

桩侧后注浆抗拔桩技术的研究与应用

王卫东¹, 吴江斌¹, 王向军¹, 黄茂松²

(1. 华东建筑设计研究院有限公司地基基础与地下工程设计研究所, 上海 200002; 2. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘要: 桩侧后注浆抗拔桩是指灌注桩成桩后通过桩侧预埋注浆装置注浆, 改变桩身与桩周土的接触界面特性, 从而提高抗拔承载力。介绍了桩侧后注浆抗拔桩的侧注浆装置、施工工艺参数和桩型特点。基于现场足尺试验、离心模型试验、剪切面试验等对桩侧后注浆抗拔桩、扩底抗拔桩和等截面抗拔桩进行对比, 初步认识了桩侧后注浆抗拔桩的承载能力、承载变形特性及桩土接触界面的力学特性和注浆增强机理。结合工程实践提出了估算桩侧后注浆抗拔桩承载力的增强系数法和荷载传递法。介绍了桩侧后注浆抗拔桩技术在上海世博 500 kV 地下变电站和上海白玉兰广场工程的应用。

关键词: 桩侧后注浆抗拔桩; 现场足尺试验; 离心模型试验; 剪切面试验; 荷载传递法

中图分类号: TU473 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2011)S2-0437-09

作者简介: 王卫东(1969-), 男, 辽宁人, 工学博士, 教授级高级工程师, 一级注册结构工程师, 从事高层建筑地基基础、地下工程、深基坑工程的设计与研究。E-mail: weidong_wang@ecadi.com。

Study and application of side-grouting uplift piles

WANG Wei-dong¹, WU Jiang-bin¹, WANG Xiang-jun¹, HUANG Mao-song²

(1. Department of Underground Structure & Geotechnical Engineering, East China Architecture Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200002, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Compared to the usual bored uplift piles, the side-grouting bored uplift piles are more effective in providing the uplift resistance by changing the interface property between the pile and the soil. The main features of the side-grouting system, construction technology and pile parameters are presented. Based on the full-scale tests, centrifugal model tests and shear tests, comparisons among the side-grouting uplift piles, base-enlarged uplift pile and straight shaft uplift pile are carried out. Some initial acknowledgement is attained, such as the bearing capacity, characteristics of load-displacement relation, interface mechanics between the pile and the soil and the strengthening mechanism of grouting. According to the engineering practice, two methods to calculate the bearing capacity of the side-grouting uplift piles are introduced, that is, grouting-strengthening empirical method and load-transfer method. The application cases of the side-grouting uplift piles in Shanghai EXPO 500 kv underground transformer substation and the project of Baiyulan Square are introduced.

Key words: side-grouting uplift pile; full-scale test; centrifuge model test; shear test; load transfer method

0 引言

在我国沿江、沿海地区, 地下水丰富、水位埋深通常在地表下 1~3 m, 随着地下空间开发向深层和大型发展, 地下工程在地下水作用下的抗浮问题越来越突出。从地下工程抗浮技术来说, 一般有增加自重、释放水浮力和设置抗拔锚杆或抗拔桩等方法, 设置抗拔桩仍为当前最普遍采用的方式。相对常规等截面桩, 扩底桩和桩侧后注浆桩等新型抗拔桩以较少材料的增加而大幅提高承载力, 应用前景广阔。2000 年以来, 上海、杭州、天津等地开展了扩底抗拔桩的探索工作, 笔者结合现场足尺试验、数值分析与工程实践对软土

地区扩底抗拔桩进行了一些有益的探索, 并逐步得到推广和应用^[1-5]。

但对于砂层, 扩孔的施工与检测变得非常困难; 且当桩长较长时, 扩底桩更换扩底钻头也会影响工效, 使得扩底抗拔桩的应用受到了一定的限制, 桩侧后注浆抗拔桩则表现出特有的优势。桩侧后注浆抗拔桩是指灌注桩成桩后通过预设在桩身内的注浆导管和桩侧注浆器对桩身若干断面进行注浆, 改变桩身与桩周土的接触界面特性, 从而提高承载力。笔者于 2006 年依

托上海世博 500 kV 地下变电站工程开展了尝试^[6], 并对桩侧后注浆抗拔桩的设计分析方法、施工技术和工程应用开展了研究工作。

本文总结了桩侧后注浆抗拔桩的侧注浆施工工艺与桩型特点; 基于现场足尺对比试验、离心模型试验、剪切实验等试验研究, 初步认识了桩侧后注浆抗拔桩的承载变形特性; 结合工程实践提出估算桩侧后注浆抗拔桩承载力的增强系数法和荷载传递法; 介绍了桩侧后注浆抗拔桩技术在上海世博 500 kV 地下变电站和上海白玉兰广场工程的应用实例。

1 桩侧后注浆抗拔桩的型式与特点

1.1 桩侧注浆装置

桩侧后注浆采用预埋管的注浆方式, 按桩侧注浆装置与注浆方式可分为环向点式注浆和纵向线式注浆, 两种注浆方式的要点和特点如下。

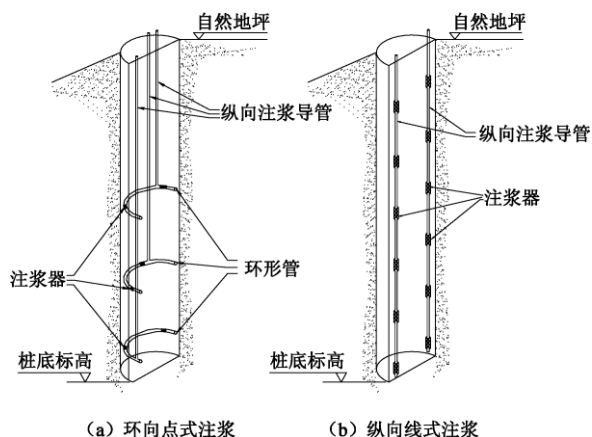


图 1 桩侧注浆方式

Fig. 1 Mode of side-grouting

(1) 环向点式注浆

将注浆器沿桩周环向布置, 通过不同标高多个环形注浆断面实现整个桩身注浆^[7]。桩侧注浆装置由纵向注浆导管、环形管及注浆器组成, 见图 1 (a), 注浆器通过环形管连接并沿环向对称布置。纵向注浆导管是连接地面注浆系统与环形管的过渡管材, 一般采用内径为 25 mm 的标准黑铁管, 注浆导管应连接牢固和密封, 与钢筋笼主筋绑扎固定并一起下放至孔内。环形管采用高压复合软管, 实现注浆器的连接, 同时与纵向注浆导管连通。通常每个环形管上沿圆周对称设置 4 个注浆器, 注浆器为单向阀式构造。注浆时, 浆液由纵向注浆导管经环形管通过注浆器的单向阀直接注入土层。由于每一个环形注浆断面需对应一个注浆导管与地面注浆装置连通, 因此注浆断面不宜设置过多, 应通过加大注浆量提高注浆断面的影响范围。

