

# 砂土地层中桩基受力特征试验分析\*

许 崧 阎长虹 许宝田

(南京大学地球科学与工程学院 南京 210093)

**摘 要** 我国长江中下游沿岸地基中分布有较厚的砂土层,砂土层是桩基的良好持力层。该地区砂性土埋藏浅,厚度大,往往夹杂粉土或粉质黏土,一般随深度增大,砂土变密实。已有研究成果中,针对桩身穿过多层砂土条件下桩基承载力的研究较少。砂土地基中打入桩试验结果表明,砂性土的状态对打入式预制桩的施工产生很大的影响,在松散或稍密的砂性土中沉桩一般比较容易,而在中密或密实的砂性土中则较为困难。本文通过某电厂工程灌注桩现场静载试验,研究了砂土地基中桩身沉降随荷载变化规律,分析了桩身轴力随地层深度变化特征及不同土层的桩侧摩阻力。设计钻孔灌注桩桩径为 800mm,桩长为 47.2m,桩身混凝土强度等级为 C35,桩身穿过 9 层土层,由现场 3 根桩静载试桩结果可知,荷载与沉降关系呈非线性, $Q-s$ 曲线分为弹性阶段、弹塑性阶段和整体破坏 3 个阶段,15m 深度以下的粉细砂层侧摩阻力对桩身轴力影响较大,15m 以上粉质黏土和淤泥质土对桩轴力影响较小。根据  $Q-s$  曲线确定单桩极限荷载约为 4800~5400kN,平均值为 5201kN,可满足设计要求,地基中下部砂土层承载力较大,砂土侧摩阻力大于黏性土的侧摩阻力,最大可达到 70kPa。所得结论可为该类地基进一步的理论研究及工程设计提供有益的参考。

**关键词** 砂土 桩基 静载试验 桩侧摩擦阻力

中图分类号: TU473.1 文献标识码: A

## IN-SITU TEST AND ANALYSIS ON MECHANICAL CHARACTERISTICS OF PILES IN SANDS

XU Song YAN Changhong XU Baotian

(School of Earth Science and Engineering of Nanjing University, Nanjing 210093)

**Abstract** Large number of engineering practice shows that there are thick sand layers in the foundation along the middle and lower reaches of the Yangtze River, China. The sand layers are good bearing stratum for pile foundations. In the area, the sands are at shallow depths, have big thicknesses, and include silt and silt clay. As the depth increases, the sands become dense. The experimental results of the driven piles indicate that the status of the density of sands has great influence on the construction of the performed piles. The pile-driving operation is easier in the loose or slightly dense sands than in the medium or very dense sands. In this paper, large scale static load tests are carried out for three piles of a power station. The characteristics of the pile settlement with load variation are studied. The axial force and side resistance of the piles are calculated at the same time. The designed diameter of the three piles is 800mm, and their length is 47.2m. The grade of the concrete is C35. Nine soil layers are passed through by the pile body. The results of static loading tests indicate that the relation of the load( $Q$ ) and settle-

\* 收稿日期: 2012-08-20; 收到修改稿日期: 2012-10-31.

基金项目: 2008 年度高等学校科技创新工程重大项目培育资金项目(708043)资助.

第一作者简介: 许崧, 主要从事岩土力学方面的研究工作. Email: xubt@nju.edu.cn

ment(s) is nonlinear. The  $Q-s$  curves can be divided into three stages including the elastic, elastic-plastic and overall damage. The frictional resistance of the sands under 15m depth is much bigger than the silt clay or the muddy soil. The results indicate that the bearing capacities of the piles are all more than 4800kN. It will be provided as reference for future design and research.

