

PHC 管桩荷载传递的试验研究和数值分析

律文田, 王永和, 冷伍明

(中南大学 土木建筑学院, 长沙 410075)

摘 要: 通过在预应力高强混凝土管桩(PHC 桩)的桩顶、桩端及桩周各主要土层的分界面埋设应变计的静荷载试验, 研究了 PHC 管桩的荷载传递机理, 分析了轴力和桩侧摩阻力的变化规律。并以工程中 PHC 管桩的竖向抗压静载试验为基础, 运用有限单元法对软土地区的 PHC 管桩桩-土相互作用进行模拟, 在分析中采用弹塑性模型, 引入了非线性接触面单元, 并且考虑了土体的材料非线性。分析结果表明, 计算值和实测值有一定的差别, 但是变化趋势基本一致。

关 键 词: PHC 管桩; 有限单元法; 荷载传递机理; 桩侧摩阻力

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

Testing and numerical analysis of load transfer mechanism of PHC pile

LÜ Wen-tian, WANG Yong-he, LENG Wu-ming

(School of Civil and Architectural Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: Base on the static loading tests on prestressed high-strength concrete piles with strain gauges at the top and toe of pile and at interfaces of soil layer, the load transfer mechanism of PHC piles was studied; and the behaviors of skin resistance and inner force were analyzed. Based on the static load test on prestressed high-strength concrete piles (PHC piles) of a practical engineering, using the elastoplastic model, nonlinear interface elements and nonlinear soil elements, by the finite element method, pile-soil interaction of PHC pile in the soft soil area were simulated. The results of analysis indicate that there are many differences between the numerical predictions and the experimental results; however, it shows that the calculated distribution trend is in good agreement with the experimental results.

Key words: PHC piles; finite element method; load transfer mechanism; skin resistance

1 引 言

桩基础是一种历史较长而又被广泛应用的深基础型式, 能较好地适应复杂地质条件以及各种荷载情况, 特别是在软弱地基上采用得较多。预应力高强混凝土管桩(以下简称 PHC 管桩)是近年来开始使用的一种桩型, 它是采用先张法预应力工艺和离心成型方法制成。由于其工厂化程度高、养护时间短、成桩质量好、强度高等优点而在国内外得到了广泛应用。然而对 PHC 管桩的荷载传递、受力机理等特性尚未进行系统的研究, 相关报道并不多见^[1, 2]。在静载试验中, 要研究桩身荷载传递机理及其参数, 则必须在桩身不同部位埋设钢筋计; 由于预应力混凝土管桩是采用先张法预应力工艺和离心成型方法制成, 并经高温蒸养^[3]; 因此, 不可能在制作桩时

将应变计预先埋设在桩内。在某工程的现场试验中, 笔者所在课题组结合科研实践工作, 研制了一种 PHC 管桩桩身应变计埋设方法^[4]。本文通过在 PHC 管桩的桩顶、桩端及桩周各主要土层的分界面埋设应变计的静荷载试验, 研究了 PHC 管桩的荷载传递机理, 分析了轴力和桩侧摩阻力的变化规律。并以工程中 PHC 管桩的竖向抗压静载试验为基础, 运用有限单元法对软土地区的 PHC 管桩桩-土相互作用进行模拟, 在分析中采用弹塑性模型, 引入了非线性接触面单元, 并且考虑了土体的材料非线性。

2 有限元分析理论

对单桩与土的共同作用的力学性能进行分析, 可把桩当作线弹性材料考虑, 土则考虑为弹塑性材料, 采用 Drucker-Prager 弹塑性本构模型^[5]; 计算时

引入非线性接触面单元,并且考虑土体材料非线性。其屈服准则采用广义的 Drucker-Prager 屈服准则^[6],该准则对莫尔-库仑准则予以近似,由此来修正 Von Mises 屈服准则;即在 Von Mises 表达式中包含一个附加项。该准则适用于混凝土、岩石和土壤等材料;相应的等效应力的表达式为

$$\sigma_e = 3\beta\sigma_m + \left[\frac{1}{2} \{S\}^T [M] \{S\} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中 σ_m 为平均应力或静水压力; $\{S\}$ 为偏差应力; β 为材料常数; $[M]$ 为 Mises 屈服准则中的 $[M]$, 为一试验常数。

