

# 复杂地质条件下高承载力PHC桩沉桩工艺

刘亚东, 史炳峰, 李佳圣, 李 胜

(中国港湾工程有限责任公司, 北京100027)

**摘要:** PHC桩因其单桩承载力高、耐久性好、抗弯刚度大、桩身强度高、造价远低于钢管桩等特点, 广泛应用于水运工程。结合国外某跨海大桥工程实例, 研究复杂地质条件下PHC桩沉桩施工工艺, 总结使用液压锤施打混凝土管桩的经验, 对于推广PHC桩在桥梁工程中应用具有参考价值。

**关键词:** 混凝土管桩; PHC桩; 沉桩工艺; 破损率

中图分类号: U 655.54\*4.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2012)09-0182-04

## On piling technology for high-capacity PHC pile upon complicated ground condition

LIU Ya-dong, SHI Bing-feng, LI Jia-sheng, LI Sheng

(China Harbor Engineering Co., Ltd., Beijing 100027, China)

**Abstract:** The PHC pile is widely used in marine projects for the advantages of high performance in pile capacity, durability, bending stiffness, shaft strength, and lower cost compared to the steel pile. Based on a foreign sea-crossing bridge project, this paper studies the piling construction technology under complicated ground condition and summarizes the experience on the hydraulic hammer for PHC pile construction, which may serve as a reference for PHC pile application in bridge engineering industry.

**Key words:** concrete pipe pile; PHC pile; piling technology; pile damage rate

PHC管桩全称为先张法预应力高强度混凝土管桩。该技术于1987年由原交通部三航局混凝土制品厂从日本引进, 并于1988年正式投产, 先后生产单节长度为15m的 $\phi 800$  mm,  $\phi 1\ 000$  mm及 $\phi 1\ 200$  mm的大直径管桩。2006年研制出第1根单节55 m超长先张预应力混凝土管桩。目前PHC管桩在市政、码头和路桥项目中得到应用广泛。

### 1 工程概况

国外某大型跨海桥梁项目, 连接岛屿和大陆, 跨海段16.5 km, 由跨越主航道的三跨斜拉桥(117.5 m+240 m+117.5 m)及其两侧连续箱梁跨组成, 引桥跨径为55 m, 共289个排架, 除高墩区位28个排架采用 $\phi 1\ 600$  mm钢管桩及大陆侧滩

涂区域10个排架采用 $\phi 1\ 600$  mm钻孔灌注桩外, 其余251个排架均采用 $\phi 1\ 000$  mm PHC桩, 桩顶伸入承台0.5 m, 各桩位设计桩长58~68 m, 单桩设计工作荷载3100~3770 kN, 极限承载力9500 kN。

### 2 地质情况

工程区域地质以黏性土和中粗砂为主, 桩端持力层为砂层。高程-40 m以上为黏性土层, 部分地质钻孔中发现夹有较密实的中粗砂层, 标贯击数较大, 不少地段-30 m处标贯击数 $N > 30$ , 部分标贯击数 $N > 40$ , PHC桩沉桩时穿越该土层及夹层状砂层时会有一定困难。在-40 m以下的中粗砂层中又大部分夹有2~3 m厚的黏土层, 当桩从较硬的中粗砂层进入该软层中时, 桩尖会产生较大的

收稿日期: 2012-04-17

作者简介: 刘亚东(1971—), 男, 在读硕士, 高级工程师, 从事港口及路桥工程施工管理。

拉应力,桩身容易被拉断或出现裂缝。工程区域典型地质钻孔如图1示。

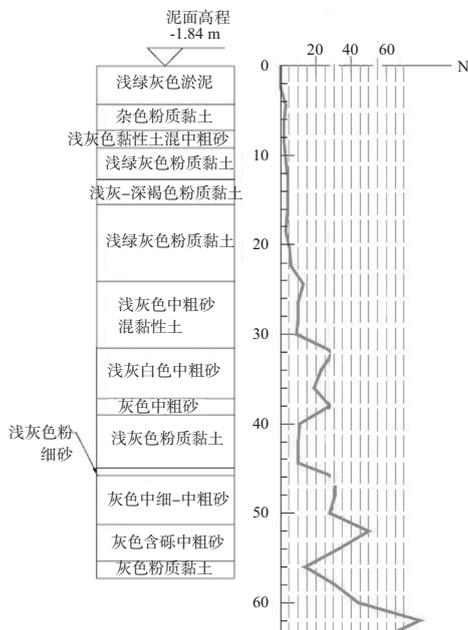


图1 典型地质钻孔

### 3 PHC桩沉桩

#### 3.1 沉桩设备选择

本项目投入2艘打桩船,选用BSP CG370液压锤进行沉桩作业。BSP CG370液压锤技术参数见表1。

#### 3.2 替打、锤垫与桩垫的设计

##### 3.2.1 替打

本项目替打设计为:采用高度2 m钢质替打,重约8 t。上端为圆筒型,圆筒内交错放置3层直径为20~30 mm的钢丝绳做为衬垫,钢丝绳中间用两块钢板分隔,上部为一厚板;中段设计成圆锥形,以便桩锤的冲击能量往下均匀传递;下段为圆柱段。