**Key words** Sands, Pile foundation, Static load test, Pile side resistance

## 1 引言

通过对长江沿岸多个电力工程的地质勘察资料分析发现,我国长江中下游(特别是江苏省境内)沿岸地表以下约 10m 深度范围为杂填土或软黏土,力学性质差,承载力低,下部分布有厚度为 60~100m 的砂性土层。砂性土层是长江沿岸地区地基中最为广泛分布的一种土层,从南京至上海段来看,长江北岸、南岸砂性土层均有广泛分布,砂性土主要包括粉砂、细砂、中砂、粗砂,局部还存在砾砂,颗粒级配良好,种类较为齐全。因此,在长江中下游地区,对于一些荷载比较大的工程(如长江大桥、电力工程中的烟囱、煤场等),天然地基无法满足承载力要求,一般采用桩基,因此,桩基持力层必然为砂性土层且桩身大部分位于砂性土层当中。

单桩竖向承载力确定的常用方法主要包括:原型试验法、静力学计算法、原位测试法、经验公式法<sup>[1-3]</sup>,单桩沉降计算方法主要包括<sup>[4-6]</sup>;荷载传递法、弹性理论法、剪切位移法、有限单元法以及其他简化方法,其中荷载传递法和有限元法可以说是目前应用比较多的研究超长桩的理论方法。研究成果表明荷载传递法的关键是能否建立一种真实反映桩-土界面的应力、位移关系的传递函数<sup>[7-9]</sup>。设计桩基承载力采用的参数能否反映实际情况,桩基承载力是否满足设计要求,均需通过桩基承载力试验来进行验证。有限元法能同时考虑影响桩基工作性能的如土的非线性性质、固结时间效应、动力效应以及桩的特殊边界约束条件等主要因素,但有限元法计算结果的准确程度主要取决于土的本构关系的准确性,很多学者应用有限元法进行分析时大部分土体模型通常采用 Duncan-Chang 非线性弹性模型,桩土界面采用 Goodman 接触面单元,已有研究成果表明,非线性弹性模型其实并不能完全真实地反映土的本构关系<sup>[8-11]</sup>。

罗耀武等<sup>[10]</sup>结合界面剪切试验探讨了桩-土界面特性对抗拔桩荷载-位移曲线、极限承载力及残余承载力的影响,并采用模型试验的方法研究了桩

-土界面特性对砂土地基中抗拔桩承载特性的影响,研究成果表明抗拔桩达极限承载力的位移随界面粗糙程度的增加而增大。迟明杰等<sup>[11]</sup>在边界面塑性理论的框架内,把相变状态参量引入到剪胀方程以及塑性硬化模量中,并建立了一个能够描述砂土剪胀性以及循环特性的本构模型,通过采用一套参量可以模拟不同的初始孔隙比、不同围压及排水(或不排水)条件下单调(或循环)加载的应力-应变关系。

张昭<sup>[12]</sup>在 Meyerhof 等研究的基础上对单向荷载下砂性土中单桩的承载机理进行了研究,其研究成果表明,当垂直荷载水平较小时,桩端沉降小,荷载-沉降近似成线性变化;随着荷载的增大,桩端沉降急剧增大,两者关系表现为非线性。当桩承受荷载小于桩的极限摩阻力时,桩顶的荷载主要由桩侧摩阻力承担;当荷载超过桩的极限摩阻力后,由于摩阻力的下降以及桩顶荷载的增加,桩端承受的荷载急剧增大。此外,随着砂性土密实度的增大,单桩承载力有所提高,在相同荷载水平下,桩的沉降量随着砂土密实度的增大而逐渐减小。

针对砂性土中桩的研究较少,特别是研究砂性土的物理、力学性质对桩-土作用的影响时大多把桩周土体看作单一的土层来研究,当桩长较大时,这种情况几乎是不可能出现的。本文根据江苏沿江地区某电厂进行的灌注桩静载试验结果,对砂土中灌注桩基的承载性状进行了分析,结果将为该地区类似桩基础的设计和施工提供参考。

## 2 工程概况

江苏靖江某发电厂位于靖江市东南方向距市中心约 12km 的斜桥镇境内,是规划容量  $2 \times 660 \text{ MW} + 4 \times 1000 \text{ MW}$  的大型火力发电厂,并保留再扩建的可能。其中一期工程建设  $2 \times 660 \text{ MW}$  超临界燃煤发电机组。由于天然地基无法满足建(构)筑物对沉降控制的要求,故主厂房、烟囱、圆形煤场等重要生产建(构)筑物以及附属辅助厂房均需采用桩基础。