材料常数 β 表达式如下:

$$\beta = \frac{2\sin\phi}{\sqrt{3}(3-\sin\phi)} \quad (2)$$

式中 ϕ 为内摩擦角。

材料的屈服参数定义为

$$\sigma_y = \frac{6cc\cos\phi}{\sqrt{3}(3-\sin\phi)} \quad (3)$$

式中 c 为凝聚力。

屈服准则的表达式如下:

$$F = 3\beta\sigma_m + \left[\frac{1}{2} \{S\}^T [M] \{S\} \right]^{\frac{1}{2}} - \sigma_y = 0 \quad (4)$$

对 DP 材料, 当 β , σ_y 给定后, 其屈服面为一圆锥面, 此圆锥面是六角形的莫尔-库仑屈服面的外切锥面, 如下图 1 所示。

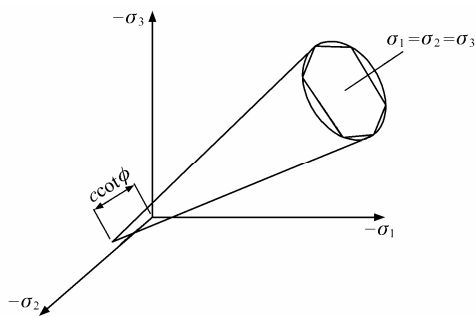


图1 Drucker-Prager 屈服面和 Mohr-Coulomb 屈服面
Fig. 1 Drucker-Prager's yielding surface and Mohr-Coulomb's yielding surface

3 实例分析

3.1 工程概况

本试验对 3 根预制的管桩进行静力工作荷载试验。该管桩由两根 12 m 的预制管桩和桩头组成, 总长 24 m, 直径 0.55 m, 采用静压方式压入软土地基。为了解每根桩在桩顶荷载作用下的荷载传递机理及各土层的侧阻力和端阻力, 在桩顶、桩端及各

主要土层的分界面上均埋设了应变计, 每根预制桩桩身布置了 10 层应变计, 每层 4 个, 共计 40 个应变计。PHC 管桩测试元件的布置见图 2。

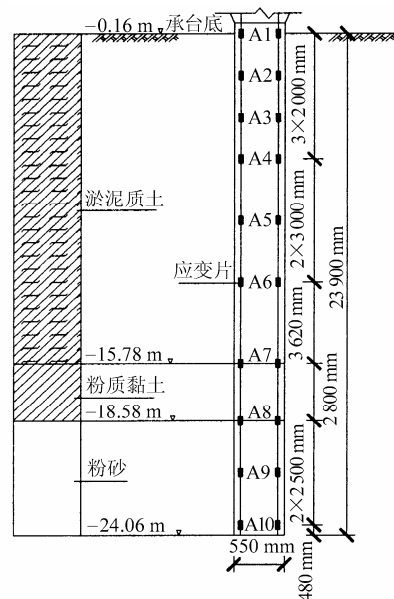


图2 预制桩应变计布置
Fig. 2 Strain gauge's setting of precast pile

3.2 地质概况

场地地层属第四系全新统冲湖积层, 主要由淤泥质粉质黏土, 粉质黏土及粉砂组成。各地层岩性自上而下分述如下: ① 淤泥质黏土, 深灰色, 流塑, 含少量腐植物, 局部夹有薄层粉砂, 具高压缩性、低强度的特点, 且大多数灵敏度超过 16, 为流动黏土, 具高触变性, 厚为 15.62 m。② 粉质黏土, 绿灰色, 软塑, 厚 2.8 m, 具中等压缩性。③ 粉砂, 褐黄色, 深灰色, 中密~密实, 饱和, 厚度为 5.48 m。

