PHC管桩工程特性分析

邢皓枫[1,2]，赵红崴[3]，叶观宝[1,2]，徐 超[1,2]
(1.同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室，上海 200092；2.同济大学地下建筑与工程系，上海 200092；3.华东电力设计院，上海 200063)

摘 要：以PHC管桩加固某电厂古河道地基为依托，进行了PHC管桩受力特性研究。利用桩身预先埋设的光纤传感器，并借助静载荷试验、高应变和静力触探等现场测试手段，研究了PHC管桩在不同级别荷载作用下桩身沿深度的受力分布特征，发现PHC管桩侧摩阻力不仅与地基土层性质相关，而且其分布特征也与桩埋置深度有很大关系；桩体上段摩阻力较小，中间段发挥度最大，下段桩身轴力衰减较快；根据试验结果提出了PHC管桩单桩承载力修正公式，用该式求得PHC管桩单桩承载力与静载荷试验结果吻合，说明修正公式是合理的。

关键词：PHC管桩；静载荷试验；光纤传感器；承载力
中图分类号：TU473 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－4548(2009)01－0036－04

作者简介：邢皓枫(1969－)，男，博士，从事地基加固与检测方面教学与研究。E-mail: hfxing@tongji.edu.cn。

Analysis of engineering characteristics of PHC pipe piles

XING Hao-feng[1,2], ZHAO Hong-wei[3], YE Guan-bao[1,2], XU Chao[1,2]
(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. East China Electric Power Design Institute, Shanghai 200063, China)

Abstract: Based on the old channel ground of a power plant improved by PHC pipe piles, the mechanical characteristics of PHC pipe piles are studied. The beating number and soil plug of PHC pipe piles during driving are tested, and the characteristics of driving PHC pipe piles are generalized. Using the optic fiber sensors and in-situ tests such as plate load tests, the distribution characteristics of pile stress are analyzed. The frictional resistance of PHC pipe piles relates with both soil properties and pile depth. The frictional resistance at the upper section of the pile is the smallest, the participation degree at the middle section is the maximal, and the axial stress at the lower section decreases at the fastest rate. On the basis of test data, the modified formula for the bearing capacity of PHC pipe piles is provided. It is proved to be reasonable by the plate load tests.

Key words: PHC pipe pile; plate load test; optic fiber sensor; bearing capacity

0 前 言

高强预应力管桩（PHC管桩）由于桩身混凝土强度高，其不仅具有强度高，耐打性好，穿透力强，施工速度快等优点，而且还有承载力高特点。故PHC管桩适用性非常广，不仅适用于一般性土层，而且可打入密实的砂层和强风化岩层；同时由于施工过程中的竖向挤压和侧向挤密作用，桩端承载力和桩侧摩阻力可较灌注桩有所提高；另外，PHC管桩是工厂化生产、质量易于控制和检查，沉桩质量比灌注桩有保证（特别是软土地基，沉管灌注桩因挤土效应容易产生断桩），故其在承载力、抗弯性能、抗拔性能上均易得到保证，且PHC管桩的单位承载力性价比在诸多桩型中是较好的一种。因此，PHC管桩在工程中的应用已在全国范围内迅速展开，被用于建筑、机场、码头、堤坝和道路等工程中，并在诸多型式的桩基中独占鳌头，并逐步取代其它摩擦桩型。

由于PHC管桩是一种新型桩，有关它的承载力计算大多借鉴其它类型的桩，但随着实践的发展，人们意识到各类型桩之间工作性状存在很大差异，故为了更好地掌握PHC管桩工作性能和实现其优化设计，学者们针对PHC管桩各个方面展开了不同程度的研究且取得了很多有价值的研究成果：郭宏磊等[1]利用逐次线性概率法加上残差修正对PHC管桩单桩竖向承载力进行了预测，并用有限元进行了模拟；黄敏等[2]对带翼板预应力管桩的承载力提高机制进行了探讨，提出了几种可能分析该种桩型竖向承载性能的模拟方法；李平先等[3]针对预应力管桩与桩帽连接节点轴拔性能

