

静压预制桩工程性状探讨

——以开封火电厂技改工程为例

黄志全¹, 蒋孝成², 张长存³

(1. 华北水利水电学院岩土工程系, 郑州 450008;
2. 河南省电力勘测设计院, 郑州 450006; 3. 天津勘测设计研究院, 天津 300222)

[摘要]以开封火电厂技改工程为例, 根据现场检测结果, 探讨了影响静压预制桩沉桩深度原因, 分析了静压桩承载力的分布规律。研究结果证明静压桩的沉桩深度和承载力与地基土的性状密切相关。对于开封火电厂技改工程场地, 尽管桩端进入砂层较小深度, 却可以在桩端平面附近良好土层的作用下提供较大的端阻力。

[关键词]静压预制桩 持力层 承载力

[中图分类号]TU473.1 **[文献标识码]**A **[文章编号]**0495-5331(2003)03-0087-04

静压预制桩是依靠机械设备对预制混凝土桩施加垂直压力, 把桩身压入地基土中形成复合地基, 达到提高地基整体承载力的目的。与打入桩比较, 静压桩具有节省材料、无震动、低噪音等优点, 但是在具体的工程施工中, 特别是在砂土中常遇到沉桩困难等问题。本文以开封火电厂技改工程为例, 根据现场检测结果, 探讨静压桩未能进入设计持力层位的原因, 分析当静压桩桩端位于砂持力层与其上覆地层的分界面附近时(即试验荷载未达到破坏时)桩侧阻力与端阻力的分布情况, 进一步研究静压桩

应用于处理河流冲积地层机理。

1 工程简介及存在的问题

开封火电厂位于开封市的东部, 属于黄河冲洪积平原, 场地地面标高在71.4 m左右, 与自然地面标高相差不大。地基土主要由第四系冲洪积粉土、粉质粘土和砂土组成, 而且上部粉土、粉质粘土的均匀性都很差, 下部砂层埋深约为20.0 m(为清除表层填土后的埋深, 较该区其他地带深2.0 m左右), 持力层为细砂层(层⑧), 各主要地层的物理力学指标见表1。

表1 各土层主要物理力学指标表

地层编号	岩土地层	代表厚度/m	重度 γ /kN·m ⁻³	孔隙比 e	相对密度 D_r	压缩模量 E_s /MPa	凝聚力 c_k /kPa	内摩擦角 φ_k /°	锥尖阻力 q_c /MPa	侧壁阻力 f_s /kPa	承载力标准值 f_k /kPa
层②	粉质粘土	6.9	19.6	0.807	/	9.0	9	25.7	1.92	34.5	120
层③	粉质粘土	6.0	19.5	0.844	/	8.3	13	15.1	1.20	32.7	100
层④	粉土	2.6	20.0	0.747	/	17.0	15	27.2	4.52	87.6	160
层⑤	粉质粘土	0.4	20.5	0.860	/	9.5	15	12.0	0.95	36.5	100
层⑥	粉土	2.0	21.0	0.574	/	17.2	25	24.0	4.19	118.2	180
层⑦	粉土	2.0	21.2	0.548	/	13.8	26	19.0	2.86	107.9	150
层⑧	细砂	11.9	20.7	0.556	0.85	26.4	/	34.6	30.83	401.0	220

开封火电厂IV期、本期技改主要建(构)筑物基础均采用静压混凝土预制桩方案, 桩身截面尺寸400 mm × 400 mm, 桩长21.0 m, 混凝土强度等级为

C30, 桩端持力层均为深部的砂层。在施工中, 严格按照现行国家规范的要求进行^[4,5], IV期工程采用2200 kN静力压桩机, 桩端进入持力层的深度约为

[收稿日期]2001-12-24; **[修订日期]**2002-06-25; **[责任编辑]**李石梦。

[基金项目]河南省青年骨干教师项目资助。

[第一作者简介]黄志全(1970年-), 男, 1999年毕业于中国科学院地质研究所, 获博士学位, 副教授, 主要从事工程地质专业的研究与生产工作。

1.5 倍桩径(600 mm);本期工程虽然采用 4000 kN 压桩机,但是桩端进入持力层的深度较Ⅳ期并无明显增大,然而,原位测试结果表明其承载力满足设计要求。因此,在黄河冲洪积平原地区,静压预制桩沉桩深度及影响沉桩深度的原因研究是必要的。同时,对桩基承载力分布分析很具工程应用价值。为了对工程性状进行检验,采用原位测试方法,主要包括静载试验、静力触探、高应变动力测试等对复合地基承载力及其沉桩深度进行分析。