3.3 静载试验

试验加载装置采用堆重平台反力装置, 依靠堆载反力系统通过千斤顶逐级加静荷载至桩的工作荷载 880 kN。试验按照《建筑桩基技术规范》(JGJ94—94) 规定的慢速维持荷载法加载。其有关参数如下:

(1) 荷载分级($\Delta P/P$): 400 kN/400 kN, 200 kN/600 kN, 200 kN/800 kN, 80 kN/880 kN;

(2) 稳定标准: 每小时的沉降不超过 0.1 mm, 并连续出现两次;

(3) 沉降测读: 加载后隔 5, 10, 15, 15, 15 min 各测读一次, 以后每隔 30 min 测读一次, 直至达到相对稳定标准;

(4) 桩身应变观测: 每级荷载达到相对稳定标准时测读。

3.4 桩身轴力确定

由实测桩身截面处的应变可以求得桩身截面间的相互作用力为

$$N_i = E\varepsilon_i A \quad (5)$$

式中 N_i 为第 i 截面轴力(kN); E 为桩身混凝土弹性模量(kPa); ε_i 为第 i 截面实测应变; A 为桩身截面积(m²)。

3.5 桩侧摩阻力确定

由桩身各截面轴力即可求得桩侧摩阻力:

$$F_i = N_i - N_{i+1} \quad (6)$$

根据土层的摩阻力可求出该段桩侧平均侧摩阻力:

$$f_i = \frac{F_i}{Ul_i} \quad (7)$$

式中 f_i 为第 i 层侧摩阻(kPa); U 为桩身截面周长(m); l_i 为第 i 截面与第 $i+1$ 截面之间的距离(m)。

3.6 桩身各应变实测截面的位移

测试面间的轴力差造成该桩层面间桩段的竖向位移或桩身压缩, 根据桩顶实测沉降减去桩身的压缩量, 可以得到桩身应变测试截面的位移。假定桩身轴力在两应变测试截面是线性变化的, 则桩身各应变实测截面的位移 s_j 按下式计算:

$$s_j = s - \sum_{i=1}^j l_i (\varepsilon_{i+1} + \varepsilon_i) / 2 \quad (8)$$

式中 s 为桩顶位移实测值; l_i 为第 i 断面和 $i+1$ 断面之间的桩长。

4 试验结果分析

4.1 荷载-沉降曲线

静荷载试验的荷载-沉降曲线的线型是桩身材料或桩周土破坏机理和破坏模式的宏观反映。图 3 给出了荷载-沉降关系曲线, 从中可以看到, 桩在工作荷载作用下, 3 根试桩荷载-沉降曲线近似呈直线; 这 3 根试桩计算的弹性压缩变形量与实测桩顶沉降量基本上一致, 说明桩顶沉降基本上为桩身的弹性压缩变形引起。这些都表明基桩基本处于弹性工作状态。

4.2 桩身轴力沿深度变化

根据实测的桩身应变值, 用式 (5) 和式 (7) 求得桩顶荷载 880 kN 时桩身轴力随深度的变化曲线, 如图 4 所示。桩在竖向荷载作用下, 桩身发生轴向弹性压缩。同时, 由于桩身表面与其侧面土紧密接触, 当桩受力产生相对于土的向下位移, 这时就会产生土对桩向上的桩侧摩阻力。竖向荷载沿桩