根据《电力工程地基处理技术规程》等规程、规

表 1 地基土体主要参数  
Table 1 The main parameters of the soils

层 序 号	地层名称	厚度/ m	含水率 $\omega$ /(%)	重度 $\gamma/\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$	压缩模量 $E_{s1-2}/\text{MPa}$	快剪		静力触探试验	
						$c/\text{kPa}$	$\phi/(\circ)$	锥尖阻力 $q_c/\text{MPa}$	侧壁摩阻力 $f_s/\text{MPa}$
1	粉质黏土	1.5	31.0	18.4	5.5	12	14.0	1.12	0.038
2	淤泥质粉质黏土	4.0	38.7	17.7	3.5	10	16.5	0.48	0.010
3	粉质黏土夹粉土	3.9	34.8	18.1	4.5	10	16.5	0.90	0.22
4	粉土	3.6	30.8	18.2	5.0	9	17.5	3.74	0.047
5	粉质黏土夹粉土	1.4	33.5	18.3	4.0	10	19.0	1.15	0.031
6	粉细砂	12.6	24.6	18.5	11.5	10	31.0	10.25	0.134
7	粉砂夹粉土	1.3	25.0	18.3	9.5	9	25.0	5.88	0.088
8	粉细砂夹粉土	14.7	25.9	18.4	12.0	7	30.0	11.20	0.148
9	粉细砂	50.0	28.9	18.4	10.0	8	29.5	10.06	0.145

范的有关要求,应进行桩基静载试验工作,以便获得重要的设计参数,并能够起到优化设计方案的作用。

厂址区位于长江边,地貌单元主要为河漫滩,地形平坦,地势较低。地基土层主要由第四系全新统-上更新统冲积、湖积成因的黏性土层、粉土层、砂性土层及黏性土、粉土、砂性土的夹层、互层组成。根据地基土层组的类别、成因、埋深及性状特征,涉及该工程桩基范围内的主要土层有9层(表1)。

### 3 砂土地基中桩基承载力特征

根据作者所从事的长江下游多个大型电厂工程勘察工作的结果发现,该地区砂性土的特征主要有:(1)埋藏不深,层厚度大;(2)粒径自上至下逐渐变大,由粉砂、细砂逐渐过渡为粗砂、砾砂;(3)纯砂较少,往往夹杂粉土或粉质黏土等薄层黏性土,局部呈互层状;(4)状态一般随深度逐渐变好,由松散、稍密渐变为中密、密实,局部存在软弱夹层。

不同状态的砂性土在桩基的承载性能方面存在较大的差别。一般来说松散或稍密状态的砂层不宜作为桩基的持力层;中密及密实的砂性土的桩侧摩阻力远大于松散、稍密的砂性土。通过对江苏地区大量砂性土层的试桩成果的分析 and 归纳,得到不同状态砂性土对应的桩基侧摩阻力设计参数(表2)。

不同状态的砂性土对于桩基的施工(尤其是打入式预制桩的施工)也造成不同程度的影响。

江苏国信某发电厂工程,试桩的桩型为外径600mm、壁厚110mm的预应力高强混凝土管桩,采用D80型筒式柴油锤沉桩,沉桩过程中需穿越深厚的砂性土层,从上至下依次为:粉砂(稍密状态)、粉

表 2 不同状态砂性土对应的桩基设计参数

Table 2 Limit frictional resistance of the sands under different status

状态	极限侧阻力标准值	
	预制桩 $q_{sik}/\text{kPa}$	灌注桩 $q_{sik}/\text{kPa}$
松散	26 ~ 32	24 ~ 30
稍密	34 ~ 40	32 ~ 38
中密	58 ~ 64	56 ~ 62
密实	76 ~ 82	74 ~ 80

细砂(中密状态)、粉砂夹粉土(稍密状态),直至桩基持力层(粉细砂夹粉土,中密-密实状态)。当穿越稍密的粉砂及粉土时,每米平均锤击数在50击左右;穿越中密的粉细砂时,每米平均锤击数在70击左右;进入粉细砂夹粉土后,每米平均锤击数在100击以上,局部出现锤击数过大而难以沉桩的现象。

