

文章编号: 1000-7598(2014)增 2-0572-07

注浆成型螺纹桩抗拔承载特性的数值分析

王 斌^{1,2}, 钱建固^{1,2}, 陈宏伟³, 黄茂松^{1,2}, 胡玉银⁴

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;
3. 华东建筑设计研究总院地基基础与地下工程设计研究中心, 上海 200002; 4. 上海建工集团股份有限公司, 上海 200080)

摘 要: 注浆成型螺纹桩为一种利用施工工艺创新, 结合钻孔灌注和二次注浆技术的新型螺纹抗拔桩型, 目前已在软土地区开展应用。为了对其受力承载特性深入研究, 使该桩型得到广泛推广, 通过数值分析方法对其抗拔性能和承载机制进行了三维有限元数值模拟。首先, 通过数值模拟桩-土界面室内大型直剪试验得到了有限元分析需要的桩-土接触面参数, 而后将得到的参数带入注浆成型螺纹桩抗拔三维有限元数值模型, 通过计算得到了不同距径比 S/D (即螺距与桩径的比值) 螺纹桩的抗拔荷载-位移曲线和轴力分布, 并观察了抗拔过程中桩周土体塑性变形的发展。数值分析表明, 螺纹桩与桩周土体的机械咬合作用增大了桩侧摩阻力, 从而使桩体极限抗拔承载力较等截面圆桩提高约 2~5 倍; 同时, 其承载能力与桩体的 S/D 有关, 当 S/D 取最优时, 荷载-位移曲线的初始切向刚度最大, 极限承载力最高, 桩周土体形成的连续拱形破坏区域最大。

关 键 词: 桩基础; 注浆成型螺纹桩; 抗拔桩; 接触面; 数值模拟

中图分类号: TU 43

文献标识码: A

Numerical analysis of grouting-screw pile uplift bearing capacity

WANG Bin^{1,2}, QIAN Jian-gu^{1,2}, CHEN Hong-wei³, HUANG Mao-song^{1,2}, HU Yu-yin⁴

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;
2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China;
3. Department of Underground Structure & Geotechnical Engineering, East China Architecture Design & Research Institute, Shanghai 200002, China;
4. Shanghai Construction (Group) General Co., Ltd., Shanghai 200080, China)

Abstract: Grouting-screw pile is a new type of uplift pile which uses a construction technology innovation combining boring and secondary grouting, has been carried out in soft soil area. In order to conduct a further research on its bearing characteristics, so that the pile can be widely promoted, a three-dimensional finite element numerical simulation analysis of its uplift bearing performance and mechanism is carried out. Firstly, the numerical simulation of pile-soil interface indoor large direct shear test is done to get the pile-soil interface parameters. Secondly, the three-dimensional finite element numerical simulation analysis is done by using the pile-soil interface parameters obtained. Finally, through the numerical simulation, the uplift load-displacement curve and the distribution of axial force of screw piles for different values of S/D (ratio of screw pitch to pile diameter) are obtained; the development of plastic deformation of soil around the pile is observed. Numerical analysis shows that owing to the increase of skin friction of pile caused by the "mechanical occlusion effect", the ultimate uplift resistance bearing capacity of screw pile increases by 3~5 times than circular cross-section pile's; the bearing capacity is related to S/D , when the S/D equals optimum, the initial tangential stiffness of the load-displacement curves, the ultimate bearing capacity and the continuous arched plastic deformation zone of soil around the pile equal maximum.

Key words: pile foundations; grouting-screw pile; uplift pile; interface; numerical simulation

1 引 言

螺纹桩利用其外围螺盘与土体的机械咬合作用, 具有优良的抗拔承载性能, 已在国内外的工程

中广泛应用^[1-3]。然而其首先使用钻机在土体中开钻螺纹桩孔而后浇筑混凝土桩的施工工艺, 难以在沿海软土地区推广应用。为此工程科研人员研发了注浆成型螺纹桩这一新桩型, 成桩工艺以钻孔灌注桩

收稿日期: 2014-06-04

基金项目: 上海市重点科技项目 (No. 11231202002)。

第一作者简介: 王斌, 男, 1989 年生, 硕士研究生, 主要从事抗拔桩的数值模拟和试验研究。E-mail: 2007wangbin@tongji.edu.cn