2 静压预制桩沉桩深度分析

本次共施工试桩 3 根,锚桩 8 根,采用 4000 kN 级静力压桩机,11 根桩穿越桩周各岩土分层时,压桩力均小于 2000 kN,但在桩端进入持力层(层⑧细砂)时,压桩力急剧增加至 3000 kN 以上,至 3200 kN 时,桩端进入持力层 100~300 mm 即停止进入(图 1),压桩终止。在开封火电厂以前各期工程桩施工中,曾采用 2200 kN 压桩机(携带配重块),桩端进入砂持力层的深度与本期大致相当,调查当地其他工程静压桩的施工情况,也普遍存在此类现象。作者认为静压预制桩在河流冲积地层的沉桩深度可以从以下两个方面分析:

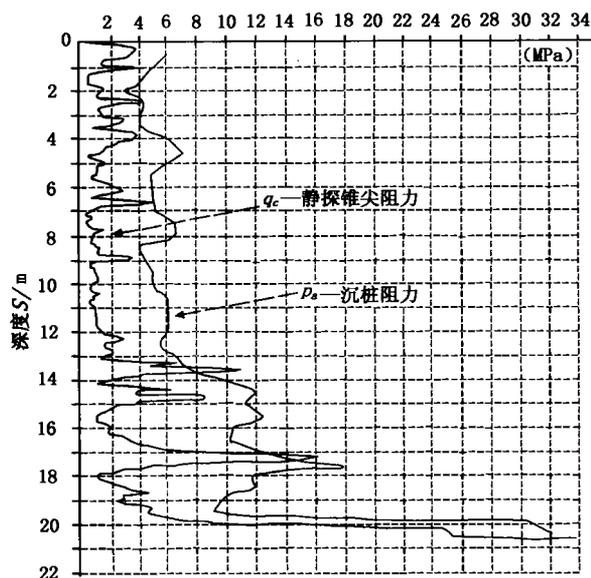


图 1 静探锥尖阻力和实测沉桩阻力曲线

2.1 沉桩阻力分析

根据静力触探试验成果,利用经验公式^[1]

$$P_g = R \cdot S \quad (1)$$

计算桩尖阻力,式中: R 为单位面积桩尖阻力, S 为桩的截面积。

静压法沉桩时,沉桩阻力由桩尖以上一段长度

的桩侧动摩阻力和桩尖阻力组成,在分界面附近,桩尖阻力的增大较锥尖阻力迅速,随着沉桩的继续下行,桩尖继续深入持力层,持力层对桩尖阻力的影响愈来愈大。在开封火电厂技改工程沉桩试验中,当桩尖刚进入砂持力层顶面时, $R = 4.5 \text{ MPa}$, $P_g = 720 \text{ kN}$;而桩尖全断面开始进入持力层时,则 R 迅速增大至 21.0 MPa , $P_g = 3360 \text{ kN}$ (该地区砂持力层静探锥尖阻力一般大于 20.0 MPa)。即桩尖进入持力层 60 cm,桩尖阻力增大了约 5 倍,平均每进入 10 cm,桩尖阻力约增加 700 kN,即使不考虑侧摩阻力的影响,沉桩阻力已经大于 $2200 \sim 4000 \text{ kN}$ (图 1)。因此,沉桩不能继续进行。

2.2 岩土地层特征

在砂土中沉桩,其阻力与砂的自然密度直接关联^[1,2]。疏松的砂受到上部压力时,体积趋向于压缩,砂土趋向密实。当密实的砂土受到上部压力的振动时,其体积发生膨胀,密度减小到某一个与周围压力相适应的最终密度值。当桩端位于匀质砂土中,桩端距上覆(或下卧)软土层有相当距离时,影响桩端阻力的主要因素是砂土类别、密实度及其埋深。然而,当桩端进入细砂持力层远小于临界深度时,端阻力除了受到持力层本身性状的影响以外,其上覆土层的性状对端阻力的发挥也产生重要影响。

在开封火电厂技改工程沉桩试验中,由于桩端持力层中细砂初始密实度较大($D_r = 0.85$),其临界压力 p_c (为 2.5 MPa)远大于砂土持力层在该埋深下的初始围压力($\sigma_3 = 0.075 \text{ MPa}$),桩尖进入砂持力层后,砂土体积膨胀使桩端土向侧面和向上挤出,桩尖附近土体发生整体剪切破坏,即沉桩能够继续下行。按照理论计算^[3],当桩尖接近临界深度时($h_{cp} = 1100 \text{ mm}$),极限端阻力临界值 $q_{cp} = 3600 \text{ kN}$ (图 1),超过压桩机提供的最大压桩力,也就是远大于其桩端动应力,沉桩随即发生困难。在开封火电厂工程中,无论是采用 2200 kN 还是 4000 kN 压桩机,所提供的最大压桩力均小于极限端阻力临界值,亦即小于其桩端动应力。