身向下传递过程中, 必须不断克服这种摩阻力。因此, 桩身截面轴力就沿深度呈非线性递减。

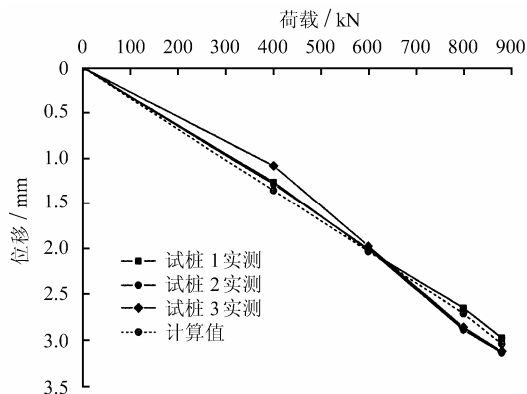


图3 荷载-沉降曲线

Fig.3 Static load test curves

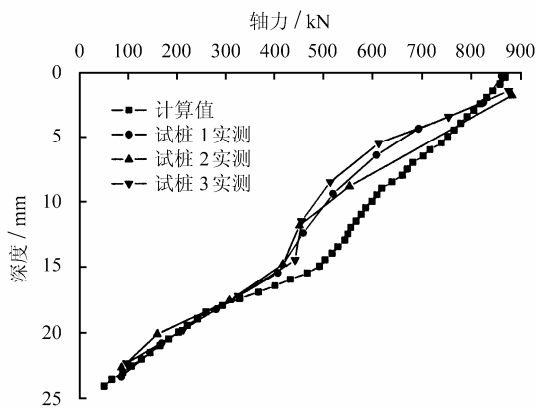


图4 轴力随深度变化图

Fig.4 The change of stress following the depth

从图 4 可以看出, 桩身轴力沿深度方向逐步衰减, 呈“倒三角形”分布, 桩身轴力上部大于下部。在桩顶荷载作用下, 桩身上部 0~16 m 的范围内, 淤泥质黏土层桩身轴力变化较小, 而在 16~24 m 范围内的粉质黏土和粉砂层, 桩身轴力传递变快。由于淤泥质黏土的压缩模量小于粉质黏土和粉砂的压缩模量, 因此, 桩端土层与桩周土层的压缩模量之比 E_b/E_s 在淤泥质黏土处明显大于粉砂和粉质黏土处; E_b/E_s 值越小, 轴力沿深度衰减越快^[7, 8], 所以, 桩身轴力在粉砂和粉质黏土层衰减速度比在淤泥质黏土层中要快。在工作荷载 880 kN 作用下, 3 根试桩在淤泥质黏土段分别承担了总荷载的 52.6%, 52.6%, 49.62%; 粉质黏土段分别承担总荷载的 14.8%, 12.6%, 14.28%; 粉砂段承担了总荷载的 22.5%, 25.0%, 24.8%; 桩端荷载分别占总荷载的 10.1%, 9.8%, 11.3%。3 根试桩的长径比均为 43.6, 从上面的数据可知, 其受力特性为端承摩擦桩, 以摩擦力为主。

4.3 侧摩阻力随深度变化

正是由于桩侧存在的侧摩阻力,造成了桩身轴力在任意两桩身轴力测试面间的差值,其差值的大小即为该段桩的侧摩阻力,变化斜率大小反映了桩侧摩阻力的大小。图5给出了桩侧摩阻力随深度变化的情况,各土层的桩侧摩阻力及相对位移关系曲线见图6。