通讯作者: 钱建固, 男, 1972 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土力学与地下工程方面的教学与研究工作。E-mail: qianjiangu@tongji.edu.cn

施工工艺为基础,并借鉴后注浆技术,解决了螺纹桩在软土地区的成桩施工难题,具体的施工步骤参见文献[4]。

注浆成型螺纹桩通过施工技术创新,在等截面圆柱外侧增加沿桩身缠绕的连续空间螺旋结构,以此改变了桩-土之间的相互作用方式,以较少的材料增加获得了抗拔承载性能的显著提高^[4-5]。但其空间形态复杂,受力分析困难,承载力的确定已成为工程界的一个难题。而在目前,国外学者在确定螺纹桩竖向抗拔承载力和变形特性方面主要仍依赖于现场的静载荷试验以及室内模型试验^[6-10],较少采用数值模拟方法。

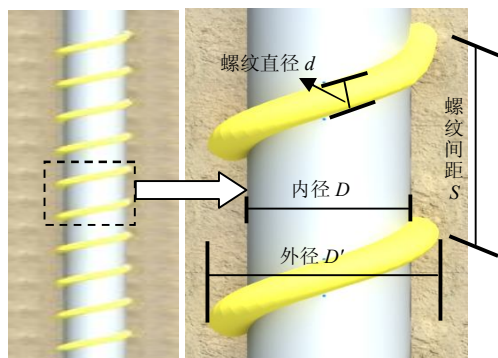
对于其他类型抗拔桩的数值模拟研究已有先例^[11-12],而螺纹桩的数值分析仅限于接触面^[4-5]。本文拟通过数值模拟的方法,应用大型通用有限元程序,对注浆成型螺纹桩的抗拔性能和承载机制进行有限元数值分析,为该桩型的工程应用给予理论支撑,并对今后的相关研究提供参考。

2 桩身与土体模型的相关参数

2.1 注浆成型螺纹桩的几何及物理参数

注浆成型螺纹桩是在传统钻孔灌注桩施工工艺的基础上,通过对钢筋笼外围螺旋缠绕的土工布带进行后注浆形成外围螺旋加工而成,桩身的主体为等截面圆柱体,桩侧外包空间螺旋圆柱结构体。

如图 1 所示,桩体的几何参数有:桩长 L ,桩身的直径 D ,主体桩侧空间螺旋外包直径 D' ,螺旋间距 S ,螺旋直径 d 。



(a) 带螺纹桩身

(b) 局部螺纹放大

图 1 注浆成型螺纹桩几何参数示意图

Fig.1 Geometric parameters of grouting-screw pile

本次数值分析为了研究螺距 S 对注浆成型螺纹桩抗拔承载性能的影响,模型桩长 L 统一选取 10 m,其余参数选取均按照工程实际,并引入参数距径比 S/D (即螺距与桩径的比值)的概念对模型桩进行分

组,模型桩的距径比如表 1 所示,分别对应 8 种不同的模型桩,如图 2 所示。

表 1 数值分析模型桩分组
Table 1 Groups of the model piles

桩型 组别	编 码	桩体直径 D/m	螺距 S/m	距径比 S/D
注浆 成型 螺纹 桩	A	0.6	0.3	0.5
	B	0.6	0.6	1.0
	C	0.6	1.2	2.0
	D	0.6	1.8	3.0
	E	0.6	2.4	4.0
	F	0.6	3.0	5.0
等截面 圆柱	G	0.6		
	H	0.8		0.0

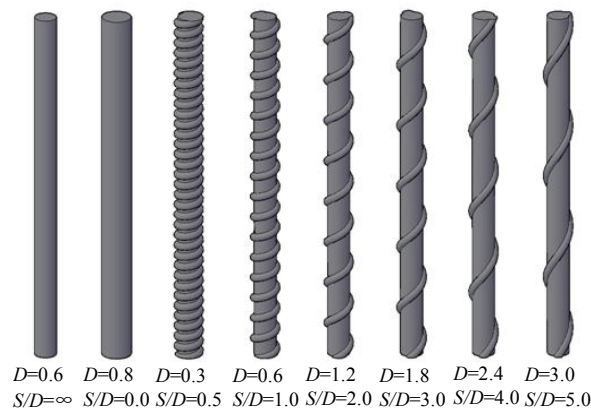


图 2 数值分析模型桩分组

Fig.2 Groups of the model piles

注浆成型螺纹桩在实际抗拔过程中,桩体本身不发生破坏,仅发生弹性变形,因此,数值模拟中对于桩体选用均质线弹性模型,弹性模量 $E=30$ GPa,泊松比 $\nu=0.2$,对应实际工程中混凝土 C30 的力学参数。