基金项目：上海市重点学科建设项目（B308）
收稿日期：2007－10－18

表 1 地基土主要物理力学指标表

Table 1 Physico-mechanical indexes of soils

地层编号	土性名称	含水率/%	孔隙比	塑性指数	液性指数	压缩系数/MPa^{-1}	黏聚力/kPa	摩擦角/(°)
①	粉土	28.6	0.828	8.9	—	0.232	24.0	22.4
$②_1$	黏土	31.8	0.951	17.1	0.63	0.471	17.2	8.0
③	粉土	28.0	0.798	8.7	—	0.213	7.5	26.0
⑤	粉砂	22.8	0.661	—	—	0.149	4.2	27.9
⑧	粉质黏土	24.4	0.699	17.7	0.15	0.233	61.5	10.1
□	粉质黏土	23.1	0.661	16.0	0.15	0.243	61.2	10.4
□	黏土	23.2	0.666	18.5	0.10	0.252	69.9	10.0
□	黏土	28.0	0.792	22.9	0.20	0.175	78.2	12.5
□	黏土	26.8	0.759	23.9	0.17	0.179	79.4	12.0

进行了原型试验，分析了连接节点工作性能和影响轴拔承载力的主要因素，并提出了建议的计算公式；Zhou等[4]通过现场和室内动测手段研究了预应力管桩施工引起桩体拉应力分布特点等。

本文以PHC管桩处理某电厂古河道地基为依托，通过预先在桩身埋设光纤传感器并借助静载核试验、高应变、标准贯入试验和静力触探等现场测试手段，研究了不同级别荷载作用下PHC管桩沿深度的受力分布，发现PHC管桩受力特点不仅与地基土层性质相关，而且其分布特征与桩体埋置深度有很大关系，桩体上段摩阻力较小，中间段发挥度最大，下段桩身轴力衰减较快。本文根据分析结果，提出了PHC管桩单桩承载力修正公式，供类似工程参考。

1　场地地层特点及 PHC 管桩施工效应

某电厂二期扩建2×1000 MW机组场区为古河道堆积物代表区域，古河道埋于近代黄泛层之下，宽约200 m，顶部埋深约5 m，底部埋深在20 m左右，形成于宋朝时期。河道内主要沉积层为粉砂及粉土，对下部上更新世地层有剥蚀作用。场地地层分布情况及主要物理力学指标见表1。

考虑施工工期和上部荷载较大的特点，该场地采用PHC管桩进行地基加固。PHC管桩桩型为PHC-AB600(130)-40b，以□层粉土为持力层，桩尖进持力层2 m，单节桩长自上而下分别为14.0，12.0，14.0 m，桩入土深度为40 m。为了获取PHC管桩桩身应力分布及桩侧摩阻力分布特点，为单桩承载力计算提供可靠设计参数，选择三根PHC管桩进行桩身应力测试，编号分别为T1、T2和T3，并由桩型为PHC-AB600(110)-28b，单节桩长为14.0 m，桩入土深度为28 m作为锚桩，提供反力。

2　PHC 管桩测试与分析

2.1　光纤测试原理与埋设

分布式光纤传感技术具有抗电磁干扰、防水、抗腐蚀、耐久性长等特点，传感器体积小，重量轻，便于铺设安装，将其植入监测对象中不存在匹配的问题，对监测对象的性能和力学参数等影响较小。考虑裸露光纤直接铺设于管桩表面易断裂而失去测试功能，本次测试对光纤进行了特殊处理，光纤铺设以PHC桩身为载体，采用u型方案铺设，由于桩体在施加荷载过程中存在一定的偏心荷载及挠曲，其桩身表现出对称性的应力应变差异，因此利用同截面两条光纤求平均值的埋设方式，铺设过程中保持光纤挺直，如图1所示，图2为光纤铺设过程图。经实践证明，处理后的光纤在其传感性质未受影响的前提下，其抗拉、抗折、抗冲击及防火花能力大为提高。

