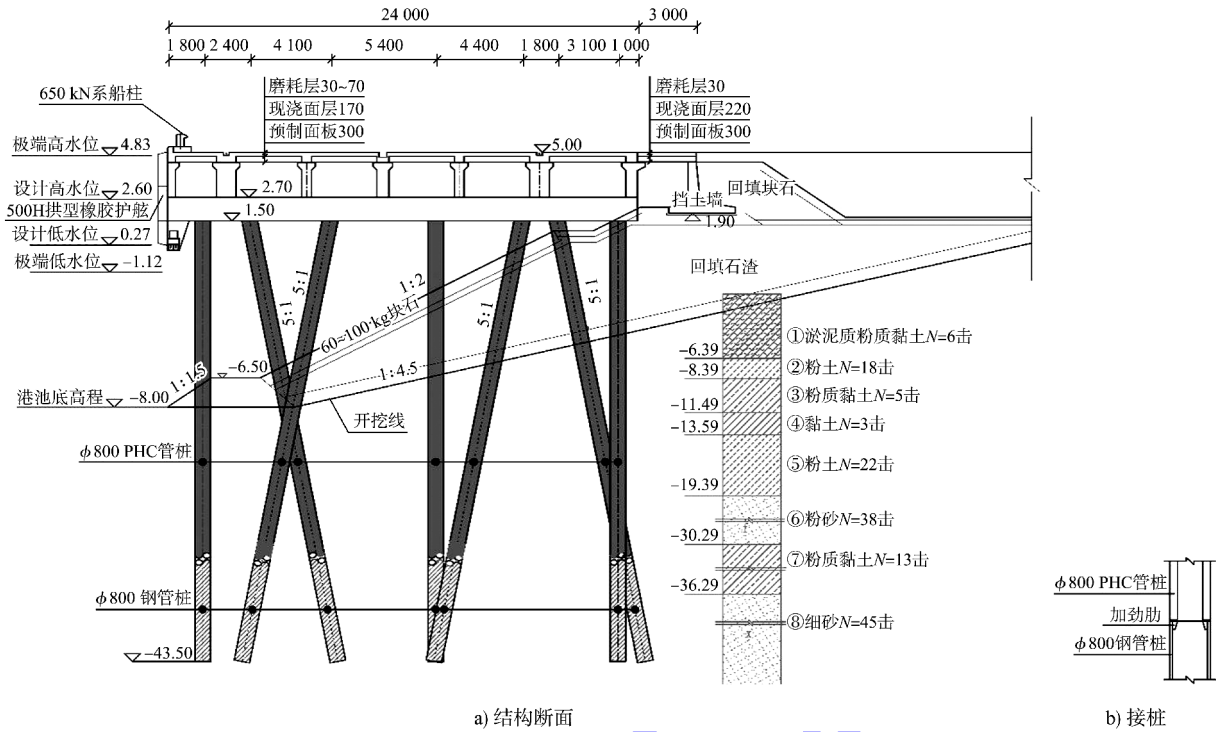


图3 码头变更设计结构断面及接桩 (尺寸: mm; 高程: m)

### 4 桩基轴向承载能力分析

#### 4.1 承载力经验参数法

依据现行水运行业规范 JTS 147-7—2022《水运工程桩基设计规范》<sup>[5]</sup>中公式:

$$Q_d = \frac{1}{\gamma_R} (U \sum q_{r,i} l_i + \eta q_R A) \quad (1)$$

式中:  $Q_d$  为单桩垂直极限承载力设计值, kN;  $\gamma_R$  为单桩轴向承载力抗力分项系数, 取 1.0 (为便于与静载荷、有限元、高应变对比, 该系数取为 1.0, 即所求为标准值);  $U$  为桩身截面外周长, m;  $q_{r,i}$  为第  $i$  层土的单位面积极限桩侧摩阻力标准值, kPa;  $l_i$  为桩身穿过第  $i$  层的长度, m;  $\eta$  为桩端承载力折减系数, 取 0.50;  $q_R$  为单位面积极限桩端阻力标准值, kPa;  $A$  为桩端外围范围内的断面总面积,  $m^2$ 。