2.2 桩周土体的几何及物理参数

本次有限元数值模拟的桩周土选取水平范围 10 倍桩径(即 6 m),竖向深度 1.5 倍桩长(即 15 m)的圆柱形土体,理论研究与工程实践均表明如此选取的土体分析范围远大于桩对周边土体的实际影响范围,桩-土数值分析模型如图 3 所示。

假定土层为均质、各向同性的理想弹塑性材料,并且忽略施工因素对桩周土体产生的影响。土体的本构模型采用 Mohr-Coulomb 模型,桩周土体物理力学参数按照下文介绍的桩-土接触面剪切试验采用的土体参数设定,土体密度 $\rho=1\,540\text{ kg/m}^3$,弹性模量 $E=30\text{ MPa}$,泊松比 $\nu=0.3$,黏聚力 $c=1.08\text{ kPa}$,内摩擦角 $\varphi=34.8^\circ$,剪胀角 $\Phi=0^\circ$ 。

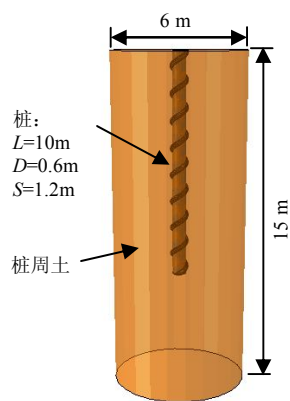


图3 桩-土计算模型尺寸
Fig.3 Model dimensions of pile and soil

3 桩-土接触面参数的确定

桩体在上拔过程中, 桩侧与土体会发生相对位移, 土体对桩体提供桩侧摩阻力, 桩侧摩阻力的发挥直接影响桩体的抗拔承载性能。为了合理地模拟这一过程, 需要在桩-土接触面上设置接触单元, 本文采用扩展库仑摩擦模型定义接触面间的性质, 分析过程中, 桩-土之间的摩擦系数 μ 的取值将通过有限元模拟桩-土界面室内大型剪切试验论证得出。

3.1 桩-土界面室内大型剪切试验

本试验的试验仪器采用同济大学自主研发的大型多功能界面剪切仪 (SJW-200), 对桩-土界面在抗拔过程中的力学性能进行试验模拟, 得出的试验结果将对有限元数值模拟中扩展库仑摩擦模型的参数定义提供现实依据, 本仪器的主要性能指标如表2所示。

表2 大型多界面剪切仪主要性能指标
Table 2 Performance index of large-scale interface shear apparatus

剪切盒 尺寸/ m^3	最大法向 压力/ kN	最大剪 切力/ kN	位移速率 mm/min	法向最大 位移/ mm	水平向最大 位移/ mm
600×400×200	200	200	0.1~50	50	150

本次试验用土取自上海长兴岛区②₃层灰色砂质粉土, 层面标高约为地下2.0 m, 平均厚度为16 m, 呈现松散~稍密状态、渗透性好。通过常规土工试验测得含水率为9.6%、重度 $\gamma=15.4 \text{ kN}/\text{m}^3$ 、孔隙比 $e=0.94$ 及相对密实度 $D_r=0.68$, 由三轴试验测得土体的黏聚力 $c=1.08 \text{ kPa}$ 和内摩擦角 $\varphi=34.8^\circ$ 。

剪切箱下盒放置600 mm×400 mm×50 mm大小的混凝土面板, 通过在剪切箱下盒底部垫一定厚度的木板以调节混凝土板上界面高度与下盒边缘齐

平, 从而确保下盒混凝土与上盒土体完全接触。混凝土试块采用C30混凝土浇筑, 试件成型后放置在养护室养护28 d。

每组试验通过液压加载系统按应力控制方式分别施加100、150与200 kPa 3种不同法向压力 (反映不同埋深桩侧压力水平), 使土体在预定的法向力下固结, 当竖向荷载施加完成后, 施加水平荷载模拟抗拔桩的上拔。桩-土接触面剪切试验采用应变控制方式。剪切过程中, 控制剪切速率为2 mm/min, 当剪切变形达到40 mm时停止试验。