大唐南京某电厂工程试桩桩型也采用D80型筒式柴油锤沉桩,沉桩过程中需依次穿越松散-稍密、稍密-中密、中密、中密-密实状态的砂性土层组,其中以中密-密实状态的砂性土层组作为桩基持力层。当穿越松散-稍密状态的砂性土层组时,每米锤击数在20~40不等;穿越稍密-中密状态层组时,每米锤击数在50~80击不等;穿越中密状态层组时,每米锤击数在70~110击不等;当进入中密-密实状态的砂性土层组(持力层)后,每米锤击数均大于150击,沉桩十分困难。

通过上述工程实例不难看出,砂性土的状态对打入式预制桩的施工产生很大的影响,在松散或稍密的砂性土中沉桩一般比较容易,而在中密或密实的砂性土中则较为困难。在工程桩的施工中,往往

出现沉桩难以到位的现象,增加了费用,降低了效率,严重时甚至需采用截桩的方式解决无法沉桩的问题,截桩的直接后果就是桩长减少,单桩承载力下降。对于工程设计而言,无疑增加了风险。

## 4 试验方法及要求

根据承载力要求,设计钻孔灌注桩桩径为800mm,桩长47.2m,桩身混凝土强度等级C35,以9层粉细砂为桩端持力层。现场选取3根桩(编号S1~S3)进行静载试验,预估单桩竖向抗压极限承载力6300kN。试验最大加载量预定为8400kN,是预估单桩竖向抗压极限承载力的1.33倍。

本次试验采用锚桩法,锚桩(M1~M8)的桩径为800mm,桩长46.5m,桩顶与地面平齐,主筋高出桩顶1.0m。

试验严格按照《建筑基桩检测技术规范》(JGJ106-2003)和《电力工程地基处理技术规程》(DL/T5024-2005)中的要求执行。

## 5 试验结果

### 5.1 桩受力变形特征

静载试验前先采用低应变对桩身完整性进行检测,结果发现桩身无明显缺陷,均符合合格标准。然后再进行静载试验,根据试验结果可得到各桩的 $Q-s$ 、 $s-lgt$ 曲线,这里仅列出其中最具代表性的S1号桩的静载 $Q-s$ 、 $s-lgt$ 曲线(图1、2)。

S1试桩:在4200kN荷载作用下,累计沉降量仅为17.90mm,变形梯度比 $\Delta S_{4200}/\Delta S_{3500} = 5.08$ ,由于桩身完整,因此,判断该桩桩底可能存在沉渣,造成 $Q-s$ 曲线沉降突增。根据规定,该类型桩荷载试验仍可继续加载,在4200~5600kN荷载作用下,各级的观测时间很长且每级沉降量越来越大,在7000kN加载过程中,沉降量很快突破110mm,故终止试验。

S2试桩:与S1有相似之处,陡降段的起始点延迟到5400kN,对应的沉降量为18.52mm,且在6000kN荷载作用下经过69min沉降没有收敛趋势,故终止试验。

S3试桩:在4200kN荷载作用下,变形梯度比 $\Delta S_{4200}/\Delta S_{3600} = 8.3$ ,累计沉降量仅为27.44mm,在5400kN荷载作用下,经过750min沉降没有收敛趋势,故终止试验。3根试桩的极限承载力分析见表3。