该替打具有足够的刚度和强度,几何中心线与桩、锤中心线吻合,确保锤击过程桩顶受力均匀,有效地缓冲了锤击力。同时,替打两侧对称设置 $\phi 50$  mm透气孔确保桩身在锤击过程中不会压缩空气损坏桩身及替打本身。图2为替打结构。

表1 BSP CG370 液压打桩锤技术参数

最大能量/kJ	冲程/cm	总长度/m	最大冲程时冲击频率/ (次·min <sup>-1</sup> )	冲击频率/ (次·min <sup>-1</sup> )	基本质量/kg	基本长度/m	工作压力/Bar	工作流量/ (L·min <sup>-1</sup> )
370	200~150	8.375	32	1~100	34 650	6 930	250	650

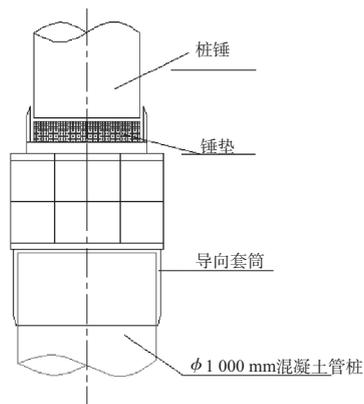


图2 替打结构

##### 3.2.2 桩垫

桩垫选用120~150 mm三合板+150 mm瓦楞纸板,“一桩一垫”,沉桩结束后桩垫残渣厚度为70~80 mm。每沉设1根桩均将替打小帽子内残渣清除干净。

##### 3.2.3 锤垫

在前期的施工中,锤垫采用钢丝绳铺设,由

于在锤击过程中随着时间的推移,钢丝绳在锤击过程中不断地变形,导致偏心锤击的产生。为克服沉桩过程中偏心锤击,锤垫改设2块160 mm钢质“铁饼”。改设“铁饼”做锤垫后,沉桩250根,均无出现桩顶破裂现象,根据施工过程监测数据,采用800 mm落高的平均压应力为30.4 MPa,拉应力3.0 MPa;采用650 mm落高的平均压应力为31 MPa,拉应力2.2 MPa。

##### 3.3 可打性分析

在项目试桩与初期施工阶段,应用GRLWEAP打桩分析软件分别对BSP CG370液压锤打桩进行可打性模拟分析,分析结果显示:在本项目地质条件下,采用BSP CG370液压锤进行打桩作业,打桩过程中的最大压应力、最大拉应力均可控制在合理范围内;在达到设计对承载力的要求下(未能打入到设计入土深度),总锤击数和终锤贯入度均属合理,具有可打性。BSP CG370液压锤打桩分