3.2 剪切试验有限元模型的建立

在有限元分析中, 桩-土的接触分析是一种典型的非线性问题, 首先接触面的力学模型本身就是非线性的, 而且对于接触面这类特殊的不连续约束, 本文采用大型通用有限元程序 ABAQUS 进行数值模拟, 对于复杂的高度非线性问题的处理, 具有强大的计算和分析能力。

建模中混凝土面板采用均质线弹性模型, 弹性模量 $E=30 \text{ GPa}$, 泊松比 $\nu=0.2$; 假定土层为均匀、各向同性的弹塑性材料, 土体本构模型采用Mohr-Coulomb模型, 典型的网格划分如图4所示。土体密度为 $\rho=1800 \text{ kg}/\text{m}^3$, 弹性模量 $E=39.1 \text{ MPa}$, 泊松比 $\nu=0.3$, 黏聚力 $c=1.08 \text{ kPa}$, 内摩擦角 $\varphi=34.8^\circ$, 剪胀角 $\Phi=0^\circ$, 为了考虑混凝土面板与土体之间可能出现的滑移, 接触面上设置接触单元, 本文采用扩展库仑摩擦模型定义接触面间的性质, 混凝土面板与土之间的摩擦系数 μ 设为0.28, 分析过程中的摩擦系数不变。

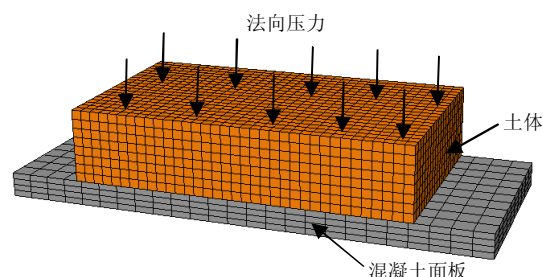


图4 混凝土面板及土体网格划分
Fig.4 Grid division of concrete plate and soil

3.3 有限元计算结果分析

经计算发现, 当扩展库仑模型中混凝土面板与土之间的摩擦系数 μ 设为0.28时, 通过有限元数值模拟得到的接触面 τ - ω 曲线与试验结果拟合度较高, 故在下文的螺旋桩抗拔数值模拟中, 桩-土间的摩擦系数 μ 取0.28是合理的。图5为法向压力为100 kPa时, 桩-土界面室内大型剪切试验的数值模拟结

果与试验真实结果对比图, 由图可知两者拟合度很好。

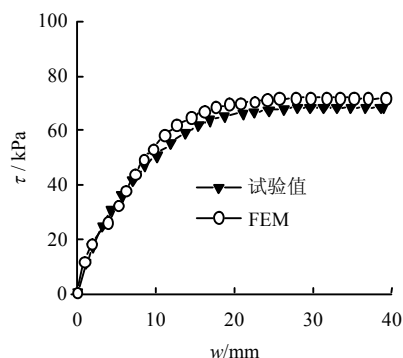


图 5 100 kPa 下桩-土界面的 τ - w 曲线对比
Fig.5 Curves comparison of τ - w at $p=100$ kPa

4 螺纹桩抗拔承载特性数值分析

4.1 螺纹桩竖向上拔过程的数值模拟

在建立好桩-土模型并赋予相关的物理参数之后, 需要对模型进行网格划分。由于螺纹桩具有的复杂空间螺旋结构的不规则性, 故采用四面体单元形式对模型进行网格划分, 并且为了提高桩-土接触有限元计算的收敛性及计算精度, 对桩-土接触区域的网格划分特别进行了加密处理, 经过网格划分的三维有限元模型如图 6 所示。