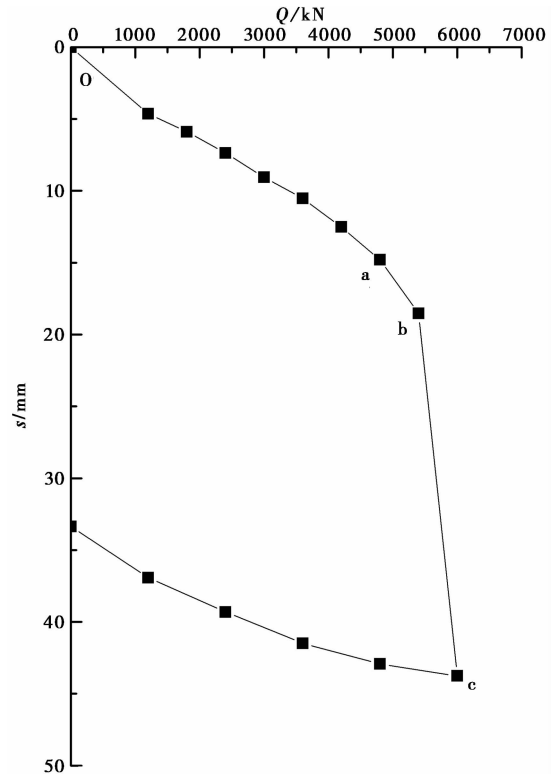


图1 S1桩 $Q-s$ 曲线

Fig. 1  $Q-s$  curve for S1 pile

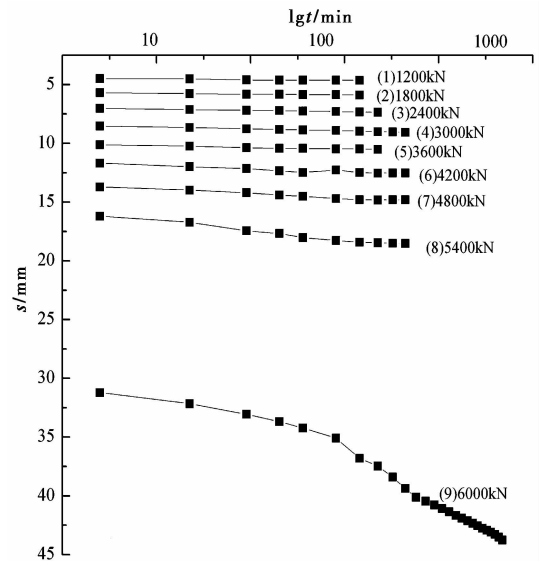


图2 S1桩 $s-lgt$ 曲线

Fig. 2  $s-lgt$  curves for S1 pile

3根桩的极限承载力平均值为5201kN,极差为603kN,小于平均值的30% ( $5201\text{kN} \times 0.3 = 1560\text{kN}$ ),取其平均值为单桩竖向抗压极限承载力,即5201kN,当取安全系数 $k=2$ 时,单桩竖向抗压承载力特征值为2600kN。

表3 桩基竖向抗压静荷载试验成果汇总表

Table 3 Results of vertical static loading tests for piles

试桩编号	S1	S2	S3
最大加载量/kN	7000	6000	5400
极限承载力/kN ( $Q-s$ ( $s=50\text{mm}$ 对应的荷载))	5403	>5400	>4800
$s-lgt$	5600	5400	4800
平均值/kN	5201		

由上述试桩结果可知,荷载与沉降关系呈非线性, $Q-s$ 曲线分为弹性阶段、弹塑性阶段和整体破坏3个阶段(以图1为例),与文献[13]所研究软黏土中桩的承载特性基本一致。

3个阶段特性分别为:

(1)弹性阶段(oa段):桩顶荷载小于比例极限,该阶段土体变形表现为弹性变形, $Q-s$ 曲线呈线性关系。

(2)弹塑性变形阶段(ab段):曲线呈非线性关系,曲线斜率逐渐增大,土体在荷载增量相同条件下沉降越来越大,土体中局部开始出现塑性变形,但该阶段 $s-lgt$ 曲线变化平缓,表明土体沉降比较稳定。

(3)整体破坏阶段(bc段):土体出现整体破坏,即使荷载不再增加,沉降量仍急剧增加, $s-lgt$ 曲线向下弯曲。

## 5.2 桩土相互作用力

采用钢筋计对桩身应力进行观测,应力观测与荷载试验同步进行,待每一级沉降稳定时测读钢筋计的频率读数,得桩身轴力测试结果(图3)。

S1~S3桩身轴力沿深度变化趋势基本一致,在15m深度处有明显的拐点(15m深度以上主要为黏性土层),表明15m深度以下的粉细砂层侧摩阻力对桩身轴力影响较大,15m以上地层,特别是上部粉质黏土和淤泥质土对轴力影响较小。