3 桩承载力分布规律

为了对静压桩工程性状进行检验,采用原位测试方法,主要包括静力触探、静载试验、高应变动力测试等对复合地基承载力的分布规律进行分析。

3.1 静力计算法确定单桩竖向承载力

由于开封火电厂场地岩土均匀性差,表现为部

分土工试验指标值的变异性偏大,而作为主要原位测试手段的静力触探试验,对该类地层有较好的适宜性。对于静压混凝土预制方桩,可以静力触探法估算单桩竖向极限承载力标准值,其计算公式为^[4,5]:

$$Q_{uk} = U \sum q_{sik} l_i + \alpha q_c A_p \quad (2)$$

式中: Q_{uk} 为单桩竖向极限承载力标准值(kN); U 为桩身周边长(m); q_{sik} 为用静力触探比贯入阻力估计的桩周第*i*层土极限侧阻力标准值(kPa); l_i 是桩周计算厚度(m); α 为桩端阻力系数; q_c 为桩端附近静力触探比贯入阻力标准值(kPa); A_p 为桩身横断面积(m²)。计算结果列于表2。

表2反映承载力沿桩身的分布情况。这里分别计算了桩端位于砂持力层顶面和压桩终止时的端阻力。比较二者可知,桩端位于砂持力层与其上覆地层分界面时,受上覆部分良好地层的影响,端阻力已经接近压桩终止时的端阻力。

3.2 原位试验结果分析

根据静载试验、高应变动力测试^[6-8]等原位试验结果(表3)对静压桩的承载力分布进行分析,从静载试验结果(图2)可以看出试桩的 $Q-s$ 曲线形

表2 单桩竖向极限承载力估算表

地 层	桩周各层计算厚度/m	锥尖阻力/MPa	侧摩阻力/kPa	侧阻力/kN	端阻力/kN
层②粉质粘土	5.9		34.5	465.7	/
层③粉质粘土	6.0		32.7	461.5	/
层④粉土	2.6		87.6	313.4	/
层⑤粉质粘土	0.4		36.5	32.5	/
层⑥粉土	2.0		118.2	276.1	/
层⑦粉土	2.0	2.86	107.9	262.4	/
层⑧细砂	0.1	30.83	401.0	23.7	1347.6
合计	20.0	/	/	1835.3	1417.6
占总阻力百分比	/	/	/	56%	44%
单桩极限承载力标准值(kN)	/	/	/	3252.9	

态比较接近,均呈缓变型,属于渐进破坏,破坏特征点不明显,试桩在最大试验荷载下没有达到极限状态,但是回弹量较大。说明试验未达极限荷载时,桩周土主要由于桩身的弹性压缩而发生剪切位移,侧摩阻力主要伴随弹性位移产生。在最大试验荷载作用下,桩尖下密实砂层不容许产生较大沉降,桩端阻力未能够充分发挥。

表3 静载试验和动力测试结果

试桩编号	桩长/m	静载试验			极限承载力标准值/kN	高应变动力测试		
		试验最大荷载/kN	最大沉降量/mm	卸载回弹量/mm		极限承载力/kN	侧阻力/kN	端阻力/kN
S1	20.4	3900	28.77	13.69	3100	3266.0	2087.6	1178.4
S2	20.4	3300	22.52	/		3146.2	1847.4	1298.8
S3	20.6	3000	11.91	9.22		3107.0	1819.5	1287.5