桩侧后注浆断面的设置与注浆量应综合地层条

件、桩长和承载力增幅要求等因素确定。首道注浆断面通常可在桩顶 9 m 以下, 注浆断面间距可取 9~12 m, 当要求承载力增幅较大时注浆断面数量取小值; 当位于粗粒土层时, 宜将注浆断面设置于粗粒土层下部。单一断面注浆量主要根据桩径确定, 上海地区桩侧注浆单一断面的水泥用量为 0.4~0.6 t, 桩径大时取大值。环向点式注浆为目前国内普遍采用的方式。

(2) 纵向线式注浆

桩侧注浆装置由纵向注浆导管及注浆器组成, 见图 1 (b)。根据桩径的大小, 沿桩周对称设置 2~3 根纵向注浆导管, 注浆导管从地面通至桩端, 在导管上每隔 1~2 m 设置桩侧注浆器。注浆时, 在纵向注浆导管内插入可上下移动的可控注浆芯管, 实现对导管上不同标高桩侧注浆器的注浆。由于在纵向注浆导管内插注浆芯管, 导管内径通常大于 50 mm。与环向点式注浆相比, 纵向线式注浆特点是通过一个注浆导管便可实现整个桩长的线式注浆, 布设导管数量少、沿桩长注浆点密集, 注浆施工可控性好, 注浆效果更均匀和稳定。纵向线式注浆方式在国内较少采用, 是进一步发展的方向。

1.2 注浆工艺与施工控制

除桩侧注浆阀外, 桩侧后注浆抗拔桩在注浆系统与施工参数上皆与桩端后注浆没有明显差异。桩侧注浆的施工难点在于侧注浆阀的构造、预埋和保护。桩侧注浆施工参数主要包括浆液配方、泵压、泵量、浆液注入量等, 其中泵压包括开塞压力、注浆压力、终止压力等。注浆水泥宜采用 P.O42.5 水泥, 注浆水灰比为 0.6~0.7。一般成桩后 12 h 进行清水劈裂对注浆阀进行开塞, 当压力超过 4 MPa 时视为管路不通。后压浆起始作业时间一般于成桩后 5~7 d 进行, 具体时间可视施工情况与经验进行调整。注浆流量的选择要满足渗透注入, 以 30~50 L/min 为宜, 同时要参照压力的变化, 在恒定注入压力比较低的情况下, 可适当加大泵量, 否则应以低值注入, 桩侧注浆压力不宜大于 1.5 MPa。后注浆采用注浆量和注浆压力双控方法, 以水泥注入量控制为主, 泵送终止压力控制为辅。当注浆量达设计要求时, 可终止注浆; 当水泥注入量达到预定值的 70%, 泵送压力超过 4.0 MPa 并持荷 3 min 也可停止注浆。

一般宜采用自上而下的注浆顺序, 即先注最上部断面, 待其有一定的初凝强度后, 再依次往下注浆, 通常各断面的注浆间隔时间不宜小于 1 h。这种方式可以最大限度地保证每一个注浆断面所注浆液能分布在预定的范围内。

1.3 桩侧后注浆抗拔桩的特点

受泥浆护壁钻孔桩施工工艺的影响, 成孔过程中

桩周土体应力释放、侧壁土层受泥浆浸泡松软、泥浆颗粒吸附于孔壁形成泥皮等成为降低桩侧摩阻力的主要因素。桩侧注浆浆液通过渗透充填、挤密、固结作用,对桩周土加固,同时浆液沿着桩土接触面向上“返浆”,从一定程度上削除泥皮带来的不良效应,使桩侧摩阻力得到提高,从而较大地提高抗拔承载能力。桩侧后注浆适用于黏性土、粉土和砂土,适用范围较广。桩侧注浆施工可以与桩基施工交叉进行,不占用总工期。当桩长较长时,扩底桩施工调换扩孔钻头所需的时间也就更长,从而影响工期。当桩身下部位于深厚砂性土层,扩底抗拔桩的扩孔施工质量不易保证,而砂层中注浆的效果却较好。因此,相对于扩底抗拔桩,桩侧后注浆抗拔桩的适用性强、工效高,特别是对于桩径和桩长相对较大的情形,其施工可行性和承载力的提高比例都更有保证。

2 试验研究与承载特性

依托实际工程,开展了桩侧后注浆抗拔桩、扩底抗拔桩和等截面抗拔桩的抗拔承载力足尺对比试验^[8],基于对桩身轴力的量测初步认识了桩侧后注浆抗拔桩桩侧摩阻力的分布与发挥特性。联合同济大学开展了离心模型试验和剪切面试验^[9],离心模型试验开展了桩侧后注浆抗拔桩、扩底抗拔桩和等截面抗拔桩 3 种桩型抗拔极限试验,研究不同桩型的极限承载能力;剪切面试验则开展了模拟注浆与未注浆桩土接触界面的大型剪切试验^[9],深入认识桩侧注浆加固机理及桩土接触面界面的力学特性。

2.1 现场足尺试验

试桩场地位于上海虹桥综合交通枢纽的西交通广场,包括等截面抗拔桩、扩底抗拔桩和桩侧后注浆抗拔桩 3 种桩型,试桩的剖面及相应土层如图 2 所示。其中常规等截面桩 2 组、桩侧注浆桩 4 组、扩底桩 3 组。3 种桩型的桩径皆为 700 mm,桩长约 50 m,桩侧后注浆抗拔桩设置了 4 道注浆断面,最下面一道注浆断面距桩端 5 m,往上每间隔 9 m 设置一道注浆断面,每道断面水泥注入量为 0.5 t,扩底桩的扩底直径为 1400 mm,扩大头高度 2 m。所有试桩皆埋设沉降杆进行桩端位移的量测,桩身内力的测试则采用了光栅或光纤传感器,测点多,能全面了解不同埋深土层的侧摩阻力分布。