根据试验结果计算得桩长范围各土层桩侧摩阻力取平均值(表4)。6~9层砂土中侧摩阻力远大于1~5层黏性土层或粉土层。砂土的侧摩阻力大于黏土层的侧摩阻力,表明对该工程而言,砂土层承载力大,并具备厚度大的优势,将是最主要的桩基持力层。

## 6 结论

(1)通过对长江中下游多个电厂工程地基的砂

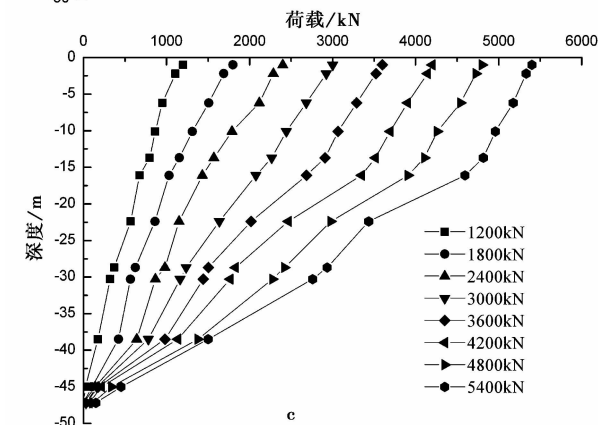
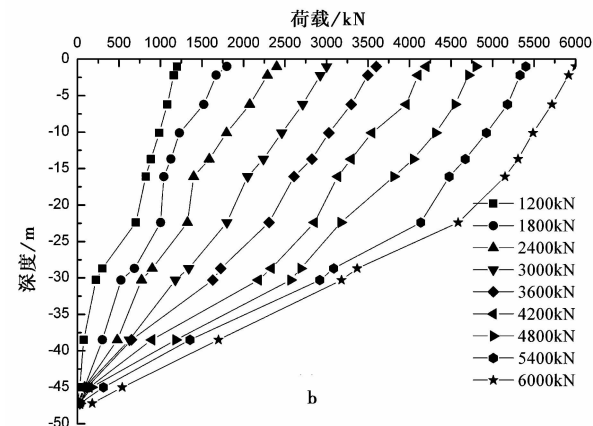
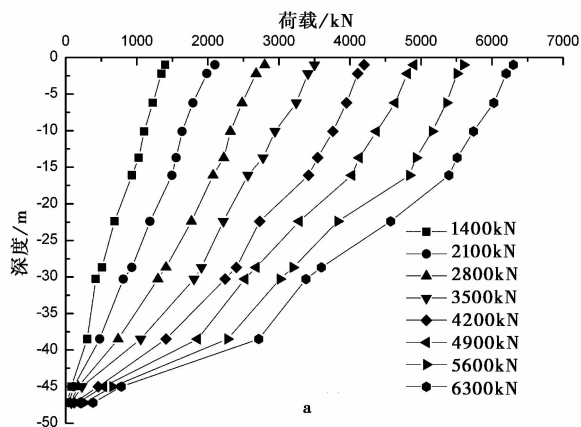