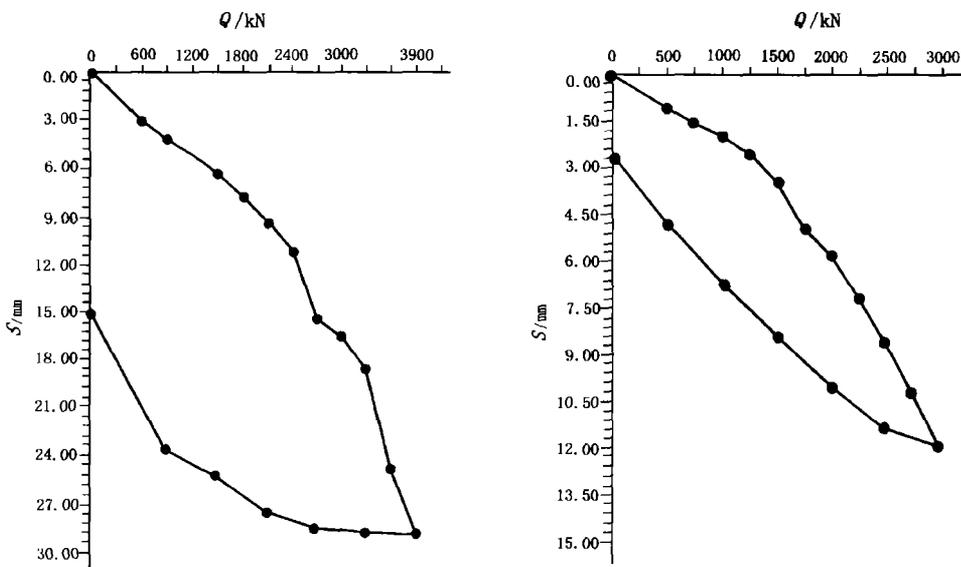


图2 试桩S1、S3的 $Q-s$ 曲线

为充分发挥其承载潜力,可以根据本地区建筑经验,结合动力测试结果,按照建(构)筑物所能承受的最大变形确定其极限承载力。

从表 3 可以看出,在该极限承载力所对应的荷载作用下,侧阻和端阻均已发挥作用,结合静力计算结果,端阻力约发挥其极限端阻力临界值的 55%。侧阻力占总阻力的 60%,端阻力约占总阻力的 40%。

3.3 端阻力变化规律

由端阻力的深度效应分析可知^[1,7-8],当桩端进入均匀持力层的深度小于某一深度时,其极限端阻力一直随深度线性增大;当进入深度大于该深度后,极限端阻力基本保持恒定不变。该深度为端阻力的临界深度 h_{cp} ,该恒定极限端阻力为端阻稳定值 q_{pt} 。对于砂持力层而言,二者均随砂持力层的相对密度 D_r 增大而增大,当有上覆土层时,在端阻稳定值 q_{pt} 一定的条件下, h_{cp} 随上覆土层厚度增加而减小;后者的大小仅与砂持力层的相对密度 D_r 有关,与上覆土层的厚度无关。在本次试验条件下,根据半经验公式计算砂持力层的极限端阻稳定值^[1]: $q_{pt} = 22.5 \text{ MPa}$, 临界深度 $h_{cp} = 1100 \text{ mm}$ 。

对本次试验场地而言,层⑧的密度高、压缩性低、厚度大(一般大于 10.0 m)、分布稳定,其上覆地层层⑥、层⑦均为稳定分布的非软弱土层,而且二者的厚度之和基本上大于 $8d$ (3.2 m),从剪切机理方面看,虽然桩端进入砂持力层的深度较小,但是桩端附近土体具有较高的抗剪强度,有力地约束了滑动面的产生。从另一角度来看,桩端阻力的潜力得到发挥,此时端阻力为极限临界阻力的 55%,并占总阻力的 40%。尽管桩端进入砂持力层较小深度(100~300 mm),却可以在桩端平面附近良好土层的作用下提供较大的端阻力。

4 结语

以开封火电厂技改工程为例,根据现场检测结果,探讨静压桩未能进入持力层设计深度的原因,分析当静压桩桩端位于密实砂持力层与其上覆地层的分界面附近时(即试验荷载未达到破坏时)桩侧阻力与端阻力的分布情况,探讨了静压桩基础方案应用于河流冲积地层机理。静压桩的沉桩深度与地基土的性状密切相关;当桩端位于匀质砂土中,桩端距上覆(或下卧)软土层有相当距离时,影响桩端阻力的主要因素是砂土的类别、密实度及其埋深。而当桩端进入细砂持力层远小于临界深度时,端阻力除了受到持力层本身性状的影响以外,桩端平面以上部分深度范围内的上覆土层的性状对端阻力的发挥也产生重要影响。在开封火电厂技改工程,尽管桩端进入密实砂持力层较小深度,却可以在桩端平面附近良好土层的作用下提供较大的端阻力。

[参考文献]

- [1] 林宗元. 岩土工程治理手册[M]. 沈阳:辽宁科学技术出版社, 1993.
- [2] 《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.
- [3] 天津大学. 地基与基础[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 1993.
- [4] JGJ94-94. 建筑桩基技术规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社.
- [5] GBJ7-89. 建筑地基基础设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社.
- [6] JGJ106-97. 基桩高应变动力检测规程[S]. 北京:中国建筑工业出版社.
- [7] 徐攸在,刘兴满. 桩的动测新技术[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1989.
- [8] 王雪峰,吴世明. 基桩动测技术[M]. 北京:科学出版社,2001.

STUDY ON ENGINEERING PROPERTIES OF THE JACK - UP PILE

HUANG Zhi - quan¹, JIANG Xiao - cheng², ZHANG Chang - cun³

(1. North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Zhengzhou 450008;

2. Henan Electronic Power Survey & Design Institute, Zhengzhou 450006;

3. Tianjin Survey and Design Institute, Tianjin 300222)

Abstract: The causes affecting on the depth of jack - up pile and the law of distribution of bearing capacity, taking the Kaifeng Power Plant of Henan Province as a studying case, are studied based on in - situ tests. The results indicate that pile depth and bearing capacity are affected by the property of foundation soil. In the case study, though the depth of pile is less than that of design, the bearing capacity is enough to satisfy the need of construction.

Key words: Jack - up pile, bearing stratum, bearing capacity