

# 软土地区防洪堤工程中预制方桩和 PHC 管桩的对比试验研究

陈焰明<sup>1</sup>, 马燕燕<sup>2</sup>, 徐艳萍<sup>1</sup>, 陈炜昀<sup>3,4</sup>, 夏唐代<sup>3</sup>

(1. 浙江水专工程建设监理有限公司, 浙江 杭州 310051; 2. 浙江水利水电学院, 浙江 杭州 310018 浙江 杭州 310058;  
3. 浙江大学软弱土与环境土工教育部重点实验室, 4. 南京工业大学交通学院, 江苏 南京 210009; )

**摘要:** 通过对浙江温州软土地区防洪堤工程中的同一场地 PHC 管桩和预制方桩的现场静载对比试验, 比较了两类桩型的预制桩的荷载-沉降曲线、桩身轴力分布情况、桩侧摩阻力分布等特性的异同。试验结果显示, 当桩侧表面积相近且桩长相同时, 软土地区中的预制方桩和 PHC 管桩在工作荷载作用下的桩身轴力、桩侧摩阻力、桩端阻力虽然表现规律较类似, 但是其发挥的程度并不同。

**关键词:** PHC 管桩; 预制方桩; 桩侧阻力; 桩端阻力; 对比分析

中图分类号: TU473.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2013)S2-0986-04

作者简介: 陈焰明(1969-), 安徽安庆人, 高级工程师, 温州沿江防洪堤工程总监。E-mail: 326697060@qq.com。

## Comparative analysis of precast square piles and PHC piles for flood protection work in soft soil areas

CHEN Yan-ming<sup>1</sup>, MA Yan-yan<sup>2</sup>, XU Yan-ping<sup>1</sup>, CHEN Wei-yun<sup>3,4</sup>, XIA Tang-dai<sup>2</sup>

(1. Zhejiang College of Water Engineering Construction Supervision Company LTD, Hangzhou 310051, China; 2. Zhejiang Water Conservancy and Hydropower College, Hangzhou 310018, China, China; 3. MOE Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058; 4. College of Transportation Science & Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China)

**Abstract:** Based on the static load tests on pretensioned high-strength concrete piles (PHC pipe) and precast square piles in the same test field of soft soil area of Wenzhou flood dike project in Zhejiang Province, the load-settlement curves, shaft load distribution curves and behaviors of skin resistance of these two types of piles are compared. The experimental results show that, for the PHC pipes and precast square piles with the same lateral area and pile length in soft areas, the behaviors of skin resistance and base resistance are different, although their axial forces, lateral friction forces and base resistances appear closely similar.

**Key words:** PHC pipe pile; precast square pile; skin resistance; base resistance; comparative analysis

## 0 引言

预应力高强混凝土管桩, 简称 PHC 管桩, 是最常见的桩型之一, 由于其单桩承载力高、施工速度快、造价低、桩身质量容易保证等优点, 目前在桩基工程被大量使用和推广。对于传统的钢筋混凝土预制方桩而言, 与同面积(均为实心)的圆桩相比, 其侧摩阻力可提高 13%<sup>[1]</sup>。目前对 PHC 管桩的荷载传递、受力机理等特性的研究已经受到越来越多的重视<sup>[2-5]</sup>。然而, 国内外对软土地区的预制方桩和 PHC 管桩的荷载传递机理的对比研究很少。本文通过对温州沿江防洪堤工程中的预制方桩与 PHC 管桩试桩的静载试验, 对

比分析了预制方桩与 PHC 管桩在轴向荷载作用下荷载传递规律以及桩身的受力特性。

## 1 场地地质和试桩概况

### 1.1 场地地质

温州市沿江防洪堤工程某工程, 位于瓯江南岸, 是温州城市防洪工程的重要组成部分, 堤线全长 2162 m, 防洪堤标准为 100 年一遇。本次试桩试验分为 2 组, 每组包括 2 根预制方桩和 2 根 PHC 管桩。第一组试桩位于地质勘探孔 Z23 孔附近(II 标段), 第二组