PHC-钢管组合桩单桩垂直极限承载力标准值按上下管径均为  $\phi 800$  mm 钢管桩计算得  $Q_d = 3\ 826$  kN, 其中桩侧摩阻力为 3 073 kN、桩端阻力为 753 kN, 计算采用的钻孔为图 1 中 SG01 (桩 1) 孔, 与静载荷试验桩为同一桩。

#### 4.2 有限元分析

##### 4.2.1 计算模型

选用 ANSYS 对 PHC-钢管组合桩三维数值模

拟。对土体分层模拟, 水平向桩周围土体直径取 10 倍桩径, 土体厚度取 2 倍桩长, 钻孔为图 3 中 SG01 (桩 1)。桩体和土体均采用 SOLID45 实体单元, 接触单元模拟荷载作用下桩-土接触面的非线性, 将桩表面取为目标面, 土体表面取为接触面, 在土表面与桩表面分别生成接触单元与目标单元, 采用 TARGE170 和 CONTA173 单元模拟, 动摩擦系数取 0.2, 静摩擦系数取 0.3。土体采用 Drucker-Prager (DP) 材料, 材料特性参数见表 2。

表 2 材料特性参数

岩土名称	密度 $\rho / (t \cdot m^{-3})$	弹性模量 $E / MPa$	泊松比 $\nu$	黏聚力 $c / kPa$	内摩擦角 $\varphi / (^\circ)$
粉土	1.82	25	0.300	22	5.4
粉质黏土	1.81	14	0.250	18	3.5
粉土	2.01	21	0.260	45	11.8
粉土	1.98	21	0.260	37	10.7
粉砂	1.94	29	0.250	12	21.5
粉质黏土	2.01	21	0.260	45	11.8
细砂	1.92	29	0.250	5	31.4
粉质黏土	2.02	22	0.280	48	12.9
PHC 管桩	25.00	$3.80 \times 10^4$	0.167	-	-
钢管桩	75.00	$2.06 \times 10^5$	0.300	-	-

### 4.2.2 边界条件

地层的边界条件主要有：地层表面为自由表面，在任意方向上可变形；桩周土体的外表面为无反射边界；土层底部为固定约束，不可变形。

### 4.2.3 有限元分析结果

竖向荷载单级加载为 250 kN，初始加载为 0 kN。18 级加载，最大加载值为 4 500 kN。 $Q-s$  曲线见图 4。可知模拟组合桩垂直极限承载力为 4 250 kN。