由于各试桩均未达到极限状态,不能直接比较各桩型的抗拔承载能力,下文着重就 3 种桩型抗拔桩的侧摩阻力发挥与分布特性进行分析。

(1) 桩侧摩阻力沿桩身分布

在各级荷载作用下,桩侧后注浆抗拔桩侧摩阻力

的分布沿着桩长较为均匀,由于未加载至极限,在最大加载值下侧摩阻力呈中间大、桩顶和桩端部位略小的规律。图 3 为最大加载值下 3 种桩型侧摩阻力数值及与规范建议值的比较。桩顶以下 20 m 的浅部土层,桩侧后注浆桩的侧摩阻力值较未注浆桩有明显提高,两者的比值约 1.36~1.93,且离桩顶越近,桩侧摩阻力发挥越充分,提高系数也越大。而桩顶以下 30~50 m 的深部土层,桩侧后注浆抗拔桩的侧摩阻力小于未注浆桩,表明在当前荷载下并未充分发挥,显示桩侧注浆桩还有较高的抗拔承载潜力。而扩底抗拔桩在扩大头对周边土体的旁压作用下,桩身下部侧摩阻力远大于另两种桩型,表明扩大头的作用已得到较大发挥。这也在一定程度上反映了桩侧后注浆抗拔桩与扩底抗拔桩各自的荷载传递机理特性。

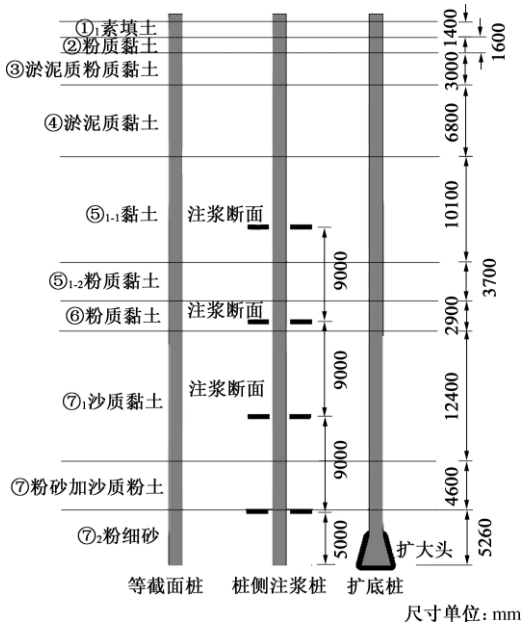


图 2 试桩剖面

Fig. 2 Profile of test piles

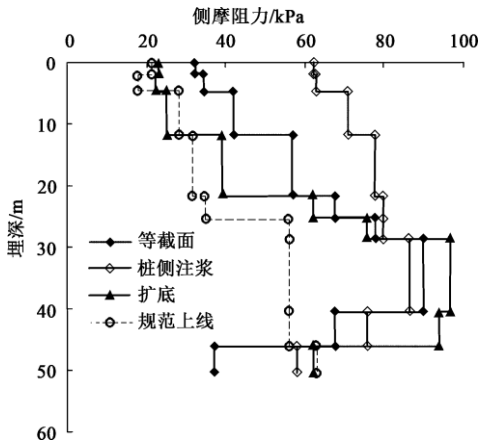


图 3 不同桩型抗拔桩平均桩侧摩阻力比较

Fig. 3 Comparison of side resistance distributions among three kinds of uplift piles and recommendation values of code

(2) 桩侧摩阻力的发挥

从桩侧后注浆抗桩桩典型土层桩侧摩阻力 τ 与桩土相对位移 w 曲线图 4 可以看出。当桩土之间的相对位移较小时 ($<2\text{ mm}$), 各土层的 $\tau-z$ 曲线基本表现为线性增长模式。当桩土相对位移达到 5 mm 左右时, 浅层土②粉质黏土、③淤泥质粉质黏土、④淤泥质黏土出现了明显的非线性状态。桩土相对位移为 15 mm 作用时, 埋深较深的土层⑤粉质黏土、⑥粉质黏土、⑦粉细砂层也出现了非线性现象, 而浅层土的侧摩阻力达到极限状态, 并且出现了明显的软化。

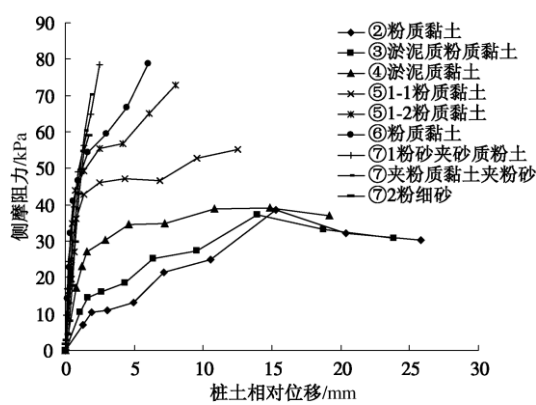


图 4 桩侧后注浆桩各土层 $\tau-z$ 曲线

Fig. 4 $\tau-z$ curves of each layer of side-grouting uplift piles

根据桩侧注浆桩与未注浆桩的比较, 产生相同的桩土相对位移, 桩侧注浆桩中的侧摩阻力更大; 而达到极限侧阻力时, 桩侧注浆中所需的桩土相对位移也相对更大。表明了注浆对桩土界面力学行为的改变。

2.2 离心模型试验

前述足尺对比试验中由于未进行至极限破坏, 各桩型静载试验均达到了较高的荷载水平, 无法判断各桩型极限承载力的大小关系。故而利用同济大学 TLJ-150 离心机开展了等截面抗拔桩、扩底抗拔桩、桩侧后注浆抗拔桩 3 种类型抗拔桩的极限承载力离心模型对比试验, 见图 5。

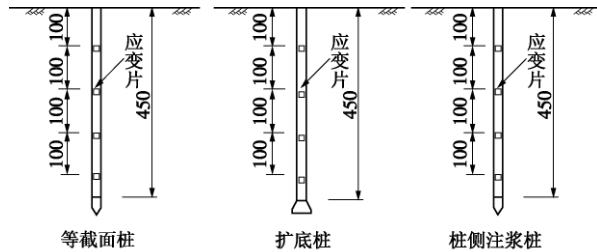


图 5 3 组离心模型试验示意图

Fig. 5 Centrifuge model tests on 3 different kinds of uplift piles

采用铝合金空心管制作 3 类抗拔桩。等截面桩通过涂抹水泥浆来模拟桩身粗糙度; 扩底桩桩端利用螺

栓将等截面段和圆台扩大头连接; 桩侧注浆桩在等截面桩身沿桩身圆周方向均匀打 4 个注浆出口, 共 4 排, 沿桩底向间距分别为 $78, 50, 50, 50\text{ mm}$, 出浆孔直径 4 mm 。本此试验采用的离心加速度为 $80g$, 则根据离心试验的相似比, 其模拟的原型尺寸如下: 桩身直径为 1.2 m , 桩长为 38 m , 其中扩底桩扩大头的直径为 3.6 m , 扩大头段长 2.2 m 。