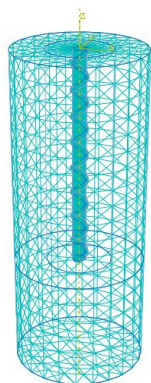


图 6 桩-土计算模型的网格划分
Fig.6 Grid division of pile and soil models

对于模拟上拔过程的边界条件如下: 桩周土体的上表面为自由边界, 土体四周圆柱侧面为法向约束, 土体底部为固定约束; 对桩体的顶面分步施加上拔位移, 通过位移控制来施加向上拔荷载, 模拟上拔过程。

下面通过对螺距 $S=0.6$ ($S/D=1.0$) 的螺纹桩抗拔数值模拟中桩周土塑性应变的发展来对螺纹桩抗拔过程进行说明, 图 7 为桩顶上拔不同位移时, 桩-土模型中间纵剖面上的土体从加载初期到最终破坏时的等效塑性云图。

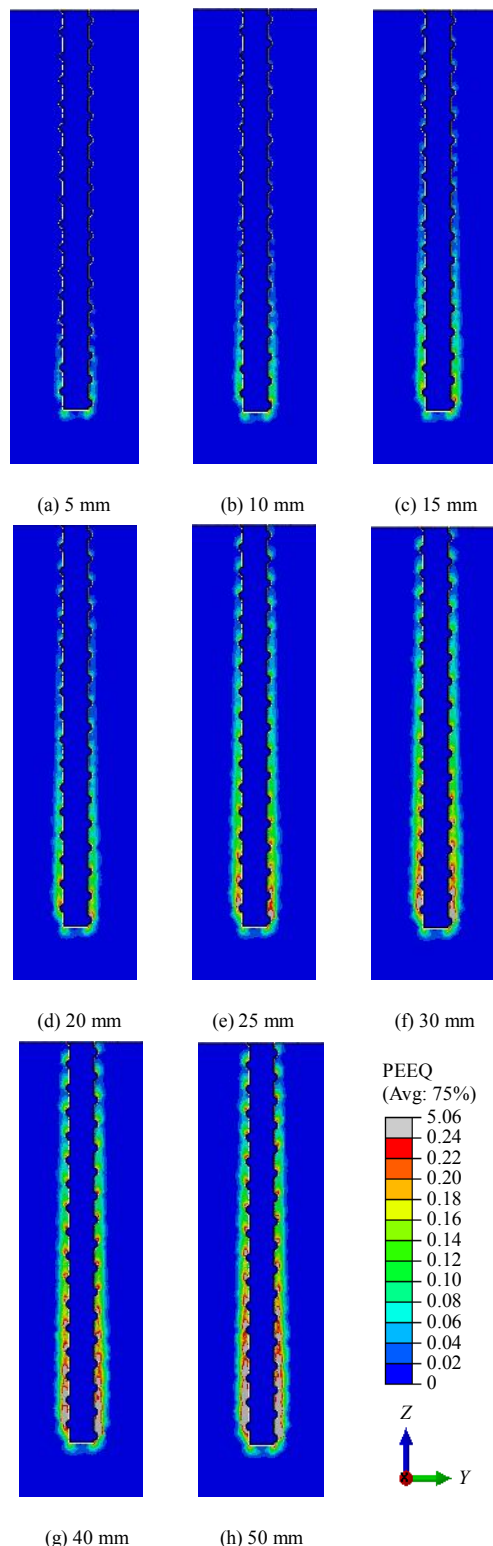


图 7 不同桩顶位移下桩侧土体的塑性应变云图
(螺距 $S=0.6$ m, $S/D=1.0$)

Fig.7 Plastic nephogram of soil (pitch $S=0.6$ m, $S/D=1.0$)

分析上图可知, 在对螺纹桩施加向上拔荷载的初期, 随着桩体上拔位移的增加, 与桩体的底部螺纹接触区域的桩周土体首先形成塑性区; 此后, 随着桩体上拔位移的不断增大, 与螺纹接触区域的桩周土塑性区由桩底向桩顶依次发展; 随着上拔位移的

进一步增大, 桩-土界面的相对位移也越来越大, 螺旋纹桩与土体发生剪切破坏, 已有的塑性区逐渐扩大, 并且向相邻螺旋纹开展; 临近破坏时, 桩侧土体的塑性区不断向相邻螺旋纹扩展并连通, 在螺旋纹外圈形成曲线滑裂塑性破坏面, 最终相邻螺旋纹之间形成了连续起伏的塑性贯通破坏曲面。

