

文章编号: 1000-7598-(2008)11-3059-07

# PHC管桩和预制方桩受力性状试验对比分析

张忠苗, 喻君, 张广兴, 王立忠

(浙江大学 软弱土与环境土工教育部重点实验室, 杭州 310027)

**摘要:** 通过在同一场地的预应力高强混凝土管桩(PHC桩)和预制方桩中埋设钢筋应力计的静载对比试验, 比较了两类桩的荷载-沉降曲线、桩身轴力分布情况、桩侧摩阻力和桩端摩阻力发挥性状的异同, 研究了PHC管桩的荷载传递机制, 发现其侧阻和端阻的发挥规律与预制方桩相同, 但在PHC管桩和方桩侧表面积相近的条件下, 在最大试验荷载作用时, 两者的侧阻和端阻发挥程度不同, PHC管桩平均单位侧阻比预制方桩低8.1%, 而端阻比方桩高24%以上。

**关键词:** PHC(预应力高强混凝土)管桩; 预制方桩; 荷载传递规律; 桩侧阻力; 桩端阻力

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

## Contrastive experimental analysis of bearing behaviors of PHC pile and precast square piles

ZHANG Zhong-miao, YU Jun, ZHANG Guang-xing, WANG Li-zhong

(Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering, Ministry of Education, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** Based on the static loading tests on pretensioned high-strength concrete (PHC pile) piles and precast square piles with strain gauges mounted in them which are in the same field, the load transfer mechanism of PHC pipe piles is studied through comparing the load-settlement curves, shaft load distribution, the behaviors of skin resistance and base resistance of two types of piles. It reveals that the behaviors of skin resistance and base resistance of PHC pipe piles is the same as those of precast square piles, however, with nearly the same side surface area, under the maximal load, the development of skin resistance and base resistance of them is different—the average skin resistance of PHC pile is 8.1 % less than the one of the precast square piles while the base resistance of PHC pipe piles is at least 24 % more than that of square piles.

**Key words:** PHC pipe piles; precast square piles; load transfer mechanism; skin resistance; base resistance

## 1 引言

预应力高强混凝土管桩(以下简称PHC管桩)具有施工速度快、价格低、承载力高、质量稳定、养护时间短、施工方便等诸多优点, 在东南沿海地区得到了广泛使用。研究桩的荷载传递机制, 对合理进行桩基的设计、施工和试验都具有重要意义。目前国内外对一般的预制桩(混凝土方桩)和PHC管桩的对比研究较少, 本文通过某电厂2组埋有钢筋应力计的试桩(一组为预制方桩, 另一组为PHC管桩)的静载荷试验, 对比研究PHC管桩与预制方桩在轴向荷载作用下荷载传递规律和受力特性的异同、桩侧摩阻力与桩端阻力共同承担外荷载的相互关系以及它们的发挥过程和分布规律。

## 2 现场试验

### 2.1 试验概况

本工程是某电厂的4期扩建工程, 采用锤击沉桩法施工。结合3期工程所得经验, 竖向静载荷试验试桩选用3种类型, 分为3组: 第1组为450 mm×450 mm混凝土预制短桩, 桩入土深度为22.5 m, 试桩编号为S<sub>1-1</sub>、S<sub>1-2</sub>和S<sub>1-3</sub>。第2组为450 mm×450 mm混凝土预制长桩, 桩入土深度为39 m, 试桩编号为S<sub>2-1</sub>、S<sub>2-2</sub>和S<sub>2-3</sub>。第3组为φ600 mm(壁厚110 mm)PHC管桩, 桩入土深度分别为39 m和34.5 m, 桩身混凝土强度等级为C80, 试桩编号为S<sub>3-1</sub>、S<sub>3-2</sub>和S<sub>3-3</sub>, 见图1(为进行比较, 本文中短桩S<sub>1-1</sub>、S<sub>1-2</sub>、S<sub>1-3</sub>未加讨论)。为了解PHC管桩与

收稿日期: 2007-03-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No.50478080)。

作者简介: 张忠苗, 男, 1961年生, 教授, 博士, 主要从事基础工程与桩基础的研究、教学、检测工作。E-mail: zjuzzm@163.com

预制方桩在轴向荷载作用下荷载传递规律和受力特性的异同及各分层土层的侧摩阻力以及桩端阻力,在试桩 S<sub>2-1</sub>、S<sub>2-2</sub>、S<sub>3-1</sub>、S<sub>3-2</sub> 内分别埋设了钢筋应力计。每根桩沿深度方向上布置 12 个断面,其中方桩每个断面沿主筋对称埋设 2 个钢筋应力计,PHC 管桩每个断面均匀埋设 3 个钢筋应力计。由于 PHC 管桩的成桩方法,不能在制作桩时将应力计预先埋设在桩内<sup>[1]</sup>,根据已有方法<sup>[2-3]</sup>,管桩管芯内增设,直径为 350 mm 左右钢筋笼,然后将钢筋计绑扎在钢筋笼上,放置到预定的桩身和土层分界面。为使钢筋计能与管桩同步工作,变形协调,在管桩管芯内填充强度等级为 C60 的高强混凝土,并用振捣器将其振捣密实。注意使桩顶桩端保持开口,否则就变成实心桩,与管桩作用机理不符。通

过估算单桩极限承载力,考虑桩身混凝土强度控制的竖向极限承载力,最终确定试验最大荷载为 6 003 kN。竖向静载荷试验的方法、步骤和要求等按照《建筑桩基技术规范》<sup>[4]</sup>中的有关规定进行。