试验用土取自上海长兴岛第②₃ 层灰色砂质粉土, 土体基本处于松散状态。根据地基土的最大干密度和最优含水率, 将土料按每层 $4\sim6\text{ cm}$ 填筑, 击实到规定的密度。地基土在 $80g$ 下固结 60 min 后的主要物理力学指标如表 1。其中地基土的固结不排水强度指标通过室内三轴试验确定^[10]。

表 1 模型地基土的主要物理力学指标

Table 1 Main physical and mechanical indices of model soils					
土名	含水率 /%	密度 /(kg m^{-3})	孔隙 比	固结不排水强度	
				c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$
灰色砂质粉土	9.75	1490	0.94	1.05	33.7

从离心模型试验得到的 3 种桩型 $Q-s$ 曲线图 6 可以看出, 在桩长、桩径一致的情况下, 等截面抗拔桩、扩底抗拔桩、桩侧后注浆抗拔桩 3 种桩型极限抗拔承载力分别为 $5812, 6808, 7701\text{ kN}$ 。桩侧后注浆抗拔桩的极限承载力最大, 其次为扩底抗拔桩, 等截面抗拔桩的极限承载力最小。扩底抗拔桩、桩侧后注浆抗拔桩的极限抗拔承载力相对于等截面抗拔桩分别提高 17.1% 和 32.5% 。

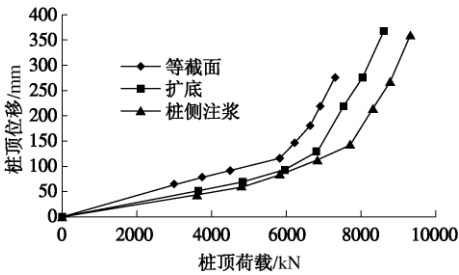


图 6 各类型抗拔桩桩顶 $Q-s$ 曲线

Fig. 6 Load-displacement curves of 3 different kinds of uplift piles

离心机模型试验同时表明, 扩底抗拔桩和桩侧后注浆抗拔桩极限承载力增加的同时也对应了更大的桩顶位移。从 $Q-s$ 曲线可以看出, 随着位移的增加, 桩顶承载力不断增大, 即便桩顶位移达 100 mm 以上, 承载力仍呈增长趋势, 极限承载力的确定还应考虑建筑物对变形控制的要求。

2.3 剪切面试验

采用同济大学 SJW-200 大型直剪仪, 通过在不同法向压力下对注浆与未注浆两种接触界面的剪切试

验, 研究注浆对桩土接触界面力学特性的影响。试验箱的尺寸为 $600\text{ mm} \times 400\text{ mm} \times 200\text{ mm}$, 混凝土等级为 C40, 混凝土初凝完成以后, 在其表面拉毛, 以增强混凝土表面与上覆土层的摩擦效应, 以及水泥净浆与混凝土的黏结效应。待混凝土强度到达设计强度的 70% 后, 预埋四周开孔的注浆管并在混凝土面上覆盖土层, 预压固结。根据试验设备的要求和现场施工时的注浆方案, 设定注浆压力 0.2 MPa, 浆液水灰比为 0.55, 水泥用量为 2 kg。试验模型见图 7。

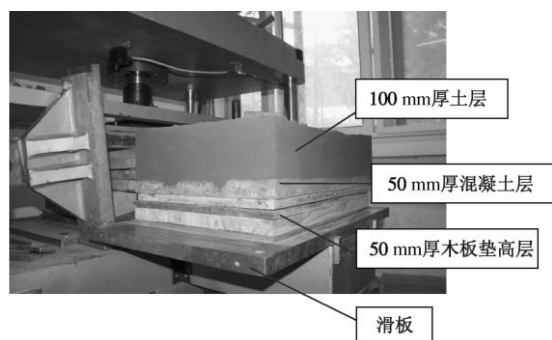


图 7 模拟注浆的大型剪切试验

Fig. 7 View of shear tests

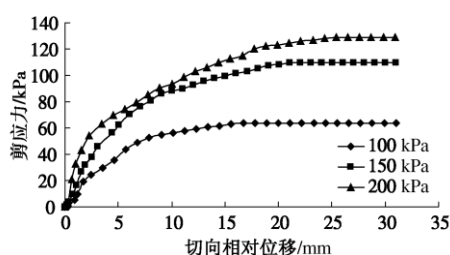


图 8 未注浆的 $\tau - w$ 曲线

Fig. 8 $\tau - w$ curves without grouting

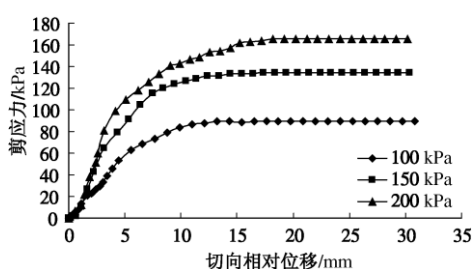


图 9 注浆的 $\tau - w$ 曲线

Fig. 9 $\tau - w$ curves with grouting

本次试验采用粉土, 试验后观察混凝土与土接触界面, 可以发现浆液沿界面形成浆脉, 说明桩侧注浆状态下, 浆液通过渗透、挤密作用, 使桩周一定区域的土体与桩身形成整体, 增加了桩身与桩周土之间的接触糙度, 从而提高桩侧阻力。

法向应力分别为 100, 150, 200 kPa 时, 未注浆时桩土界面的极限摩阻力分别为 63, 109, 128 kPa, 注浆后极限摩阻力分别为 89, 133, 165 kPa。桩侧法向压力越大, 桩侧极限摩阻力越大, 这表明了, 埋深

是影响桩侧摩阻力的主要因素之一。在法向压力相等条件下, 注浆界面的极限侧摩阻力比未注浆提高 22.0%~41.3%, 证明了注浆对接触界面承载力提高的有效性及幅度。

将注浆与未注浆两种情况下的接触面抗剪强度与法向应力之间的关系用直线拟合如图 10 所示。对于试验采用的砂质粉土, 注浆前后, 侧摩阻力与法向压力基本呈线性比例关系, 注浆后桩土摩擦角从 33.6° 增至 39.9° , 桩侧摩阻力的提高比例为 26%。表明对于砂质粉土, 注浆的机理在于增加桩土之间的接触糙度, 提高摩擦角从而提高侧摩阻力。

