

# Research on Construction Optimization of PHC Pipe Pile Based on ABAQUS

Yanchao Zhang Zhongyu Chen\* Qingtao Wang

Shanghai Baoye Group Co., Ltd. Changchun Branch, Changchun, Jilin, 130000, China

## Abstract

PHC pipe piles have been widely used in pile foundation engineering of buildings and bridges, but in the actual application process, they face many problems caused by environmental factors. When using a hammer driven pile driver for PHC pipe pile sinking, groundwater can cause an abnormal increase in pressure inside the column, resulting in damage to the pile body during the hammering process. To solve this problem, drilling holes below the pile top is used to release the pressure inside the column, and the location and area of the holes are determined while ensuring that the pile head position is not damaged. To this end, ABAQUS software was used to perform finite element simulation on PHC pipe piles, identifying stress concentration points to determine the optimal drilling position, and verifying the influence of hole size on the structural bearing performance of pipe piles. Field testing showed that after drilling at the location determined by simulation results, there were no signs of structural damage. In the end, the process was successfully applied in engineering projects, effectively meeting construction requirements.

## Keywords

PHC pipe pile; pile sinking process; finite element simulation; engineering applications

# 基于 ABAQUS 的 PHC 管桩施工优化研究

张艳超 陈忠钰\* 王庆涛

上海宝冶集团有限公司长春分公司, 中国·吉林 长春 130000

## 摘 要

PHC管桩已在建筑与桥梁的桩基工程中得到广泛应用, 然而实际应用过程中却面临许多由于环境因素引起的问题。当采用锤击式打桩机进行PHC管桩沉桩时, 地下水会导致柱内压力异常增大, 从而在锤击过程中损坏桩身。为了解决这一问题, 通过在桩顶以下位置进行打孔来释放柱内压力, 在保证桩头位置不被破坏的前提下确定打孔的位置和面积。为此, 利用ABAQUS软件对PHC管桩进行有限元模拟, 通过识别应力集中点来确定最佳的打孔位置, 同时验证开孔大小对管桩结构承载性能的影响。实地检测显示, 按照模拟结果确定的位置进行打孔后, 未出现任何结构破坏迹象。最终, 该工艺被成功应用于工程项目中, 有效满足施工需求。

## 关键词

PHC管桩; 沉桩工艺; 有限元模拟; 工程应用

## 1 引言

PHC管桩是一种预应力高强度混凝土管桩。它是采用先张法预应力和离心成桩工艺, 通过一系列特殊工艺制成的截面为空心, 外壁为环向弯曲的截面形式的一种空心桩。PHC管桩作为一种较为常见的桩基结构形式, 具有较高的承载能力和抗震性能, 适用于各种建筑和桥梁工程中。研究人员通过理论分析、数值模拟和现场试验等方法, 对PHC管桩的承载性能、变形特性和抗侧移性能进行了深入研究,

这些研究为PHC管桩的设计和应用提供了重要的理论基础和技术支持<sup>[1]</sup>。

锤击管桩是一种常见的桩基施工工艺, 使用冲击锤在管桩顶部进行冲击, 使其逐渐下沉到设计要求的深度。但在PHC管桩在施工过程中如果遇到深厚砂层、圆砾层或者卵石层等复杂地质情况时, 继续沉桩会导致碎石、砂土沿空心管桩内部向上填充蔓延, 造成管底堵塞<sup>[2]</sup>。

若在高地下水环境下水在管桩内部无法排除, 当管桩空间内部注满水后, 继续沉桩使柱内水压增大, 从而导致管桩破裂, 为解决此问题在PHC管桩顶面以下位置打孔, 但孔径的大小和位置不好确定, 如若过大会导致混凝土在锤击过程中开裂, 导致无法进行沉桩作业。在合理力学条件<sup>[3]</sup>下合理孔径大小保证水流顺利排除, 同时在ABAQUS软件中对实际锤击过程进行有限元模拟通过孔径沿圆周方向的

**【作者简介】**张艳超(1989-), 中国河北唐山人, 硕士, 工程师, 从事工程施工技术研究。

**【通讯作者】**陈忠钰(1998-), 中国吉林白山人, 硕士, 工程师, 从事工程施工技术研究。

应力变化判断孔径的大小对预制管桩承载能力的影响,从而确定新型PHC管桩结构。在工厂完成PHC管桩浇筑成型后,投入实际工程应用,最终满足实际要求。

## 2 PHC管桩的施工工艺

### 2.1 定义及分类

PHC管桩是一种钢筋混凝土预应力桩基构件,通常用于建筑工程、交通工程、水利工程等领域的桩基施工。按混凝土有效预应力或管桩的抗弯性能分为A型、AB型、B型和C型,其混凝土有效预压应力值分别为 $4\text{N/mm}^2$ 、 $6\text{N/mm}^2$ 、 $8\text{N/mm}^2$ 和 $10\text{N/mm}^2$ ,其计算值偏差在各自规定值的 $\pm 5\%$ 范围内<sup>[4]</sup>。