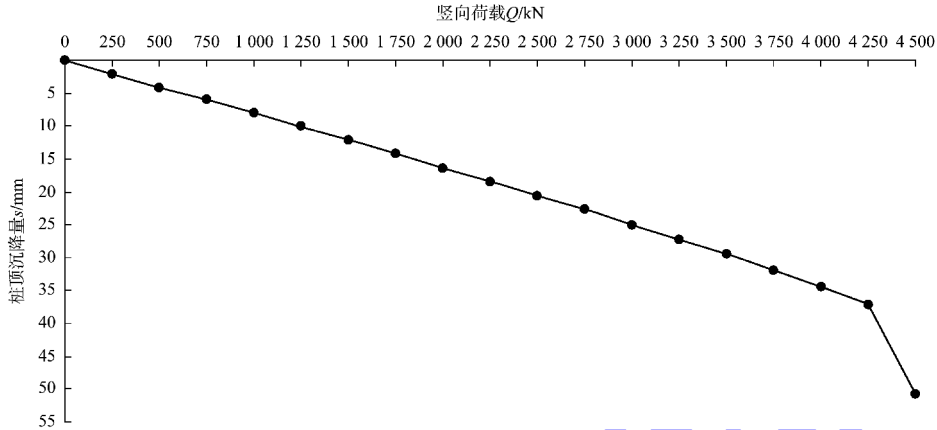


图 4 有限元分析  $Q-s$  曲线

## 4.3 静载荷试验

### 4.3.1 试验装置

静载荷试验桩采用的钻孔为图 1 中 SG01 (桩 1)，静载荷试验采用锚桩法，布设 1 根试桩、

4 根锚桩、2 根基准桩、副梁与 4 根锚桩采用吊篮相连，副梁与主梁连接。千斤顶置于试验桩桩顶，顶部顶于主梁。试验装置见图 5。

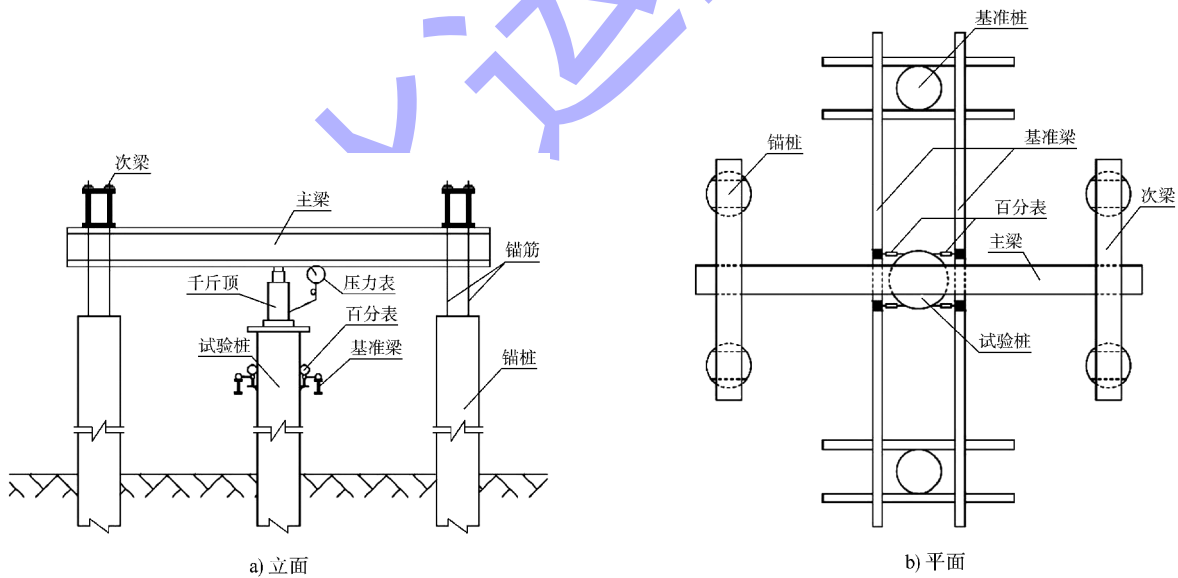


图 5 静载荷试验装置

### 4.3.2 试验方法

加卸载方式采用快速维持荷载法。每级加载为 250 kN，每级卸载为 500 kN。每级荷载维持时间为 60 min，卸荷载维持 15 min。

### 4.3.3 试验结果

竖向单级加载为 250 kN，初始加载为 0 kN。经过 18 级加载，最大加载值为 4 500 kN。 $Q-s$  曲线见图 6。可以判定模拟组合桩垂直极限承载力为 4 250 kN。