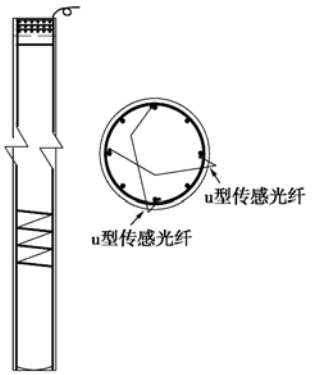


图 1 光纤铺设工艺图

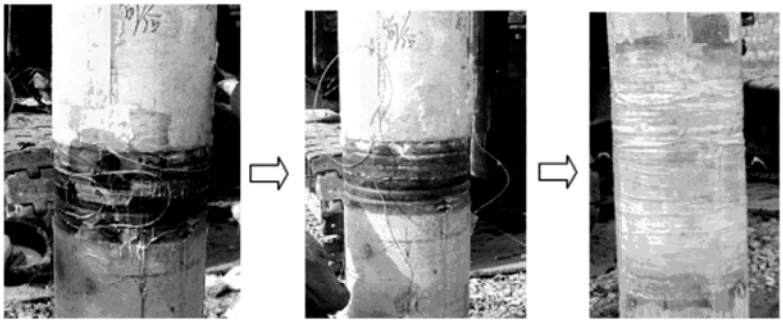
Fig. 1 Layout of optic fiber sensors

静载试验过程中在每级加载稳定后用BOTDR开始采集光纤传感器数据，采集时间大约每次20 min。BOTDR采集结束时本级荷载基本上达到载荷试验稳定标准，然后开始施加下一级荷载，同样，在卸载时，也是大约预估稳定时间前0.5 h开始采集BOTDR数据。

2.2　光纤测试及桩身受力性状分析

通过低应变检测T1、T2和T3三根试桩的完整性得知T2试桩在接桩处存在轻微缺陷，故静载荷试验过程中仅对T1和T3两完整桩进行了桩身应力测试。光纤测试各荷载下桩身轴力沿深度的分布见图3（a）、（c）。

单桩承载力是由桩侧摩阻力和端阻力计算的，而



(a) (b) (c)

图 2 光纤铺设过程图

Fig. 2 Steps for laying optic fiber sensors

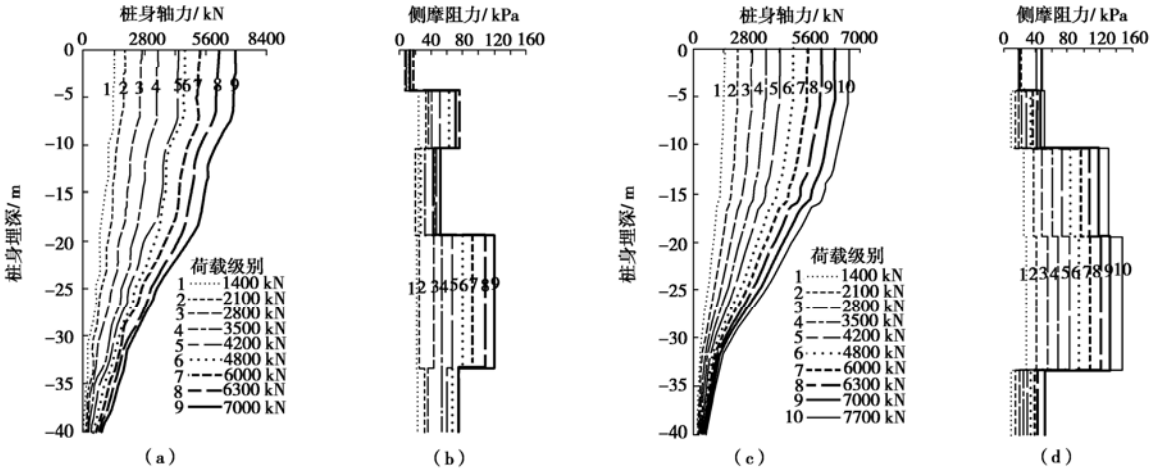


图 3 光纤测试结果图

Fig. 3 Results of optic fiber sensor tests

桩身侧摩阻力按土层进行计算，故图3测试资料取同一土层桩身上能代表其段内大体趋势的一小段，得到两个横截面，利用式（1）的轴力计算方法求得两截面上的轴力值，轴力值之差与该段内桩周面积之比就是侧摩阻力。

$$q_s(z)=-\frac{1}{U}\frac{\Delta Q(z)}{\Delta z}=-\frac{1}{U}\frac{\Delta\sigma A}{\Delta z}=-\frac{1}{U}\frac{\Delta\varepsilon AE}{\Delta z}=-\frac{AE}{U}\frac{\Delta\varepsilon}{\Delta z}, \tag{1}$$