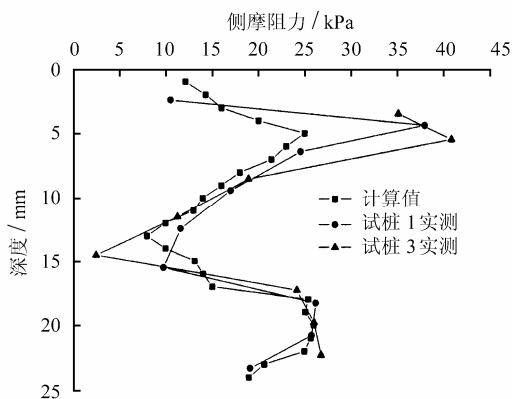


图5 侧摩阻力随深度变化图

Fig. 5 The change of lateral friction following the depth

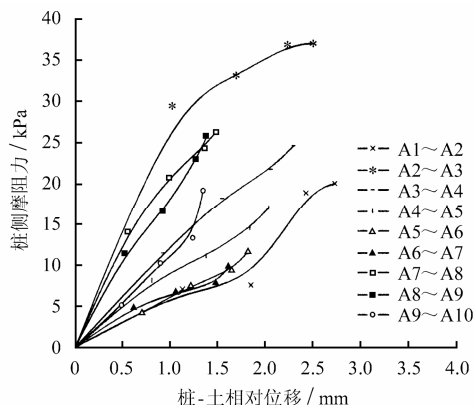


图6 桩侧摩阻力及相对位移关系曲线

Fig. 6 Relations of skin resistance to relative displacement

众所周知^[2],桩侧摩阻力的大小与桩-土之间的相对位移、刚度比、作用在桩侧表面的水平应力以及土的特性有关。从图5中可以看出,在工作荷载作用下,桩身上部首先发生弹性压缩,产生土对桩向上的侧摩阻力。随着荷载沿桩身向下传递,桩身侧阻自上而下逐步发挥,沿桩身呈非线性分布。淤泥质黏土层(0~16 m)桩侧摩阻力沿桩长呈上大下小抛物线形分布,淤泥质黏土层上半段桩侧摩阻力较大,到了下半段时桩侧摩阻力显著下降;在桩端附近的粉质黏土层和粉砂层,侧摩阻力又显著增加。从图6可以看出,随着桩-土相对位移增加,桩

侧摩阻力随之增大。即使在灌注桩中常常表现为加工软化型土层如淤泥质土等,在本次试验中也看不出有很明显的软化迹象。

表1给出的是《建筑桩基技术规范》(JGJ94-94)和《铁路桥涵地基和基础设计规范》(TB10002.5-99)中不同土层的侧摩阻力和实测值的比较。从表中可以看出,仅软土层上部侧摩阻力接近有关规范提供的极限侧摩阻力,中部的软土层和下面的粉质黏土与粉砂层的侧摩阻力都达不到两规范提供的极限侧摩阻力的一半。

表1 桩侧摩阻力对比
Table 1 Comparison of skin resistance

土样名称	桩侧摩阻力/kPa		
	JGJ94-94	TB10002.5-99	实测值
淤泥质黏土	20~28		10~37
黏性土	50~66	60~75	22~34
粉砂	42~85	35~80	17~27

5 有限单元法计算结果分析

对于静荷载作用下桩-土相互作用分析,可引入虚边界,使之处于离结构足够远的地方,根据圣维南原理^[9],虚边界的引入对体系的影响可忽略不计。土变成了有限域,对其进行模拟可同于对结构的模拟,能直接对由结构和土组成的整个体系进行离散分析。考虑到模拟土的真实性,土体深度设为2倍桩长,宽度为10倍桩的直径^[10]。为了降低自由度、减少计算时间,建模中利用对称性原理,桩和土体取1/4模型进行计算,在对称面上设立正对称的边界条件。通过选择合理的参数,实现桩土界面状态分线性的模拟;另外,计算时不考虑土体的排水固结和土体的应力历史,以及压桩引起的土体初始位移场和应力场。单桩计算模型如图7所示。

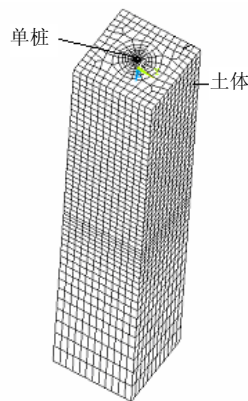


图7 桩-土相互作用计算模型

Fig. 7 Model of pile-soil interaction

通过有限单元法模拟试桩的试验情况, 计算出荷载-沉降曲线、轴力随深度的变化曲线和桩侧摩阻力分布曲线如图 3~5 所示。从图中可以看出, 实测和计算出的荷载-沉降曲线吻合较好。轴力随深度的变化规律和计算出的类似, 在软黏土层计算出的轴力比实测值略大, 但是在粉质黏土层和砂土层计算值和实测值相差不大。图 5 显示软黏土层中桩侧摩阻力计算值小于实测值, 但是在粉质黏土层和粉砂层桩侧摩阻力的实测值和计算值很接近。上面的分析表明, 虽然计算值和实测值有一定的差距, 但是曲线变化规律基本一致; 考虑到桩侧土参数确定时的误差及测试误差, 所以认为计算建立的桩土模型是合理的, 也较好地反映了荷载传递的规律。