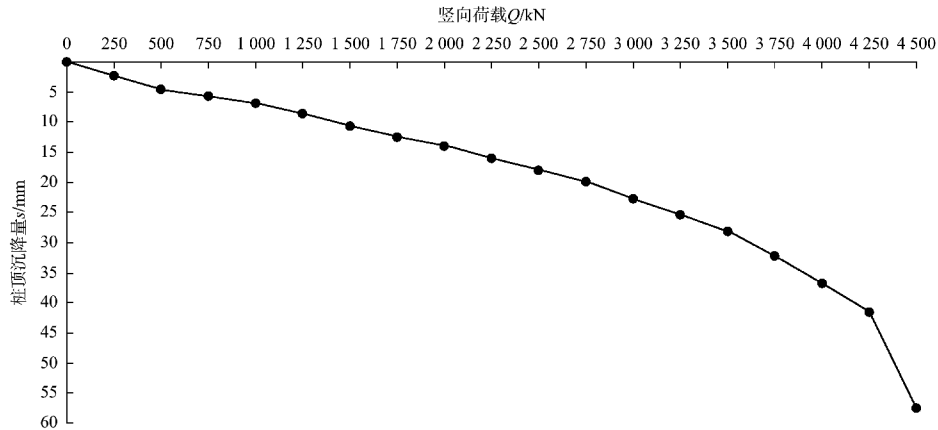


图 6 静载荷试验  $Q-s$  曲线

#### 4.4 高应变检测

高应变作为检测单桩竖向承载力方法，因成本低、快速、可靠等特点获得普遍应用。CASE法和实测曲线拟合法是最为常用的两种高应变检测方法<sup>[6]</sup>，高应变检测时将 PHC-钢管组合桩视为上下阻抗相同的桩，取 PHC 段和钢管段阻抗的加权平均值。高应变检测数据为复打数据，根据力、速度时程图 7 ( $F$  为实测的催记力, kN;  $Z$  为桩身截面力学阻抗,  $kN \cdot s/m$ ;  $v$  为实测的速度,  $m/s$ )，通过上行波、下行波曲线图 8，确定单桩承载力 (向上为正、下为负)。可得组合桩单桩承载力为 4 345 kN。实测曲线拟合见图 9，实测曲线所得承载力为 4 111 kN。

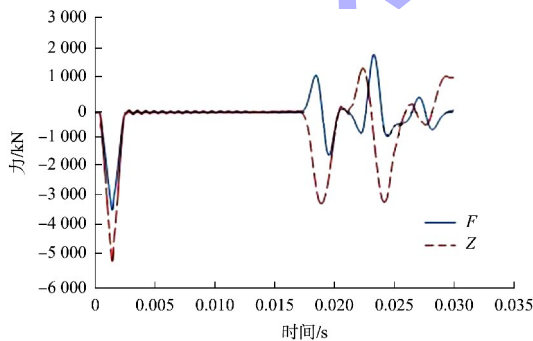


图 7 力、速度时程

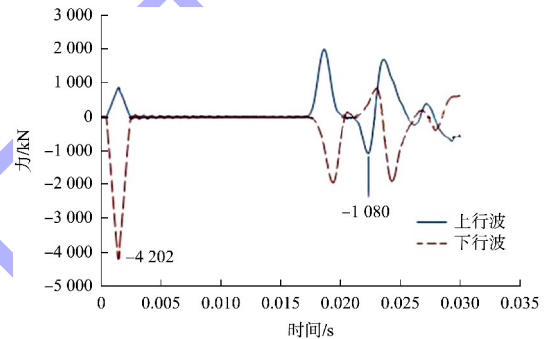


图 8 上、下行波曲线

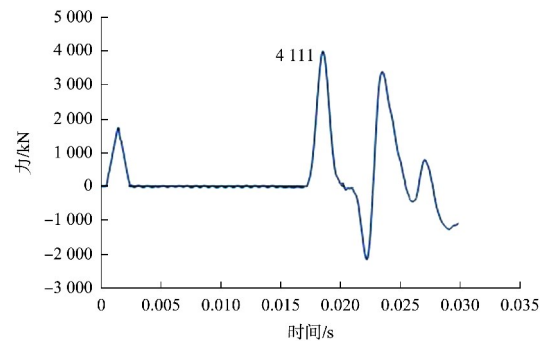


图 9 实测曲线拟合曲线

#### 4.5 桩基垂直极限承载力结果

PHC-钢管组合桩单桩垂直极限承载力标准值结果见表 3。根据有限元分析、静载荷试验、高应变检测可以判断工程 PHC-钢管组合桩单桩垂直极限承载力标准值约为 4 250 kN。

表3 单桩垂直极限承载力标准值结果

方法		阻力标准值/kN		结果/ kN
		桩侧	桩端	
经验	PHC 桩	3 073	1 507	4 580
参数法	钢管桩	3 073	753	3 826
有限元分析				4 250
静载荷试验				4 250
高应变	CASE 法			4 345
检测	曲线拟合法			4 111