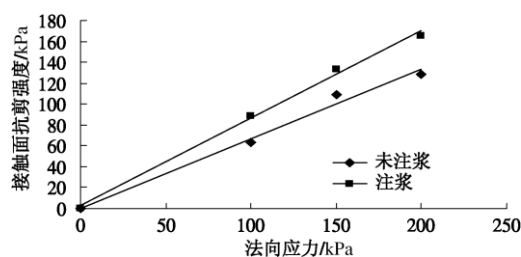


图 10 剪切试验拟合抗剪强度直线

Fig. 10 Fitted shearing resistance curves

100, 150, 200 kPa 3 种法向压力, 分别对应了④淤泥质粉质黏土, ⑤1-1 粉质黏土和⑥粉质黏土 3 种埋深。图 11 为 200 kPa 剪切试验结果与相应⑥粉质黏土层的足尺试验实测值比较, 两者结果比较接近。这说明用不同围压剪切试验模拟相应深度土层桩土界面特性是可行的。在足尺试验中, 受加载能力的限制, 深层的桩土相对位移得不到充分发展, 侧摩阻力也并未达到极限, 而剪切实验可以通过高围压下的试验, 为认识较大桩土相对位移条件下深层土体的侧摩阻力发挥特性提供了手段。

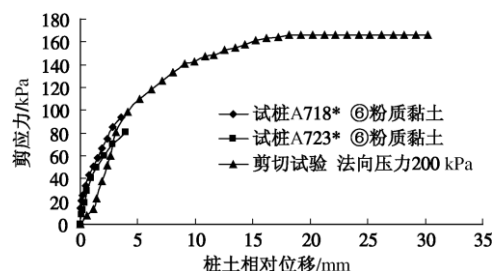


图 11 200 kPa 时试验值与实测值比较

Fig. 11 Comparison between shear tests and full-scale tests under 200 kPa

基于足尺对比试验、离心试验、剪切面实验等对桩侧后注浆抗拔桩的承载特性有综合的认识。桩侧后注浆抗拔桩通过注浆改变桩身与桩周土的接触界面特性, 从而提高承载力。离心模型试验也证明桩侧后注浆抗拔桩极限承载力较常规等截面桩提高 32.5%。在足尺试验各级荷载下, 桩侧后注浆抗拔桩桩侧摩阻力的分布沿着桩长较为均匀, 桩侧摩阻力呈中间大、桩

顶和桩端略小的规律。浅部侧摩阻力得以充分发挥,较常规等截面桩提高 36%~93%,而深部尚未充分发挥,还有较高的抗拔承载潜力。从混凝土与土接触界面剪切面试验可以发现注浆浆液沿界面形成浆脉,增加了桩身与土体之间的接触糙度,从而提高桩侧摩阻力,在法向压力相等条件下,注浆界面的极限侧摩阻力比未注浆提高 22.0%~41.3%。

3 抗拔承载力估算方法

3.1 增强系数法

参照《建筑桩基技术规范》JGJ94—2008 关于桩端后注浆承压桩采用注浆增强系数来体现注浆对桩基承载力提高的方法,可采用如下公式估算桩侧后注浆抗拔桩承载力。

$$Q_{uk} = Q_{sk} + Q_{gsk} + G_p$$
$$= \lambda_i u \sum q_{sik} l_j + \lambda_i u \sum \beta_{si} q_{sik} l_{gi} + G_p \quad (1)$$

式中 Q_{sk} 为后注浆非竖向增强段的总极限侧阻力标准值; Q_{gsk} 为后注浆竖向增强段的总极限侧阻力标准值; G_p 为单桩自重标准值 (kN), 地下水位以下应扣除浮力, 自重和浮力作用分项系数取 1.0。 U 为桩身周长; l_j 为后注浆非竖向增强段第 j 土层厚度; l_{gi} 为后注浆竖向增强段内第 i 层土厚度: 对于泥浆护壁成孔灌注桩, 竖向增强段为桩侧注浆断面以上 12 m, 重叠部分应扣除; q_{sik} 、 q_{sjk} 分别为后注浆竖向增强段第 i 土层初始极限侧阻力标准值、非竖向增强段第 j 土层初始极限侧阻力标准值、初始极限端阻力标准值; 根据上海市地基基础设计规范极限侧摩阻力标准值表确定。

λ_i 为第 i 层土的抗拔承载力系数, 按表 2 取值。

表 2 抗拔承载力系数 λ

Table 2 Values of uplift parameter λ	
土的类型	λ
砂土	0.6~0.7
黏性土、粉性土	0.7~0.8

β_{si} 为后注浆侧阻力增强系数, 上海软土地区可按表 3 取值。

表 6 后注浆侧阻力增强系数 β_{si}

Table 3 Values of strengthening parameter of side-grouting β_{si}			
土层名称	淤泥淤泥质土	黏性土粉土	粉砂细砂
β_{si}	1.1~1.3	1.3~1.5	1.4~1.8

采用该后注浆侧阻力增强系数法力学意义明确, 计算简单, 便于工程使用, 其关键在于增强系数的取值。需随着工程实践经验的积累, 调整和完善各土层的注浆增强系数取值, 以提高估算的准确性。

3.2 荷载传递法

荷载传递法根据桩侧和桩端土体的物理力学特性,

利用荷载传递方法来确定桩的荷载 - 沉降关系。荷载传递法的准确性取决于桩土受力 τ 与桩土相对位移 w 关系曲线的确定, 目前应用较多的 $\tau - w$ 关系形式主要有双曲线、抛物线等一些非线性曲线形式, 这些 $\tau - w$ 曲线基本上来自试验实测值, 且以室内模型试验或是小尺寸的原位试验居多。王向军^[11]基于前述足尺试验和剪切面试验实测桩侧摩阻力与位移关系曲线, 进行归一化并用于荷载传递法。

图 12 为某桩侧后注浆抗拔桩足尺试验经过归一化后各土层的 $\tau/\tau_{ult} - w/w_{ult}$ 曲线。浅部发挥较充分的土层能较好地归一化为一条曲线, 较深土层由于尚未充分发挥归一化效果相对较差。从图 13 可以看出, 与现场足尺试验结果相比, 由于剪切面试验可以达到极限破坏状态, 因此剪切面试验得到的归一化效果比较理想, 归一化后各曲线基本上较为接近。