6 结 论

(1) 在工作荷载作用下, 桩顶沉降基本上都是桩身的弹性压缩变形引起。基桩在竖向荷载作用下, 桩身轴力沿深度方向呈“倒三角形”分布, 桩身轴力在粉砂和粉质黏土层衰减速度比在淤泥质黏土层中要快。

(2) 在工作荷载作用下, 桩身侧摩阻力自上而下逐步发挥, 沿桩身呈非线性分布, 软黏土中桩侧摩阻力分布为抛物线形。仅软土层上部侧摩阻力接近有关规范提供的极限侧摩阻力, 中部的软土层和下面的粉质黏土与粉砂层的侧摩阻力都达不到有关规范提供的极限侧摩阻力的一半。

(3) 通过对桩顶沉降、轴力和侧摩阻力分布对比可以发现, 虽然计算值和实测值有一定的差别, 但是曲线变化趋势基本一致。

参 考 文 献

- [1] 陈福全, 简洪钰, 许万强, 等. 小截面静压预制桩的现场试验及其应用研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(2): 213—216.
CHEN Fu-quan, JIAN Hong-yu, XU Wan-qiang, et al. An in-situ test and analysis of static pressed precast piles with small section[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2002, 23(2): 213—216.
- [2] 施峰. PHC 管桩荷载传递的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 95—99.
SHI Feng. Experimental research on load transfer mechanism of pretensioned high strength spun concrete piles[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2004, 26(1): 95—99.
- [3] 邓友生, 孙宝俊, 邬忠强. 预应力混凝土管桩的应用研究及发展前景[J]. 建筑技术, 2003, 34(4): 263—266.
DENG You-sheng, SUN Bao-jun, WU Zhong-qiang. Research on the use of prestressed concrete tubular pile and prospects thereof[J]. **Architecture Technology**, 2003, 34(4): 263—266.
- [4] 冷伍明, 律文田, 谢维镒, 等. 基桩现场静动载试验技术研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(5): 619—622.
LENG Wu-ming, LÜ Wen-tian, XIE Wei-liu, et al. Study on measuring technology of static and dynamic load test pile in-situ[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2004, 26(5): 619—622.
- [5] 章根德. 土的本构模型及其工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 1995.
- [6] 黄昌利, 谢肖礼. 桩与土相互作用非线性有限元分析[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2002, 27(2): 175—178.
HUANG Chang-li, XIE Xiao-li. Nonlinear finite element analysis of the interactivity of stake and soil[J]. **Journal of Guangxi University (Natural Science Edition)**, 2002, 27(2): 175—178.
- [7] 桩基工程手册编写委员会. 桩基工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1995.
- [8] 朱向荣, 方鹏飞, 黄洪勉. 深厚软基超长桩工程性状试验研究[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(1): 76—79.
ZHU Xiang-rong, FANG Peng-fei, HUANG Hong-mian. Research on super-long pile in soft clay[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2003, 25(1): 76—79.
- [9] 徐芝纶. 弹性力学(第二版)(上册)[M]. 北京: 高等教育出版社, 1982.
- [10] 孙毅, 金涛, 陈甦. Ansys 在桩土共同作用分析中的应用[J]. 苏州城建环保学院学报, 2002, 15(4): 13—17.
SUN Yi, JIN Tao, CHEN Su. Application of ansys in the analysis of interaction of cap, pile and soil[J]. **Journal of Suzhou Institute of Urban Construction and Environmental Protection**, 2002, 15(4): 13—17.