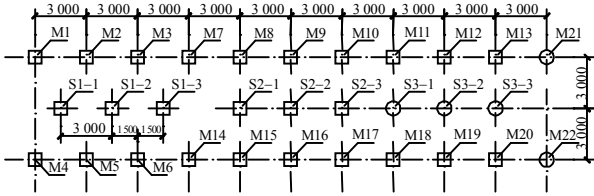


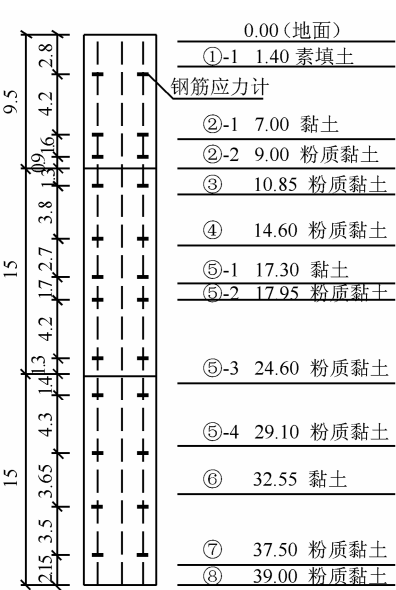
图 1 试桩桩位布置图 (单位:mm)  
Fig.1 Test piles position (units: mm)

2.2 工程地质情况

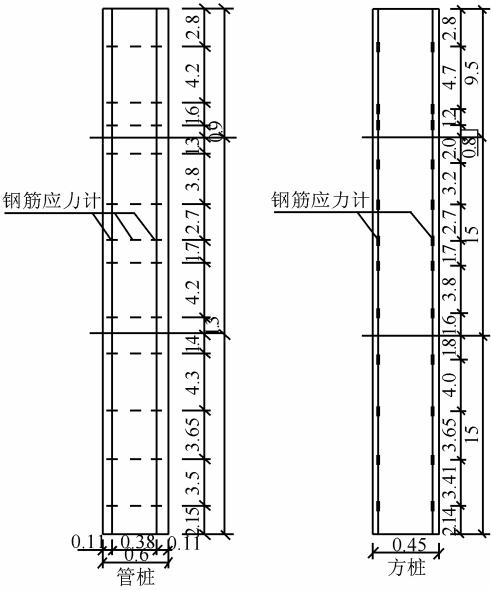
各土层的物理力学性质参见表 1,地质剖面图见图 2(a)。

表 1 典型土层的物理力学性质指标  
Table 1 Indices of physico-mechanical properties of typical soil layers

| 土层  | 土层名称    | 土层厚度 /m   | 含水率 /% | 重度 /(kN·m <sup>-3</sup> ) | I <sub>p</sub> | I <sub>L</sub> | E <sub>s</sub> /MPa | q <sub>sk</sub> /kPa | q <sub>pk</sub> /kPa |
|-----|---------|-----------|--------|---------------------------|----------------|----------------|---------------------|----------------------|----------------------|
| ①-1 | 素填土     | 0~5.0     | 34.8   | 18.6                      | 17.9           | 0.58           |                     | 27                   |                      |
| ①-3 | 淤泥质粉质黏土 | 0~6.3     | 41.4   | 17.7                      | 16.0           | 1.45           |                     | 14                   |                      |
| ②-1 | 黏土      | 0~5.65    | 26.6   | 19.6                      | 17.2           | 0.38           |                     | 74                   |                      |
| ②-2 | 粉质黏土    | 2.0~6.5   | 30.7   | 19.1                      | 15.0           | 0.61           |                     | 60                   |                      |
| ③   | 粉质黏土    | 0.6~4.95  | 31.9   | 19.2                      | 10.5           | 1.24           |                     | 30                   |                      |
| ④   | 粉质黏土    | 0.7~4.6   | 33.2   | 18.9                      | 13.2           | 1.12           |                     | 25                   |                      |
| ④-1 | 粉土      | 0~1.55    | 29.7   | 19.4                      | 8.9            |                |                     | 54                   |                      |
| ④-2 | 淤泥质粉质黏土 | 0.8~11.9  | 38.9   | 18.4                      | 11.6           | 1.60           |                     | 25                   |                      |
| ⑤-1 | 黏土      | 1.15~9.75 | 23.9   | 20.0                      | 18.5           | 0.20           | 17.26               | 90                   | 4 500                |
| ⑤-2 | 粉质黏土    | 0.5~4.75  | 27.5   | 19.7                      | 13.2           | 0.71           | 12.90               | 65                   |                      |
| ⑤-3 | 粉质黏土    | 1.6~8.5   | 29.8   | 19.3                      | 15.5           | 0.53           | 11.17               | 60                   | 2 400                |
| ⑤-4 | 粉质黏土    | 0.6~6.35  | 32.3   | 18.9                      | 13.2           | 1.02           | 13.67               | 35                   | 1 800                |
| ⑥   | 黏土      | 2.9~6.3   | 42.9   | 17.9                      | 23.6           | 0.65           | 8.14                | 55                   |                      |
| ⑦   | 粉质黏土    | 2.2~7.05  | 28.3   | 19.8                      | 11.9           | 0.83           | 15.15               | 45                   |                      |
| ⑧   | 粉质黏土    | 11.0~12.0 | 26.5   | 19.8                      | 15.9           | 0.33           | 24.77               | 75                   | 4 000                |



(a) 地质剖面图



(b) 钢筋应力计埋设位置图

图 2 地质剖面图和钢筋应力计的埋设位置图 (单位: m)  
Fig.2 Geologic section and strain gauge positions (unit: m)