4.2 极限抗拔承载力与距径比 (S/D) 的关系

通过数值模拟得到的不同距径比 (S/D) 的螺旋纹桩型荷载-位移曲线, 如图 8 所示。整个加载曲线可分为 3 个阶段: 初始加载阶段, 荷载随着位移的增加, 几乎按线性成比例增大; 随着上拔位移的进一步增大, 曲线达到加载中期, 此时荷载随位移增大呈现非线性增加; 最后, 到加载末期时, 荷载随位移的增大而趋于稳定, 该稳定值即为桩体的极限抗拔承载力。

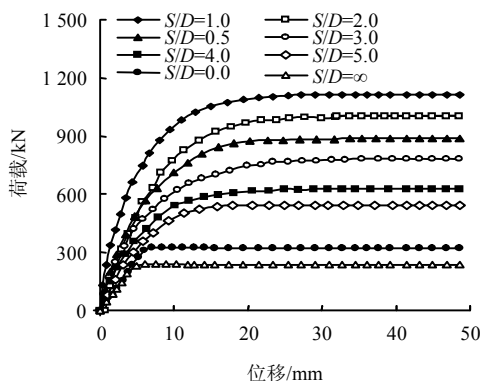


图 8 螺旋纹桩荷载-位移曲线

Fig.8 Load-displacement curves of screw piles

然而对于不同 S/D 的螺旋纹桩型, 其荷载-位移曲线形态各异, 总体来说差异表现在初始抗拔刚度和最终极限承载力这两方面。 $S/D=0$ 时, 其初始段曲线的抗拔刚度很小, 极限承载力很低, 说明螺距并非越小越好, S/D 太小, 不利于螺旋纹桩抗拔承载力的提高; $S/D=0.5$ 时, 其初始段曲线的抗拔刚度和极限承载力都有较大幅度增加; $S/D=1.0$ 时, 其初始抗拔刚度最大, 极限承载力最大; 随着 S/D 的进一步增大, 对应 $S/D=2.0$ 、 3.0 和 4.0 的情况, 螺距越来越大, 其初始抗拔刚度却随之减小, 极限承载力也逐渐降低; 当 $S/D=\infty$ 时, 其极限承载力达到最小值。值得注意的是, 对于 $S/D=0$ 与 $S/D=\infty$ 这两种极限情况, 二者的初始曲线段几乎重合, 原因是这两种桩型均为等截面圆桩, 而注浆成型螺旋纹桩相比相同直径的等截面圆桩, 其极限抗拔承载力可提高约 2~5 倍。

通过绘制不同距径比 (S/D) 螺旋纹桩型的单桩极限承载力与 S/D 的关系图 (见图 9), 我们发现: 随

着 S/D 逐渐增大, 单桩极限承载力逐渐增大, 并在 $S/D=1.0$ 时, 极限承载力达到峰值, 此后, 极限承载力随着 S/D 的增大又呈下降趋势, 这说明注浆成型螺旋纹桩的螺距存在一个最优值, 当螺旋纹桩取最优螺距时, 其初始抗拔刚度与极限抗拔承载力均达到最大。

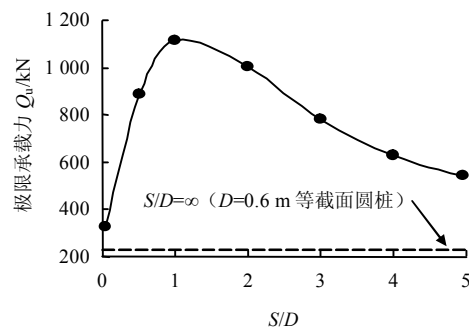


图 9 单桩极限承载力

Fig.9 The ultimate bearing capacity of single pile vs. S/D

当抗拔承载力达到极限时, 桩身的轴力沿深度方向分布的曲线对比如图 10 所示。从图中可以看出, 不同距径比的模型桩, 其轴力沿深度衰减率有着显著差别, 具体地, 等截面圆桩的轴力分布随桩深呈明显的非线性分布, 而螺旋纹桩的非线性趋势不是十分明显。这种差异本质上是由于桩侧摩阻力分布的不同导致的, 等截面圆桩的极限承载力很大程度上取决于桩中间以下部分桩侧摩阻力的发挥, 而螺旋纹桩由于桩身螺旋纹的存在, 使得桩-土相互作用方式得以改变, 上半部分的桩侧摩阻力也得到了较好的发挥。