### 2.2 特点及优势

PHC管桩具有许多独特的优势使其在工程中得以广泛应用。由于采用了混凝土预应力钢筋材料,使得管桩的承载能力得到大幅提升,这种钢筋材料不仅可以增加桩体的强度和刚度,还能有效地抵抗桩身的变形和破坏,从而保证了桩体的稳定和安全。PHC管桩的混凝土制作采用现代化的工艺和材料,具有较高的抗化学侵蚀能力,能够经受住湿度、氯离子等环境因素的侵蚀,延长了桩体的使用寿命。在制造过程中,PHC管桩可以在工厂进行模具浇筑,生产过程更加标准化和规范化,这不仅能够保证桩体质量的稳定和一致性,还能避免了现场施工的不确定因素,提高了成桩质量的可靠性。虽然PHC单桩承载能力高,但单位承载能力的价格却比普通桩低,这意味着在满足工程承载要求的前提下,PHC管桩可以降低工程的成本,提高经济效益。

### 2.3 应用情况

PHC管桩广泛应用于建筑工程、桥梁工程、港口工程、道路工程等领域。

#### 2.3.1 土壤改良

在软地基中通过安装PHC管桩可以改善地基的承载能

力、抗沉降性能和抗液化能力,从而提高整体工程的稳定性和安全性。

#### 2.3.2 承载结构

在建设桥梁、高层建筑等工程时,PHC管桩通常被用作桩基或桩柱。其高强度和刚性使其能够承受大荷载,分担结构的重量,并将荷载传递到更深的地层。

#### 2.3.3 抗侧移结构

PHC管桩在抗侧移结构中起到重要作用。通过设置一定数量的PHC管桩并施加预应力,可以有效地抵抗水平荷载和地震力,提高结构的抗侧移性能。这种应用常见于挡土墙、防护墙和地下结构等工程。

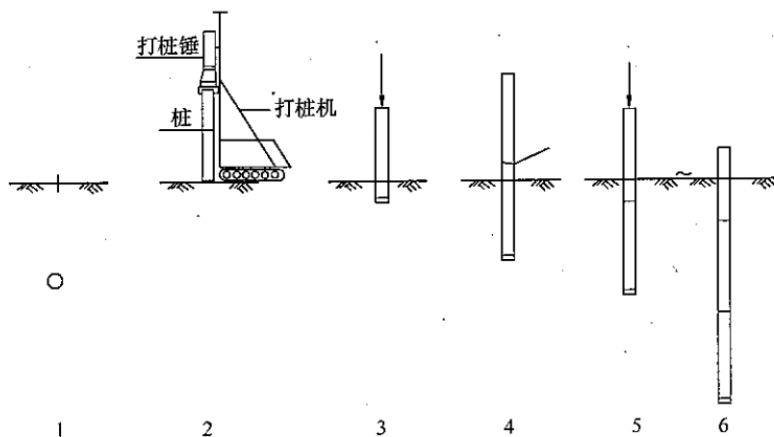
#### 2.3.4 地下工程

在地铁、隧道和地下室的施工中,PHC管桩可以用作支撑结构,提供临时或永久的支撑和稳定。

### 2.4 沉桩工艺

锤击法施工预应力管桩的工艺流程包括:测量定位→底桩就位、对中和调直→锤击沉桩→接桩→再锤击、接桩→打至持力层→收锤(图1)。

施工时采用锤击能量大、施工速率快、工效高的柴油锤打桩,保证破损率在1%左右,最多不能超过3%,且每根桩锤击数,宜在1500下以内,最多不超过2500下。桩帽应有足够的强度、刚度和耐打性。桩帽宜做成圆筒形,套筒深度宜为35~40cm,内径应比管桩外径大2~3cm。“锤垫”设在桩帽的上部,保护柴油锤和桩头,一般采用竖纹硬木或盘圈层叠的钢丝绳制作,厚度取15~20cm。接桩时采用端头板,四周一圈坡口进行电焊接接。待两个端头板对齐后,在端头板四周均匀对称点焊4~6点,一般为防止产生接桩偏斜,应用两个焊工对称操作,要求两个端头板之间焊接饱满。待焊缝自然冷却8~10min后便可继续锤击沉桩。