## 2.3 桩位布置及试桩参数

试桩的桩位布置见图 1, 钢筋应力计的埋设位置见图 2 (b), 试桩参数及试验结果见表 2, 其中试桩 S<sub>2-1</sub> 和 S<sub>3-1</sub> 的钢筋计的埋设深度完全相同。从表 2 可以看出, PHC 管桩的桩身周长比预制方桩的大 4.67 %, 可以认为桩长相同条件下两种类型的桩外侧面积近似相等, 所以相同深度断面间的轴力差就能反映两类桩桩身侧摩阻力的大小关系。PHC 管桩的净截面积比方桩小 16.4 %, 而 C80 的初始弹性模量比 C40 大 16.9 %, 计算可得 PHC 管桩的初始弹性抗压刚度与方桩几乎相等。当应力较小时 ( $\sigma_c \leq 0.3f_c$ ), 混凝土可视为处于弹性阶段, 变形模量一直等于初始弹性模量; 当应力较大时, 混凝土处于弹塑性阶段, 变形模量随着应力增加而减小<sup>[5]</sup>。C80 的抗压强度比 C40 大 87.96 %, 随着桩顶荷载的增加, 方桩桩身混凝土比 PHC 管桩先进入弹塑性阶段, 当方桩在加载到 3726 kN 而 PHC 管桩加载到 4347 kN 时, 二者上半段桩身都进入弹塑性阶段, 因此方桩桩身变形模量比管桩先减小, 导致其桩身抗压刚度比 PHC 管桩先减小。

表 2 各试桩有关参数和试验结果  
Table 2 Parameters and results of test piles

| 参数                     | 试桩编号             |                  |                  |                  |                  |                  |
|------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
|                        | S <sub>2-1</sub> | S <sub>2-2</sub> | S <sub>2-3</sub> | S <sub>3-1</sub> | S <sub>3-2</sub> | S <sub>3-3</sub> |
| 桩入土深度 /m               | 39               | 39               | 39               | 39               | 34.5             | 39               |
| 桩外径或边长 /mm             | 450              | 450              | 450              | 600              | 600              | 600              |
| 桩身外侧周长 /m              | 1.8              | 1.8              | 1.8              | 1.884            | 1.884            | 1.884            |
| 桩身净截面积 /m <sup>2</sup> | 0.202 5          | 0.202 5          | 0.202 5          | 0.169 2          | 0.169 2          | 0.169 2          |
| 桩身混凝土强度等级              | C40              | C40              | C40              | C80              | C80              | C80              |
| 桩身极限承载力 /kN            | 5 427            | 5 427            | 5 427            | 5 350            | 5 350            | 5 350            |
| 试验最大荷载 /kN             | 6 003            | 6 003            | 6 003            | 6 003            | 6 003            | 6 003            |
| 桩顶最大沉降 /mm             | 20.01            | 19.87            | 20.06            | 14.80            | 17.13            | 15.61            |
| 桩顶残余沉降 /mm             | 16.73            | 15.42            | 16.04            | 10.47            | 8.28             | 9.25             |
| 桩持力层号                  | 8                | 8                | 8                | 8                | 7                | 8                |

## 3 试验结果分析

### 3.1 试验数据处理

#### (1) 桩身混凝土应力-应变关系<sup>[6]</sup>

由实测各级荷载下标定面的轴向应变值和对应的应力计算值, 可得各试桩标定面混凝土的轴向应

力与应变的近似拟合关系:

$$\sigma_i = a\varepsilon_i^2 + b\varepsilon_i + c \quad (1)$$

式中:  $a$ 、 $b$ 、 $c$  为待定系数, 通过标定断面确定;  $\sigma_i$  为第  $i$  断面的应力 (kPa)。

#### (2) 桩身轴力计算

根据钢筋应力计的实测数据可计算得到某一级荷载作用下  $i$  断面钢筋轴力<sup>[7]</sup>:

$$P_{si} = K(F_i^2 - F_0^2) + B \quad (2)$$

式中:  $K$  为标定系数 (kN/Hz<sup>2</sup>);  $F_i$  为某一级荷载作用  $i$  断面钢弦振动频率 (Hz);  $F_0$  为钢弦初始振动频率 (Hz);  $B$  为计算修正值 (单位 kN, 由仪器标定书提供)。得到  $i$  断面钢筋轴力后该断面钢筋应变为

$$\varepsilon_i = \frac{P_{si}}{E_s A_s} \quad (3)$$

式中:  $A_s$  为钢筋面积 (m<sup>2</sup>);  $E_s$  为钢筋弹性模量 (kPa)。

钢筋和混凝土浇灌在一起, 假定二者变形一致, 即任一断面钢筋和混凝土具有相同的应变值。在桩身混凝土应力为

$$\sigma_{ci} = E_c \varepsilon_i \quad (4)$$

式中:  $E_c$  为混凝土的弹性模量。桩身轴力为

$$Q_i = A_{ci} \sigma_{ci} + P_{si} \quad (5)$$

式中:  $A_{ci}$  为桩身截面混凝土面积。

#### (3) 桩侧阻力的计算

各分层土体的桩侧平均摩阻力为

$$q_{sik} = \frac{Q_i - Q_{i+1}}{A_i} \quad (6)$$

式中:  $Q_i$ 、 $Q_{i+1}$  为第  $i$  和  $i+1$  断面轴力;  $A_i$  为第  $i$  分层桩侧表面积。

#### (4) 桩端承载力

桩端承载力为

$$q_{pk} = Q_n / A_0 \quad (7)$$

式中:  $Q_n$  为桩端轴向力;  $A_0$  为桩端面积。

#### (5) 桩土相对位移的计算

第  $i$  段的桩土相对位移量为

$$\delta_i = S - \sum_{j=1}^i \frac{L_j}{2} (\varepsilon_j + \varepsilon_{j+1}) \quad (8)$$