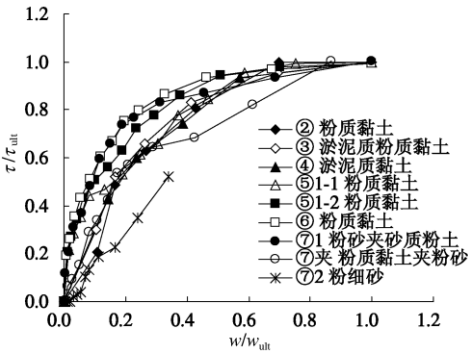


图 12 某工程桩实测的归一化 $\tau - w$ 曲线

Fig. 12 Normalized $\tau - w$ curves of test uplift piles

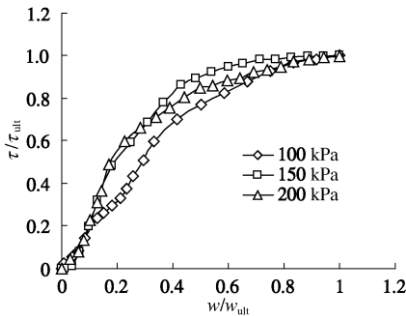


图 13 剪切面试验结果的归一化曲线

Fig. 13 Normalized $\tau - w$ curves of large scale direct shear tests

从现场足尺试验和直剪试验各归一化曲线形状看, 归一化后的各 $\tau_{ult} - w_{ult}$ 曲线基本呈双曲线模式, 因而采用双曲线函数对其进行拟合。首先将所有试验得到的数据归一化合并于图 14, 试验数据为散点形式, 然后采用双曲线函数进行拟合, 其中双曲线函数满足条件 $a+b=1$ 。拟合曲线如图 14 所示。拟合后, 各土层统一的桩侧土荷载位移关系可表示为

$$\tau = \frac{w}{\frac{0.207w_{ult}}{\tau_{ult}} + 0.793 \frac{w}{\tau_{ult}}} \quad (2)$$

式中 τ 为桩侧摩阻力; w 为桩土相对位移; τ_{ult} 为极限侧摩阻力; w_{ult} 为桩土临界相对位移。

式 (1) 中, $a=0.207w_{ult} / \tau_{ult}$, 其物理意义为拟合双曲线初始切线刚度 k_z 的倒数, 即 $a=1/k_z$; $b=0.793/\tau_{ult}$, 其物理意义为 $\tau-w$ 双曲线极限值的倒数, 即 $b=1/\tau_{ult}$ 。

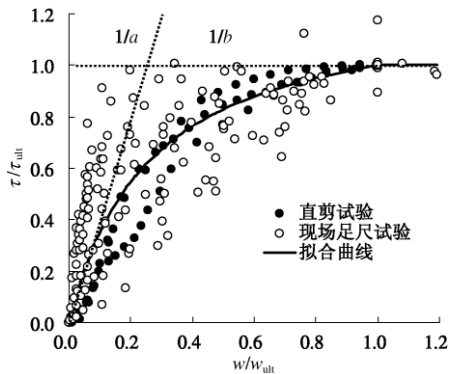


图 14 归一化数据点的双曲线拟合

Fig. 14 Fitted curves of normalized τ - w data

本文第 4 节介绍了上海白玉兰广场工程桩侧后注浆抗拔桩的现场足尺试验。采用上述荷载传递法, 计算的桩顶荷载位移曲线与实测结果的比较如图 14 所示。图 15 中的实测值为各桩侧后注浆抗拔桩实测值的平均值。图上可以看出, 本文方法计算结果与实测值之间是比较吻合的, 表明本文方法可适用于桩侧后注浆抗拔桩承载变形特性的计算分析。

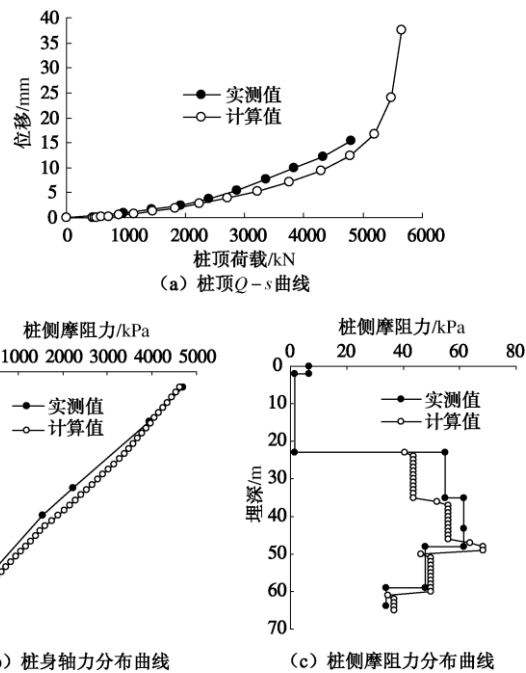


图 15 荷载传递法算例 1

Fig. 15 Verification of Example 1

增强系数法仅能估算桩侧后注浆抗拔桩的极限承载力。荷载传递法可求得桩侧后注浆抗拔桩的桩顶 Q

- s 曲线、桩身轴力分布曲线及桩侧摩阻力分布曲线等, 能反映桩土体系的荷载 - 沉降主要工作机理, 同时具有概念明确、应用性强的优点。增强系数法和荷载传递法尚需通过大量试验资料的积累建立区域性的计算参数, 以提高承载力估算的准确性。

4 工程应用

4.1 上海世博 500 kV 地下变电站

上海世博 500 kV 地下变电站工程开展了桩侧后注浆抗拔桩的尝试^[6-7]。变电站为全地下四层筒型结构, 地下建筑直径为 130 m, 埋置深度约 34 m, 建设规模列全国同类工程之首。正常使用阶段承受的水浮力达 44 万余吨, 其结构自重仅为水浮力的 70%, 需设置大量的抗拔桩。

抗拔桩采用钻孔灌注桩, 桩径 $\phi 800$, 桩端进入⑨₁ 中砂层, 桩端埋深达 82.3 m, 设计有效桩长 48.6 m。考虑采用扩底桩和桩侧后注浆桩两种抗拔新桩型进行比选。桩型 A 为扩底桩的扩底直径为 $\phi 1500$, 扩径长度为 1.5 m。桩型 B 为桩侧后注浆桩, 沿桩长设置五道注浆断面, 每个断面每道注浆断面注浆孔数量不少于 4 个, 且应沿桩周均匀分布。桩侧压浆水泥用量为每道 500 kg, 单桩水泥用量为 2.5 t。两种抗拔桩桩型立面图见图 16。