式中，E 为桩身混凝土的弹性模量，A 为桩身截面面积，$q_s(z)$ 为桩侧分布摩阻力，$Q(z)$ 为桩身轴向力，U 为桩身周长，$\Delta Q(z)$ 为某土层内桩身两截面间轴力变化量，Δz 为该土层内桩身两截面间深度差，$\Delta\varepsilon$ 为某土层内桩身两截面间轴向应变变化量。

根据光纤测试结果，由式（1）得场地各地层桩侧摩阻力值，如表 2 所示。从表 2 可知 PHC 管桩实际桩侧摩阻力大小并不与土层性质呈严格的正相关性，其大小与桩体埋置深度有很大关系；由底部轴力值除以桩底面积得桩端阻力值，也列于表 2。

为了分析荷载作用下 PHC 管桩侧摩阻力分布特点，将测试结果进行了简化。根据场地土层分布情况和测试结果可分为 5 个大应变土层，即 0～−4.4 m，−4.4～−10.4 m，−10.4～−19.4 m，−19.4～−33.4 m，−33.4～−40 m。两测试桩在各荷载级下桩侧摩阻力沿深度的分布见图 3（b）、（d），其平均值见图 4。

表 2 桩的极限侧阻标准值和端阻极限标准值表

Table 2 Frictional and toe resistance of piles

层号	名称	侧阻极限标准值/kPa	端阻极限标准值/kPa
①	粉土	15.0	
②$_1$	黏土	28.0	
③	粉土	74.8	
⑤	粉砂	89.0	
⑧	粉质黏土	115.0	
⑪	粉质黏土	127.0	
⑬	黏土	81.5	
⑭	黏土	65.0	4640

由桩的桩身轴力图3及摩阻力分布图4得到如下结果：

（1）在各级荷载下，PHC管桩轴力沿桩身呈非线性递减分布，当荷载较小时，非线性并不明显，随着荷载的增大，非线性逐渐明显。这是因为当荷载较小时，力作用在桩身上产生的变形就小，不能很好地发挥桩周土体的摩阻力，从桩顶到桩端轴力衰减的速率较小；当桩顶荷载逐步加大时，桩体产生的变形逐步增大，桩与

周围土体之间产生相互滑动的趋势逐步增大，当荷载足够大时，桩周土体对桩的摩阻力达到极限值。

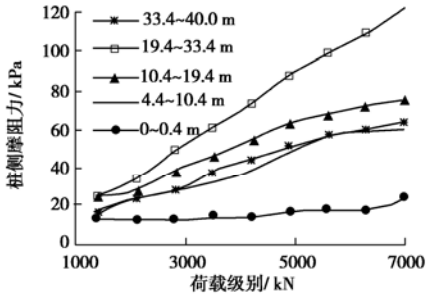


图 4 各荷载级下桩身摩阻力分布图

Fig. 4 Frictional resistances of piles at different loads

（2）桩轴力自桩顶处开始慢慢衰减，虽衰减的幅度不同，但到了从桩顶到2/3桩长附近处轴力值已减小了70%左右，而且随着荷载的增加，递减幅度更大。

（3）桩身轴力随深度逐渐平滑递减，递减速率因土层而异，随着荷载加大各土层摩阻力逐渐发挥并趋于极限，端承力在荷载较高时发挥度增大，直至极限荷载下达到桩端阻力极限值。

（4）PHC管桩侧摩阻力大小不仅与地基土性质有关，而且还与上部荷载大小、桩体埋置深度有关，且与桩体埋置深度较与地基土性质的相关性更大，故用忽略桩体埋置深度的土体侧阻力来计算PHC管桩单桩承载力是不严格的。