式中:  $S$  为桩顶位移实测值;  $L_i$  为第  $i$  和第  $i+1$  断

面之间的桩长。

(6) 单桩承载力估算

根据地质报告提供的参数，采用传统静力经验公式估算：

$$Q_u = \pi d \sum L_i q_{sik} + \pi d^2 q_{pk} / 4 \quad (9)$$

式中： $d$  为桩径。

3.2 静载  $Q$ - $S$  曲线对比

本次试验未能达到桩端土体的极限状态，但已使试桩轴向应力达到桩身混凝土材料极限强度的标准值。桩的  $Q$ - $S$  曲线是桩受力和荷载传递特征的宏观反映，试验曲线见图 3。从图中可以看出，6 根桩的  $Q$ - $S$  曲线形状相似，均呈缓变型，当加载到 6 003 kN 时，未出现明显的向下弯折的拐点，也未出现第 2 拐点，没有达到极限状态。单桩的桩顶沉降量主要包括桩身压缩量和桩端沉降量，按弹性方法计算，方桩  $S_{2-1}$  的压缩量为 19.36 mm，基本上等于实测桩顶沉降量 20.01 mm。而 PHC 管桩的弹性压缩量为 13.50 mm，桩顶沉降为 15.20 mm，这说明由于承受较大桩端荷载，PHC 管桩出现相对较大的桩端位移，但由于其桩身抗压刚度较大，桩身压缩量小，故最终沉降量还是小于方桩。方桩  $S_{2-1}$  和  $S_{2-3}$  的  $Q$ - $S$  曲线几乎重合，说明桩的受力性状和荷载传递规律较相近；管桩  $S_{3-1}$  和  $S_{3-3}$  的  $Q$ - $S$  曲线也较接近，承受较大荷载时，桩长较长的  $S_{3-1}$  和  $S_{3-3}$  比桩长较短的  $S_{3-2}$  沉降小，是因为  $S_{3-1}$  和  $S_{3-3}$  的持力层的力学性能比  $S_{3-2}$  的好，桩端沉降小，从加载至 3 105 kN 开始到完全卸载，管桩的沉降一直比方桩的小，说明在此地质条件下，PHC 管桩在控制沉降上比方桩更有效。参照地质参数，按静力经验公式 (9) 和按桩身强度控制的极限承载力计算值<sup>[8]</sup>与实测极限承载力值的对比见表 3。管桩实测值比按静力经验公式的计算值至少高 18.53 %，方桩至少高 31.39 %。

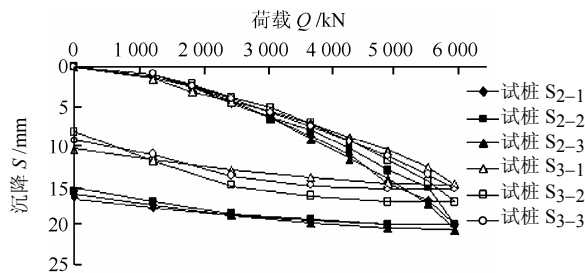


图3 试桩  $Q$ - $S$  曲线  
Fig.3  $Q$ - $S$  curves of test piles

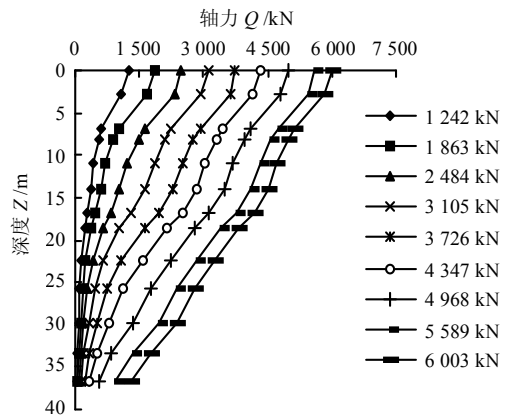
表3 试桩理论和实测极限承载力对比  
Table 3 The contrast between the theoretic and practical bearing capability of test piles

| 桩型           | 理论极限承载力 /kN |          | 实测极限承载力 /kN   |
|--------------|-------------|----------|---------------|
|              | 式 (9) 计算    | 按桩身强度计算  |               |
| 管桩 $S_{3-1}$ | 5 064.57    | 6 122.9  | $\geq 6\ 003$ |
| 方桩 $S_{2-1}$ | 4 568.76    | 5 467.50 | $\geq 6\ 003$ |

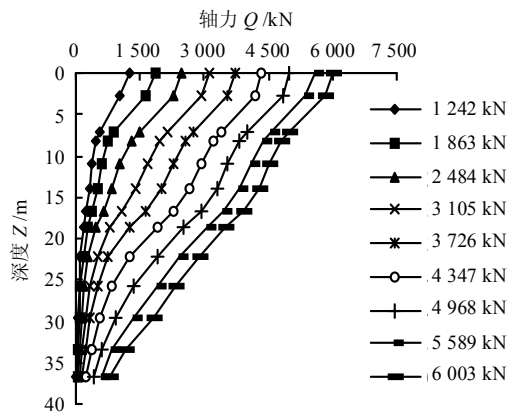
注：管桩按规范法计算时，考虑土塞效应，假定桩端完全封闭。

3.3 静载轴力对比

各试桩实测轴力分布如图 4 所示。从图中可以看出，桩身在 0.0~15.0 m 内轴力的传递较桩身下半段稍慢，PHC 管桩和预制方桩的轴力传递速度相近，图 4 (a) 和图 4 (b) 中的斜率大小相近；桩身在 15.0~37.0 m 范围内，桩身轴力传递较快，轴力传递曲线的斜率较大，同时 PHC 管桩的桩身轴力衰减速度比预制方桩的慢，图 4 (a) 中的斜率比图 4 (b) 中的斜率小。这主要是因为 0.0~15.0 m 范围内的土层 (土层①-1 到土层④-2) 的侧摩阻力较低，PHC 管桩和方桩的侧摩阻力发挥程度相当，但该范围内桩身轴力都很大，桩身压缩量大，桩土相对位移大，能充分发挥侧摩阻力，而在 15.0~