1—测量放线; 2—就位对中调直; 3—锤击下沉; 4—电焊接桩; 5—再锤击、再接桩、再锤击; 6—收锤, 测量贯入度

图1 管桩锤击施工顺序

### 3 改进方法及技术

#### 3.1 存在的问题

现场实际施工发现由于 PHC 管桩是空心管桩，当锤击至地下水水位以下时地下水会在空心柱内形成水柱。继续沉桩后，管桩内部水柱由于挤压形成较大的水压力，在锤击过程中对管桩产生了较大的水平作用力，同时在锤击过程中由于空心柱内会处于短暂的封闭状态，随着地下水水位升高会造成柱内产生较大的压强差，导致管桩发生破裂。

#### 3.2 创新方法

查阅相关资料发现引孔是一种常见的解决 PHC 管桩柱内进水造成压强过大的方法。

传统的 PHC 管桩打孔方法是在成品 PHC 管桩进行钻孔，但是此方式对结构承载性能影响较大，锤击过程中容易造成管桩破裂。为解决这一问题，在厂家制作时混凝土浇筑以前在柱顶以下部位进行钢管穿孔，浇筑完成后形成贯穿通道，但在实施引孔操作前，需要进行充分的设计和评估，确保引孔的位置和深度合适，并避免对管桩柱的结构造成不必要的影响。

#### 3.3 关键技术

为确定引孔位置和深度的合适值，通过采用有限元模拟的方法，对引孔后的 PHC 管桩进行连续多次锤击试验模拟，确保 PHC 管桩不会出现应力集中点，造成管桩破坏。

##### 3.3.1 孔径大小确定

根据流体力学，我们通过体积流量和流速可以确定出水口面积，具体公式如下：

$$Q=Av$$

式中， $Q$  为体积流量； $A$  为出水口面积； $v$  为流速。

##### 3.3.2 冲击力计算

查阅相关资料发现锤击法锤击 PHC 管桩柱的冲击力计算不能仅仅考虑锤子的重量，还需要分析动能的转化<sup>[5]</sup>，因此冲击力使用以下公式计算：

$$F=mg + \frac{m\sqrt{2gh}}{\sqrt{2h/g}} \quad (1)$$

式中， $m$  为锤子质量； $h$  为落锤距离； $g$  为重力加速度。如果引孔距离柱顶端太近会对结构造成破坏，通过有限元模拟来判定结构是否发生破坏，具体见第 4 节。

以桩型 PHC500(125)AB 为基准计算，使用 12.8t 锤式打桩机、落距为 1.5m、平均锤击速率为 5cm/次。经计算确定锤击过程中，锤击冲击力为 257kN、8 个孔（开孔直径 28mm）。

### 4 基于 ABAQUS 软件的过程模拟

#### 4.1 ABAQUS 软件

ABAQUS 公司成立于 1978 年，总部设在罗得岛州普罗维登斯市。技术先进可靠的 ABAQUS 软件已经逐步被工程界广泛接受，它可以解决复杂的非线性问题，将试验过程简化。ABAQUS 软件有限元分析思路主要是化整为零，积

零为整，将连续的求解区域分割成多个单元，并在单元节点上建立函数关系求解力学特征，再利用单元和集合体的场函数确定集合体的力学特征<sup>[6]</sup>。

#### 4.2 材料本构关系

##### 4.2.1 混凝土

ABAQUS 作为一款大型的非线性有限元软件，其中自带混凝土塑性损伤（Concrete Damage Plasticity, CDP）模型，论文选用 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》<sup>[7]</sup>给出的单轴应力—应变曲线确定混凝土在 ABAQUS 软件中的取值，图 2 和图 3 所示为混凝土单轴受压、受拉曲线，考虑到 PHC 管桩浇筑混凝土强度为 C80，取其弹性模量  $E_0=41004\text{N/mm}^2$ ，泊松比为 0.2。