析见图3。

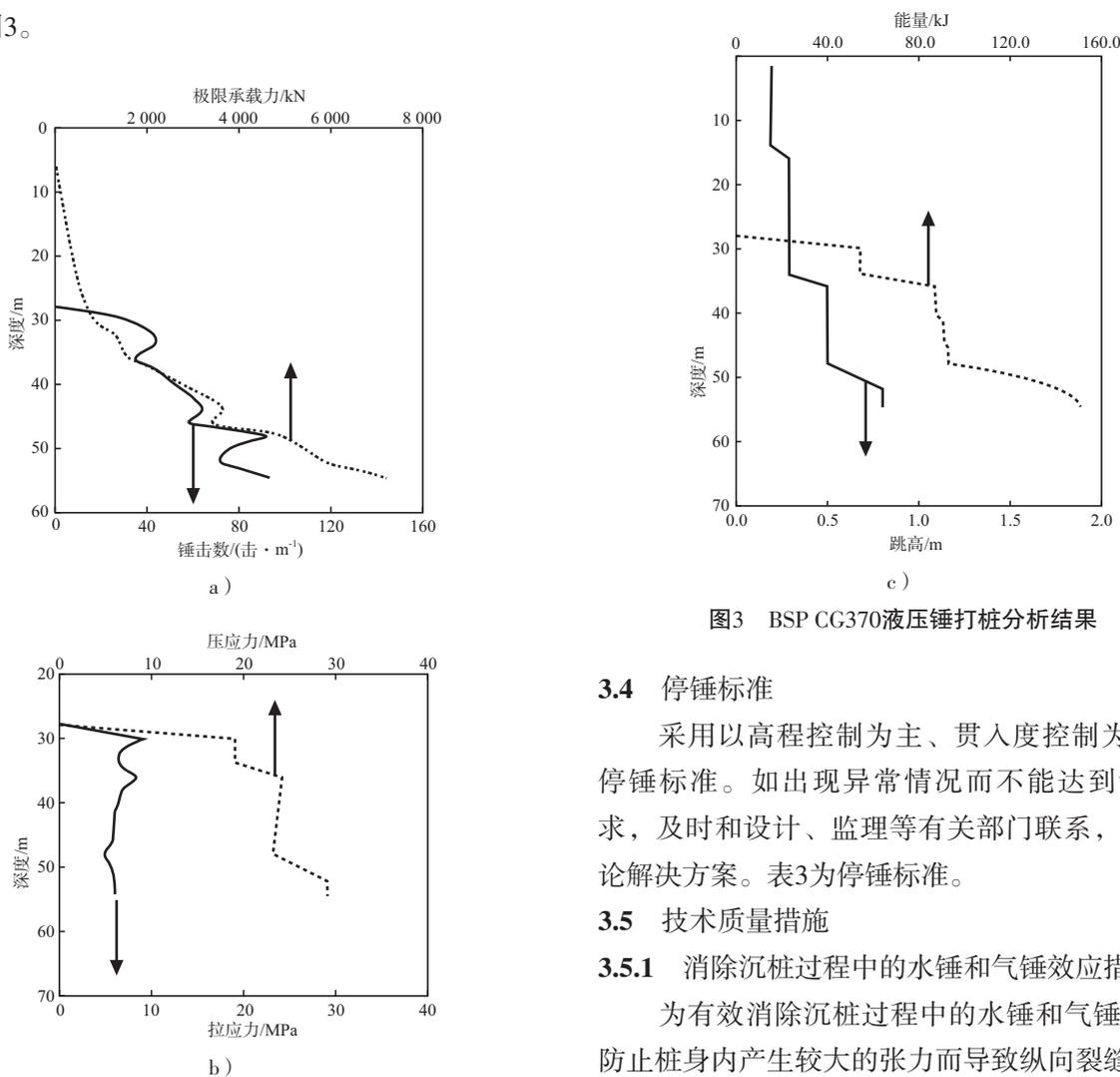


图3 BSP CG370液压锤打桩分析结果

### 3.4 停锤标准

采用以高程控制为主、贯入度控制为辅<sup>[1]</sup>的停锤标准。如出现异常情况而不能达到设计要求，及时和设计、监理等有关部门联系，共同讨论解决方案。表3为停锤标准。

### 3.5 技术质量措施

#### 3.5.1 消除沉桩过程中的水锤和气锤效应措施

为有效消除沉桩过程中的水锤和气锤效应，防止桩身内产生较大的张力而导致纵向裂缝：

表3 沉桩停锤标准

桩顶实际高程与设计高程差值 $\Delta h/m$	锤击能量 $E/kJ$	最后20 cm平均贯入度/mm	具体操作
		$\leq 8$	正常停锤
达到设计高程	$\geq 150$	$> 8$	应暂停沉桩，进行高应变动力检测，承载力满足要求进行后续施工；不满足要求，复打30~40 cm停锤重新进行高应变动力检测并分析检测结果
$0 < \Delta h \leq 1.5$		$\leq 5$	停锤
$\Delta h > 1.5$	$\geq 150 \sim 180$	$\leq 5$	在桩头与桩身质量不出现问题的前提下尽量减小 $\Delta h$ ，同时上报工程师和设计，暂停后续沉桩

- 1) 替打上开排气孔；
- 2) PHC桩身预留4个直径 $\phi 50$  mm的排气孔，上部2个布置在桩顶约1.5 m位置，下部2个设在泥面以下15 m位置在桩壁上对称布置各1个。

#### 3.5.2 沉桩过程控制

- 1) 严格按照设计提供的吊点位置进行吊桩。
- 2) 稳桩、压锤后严禁动船纠偏。开锤前检查桩与锤是否在同一直线上，避免因桩偏心锤击引

起PHC桩顶碎裂或断桩。

- 3) 沉桩过程中要密切注意桩身变化，一旦发现问题，应立即停锤，并会同设计单位和监理工程师，分析原因，采取相应措施。

- 4) 桩垫与锤垫必须及时更换，并保证相应的厚度。

- 5) 严格控制桩锤的落高，特别是在沉桩前期及土层地质条件发生突变的前提下。液压锤的开

锤落高小于100 mm。

6) 密切观察锚位变化情况, 及时调整锚位。桩在捶击过程中必须保证各锚缆受力条件良好, 防止出现走锚。同时定时检查桩船上的各个压仓水的水量, 保证船体有足够的稳定性。