(a) PHC 管桩 ( $S_{3-1}$ ) 桩身轴力图



(b) 方桩 ( $S_{2-1}$ ) 桩身轴力图

图4 试桩桩身轴力分布图  
Fig.4 Axial force distribution curves of test piles

37.0 m 范围内 (土层⑤-1 到土层⑧) 的黏土和粉质黏土的侧摩阻力较高, 在该范围内 PHC 管桩的侧摩阻力没有方桩发挥得充分, 这也直接导致 PHC 管桩的端阻比在整个加载过程中一直比方桩大, 见图 5。在最大试验荷载 6 003 kN 作用下, 预制方桩  $S_{2-1}$  和  $S_{2-2}$  的桩端轴力 (端承力) 分别为 592 kN 和 548 kN, 占总荷载的 9 %~10 %; PHC 管桩  $S_{3-1}$  和  $S_{3-2}$  的桩端轴力分别为 1 030.6 kN 和 1 212 kN, 占总荷载的 17 %和 20 %。这是因为方桩各截面的桩土相对位移较大, 更为充分地发挥了桩侧摩阻力。而 PHC 管桩桩身抗压刚度大, 压缩量小, 各截面的桩土相对位移没有方桩大, 尤其是下半段, 所以其侧摩阻力的发挥程度较小, 导致出现较大桩端位移而获得较大桩端力。文献[2]报道, 静载试验中 PHC 管桩桩端承载力仅占 10 %左右, 表明 PHC 管桩的工作机制还与桩长、桩径、土质条件和加载水平等因素密切相关。最大试验荷载 6 003 kN 作用下的各试桩的桩身轴力对比见表 4。

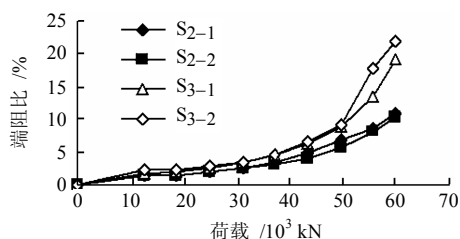


图 5 各试桩端阻比变化曲线  
Fig.5 Curves of share of base resistance of test piles

表 4 在 6 003 kN 荷载作用下桩身轴力对比  
Table 4 The contrast between axial loads of two types of piles under 6 003 kN

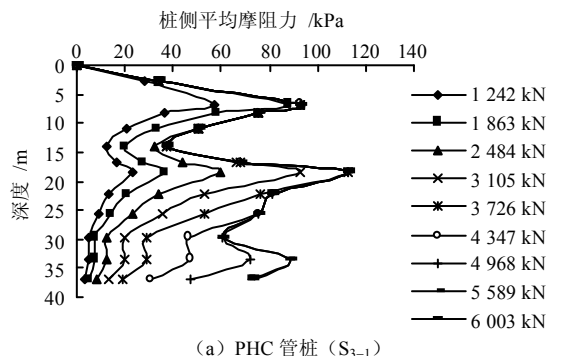
| 比较       | 试桩        |           |           |           |
|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|          | $S_{2-1}$ | $S_{2-2}$ | $S_{3-1}$ | $S_{3-2}$ |
| 桩侧阻力 /kN | 5 411.0   | 5 455.0   | 4 972.4   | 4 791.0   |
| 桩端阻力 /kN | 592.0     | 548.0     | 1 030.6   | 1 212.0   |

### 3.4 桩侧摩阻力性状对比

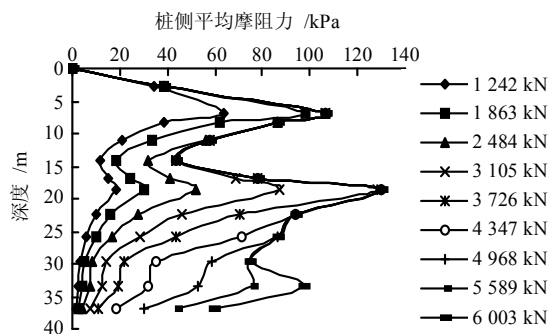
各试桩桩侧摩阻力沿桩身分布见图 6。从图可看出, PHC 桩的侧阻发挥规律和预制方桩相同, 即上部土层的摩阻力先于下部发挥作用, 随着荷载的增加, 下部土层的摩阻力逐渐发挥出来, 其发挥是个异步的过程。极限摩阻力小的土层, 其摩阻力易发挥到极限, 如上部土层。超过一定工作荷载后, 上部土层的摩阻力已经趋于稳定并达到峰值, 而下部土层的摩阻力还未完全发挥。加载到 3 726 kN 后上部一些土层的侧摩阻力就已达到峰值。