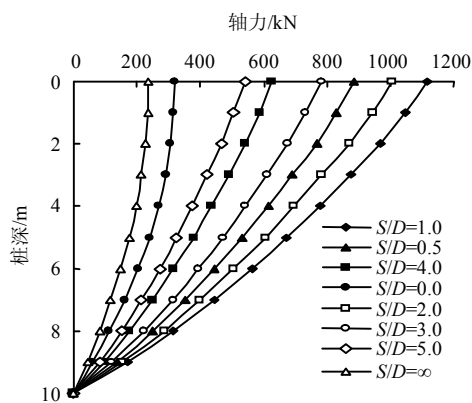


图 10 桩身轴力分布图

Fig.10 The distributions of pile axial force vs. S/D

4.3 不同距径比 (S/D) 的螺旋纹桩破坏机制分析

为了分析不同 S/D 的螺旋纹桩在上拔荷载下的破坏机制, 提取了本次数值模拟的 A、B、C、D、E、F 6 组螺旋纹桩型在桩顶位移为 50 mm (此时桩体已

完全达到极限抗拔承载状态)时桩-土中间纵剖面的桩周土塑性应变云图,如图 11 所示。为了使对比更加直观,所选取的三维桩-土模型的中间剖面图的左边为桩-土共同显示,右边的云图将螺纹桩隐藏,仅显示桩周土体。

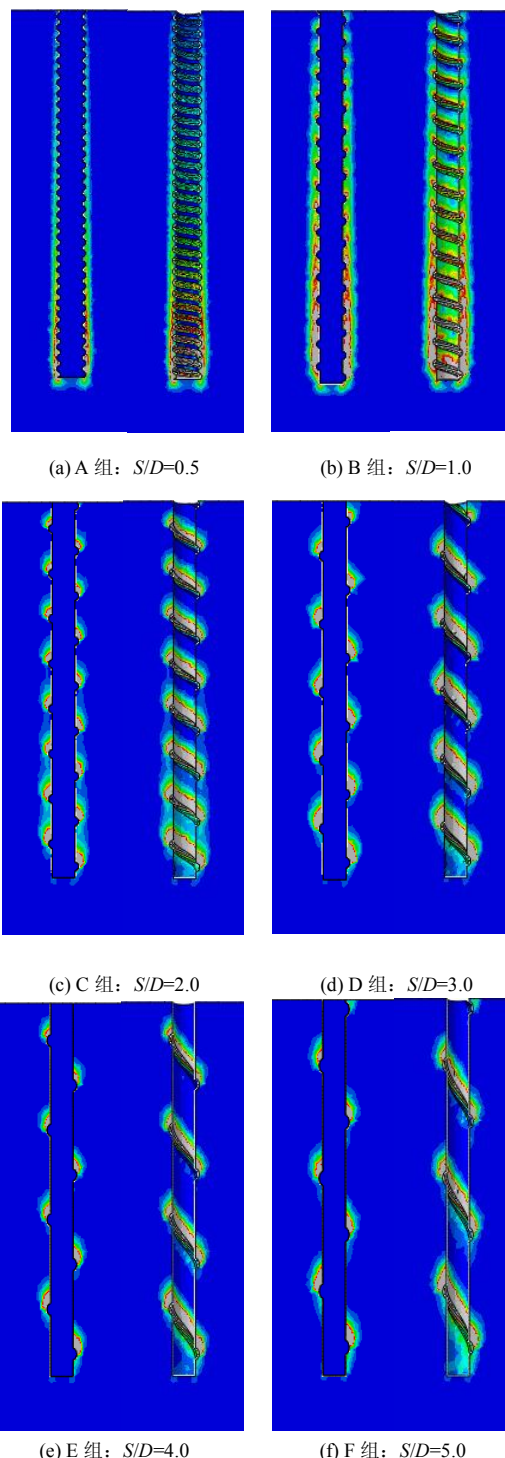


图 11 桩顶位移为 50 mm 时土体塑性应变云图
Fig.11 Plastic strain nephogram of soil when pile top displacement of 50 mm