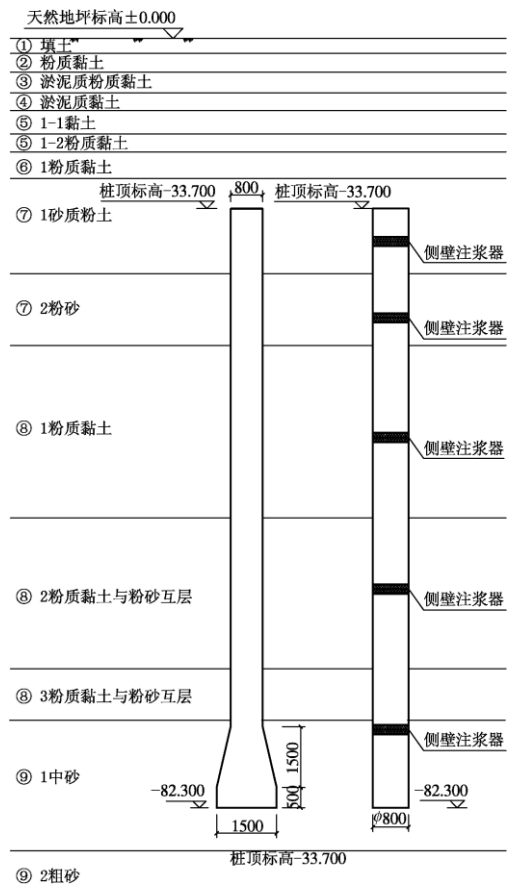


图 16 抗拔桩立面图

Fig. 16 Profile of side-grouting uplift piles

采用双套管隔离开挖段的侧摩阻力, 载荷试验直接得到有效桩长的极限抗拔承载力不小于 8000 kN。试验结果表明: 扩底抗拔桩和桩侧注浆桩均达到设计极限承载力要求, 在相同的荷载水平下桩侧注浆桩抗变形性能优于扩底桩, 而且桩侧注浆桩工效较高, 可缩短桩基工程的工期, 同时桩侧注浆桩较扩底桩更利于施工质量的控制和保证。工程选用桩侧注浆桩作为抗拔桩。本工程桩侧后注浆抗拔桩承载力较常规桩提高 35% 以上, 共节约混凝土约 12000 m³。

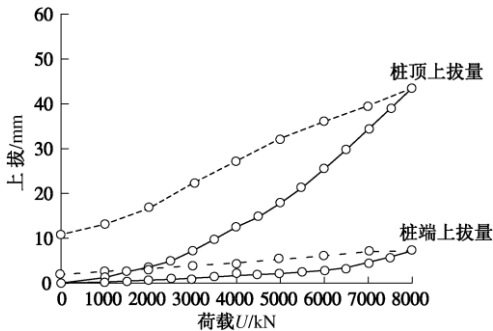


图 17 桩侧后注浆抗拔桩 $Q-s$ 曲线

Fig. 17 $Q-s$ curves of measurement

4.2 上海白玉兰广场

上海白玉兰广场约设置 4 层地下室, 地下室埋置深度约 21 m, 除 3 幢主楼外, 裙楼与纯地下室约 3.5 万平方米 (单层面积) 区域水浮力大于上部荷重, 需要采取抗浮措施。

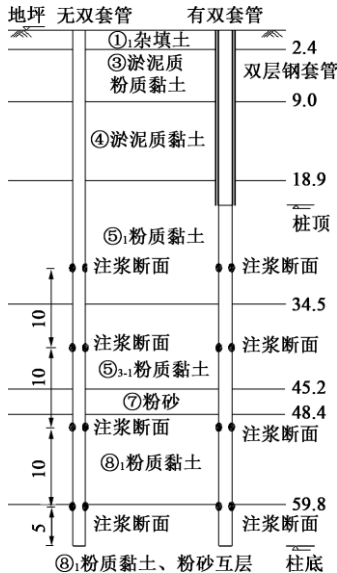


图 18 抗拔试桩剖面图

Fig. 18 Profile of two kinds of test piles

该工程采用了约 2300 根桩径为 700 的桩侧后注浆抗拔桩, 桩端埋深 64 m, 有效桩长 43 m, 设置 4 道注浆断面, 最下面一道注浆断面距桩端 5 m (图 18), 以上每隔 10 m 设置一道注浆断面。工程桩单桩承载力特征值为 2050 kN。共开展了 9 组桩侧后注浆抗拔

桩试验, 其中 3 组采用了双套管技术, 并进行桩身轴力量测^[12]。

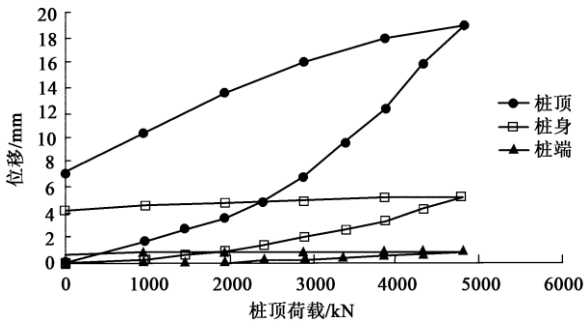


图 19 桩侧后注浆抗拔桩 $Q-s$ 曲线

Fig. 19 $Q-s$ curves of measurement

载荷试验表明, 试桩极限承载力不小于 4800 kN, 且桩顶变形小, 还有较大的承载潜力。从双套管试桩的桩侧各土层摩阻力大小与规范推荐值的比较可以看出, 桩侧注浆对提高桩侧土层摩阻力的效应是比较明显的。桩身上部侧摩阻力的增强系数较大, 而受加载未达到极限的限制, 桩身下部侧摩阻力尚未充分发挥。注浆后, 总的抗拔承载力得到大幅提高, 比等截面抗拔桩承载力估算值提高 45%, 且尚有承载潜力。

试桩载荷试验表明, 采用 $\Phi 700$ 的桩侧后注浆抗拔桩, 其抗拔承载力完全可达到同等桩长情况下 $\Phi 850$ 等截面抗拔桩的抗拔承载力。据此, 本工程 2050 根抗拔桩可节约混凝土方量约 13000 m³, 节省造价 400 多万元, 减少泥浆排放量约 73000 m³, 经济及环保效益显著。

5 结 论

桩侧后注浆抗拔桩已成为抗拔桩桩型发展的又一重要方向。通过现场足尺试验、离心模型试验、剪切实验等试验研究与工程实践, 为桩侧后注浆抗拔桩的推广应用形成了初步的理论与工程基础。