加至最大试验荷载 6 003 kN 时, 对比 PHC 管桩和方桩的桩侧摩阻力沿桩身分布图, 并参见表 5

和图 7 可以发现, 在 0~16.8 m 范围内, 2 组桩侧摩阻力发挥程度相近, 但方桩的稍大, 只有在第 3 断面处的峰值要比管桩大 14.8 %; 在 16.8~30 m 的范围内, 方桩的侧摩阻力发挥程度普遍要比管桩的大 14.8 %~24.4 %; 在 35 m 以下的范围内, 管桩的侧摩阻力比方桩的大, 这主要是因为管桩有较大的桩端位移, 即在土层⑧中的桩土相对位移较大。此时桩身侧摩阻力发挥对比见表 5。对全桩的平均侧摩阻力而言, 管桩要比方桩低 8.1 %。



(a) PHC 管桩 ( $S_{3-1}$ )



(b) 方桩 ( $S_{2-1}$ )

图 6 各试桩桩侧摩阻力沿桩身分布曲线  
Fig.6 Skin friction distribution curves of test piles

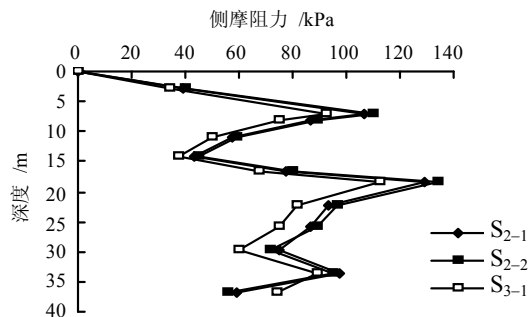


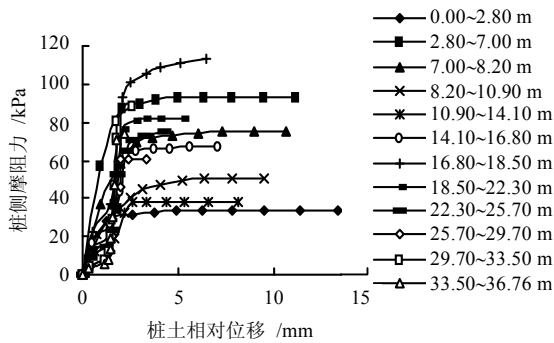
图 7 在 6 003 kN 荷载下各试桩的侧阻沿桩身分布图  
Fig.7 Skin resistance distribution curves of piles under 6 003 kN

从图 8 可以看出, PHC 管桩和预制方桩一样, 随着桩土相对位移的增加, 各土层的摩阻力随着相

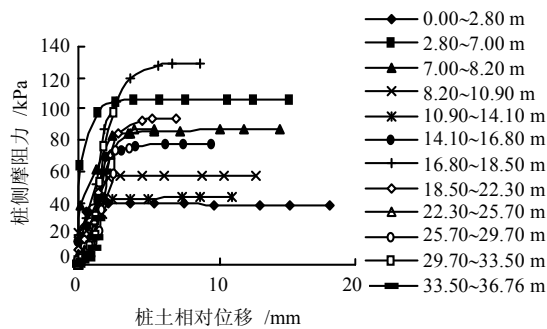
对位移的增加而增加,增加至峰值时,即使相对位移继续增加,其侧阻力仍保持不变,没有出现明显的侧阻软化现象。同时还可以看出,在各土层中方桩的相对位移要比 PHC 管桩的大,且其侧阻的峰值稍大。

表 5 在 6 003 kN 荷载作用下单位桩身平均侧阻发挥对比  
Table 5 The contrast between the unit skin resistance of two piles under 6 003 kN

| 桩型                  | 不同深度 (m) 侧阻力 /MPa |              |             |
|---------------------|-------------------|--------------|-------------|
|                     | 0~16.8            | 16.8~30      | ≤30         |
| 管桩 S <sub>3-1</sub> | 0~92.80           | 60.19~112.86 | 74.10~88.92 |
| 方桩 S <sub>2-1</sub> | 0~106.54          | 74.87~129.58 | 59.40~97.34 |



(a) PHC 管桩 (S<sub>3-1</sub>)



(b) 方桩 (S<sub>2-1</sub>)

图 8 各试桩桩侧摩阻力与桩土相对位移曲线  
Fig.8 Relations of skin friction to relative displacement of test piles

3.5 桩端阻力发挥性状分析

端阻比随荷载变化的曲线见图 5。可以看出,PHC 桩的端阻发挥规律和一般的预制方桩相同,即随着荷载水平提高,端阻开始发挥,其所占承载力的比例逐渐提高;对 PHC 管桩同样满足随着长径比  $L/D$  增加,桩端承力减小的规律<sup>[3]</sup>。这里,当荷载大于 5 000 kN 时,短桩 S<sub>3-2</sub> 的端阻比长桩 S<sub>3-1</sub> 的明显增大。比较管桩和方桩,相同桩长情况下在最大试验荷载 6 003 kN 作用下,PHC 管桩桩端土受到的总荷载比方桩大 74 %,不考虑土塞效应时,视桩端为完全开口,此时单位面积桩端阻力大于持力层地基承载力,故会发生土塞效应;当考虑土塞

效应使 PHC 管桩桩端变成全封闭时,其面积为 0.282 6 m<sup>2</sup>,单位面积桩端土阻力发挥程度要比方桩大 24 %,二者的单位桩端阻力对比见表 6。

表 6 在 6 003 kN 荷载作用下单位桩端阻力对比  
Table 6 The contrast between the unit base resistance of two piles under 6 003 kN

| 参数        | 方桩 (S <sub>2-1</sub> ) | PHC 管桩 (S <sub>3-1</sub> ) |          |
|-----------|------------------------|----------------------------|----------|
|           |                        | 桩端开口                       | 桩端闭口     |
| 桩端阻力 /kPa | 2 923.4                | 6 091.01                   | 3 646.85 |