### 3.5.3 异常情况处理措施

1) 硬夹层。沉桩过程如遇硬夹层, 严禁盲目提升落高而产生较大桩身打击应力从而打裂桩身, 甚至断桩, 可采取小落高、快频率的方法, 干扰桩尖土体, 降低动土阻力。

2) 软土地质沉桩。当桩尖需穿过硬夹层下软弱下卧层进入下一个硬夹层时, 需提前控制桩锤落高, 避免贯入度突然过大造成桩身拉应力过大而拉裂桩身。

3) 入土较浅、溜桩。一方面由于桩身自由长度相对较长, 杜绝大落高沉桩, 以免锤击应力与端承力集中于桩身中部且桩身作周期性摆动致使断桩。另一方面, 应使用小落高锤击试探溜桩情况, 确保桩身与替打以惯性缓慢下沉, 一旦溜桩, 立即停止捶击, 刹住桩锤绞车。溜桩时处理得当不仅可以减小偏位, 而且可以保护桩身同时避免使桩锤及替打落水。

## 4 PHC桩沉桩质量问题预防与处置方法

### 4.1 原因分析

PHC桩沉桩过程中出现桩身纵向及环向裂缝是一个较普遍的质量通病, 桩身开裂的原因分析较复杂, 因素也较多, 主要有桩本身质量的不均匀性、桩锤选型不当、偏心捶击、地质情况突变、锤垫及桩垫的选用不适等。表4为按照制桩、运桩和沉桩3个阶段对影响质量因素进行逐层分解结果。

表4 沉桩施工质量问题

因素	缺陷桩数量/根	频率/%	累计频率/%
地质情况变化大	35	62.50	62.50
捶击数过多	10	17.86	80.36
替打、锤垫、桩垫不合适	6	10.71	91.07
偏心捶击	2	3.57	94.64
捶击能量过大 <sup>[2]</sup>	2	3.57	98.21
沉桩过程中桩船移位	1	1.79	100.00

### 4.2 预防措施

1) 坚持重锤轻打的原则进行施工。严格按照建议停锤标准进行捶击控制, 对地质资料认真分析, 总结已沉设桩基沉桩规律, 及时调整并采用合适的桩锤落高。

2) 穿透标贯击数较大的砂层时, 贯入度小, 桩尖的反弹力大(压缩波), 下部捶击能量需通过桩身变形消耗, 反弹上行应力波与捶击波的叠加会增大桩的环向拉应力。此时应适当减小捶击频率, 不应盲目增加桩锤落高, 否则在桩尖击穿夹层瞬间贯入度偏大, 易产生较大拉应力而导致桩身出现环向裂缝。

3) 选用合理锤垫、桩垫, 使桩锤、替打、桩身轴线尽可能在同一直线上, 避免偏心捶击导致桩身开裂。锚缆松弛, 桩架与桩身不平行等均有可能引起偏心捶击。

### 4.3 桩身质量问题的处理方法

#### 4.3.1 水上部分裂缝修补

碳素纤维加固材料是高强度碳纤维单向排列, 用微量的树脂浸渗后作为混凝土的修复补强材料, 其抗拉强度大约是钢筋的10倍, 并且具有质量轻、高弹性、高强度、耐腐蚀等特性。采用碳纤维布浸渍环氧树脂粘贴修补时, 将碳纤维用环氧树脂预浸成为复合增强材料(单向连续纤维), 用环氧树脂粘结剂沿垂直于裂缝方向粘贴在桩身, 形成一个新的复合体, 使该材料与原有桩身共同受力增大结构的抗裂能力, 提高结构的强度、刚度、抗裂性和延伸性, 同时起到防腐作用。

#### 4.3.2 水下部分裂缝修补

采用碳纤维布浸渍环氧树脂水下粘贴修补方法, 其中底胶(粘结剂)采用专用的水下修补剂, 其它施工方法与水上部分类似。

#### 4.3.3 贯穿裂缝处理

当桩身出现贯穿性裂缝, 且裂缝位置位于设计桩芯混凝土下方时, 除按上述要求进行修补外, 对桩内吸泥清淤, 并加长桩芯混凝土的长度, 使桩芯混凝土超过裂缝区域500 mm以上。

(下转第193页)