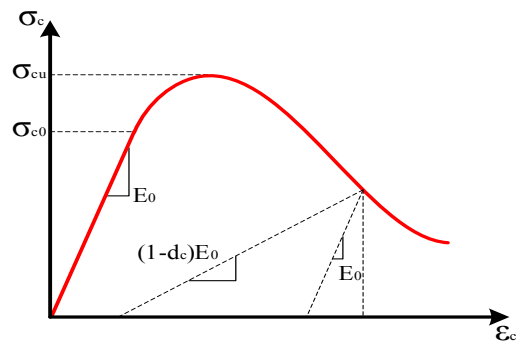


图 2 混凝土单轴受压应力—应变曲线

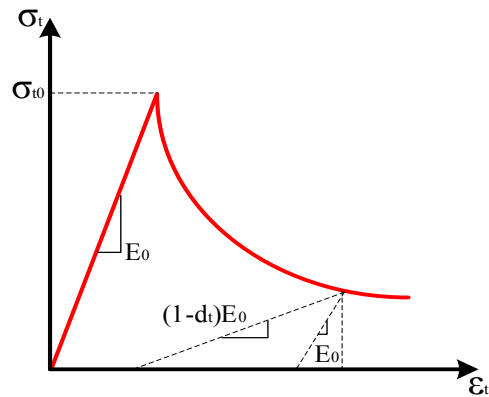


图 3 混凝土单轴受拉应力—应变曲线

##### 4.2.2 钢筋

钢筋应力、应变关系采用直线模型，PHC 管桩钢筋设定为高强预应力钢筋，其结构关系如表 1 所示。

表 1 钢筋参数

型号	弹性模量 (N/mm <sup>2</sup> )	泊松比	极限强度 (MPa)	线膨胀系数
HPB300	195000	0.3	1860	0.000012

#### 4.3 建立模型

以桩型 PHC500(125)AB 为基准管长增加 0.564m 建立 ABAQUS 有限元模型，同时进行应变分析，以柱顶端到引

孔圆周距离为变量,选取 100mm、200mm、300mm 等参数进行模拟试验,最终确定距离柱顶端距离 300mm 为最优量,具体操作流程如下:

- ①创建部件,参照图集 10G409《预应力混凝土管桩》输入几何参数。
- ②装配构件,将已经完成的部件进行组装。
- ③创建相互作用,使用 embedded 功能将箍筋笼嵌入混凝土中,不考虑二者的粘结滑移。
- ④定义边界条件,对桩顶端施加正负垂直方向的力,对 PHC 管桩进行抗压和拉伸两个模拟过程,同时在柱底端进行边界绑定。
- ⑤网格划分,混凝土圆柱为一十结点修正二次四面体单元,杂交,线性压力;钢筋为两结点线性三维桁架,杂交

单元。

在 ABAQUS 软件装配时使用钢垫块模拟 PHC 管桩上、下两个部位的圆钢板。预应力施加采用降温法,创建温度应力场对钢筋施加预应力具体公式如下:

$$T = -\frac{N}{\alpha EA} \quad (2)$$

式中,  $T$  为温度;  $N$  为预应力大小;  $\alpha$  为线膨胀系数;  $E$  为钢筋弹性模量;  $A$  为预应力筋面积。综上所述,ABAQUS 软件中 PHC 管桩柱模型如图 4 所示。