注:桩端开口未考虑土塞效应;桩端闭口考虑土塞效应。

4 结 论

通过研究埋有钢筋应力计的 PHC 管桩和预制方桩的静荷载试验得出如下结论:

(1) 试桩的实际承载力都比按静力经验公式计算所得结果要高,PHC 管桩实测值比按静力经验公式的计算值至少高 18.53 %,而方桩的至少高 31.39 %。

(2) PHC 管桩和预制方桩相比,桩周长基本相同,桩身刚度较大,当土质条件相近和桩长相同时,在最大试验荷载 6 003 kN 作用下预制方桩 S<sub>2-1</sub> 和 S<sub>2-2</sub> 的桩端轴力(端承力)分别为 592 kN 和 548 kN,占总荷载的 9 %~10 %;PHC 管桩 S<sub>3-1</sub> 和 S<sub>3-2</sub> 的桩端轴力分别为 1 030.6 kN 和 1 212 kN,占总荷载的 17 %和 20 %。PHC 管桩在 0~35 m 范围内的侧阻均比方桩小,但在 35 m 以下管桩的侧阻反而大。

(3) PHC 管桩和预制方桩的侧阻发挥规律相同,即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。相同工作荷载水平下,管桩由于桩身抗压刚度大,桩身压缩量小,桩土相对位移小,导致侧阻发挥较小。在最大试验荷载 6 003 kN 作用下 PHC 管桩 S<sub>3-1</sub> 的平均侧阻要比预制方桩 S<sub>2-1</sub> 低 8.1 %。

(4) PHC 桩的端阻发挥规律和预制方桩相同,即随着荷载水平提高,端阻开始发挥,其所占承载力的比例逐渐提高,且桩端承力随长径比  $L/D$  的增加而减小。管桩由于侧阻发挥程度小使端阻增大,进而发生土塞效应。在最大试验荷载 6 003 kN 作用下,PHC 管桩 S<sub>3-1</sub> 桩端土受到的总荷载比方桩 S<sub>2-1</sub> 大 74 %,桩端土发生土塞效应,单位面积桩端土阻力发挥程度要比方桩大 24 %以上。

参 考 文 献

[1] 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, LENG Wu-ming. Testing

- and numerical analysis of load transfer mechanism of PHC pile[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(3): 466—500.
- [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] 苏振明. 预应力管桩荷载传递特性[J]. 建筑科学, 2005, 21 (1): 88—93.  
SU Zhen-ming. Research of load transfer characteristics of PHC pipe piles[J]. **Building Science**, 2005, 21(1): 88—93.
- [4] 中国建筑科学研究院. JGJ94—94 建筑桩基技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1995.
- [5] 舒士霖. 钢筋混凝土结构[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2003.
- [6] 辛公锋. 大直径超长桩侧阻软化试验与理论研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [7] 张忠苗. 软土地基大直径桩受力性状与桩端注浆新技术[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2001.
- [8] 徐至钧, 李智宇. 预应力混凝土管桩基础设计与施工[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.