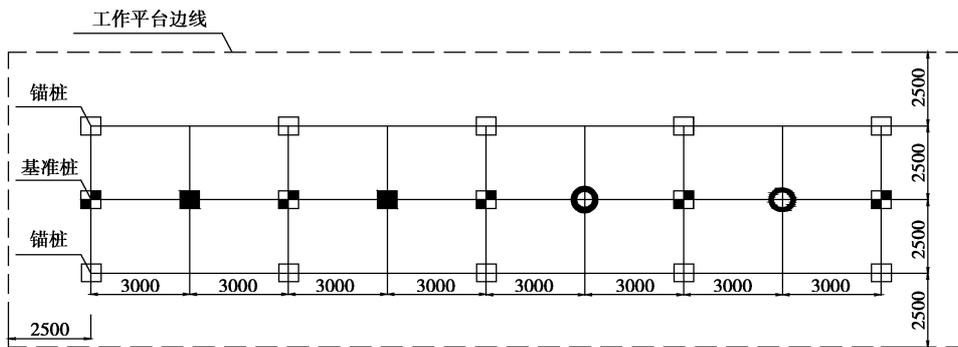


图 1 试桩试验布置图 (单位: mm)

Fig. 1 Position of test piles (units: mm)

试桩位于地质勘探孔 Z12 孔附近 (III 标段)。本文以第一组试桩为例进行讨论分析。试桩处的工程地质概况如表 1 所示。

表 1 场地各土层的物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of soil layers

土层编号	土层名称	第一组试桩(Z23)		地基承载力特征值 $f_{ak}/kPa$	桩周土摩阻力特征值 $q_s/kPa$
		层顶高程/m	层厚/m		
1	淤泥质粉质黏土	0.0	0.0	70	10
2	细砂夹淤泥	1.40	12.55	90	25
3	淤泥夹细砂	-11.15	5.10	60	16
4	淤泥	-16.25	11.80	50	12
5	淤泥质黏土	-28.05	6.60	70	14
6	卵石	-34.65	—	400	90

1.2 试桩概况

试桩的布置图如图 1 所示, 在 4 根试桩中, 2 根为混凝土预制方桩, 截面大小为 600 mm×600 mm, 混凝土强度等级为 C50, 桩长为 43 m, 编号分别为 S1 桩和 S2 桩。另外 2 根为 PHC 管桩, 外径为 800 mm, 混凝土强度等级为 C80, 桩长为 41 m, 分别编号为 S3 桩和 S4 桩, 4 根试桩的入土深度均为 35 m。本次垂直静荷载试验的最大加载荷载不小于 7500 kN。

1.3 静载试验

根据桩身对应各个典型底层交界面安装传感器, 每个断面安装 4 只传感器, 见图 2, 每只传感器绑焊于主筋上。

试验的反力装置采用锚桩横梁反力法。反力系统通过千斤顶逐级加载至桩的工作荷载 7500 kN。试验方法采用慢速维持荷载法, 荷载分级施加。本次试验分 10 级加载, 每级加荷载 750 kN, 每级卸荷载为 1500 kN。每级加载后, 测读时间为 0, 5, 15 和 30 min, 以后每隔 30 min 测读一次, 直到桩顶 1 h 内对应的沉降值小于 0.1 mm, 加载下级荷载。卸载时, 每级荷载维持 1 h, 按第 15, 30, 60 min 测读一次, 全部卸载后, 间隔 3 h 测读最后一次, 得到残余沉降值。

1.4 桩身钢筋混凝土应力 - 应变关系

根据试桩在实测各级荷载作用下标定截面上的轴向应变和对应的应力计算值, 可以得到各试桩标定截面上混凝土的轴向应力 - 应变的近似拟合关系<sup>[2]</sup>:

$$\sigma = a_0 + a_1\varepsilon + a_1\varepsilon^2 \quad (1)$$

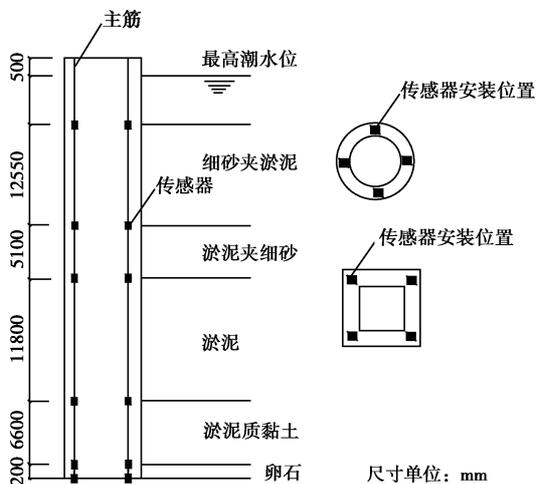


图 2 传感器布置图

Fig. 2 Layout of sensors

1.5 桩身轴力计算

根据试验中预埋钢筋传感器的实测应变数据, 计算各截面的轴力值大小为

$$Q_{ij} = A\sigma(\varepsilon_{ij}) \quad (2)$$

式中,  $Q_{ij}$  为第  $i$  截面在第  $j$  级荷载下的轴力;  $\varepsilon_{ij}$  为第  $i$  截面在第  $j$  级荷载下的轴向应变;  $A$  为桩身平均横截面积。

1.6 平均桩侧阻力及端阻力

各土层的平均侧阻力可以按下式计算:

$$q_{si} = (Q_i - Q_{i+1}) / F_i \quad (3)$$

式中,  $F_i$  为第  $i$  桩节的侧表面积值。

桩端阻力按下式计算:

$$q_p = Q_n / A_p \quad (4)$$

式中,  $Q_n$  为桩端轴向力 (kN),  $A_p$  为桩端面积 ( $m^2$ )。

2 试验结果分析

2.1 荷载 - 沉降曲线

四根试桩的荷载-沉降 ( $Q-s$ ) 曲线, 是桩受力和荷载传递特征的宏观反映。4 根试桩竖向静载荷试验  $Q-s$  曲线如图 3 所示。受工程桩条件的限制, 本次试验未能进行到桩端土体的极限状态。从图 3 可以看出, 这 4 根的  $Q-s$  曲线形状相似, 呈缓变型, 当最终加载到 7500 kN 时, 未出现明显向下的拐点, 说明并没有达到极限状态。可以看出 S1、S2 桩的最终沉降量 (分别为 34.9 和 32.8 mm) 均大于 S3、S4 试桩的最终沉降量值 (分别为 28.6 和 26.6 mm)。