图3 桩身轴力

Fig. 3 Axial forces of the piles

a. S1 桩; b. S2 桩; c. S3 桩

表4 桩侧摩阻力

Table 4 Frictional resistance for the piles

土层	2	3	4	5	6	7	8	9
摩阻力/kPa	21	35	26	37	55	48	67	70

土中打入桩试验发现,砂性土的状态对打入式预制桩的影响很大,在松散或稍密的砂性土中沉桩一般比较容易,而在中密或密实的砂性土中则较为困难。

(2)通过单桩静载试验可从宏观角度研究竖向

荷载作用下单桩的沉降特征、单桩承载力、摩阻力的工作性状。

(3) 本次试验根据  $Q-s$  曲线确定单桩极限载荷约为 4800 ~ 5400kN, 平均值为 5201kN, 可满足设计要求。

(4) 桩身轴力和桩侧摩阻力测试分析结果表明, 地基中下部砂土层承载力较大, 砂土侧摩阻力大于黏性土的侧摩阻力, 最大可达到 70kPa。

## 参 考 文 献

- [1] 蒋建平. 大直径灌注桩竖向承载性状[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2007.  
Jiang Jianping. Study on Bearing Properties of Large Diameter Cast-in-Place Piles. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2007.
- [2] 中国建筑科学研究院. JGJ 94-2008 建筑桩基技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.  
China Academy of Building Research. JGJ 94-2008 Technical Code for Building Pile Foundations. Beijing: Architecture and Building Press, 2008.
- [3] 蔡邦国, 陈德银. 嵌岩桩桩底沉渣在桩基检测信号中的反应[J]. 土工基础, 2005, 19(5): 89 ~ 90.  
Cai Bangguo, Chen Deyin. Reflection of residence around inserted pile bottom in pile foundation checking signals. Soil Engineering and Foundation, 2005, 19(5): 89 ~ 90.
- [4] 周健, 张刚, 曾庆有. 主动侧向受荷桩模型试验与颗粒流数值模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(5): 650 ~ 656.  
Zhou Jian, Zhang Gang, Zeng Qingyou. Model tests and PFC2D numerical analysis of active laterally loaded piles. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(5): 650 ~ 656.
- [5] 刘松玉, 席培胜, 储海岩, 等. 双向水泥土搅拌桩加固软土地基试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(3): 560 ~ 564.  
Liu Songyu, Xi Peisheng, Chu Haiyan, et al. Research on practice of bidirectional deep mixing cement-soil columns for reinforcing soft ground. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(3): 560 ~ 564.
- [6] 郑刚, 刘双菊, 伍止超, 等. 刚性桩复合地基在水平荷载作用下工作性状的模型试验[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(8): 865 ~ 868.  
Zheng Gang, Liu Shuangju, Wu Zhichao, et al. Experimental study on behavior of rigid pile composite ground under horizontal load. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(8): 865 ~ 868.
- [7] 蒋建平, 汪明武, 高广运. 桩端岩土差异对超长桩影响的对比研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(18): 3190 ~ 3195.  
Jiang Jianping, Wang Mingwu, Gao Guangyun. Contrastive study on influence of difference of pile end rock-soil layer on super-long pile. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(3): 3190 ~ 3195.
- [8] 戴国亮, 龚维明, 程晔, 等. 自平衡测试技术及桩端后压浆工艺在大直径超长桩的应用[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(6): 690 ~ 694.  
Dai Guoliang, Gong Weiming, Cheng Ye, et al. Application of self-balanced testing and post grouting to large diameter and super-long piles. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(6): 690 ~ 694.
- [9] 何剑. 泥岩地基中灌注桩竖向承载性状试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(10): 1573 ~ 1577.  
He Jian. Testing study on vertical bearing properties of cast-in-place pile in muddy rock foundation. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(10): 1573 ~ 1577.
- [10] 罗耀武, 胡琦, 凌道盛, 等. 桩-土界面特性对砂土地基中抗拔桩承载特性影响的模型试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(3): 722 ~ 727.  
Luo Yaowu, Hu Qi, Ling Daosheng, et al. Model experimental research on effects of properties of interface between piles and sand on bearing behavior of uplift piles in sand. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(3): 722 ~ 727.
- [11] 迟明杰, 赵成刚, 李小军. 剪胀性砂土边界模型的研究[J]. 工程地质学报, 2008, 16(3): 415 ~ 420.  
Chi Mingjie, Zhao Chenggang, Li Xiaojun. A bounding surface plasticity based constitutive model for dilatant sand. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(3): 415 ~ 420.
- [12] 张昭. 砂土中桩基础沉降机理宏观细观研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.  
Zhang Zhao. Macro-scale and Meso-scale Study of Settlement Mechanism of Pile Foundations in Sand. Shanghai: Tongji University, 2007.
- [13] 陈安. 软黏土中桩土共同作用模型试验与机理研究[D]. 长沙: 中南大学, 2006.  
Chen An. Model Tests and Study on Mechanism of Pile-Soil Interaction in Soft Clay. Changsha: Central South University, 2006.