## 《岩土力学》2008 年第 6 期被 EI 收录论文 (53 篇, 收录率 96 %)

| No. | 论文题名                            | 作 者              | 页 码       |
|-----|---------------------------------|------------------|-----------|
| 1   | 考虑土体固结变形的污染物运移模型                | 张志红, 李 涛, 赵成刚, 等 | 1435—1439 |
| 2   | 表面渗流对生态边坡中客土稳定性影响研究             | 王 亮, 杨俊杰, 刘 强, 等 | 1440—1445 |
| 3   | 塑性梯度体元及应变局部化启动机制分析              | 赵 冰, 李 宁, 郑颖人    | 1446—1450 |
| 4   | 一个新的全局优化算法在岩土工程反分析中的应用          | 吕颖慧, 王水林, 葛修润, 等 | 1451—1454 |
| 5   | 极限保土状态下的反滤机制试验研究                | 陈 轮, 庄艳峰, 许 齐, 等 | 1455—1460 |
| 6   | 南京砂强度特征与静态液化现象分析                | 朱建群, 孔令伟, 钟方杰    | 1461—1465 |
| 7   | 桩承式路堤土拱效应有限元研究                  | 贺 翀, 楼晓明, 熊巨华    | 1466—1470 |
| 8   | 基于非线性规划的有限元塑性极限分析下限法研究          | 王均星, 李 泽         | 1471—1476 |
| 9   | 温度和应力耦合作用下砂岩破坏的细观试验研究           | 左建平, 周宏伟, 谢和平, 等 | 1477—1482 |
| 10  | 扩建城市垃圾填埋场的地震稳定性分析               | 朱 斌, 陈云敏, 柯 瀚    | 1483—1488 |
| 11  | 基于 RES 的地下巷道工程稳定性全耦合分析方法        | 余伟健, 高 谦, 韩 阳, 等 | 1489—1493 |
| 12  | 黄河水下三角洲粉质土扰动土层特征及成因探析           | 孙永福, 董立峰, 宋玉鹏    | 1494—1499 |
| 13  | 煤岩突出中单个煤壳失稳前兆阶段的能量分析            | 潘 岳, 张 勇, 戚云松    | 1500—1506 |
| 14  | 低温条件下塑料土工格栅拉伸特性的试验研究            | 汪恩良, 徐学燕         | 1507—1511 |
| 15  | 注浆抬升地层的机制、解析解及数值模拟分析            | 唐智伟, 赵成刚         | 1512—1516 |
| 16  | 压力型锚杆锚固段的应力分布规律研究               | 卢 黎, 张永兴, 吴曙光    | 1517—1520 |
| 17  | 复杂荷载作用下考虑下卧层三维渗流的未打穿竖井地基固结分析    | 耿雪玉, 蔡袁强, 徐长节    | 1521—1529 |
| 18  | 考虑物态变化的粗粒土亚塑性本构模型               | 张 嘎, 张建民, 吴 伟    | 1530—1534 |
| 19  | 深基坑工程托换技术影响因素分析                 | 刘毓胤, 李 协, 陈福全    | 1535—1539 |
| 20  | 凹形地貌对爆破振动波传播影响的数值模拟             | 唐 海, 李海波, 周青春, 等 | 1540—1544 |
| 21  | 吸力式沉箱基础极限拉拔承载力的数值分析             | 王志云, 王忠涛, 栾茂田, 等 | 1545—1550 |
| 22  | 基于可靠度理论的滑坡稳定性及其影响因素分析           | 尹小涛, 王水林         | 1551—1556 |
| 23  | 用于月面车辆力学试验的模拟月壤研究               | 李建桥, 邹 猛, 贾 阳, 等 | 1557—1561 |
| 24  | 大型地下洞室考虑开挖卸荷效应的位移反分析            | 董志宏, 丁秀丽, 卢 波, 等 | 1562—1568 |
| 25  | 旁孔透射波法检测既有建筑物桩基的三维有限元分析         | 黄大治, 陈龙珠         | 1569—1574 |
| 26  | 含圆柱形弹性夹杂地基沉降量的解析解               | 王明斌, 李术才, 李树忱, 等 | 1575—1579 |
| 27  | 强夯动力性能的显式非线性数值分析                | 田 水, 王 钊         | 1580—1584 |
| 28  | 多筒系缆平台原型顶升试验研究                  | 丁红岩, 张浦阳         | 1585—1592 |
| 29  | 基坑降水引起地面沉降的实时预测                 | 张 勇, 赵云云         | 1593—1596 |
| 30  | 龙凤山水库土石坝电阻率层析成像无损检测技术           | 屠毓敏, 刘国华, 王振宇, 等 | 1597—1601 |
| 31  | 用水位恢复数据反演越流承压含水层参数              | 杨建民, 郑 刚         | 1602—1606 |
| 32  | 砂类土体隧道围岩压缩模量的试验研究               | 王玉锁, 王明年, 童建军, 等 | 1607—1612 |
| 33  | 公路黄土暗穴临界稳定埋深回归的预测方法及其程序实现       | 邓亚虹, 彭建兵, 范 文, 等 | 1613—1617 |
| 34  | 基于图像测量方法的非饱和压实土三轴试样变形测量         | 董建军, 邵龙潭, 刘永禄, 等 | 1618—1622 |
| 35  | 高水位隧道堵水限排围岩与支护相互作用分析            | 王秀英, 谭忠盛, 王梦恕, 等 | 1623—1628 |
| 36  | 加气硅化黄土的微结构研究                    | 尹亚雄, 王生新, 韩文峰, 等 | 1629—1633 |
| 37  | 文 13 西块油藏岩石形变对采收率影响研究           | 王 锐, 岳湘安, 张凤义, 等 | 1634—1638 |
| 38  | 地下排水对滑坡稳定性影响动态研究                | 严绍军, 唐辉明, 项 伟    | 1639—1643 |
| 39  | 煤巷掘进迎头煤与瓦斯突出的突变机制分析             | 赵志刚, 谭云亮, 程国强    | 1644—1648 |
| 40  | 有效应力对裂缝型低渗透砂岩油藏压力响应的影响          | 李宜强, 班凡生, 高树生, 等 | 1649—1653 |
| 41  | 基坑土钉支护边坡有限元稳定性分析方法探讨            | 赵 杰, 邵龙潭         | 1654—1658 |
| 42  | 地下工程渗流排水孔数值模拟的隐式复合单元法           | 倪绍虎, 肖 明         | 1659—1664 |
| 43  | 顺层高边坡开挖松动区研究                    | 孙书伟, 马惠民, 张忠平    | 1665—1668 |
| 44  | 苏通大桥地基粉质黏土物性指标相关关系试验研究          | 蒋建平, 罗国煜         | 1669—1674 |
| 45  | 裂隙网络模拟与 REV 尺度研究                | 张贵科, 徐卫亚         | 1675—1680 |
| 46  | 物元可拓模型的改进及其在膨胀土分类中的应用           | 张慧颖, 曾建民         | 1681—1684 |
| 47  | 基于 GIS 的城市地面沉降信息管理与预测系统研究       | 侯卫生, 吴信才, 刘修国    | 1685—1696 |
| 48  | 钻孔后注浆技术在苏通大桥基础工程中的应用            | 布克明, 殷坤龙, 龚维明    | 1697—1700 |
| 49  | 不同方向卸载对基坑支护位移内力的影响              | 殷德顺, 王保田, 张文慧    | 1701—1705 |
| 50  | 软土 $e-p$ 曲线确定的简化方法及在非线形沉降计算中的应用 | 彭长学, 杨光华         | 1706—1710 |
| 51  | 侧移土体被动桩成拱效应分析                   | 李忠诚, 洪昌地         | 1711—1715 |
| 52  | 基于指数趋势模型的卡尔曼滤波法在危岩体变形分析中的应用     | 陆付民, 王尚庆         | 1716—1718 |
| 53  | 重力坝深层抗滑稳定计算探讨                   | 周 泽, 周 峰, 潘军校, 等 | 1719—1722 |