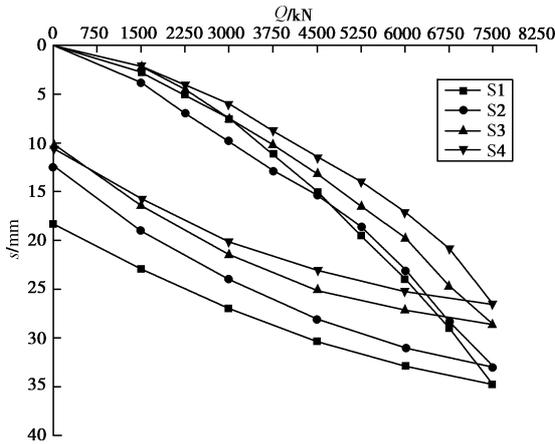


图 3 试桩的  $Q-s$  曲线

Fig. 3  $Q-s$  curves of test piles

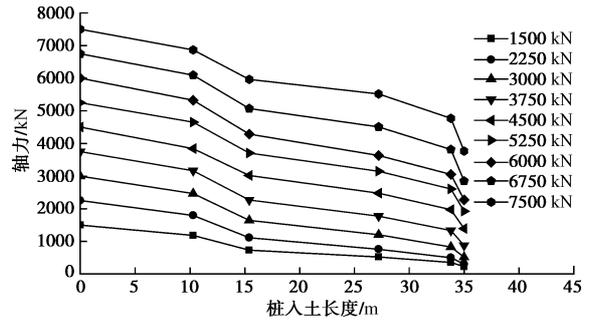
### 2.2 轴力分布

试桩的实测轴力分布图如图 4 所示, 可见预制方桩与 PHC 管桩的轴力传递速度分布情况相似。可以看到: 桩身 0~15 m 范围内, 轴力图中曲线的斜率较大; 15~34 m 范围内, 轴力图中曲线的斜率较小。这主要是由于 0~15 m 范围内的桩周土为淤泥夹细砂, 桩侧摩阻力较高; 而 15~34 m 范围的桩周土主要是淤泥质黏土, 桩侧摩阻力较低。再往下土层为卵石, 其强度比上部土层的强度大很多, 故桩身轴力变化又增大, 斜率又提高。在 7500 kN 工作荷载作用下, 对于方桩 S1 和 PHC 管桩 S3 而言, 桩端荷载分别为 3765 kN 和 3678 kN, 分别占桩顶荷载的 50.2%和 49.0%; 淤泥夹细砂段分别承担了 899 kN 和 867 kN, 分别占桩顶荷载的 12.0%和 11.6%。卵石段分别承担了 1008 kN 和 757 kN, 分别占桩顶荷载的 13.4%和 10.1%。可以看出其受力特性都为端承摩擦桩, 以端承力为辅。

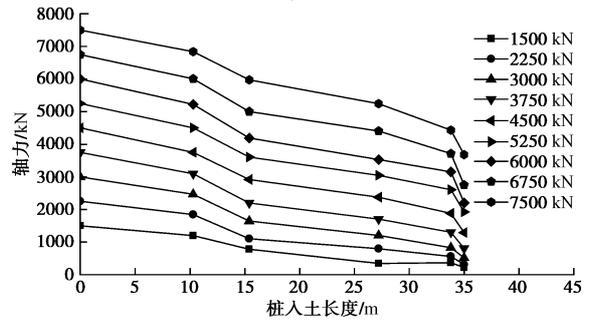
### 2.3 桩侧摩阻力分布

试桩在各级荷载作用下桩周土摩阻力沿桩身分布如图 5 所示。由图 5 可以看出, 桩侧摩阻力的发挥实际上是一个异步的过程, 上部土层的侧摩阻力要先于下部土层发挥作用, 随着荷载的增加下部土层的侧摩阻力才逐渐发挥作用。对于极限摩阻力较小的土层, 其摩阻力易发挥到极限, 如上部土层。当超过了一定工作荷载后, 其上部土层的摩阻力已经趋于稳定并达到峰值, 而下部土层的摩阻力还未得到完全发挥。对比图 5 的分布图可以发现, 两组试桩的侧摩阻力发挥