#### 4.4 运行结果

##### 4.4.1 应力分析

有限元模型分析结果见图 5,对在 257kN 荷载作用下的 PHC 管桩引孔圆周进行应力分析,最大值为 2.01MPa。

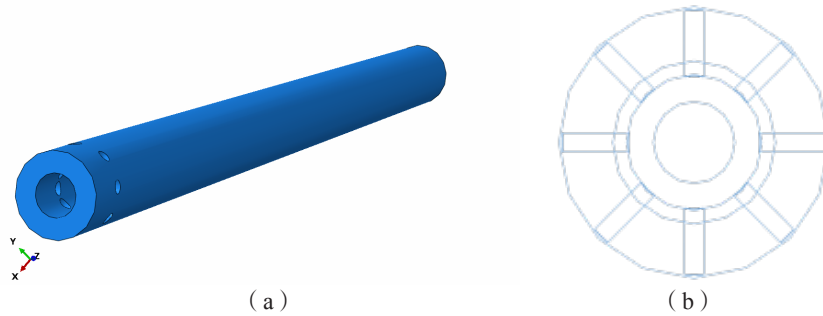


图 4 PHC 管桩模型图

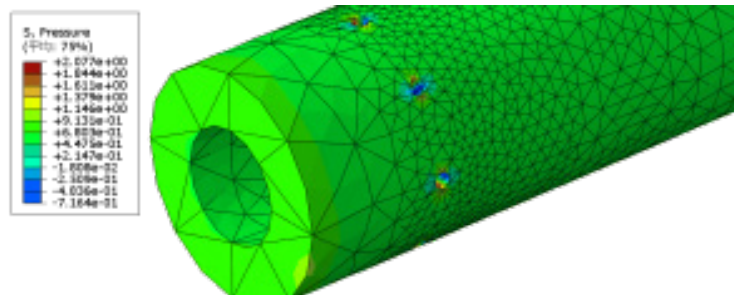


图 5 Z 轴方向应力分析图

##### 4.4.2 疲劳分析

根据混规 2010 可知, C80 混凝土的极限抗压强度为 66.56MPa、极限抗拉强度 4.69MPa。由于是在 X 轴方向进行加载,所以 X 轴方向上抗压强度太小,不考虑其多次落锤击打的影响。但由于 PHC 管桩开孔导致圆孔周围会产生拉应力,模拟最大应力值与极限强度比值为 0.43。

为了研究混凝土在常幅重复荷载作用下的疲劳性能,研究混凝土材料在弯曲疲劳条件下的疲劳寿命分布规律,建立混凝土材料的直线型双对数弯曲疲劳方程<sup>[8]</sup>:

$$\log S = 0.0483 - 0.0426 \log N_f \quad r = 0.95 \quad (3)$$

分析发现  $S$  最大值为 0.43,混凝土疲劳次数均能满足锤击要求。

## 5 PHC 管桩柱的案例应用

### 5.1 项目施工概况

本项目为长春影视文创孵化园区二期建设项目,主要分为冰雪体验摄影基地和影视研学基地。桩基工程数为 5805 根,合计长 60284.5m。冰雪体验摄影基地工程桩为 3950 根,总长 45180m;影视研学基地工程桩为 1777 根,总长 15104.5m。桩基工程分为锤击法和静压法两种施工方式,在使用锤击法施工时桩型 PHC500(125)AB 管桩(设计管长为 8.5m)的管长制作作为 9.064m,同时 PHC 管桩本身结构进行开孔操作,开孔位置与第 4 节 ABAQUS 有限元模拟一致,采用制作工艺见 3.2,其余部分均未发生改变。



## 5.2 现场检测

对已经制作完成打孔后的 PHC 管桩进行现场实验检测,包括竖向抗压静载试验、竖向抗拔静载试验(图 6)、水平静载试验,未发现导致结构发生破坏的问题(图 7)。



图 6 竖向抗拔静载试验



图 7 施工现场照片

## 5.3 沉桩工艺

本项目使用落锤式打桩机沿孔径方向进行锤击,用于安置 PHC 管桩。整个过程基于精确测量仪器对桩位的测量和标定,根据标定位置使用长螺旋钻孔机进行钻孔,一旦孔

深达到设计要求深度,立即清理桩孔内的泥土和水等杂物。紧接着将 PHC 管桩放置在预定位置,运用落锤式打桩机对管桩进行击打,从而逐步将 PHC 管桩埋入地下,最终完成沉桩的施工过程。

## 6 结论

①为解决使用锤击法施工 PHC 管桩时因为地下水水位过高造成柱内压强过大,造成桩身破裂问题,提出在 PHC 管桩顶端以下位置进行打孔。

②实际应用时无法确定打孔位置和面积是否会对结构承载能力产生较大影响。PHC500(125)AB 管桩打孔孔径大小根据流体力学,确定打孔数量为 8,直径为 14mm,打孔位置根据 ABAQUS 有限元模拟确定孔上圆周点距离桩顶端 300mm 最为合适。

③运用 ABAQUS 软件模拟打孔后 PHC 管桩的受力性能,未发现结构出现较大应力集中点造成结构发生破坏,同时在现场进行实际检测均未发现结构破坏。

④在长春影视文创孵化园区二期建设项目应用该工艺,使用锤击法沉桩达到设计深度后,顺利完成桩基工程施工。

## 参考文献

- [1] 王银霞.预应力混凝土管桩在长春地区的适宜性研究[D].吉林:吉林大学,2013.
- [2] 黄芬清.长螺旋钻机引孔辅助锤击PHC管桩施工技术[J].四川水泥,2023(4):160-162.
- [3] 何川.流体力学[M].重庆:重庆大学出版社,2018.
- [4] 10G409 预应力混凝土管桩[S].
- [5] 金江,袁继峰,葛文璇,等.理论力学[M].南京:东南大学出版社,2019.
- [6] 孙庆昭.ABAQUS混凝土塑性损伤模型概述[J].重庆建筑,2014,13(11):70-72.
- [7] GB 50010—2010 混凝土结构设计规范[S].
- [8] 李永强,车惠民.在等幅重复应力作用下混凝土弯曲疲劳性能研究[J].铁道学报,1999(2):85-88.