(1) 目前国内桩侧后注浆普遍采用环向点式注浆工艺。相对于扩底抗拔桩, 桩侧后注浆抗拔桩的适用性强、工效高, 特别适用于桩长较长或桩身位于较厚砂层的情形, 其施工可行性和承载力的提高比例都更有保证。

(2) 桩侧后注浆抗拔桩通过注浆改变桩身与桩周土的接触界面特性, 从而提高承载力。离心模型试验证明桩侧后注浆抗拔桩极限承载力较常规等截面桩提高 32.5%。现场足尺试验表明, 扩底抗拔桩在扩大头对周边土体的旁压作用下, 桩身下部侧摩阻力得到大幅的提升和发挥; 而桩侧后注浆抗拔桩侧摩阻力的分布较为均匀, 在试验荷载下, 浅部侧摩阻力较常规等截面桩提高 36%~93%, 而深部尚还有较高的承载潜力。从混凝土与土接触界面剪切面试验可以发现注浆

浆液沿界面形成浆脉, 增加了桩身与土体之间的接触糙度, 在法向压力相等条件下, 注浆界面的极限侧摩阻力比未注浆提高 22.0%~41.3%。

(3) 结合工程实践提出了估算桩侧后注浆抗拔桩承载力的两种方法: 基于规范的增强系数法和基于实测桩侧摩阻力与位移关系归一化曲线的荷载传递法, 并初步确定了在上海软土地区应用的计算参数。前者物理力学意义明确, 计算简单, 便于工程使用; 后者能反映桩土体的荷载-沉降主要工作机理。

(4) 桩侧后注浆抗拔桩已成功应用于上海世博 500 kV 地下变电站、上海白玉兰广场、武汉中心等工程, 产生较大的社会经济效益。

参考文献:

- [1] 王卫东, 吴江斌, 黄绍铭. 上海软土地区扩底抗拔桩的研究与工程应用[C]// 中国建筑学会地基基础分会 2006 学术年会论文集. 南昌, 2006: 101 - 111. (WANG Wei-dong, WU Jiang-bin, HUANG Shao-ming. Research and application of uplift pile with enlarged base in soft ground of Shanghai[C]// Proc of the 2006 Academic Annual Meeting of Ground and Foundation. Nanchang, 2006: 10 - 111. (in Chinese))
- [2] 王卫东, 吴江斌, 许亮, 等. 软土地区扩底抗拔桩承载特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(9): 1418 - 1422. (WANG Wei-dong, WU Jiang-bin, XU Liang, et al. Full-scale field tests on uplift behavior of piles with enlarged base[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(9): 1418 - 1422. (in Chinese))
- [3] 吴江斌, 王卫东, 黄绍铭. 扩底抗拔桩扩大头作用机理的数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2008, **29**(8): 2115 - 2120. (WU Jiang-bin, WANG Wei-dong, HUANG Shao-ming, et al. Uplift mechanism of enlarged base of belled pile by numeric analysis[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **29**(8): 2115 - 2120. (in Chinese))
- [4] 吴江斌, 王卫东, 黄绍铭. 等截面桩与扩底桩抗拔承载特性之数值分析研究[J]. 岩土力学, 2008, **29**(9): 2583 - 2588. (WU Jiang-bin, WANG Wei-dong, HUANG Shao-ming. Numerical modeling of uplift behavior of normal piles with straight shaft and pedestal piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **29**(9): 2583 - 2588. (in Chinese))
- [5] 酆建俊, 黄茂松, 木林隆, 等. 分层地基中扩底抗拔桩的计算方法研究[J]. 岩土力学, 2008, **29**(7): 1997 - 2003. (LI Jian-jun, HUANG Mao-song, MU Lin-long, et al. Research on computation methods of uplift capacity of enlarged base pile in layered soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, **29**(7): 1997 - 2003. (in Chinese))
- [6] 王卫东, 翁其平, 吴江斌. 上海世博 500 kV 地下变电站超深抗拔桩的设计与分析[J]. 建筑结构, 2007, **37**(5): 107 - 110. (WANG Wei-dong, WENG Qi-ping, WU Jiang-bin. Design and analysis of the deep substructure's uplift piles in the project of shanghai world exposition 500 kV underground electric substation[J]. Building Structures, 2007, **37**(5): 107 - 110. (in Chinese))
- [7] 吴献, 唐甜, 沈伟城. 桩侧后注浆施工技术在软土地基超长灌注桩中的应用[J]. 建筑施工, 2007, **29**(8): 587 - 588. (WU Xian, TANG Tian, SHEN Wei-cheng. Application of side post-casting technique for ultra long bored pile under soft soil foundation[J]. Building Construction, 2007, **29**(8): 587 - 588. (in Chinese))
- [8] 吴江斌, 王卫东, 王向军. 软土地区多种桩型抗拔桩侧摩阻力特性研究[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(增刊 2): 93 - 98. (WU Jiang-bin, WANG Wei-dong, WANG Xiang-jun. Side resistance properties of multiple uplift piles in soft soil area[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(S2): 93 - 98. (in Chinese))
- [9] 程明进. 桩侧后注浆接触面特性试验研究与抗拔桩受力变形分析[D]. 上海: 同济大学, 2010. (CHENG Ming-jin. Experimental study on behavior of grouting pile-soil interface and modelling load-deformation of uplift piles[D]. Shanghai: Tongji University, 2010. (in Chinese))
- [10] 李伟伟, 钱建固, 黄茂松. 等截面抗拔桩承载变形特性离心模型试验及数值分析[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(增刊 2): 17 - 20. (LI Wei-wei, QIAN Jian-gu, HUANG Mao-shong. Centrifugal model tests and numerical simulation on bearing capacity and deformation of uplift piles with uniform sections[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(S2): 17 - 20. (in Chinese))
- [11] 王向军. 软土地区抗拔桩的承载及变形特性分析[D]. 上海: 同济大学, 2010. (WANG Xiang-jun. Analysis of bearing capacity and displacement characteristic of uplift piles in soft soil area[D]. Shanghai: Tongji University, 2010. (in Chinese))
- [12] 王卫东, 吴江斌, 王向军. 桩侧后注浆抗拔桩的试验研究与工程应用[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(增刊 2): 284 - 289. (WANG Wei-dong, WU Jiang-bin, WANG Xiang-jun. Full-scale tests of side-grouting uplift pile and application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(S2): 284 - 289. (in Chinese))

（本文责编 黄贤沙）