程度相近, 图 5 显示 PHC 管桩的侧摩阻力要稍大一些。



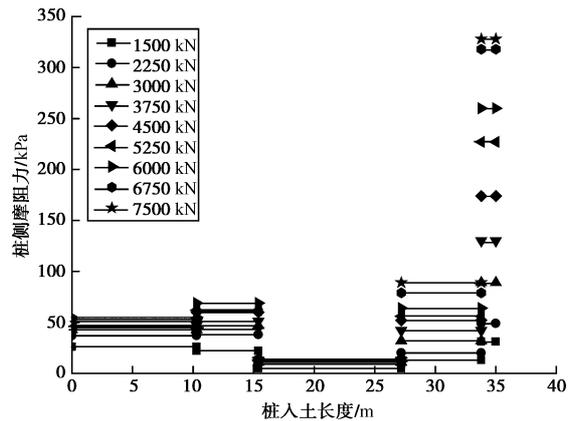
(a) 方桩(S1)桩身轴力分布图



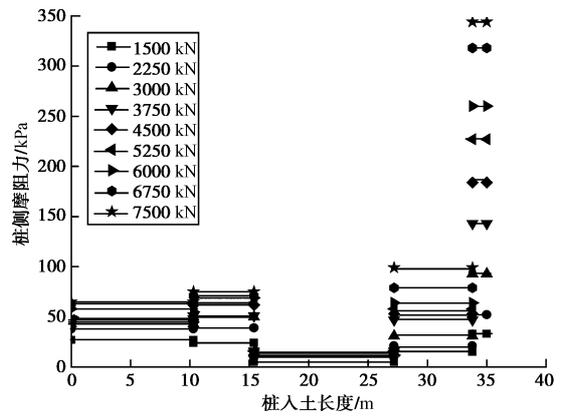
(b) PHC方桩(S3)桩身轴力分布图

图 4 试桩桩身轴力分布图

Fig. 4 Distribution curves of axial force of test piles



(a) 方桩(S1)桩侧摩阻力分布图



(b) PHC方桩(S3)桩身轴力分布图

图 5 试桩桩侧摩阻力分布

Fig. 5 Distribution curves of lateral friction force of test piles

当荷载增加到 4500 kN 时, 上部淤泥层的摩阻力反而有所减小, 这主要是上部桩土发生了相对滑移。虽然桩身下部的轴力较小, 桩土相对位移很小, 但是产生的侧摩阻力却较大。由此可见, 侧摩阻力的大小与桩

土之间的相对位移、刚度比等特性有关。

### 3 结 论

本文通过对温州地区沿江防洪堤工程某工程研究埋有钢筋应力计的预制方桩和 PHC 管桩的静载荷试验, 研究了两组试桩的承载力机理, 试验采用的管桩和方桩周长接近, 桩长基本相同, 地质条件基本相同, 通过对比分析得出如下结论:

(1) 虽然两组试桩的试验得到的  $Q-s$  曲线的形状类似, 均呈缓变型, 但是还是存在一定的差别。可以看出当承受较大的桩端荷载时, 预制方桩产生了较大的桩顶位移。

(2) 预制方桩和 PHC 管桩在轴力分布上也有所差异: 在 7500 kN 工作荷载作用下, 对于方桩 S1 和 PHC 管桩 S3 而言, 桩端荷载分别为 3765 kN 和 3678 kN, 分别占桩顶荷载的 50.2% 和 49.0%; 淤泥夹细砂段分别承担了 899 kN 和 867 kN, 分别占桩顶荷载的 12.0% 和 11.6%。卵石段分别承担了 1008 kN 和 757 kN, 分别占桩顶荷载的 13.4% 和 10.1%。可以看出试桩受力特性都为端承摩擦桩, 但以桩侧摩阻力为主。

(3) 预制方桩和 PHC 管桩的桩侧摩阻力的发挥规律相似, 上部土层的摩阻力先于下部发挥作用, 随着荷载增加, 下部土层的摩阻力才逐渐发挥出来, 其发挥是个异步的过程, 且二者各土层的摩阻力随着桩土相对位移的增加而增加。由于圆形截面桩对周围土的挤土效应较方形截面桩好, 故 PHC 管桩的桩侧摩阻发挥较大。

#### 参考文献:

[1] 刘芙蓉, 贾 燎, 李 彬. 预应力混凝土空心方桩焊接接

头抗弯试验研究[J]. 武汉理工大学学报, 2008, 30(5): 105 - 108. (LIU Fu-rong, JIA Liao, LI Cheng. The test study on welding joint flexural bearing capacity of prestressed concrete hollow square pile[J]. Journal of Wuhan University of technology, 2008, 30(5): 105 - 108. (in Chinese))

[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. (in Chinese))

[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. (in Chinese))

[4] 律文田, 王永和, 冷伍明. PHC 管桩荷载传递的试验研究和数值分析 [J]. 岩土力学, 2006, 27(3): 466 - 500. (LÜ Wen-tian, WANG Yong-he, et al. Testing and numerical analysis of load transfer mechanism of PHC pile[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(3): 466 - 500. (in Chinese))

[5] 蔡 健, 周万清, 林奕禧, 等. 深厚软土超长预应力高强混凝土管桩轴向受力性状的试验研究[J]. 土木工程学报, 2006, 39(10): 466 - 500. (CAI Jian, ZHOU Wan-qing, LIN Yi-xi, et al. Experimental study on the axial compressive behavior of super-long PHC pipe piles in deep soft soils[J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(10): 466 - 500. (in Chinese))