3　单桩承载力修正与现场试验对比

管桩土塞对单桩强度发挥是有利的，但PHC管桩存在不能忽略不计的24%左右土塞效应，故在进行PHC管桩单桩竖向极限承载力计算时，应考虑土塞产生的内壁侧摩阻力和桩端土密实增加的端阻力，式（2）为考虑该两方面作用的PHC管桩单桩承载力修正公式：

$$Q_{\mathrm{uk}} = (u_1 + \alpha u_2) h_i q_{\mathrm{sik}} + \beta A_{\mathrm{p}} q_{\mathrm{pk}} \quad , \qquad (2)$$

式中，u_1，u_2 分别为 PHC 管桩外壁、内壁的周长，A_{p} 为桩端外壁所围的面积，q_{sik}，q_{pk} 分别为各土层对应的桩体极限侧阻力、端阻力标准值，h_i 为各层土的厚度，α，β 分别为“土塞”效应修正系数和端阻力修正系数，根据土层性质由试验确定，当无试验资料可按表 3 取值。

由表 1～3 和图 4，利用式（2）按实际土层方式和五大应变土层的分段方式求得 PHC 管桩单桩承载力极限标准值及土塞效应发挥度，如表 4 所示。为了和试验结果进行对比，表 4 中同时列出了静载荷试验结果。从表 4 可知式（2）的 PHC 管桩修正公式是可行的，且土塞效应所占比例超过 5%，故 PHC 管桩单桩承载力计算时不能忽略不计。

表 3 修正系数α，β表

Table 3 Correction coefficients for α and β

系数	黏性土	粉土	砂土
α 值	0.3	0.5	0.6
β 值	1.0	1.1	1.2

表 4 PHC 单桩承载力表

Table 4 The bearing capacity of a single PHC pile

承载力计算值/kN		土塞所占比例/%		载荷试验值/kN
土层	分段	土层	分段	
7095	7165	5.1	5.4	7000

4　结　　论

（1）在各级荷载下，桩身轴力沿桩身呈非线性递减分布，上部荷载越大，桩身轴力非线性越明显，从桩顶到2/3桩长附近处轴力值已减小了70%左右，而且随着荷载的增加，递减幅度更大。

（2）PHC管桩侧摩阻力大小不仅与地基土性质有关，而且还与上部荷载大小、桩体埋置深度有关，故用忽略桩体埋置深度的土体侧阻力来计算PHC管桩单桩承载力是不严格的。

（3）PHC管桩沉桩过程中存在大于20%的土塞效应，其对桩体强度发挥度不低于5%，故单桩承载力计算时忽略不计是很不经济的。

参考文献：

[1] 郭宏磊, 贺　雯, 胡亦兵, 王元汉. PHC 桩的竖向极限承载力的预测[J]. 工程力学, 2004, **12**(3): 78－83. (GUO Hong-lei, HE Wen, HU Yi-bing, WANG Yuan-han. Predication of vertical ultimate bearing capacity of PHC piles[J]. Engineering Mechanics, 2004, **12**(3): 78－83. (in Chinese))

[2] 黄　敏, 龚晓南. 带翼板预应力管桩承载性能的模拟分析[J]. 土木工程学报, 2005, **38**(2): 102－106. (HUANG Min, GONG Xiao-nan. A study on the behavior of prestressed pipe pile with plates under axial load[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, **38**(2): 102－106. (in Chinese))

[3] 李平先, 张雷顺, 赵国藩. 预应力混凝土管桩与桩帽连接节点轴拔性能原型试验研究[J]. 土木工程学报, 2005, **38**(7): 81－86. (LI Ping-xian, ZHANG Lei-shun, ZHAO Guo-fan. Prototype test on the axial pull out behavior of the joint of prestressed concrete pipe pile and pile cap[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, **38**(7): 81－86. (in Chinese))

[4] ZHOU Li-yun, CHEN Jian-bin, LAO Wei-kang. Construction control and pile body tensile stresses distribution pattern during driving[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, **133**(9): 1102－1109.