#### 4.6 结果分析

根据规范经验参数法抗力分项系  $\gamma_R$  取 1.45, 其他方法可取 1.40; 因此可得单桩垂直承载力设计值见表 4。

表4 单桩垂直极限承载力设计值结果

方法		阻力设计值/kN		结果/ kN
		桩侧	桩端	
经验	PHC 桩	2 119	1 039	3 158
参数法	钢管桩	2 119	519	2 638
其他方法				3 035

由表 4 可知: 单桩垂直承载力设计值大小关系为  $Q_{d, \text{钢管桩}} < Q_{d, \text{组合桩}} < Q_{d, \text{PHC管桩}}$ , 桩侧摩阻力相等, 则  $Q_{\text{端钢管桩}} < Q_{\text{端组合桩}} < Q_{\text{端PHC管桩}}$ 。

根据规范桩端阻力  $Q_{\text{端}}$  可根据下式计算:

$$Q_{\text{端}} = \frac{1}{\gamma_R} \eta q_R A \quad (2)$$

式中:  $\eta_{\text{PHC}}$  取 1.0,  $\eta_{\text{钢管桩}}$  取值为 0.5, 针对 PHC-钢管组合桩未明确  $\eta_{\text{组合桩}}$  取值, 本文拟采用反推法, 提出组合桩桩端近似折减系数  $\eta_{\text{组合桩}}$ 。

$$\text{令: } C = \frac{1}{\gamma_R} q_R A \quad (3)$$

$$\text{可得: } Q_{\text{端}} = \eta C \quad (4)$$

钢管桩、组合桩、PHC 管桩管径一致, 进入同一持力层, 因此式(4)中  $C$  值为常数, 结合桩径 0.8 m, 桩端土层极限端阻力标准值  $q_R$  为 3 650 kPa, 抗力分项系数  $\gamma_R$  取 1.45, 得出  $C$  为 1 264 kN。由表 4 可知, 组合桩  $Q_{d, \text{组合桩}}$  为 3 035 kN, 则  $Q_{\text{端}}$  为 916 kN,  $\eta_{\text{组合桩}}$  约为 0.72, 即 PHC-钢管组合桩桩端承载力折减系数  $\eta_{\text{组合桩}}$  可取 0.72。

## 5 结论

1) 上混下钢 PHC-钢管组合桩上部的 PHC 管桩具有抗腐蚀性强、造价低的优点, 下部的钢管桩具有穿透力强、抗打击性强的优点。上混下钢 PHC-钢管组合桩相较于 PHC 管桩克服了穿透粉砂层的困难, 且相较于钢管桩节省了工程费用。经论证在桩基需要穿透厚度大、标贯高的粉砂层时, 采用上混下钢 PHC-钢管组合桩是经济合理的。

2) 通过有限元分析、静载荷试验、高应变检测等手段结合承载力经验参数法得出: 钢管桩桩端承载力最小, PHC-钢管组合桩桩端承载力次之, PHC 管桩桩端承载力最大, 由此可知 PHC-钢管组合桩的桩端阻力由钢管桩桩端阻力和接桩错台处阻力两部分构成。

3) 工程所在地区该类组合桩进入持力层时, 通过反推法确定桩端承载力折减系数取 0.72, 可为该地区同类项目的工程可行性研究阶段、初步设计阶段桩基垂直承载能力计算提供一定的参考, 施工前应通过静载荷试验进行校正。

### 参考文献:

- [1] 韩理安. 港口水工建筑物[M]. 北京: 人民交通出版社, 2000.
- [2] 侯建飞, 朱福明, 刘翔, 等. 高桩码头 PHC 桩与钢管桩的复合桩: CN201220478002. 8[P]. 2013-03-13.
- [3] 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.
- [4] 山东省交通规划设计院. 某多用途泊位工程设计变更报告[R]. 济南: 山东省交通规划设计院, 2014.
- [5] 中交第三航务工程勘察设计院有限公司. 水运工程桩基设计规范: JTS 147-7—2022[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2022.
- [6] 中交四航工程研究院有限公司, 广州港湾工程质量检测有限公司. 水运工程桩基试验检测技术规范: JTS 240—2020[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2020.

(本文编辑 赵娟)