从图中可以看出,桩周土体破坏时的塑性变形与螺距的大小密切相关:当 S/D 较小 ($S/D=0.5$) 时,

桩周土体的塑性区域主要集中在每道螺纹的顶端附近,向四周开展的范围很小,当达到极限荷载时,桩侧土体在螺纹附近产生近似圆柱形的剪切破坏面,类似于等截面圆桩的破坏模式;随着 S/D 增加到 1.0 时,桩周土体的塑性开展区较 $S/D=0.5$ 时向四周土体延伸范围更大,类似拱形,并且相邻的螺纹端部的拱形塑性区相连通,形成了连续贯通的拱形塑性破坏面,从而使土体在剪切破坏时发挥更大的桩侧摩阻力,因此,桩体的极限抗拔承载力大幅提高;随着 S/D 进一步增加 ($S/D=2.0$ 、 3.0 、 4.0 、 5.0),尽管桩周土体在螺纹端部形成了较大拱形塑性区域,然而由于螺距随之增大,相邻螺纹间的塑性区难以贯通,加之桩长一定时螺距越大螺纹的道数越小,桩周土与螺纹端部接触发生塑性变形的拱形区域数目也相应减少,因而导致最终上拔破坏时土体的塑性变形开展范围进一步缩小,宏观表现为极限抗拔承载力的减小。

5 结 论

(1) 螺纹桩螺纹的存在改变了桩-土之间的作用方式,通过与桩周土体的机械咬合作用,使得桩周土体在上拔过程中发生很大的塑性变形,从而使桩侧摩阻力有很大的提高,桩体抗拔承载力大于等截面圆桩,其极限抗拔承载力可提高约 2~5 倍。由此可见,注浆成型螺纹桩技术能极大地提高抗拔桩的承载能力。

(2) 对于不同距径比 (S/D) 的螺纹桩,在位移较小时,其荷载-位移曲线的初始切向刚度也有明显的差异: $S/D=0.0$ 时,其初始段曲线的切向刚度很小,极限承载力很低;继而桩体的初始切向刚度与极限承载力随 S/D 的增大得到较大幅度增长,当 $S/D=1.0$ 时,其初始切向刚度最大,极限承载力也最大;随着 S/D 继续增大,其初始切向刚度与极限承载力又随之减小。可见,存在一个最优化的距径比 S/D ,在桩径 D 给定的条件下,存在某一最优螺距使得其荷载-位移曲线的初始切向刚度最大,并且极限承载力最高。

(3) 桩侧土体的破坏形态与螺距有很大的关系:当 S/D 较小时,桩侧塑性区主要集中在螺纹高度附近,向四周开展的范围很小;随着 S/D 的增加,桩侧土体的塑性开展区越来越大,并向四周土体延伸, $S/D=1.0$ 时,开展程度达到最大,相邻螺纹间有连续贯通的破坏面。 $S/D=2.0\sim 5.0$ 时,明显可以看出,由于螺距的进一步增大,相邻螺纹间很难形

成连续贯通的塑性破坏区。

参考文献

- [1] Richard S. screw piles uses and considerations[J]. **Structure Magazine**, 2004, 23: 29—31.
- [2] SPRINCE ANDINA, PAKRASTINSH LEONIDS. Helical pile behaviour and load transfer mechanism in different soils[J]. **Geotextiles and Geomembranes**, 2010, 19: 1—22.
- [3] 董天文, 李士伟, 张亚军, 等. 软土地基螺旋桩竖向抗拔极限承载力计算方法[J]. **岩石力学与工程学报**, 2009, 28(增刊 1): 3057—3062.
- DONG Tian-wen, LI Shi-wei, ZHANG Ya-jun, et al. Calculation method of ultimate bearing capacity of vertical pull-out screw pile in soft ground[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(Supp.1): 3057—3062.
- [4] 钱建固, 陈宏伟, 贾鹏, 等. 注浆成型螺纹桩接触面特性试验研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2013, 32(9): 1744—1749.
- QIAN Jian-gu, CHEN Hong-wei, JIA Peng, et al. Experimental study of mechanical behaviors of grouting-screw pile interface[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(9): 1744—1749.
- [5] 钱建固, 贾鹏, 程明进, 等. 注浆桩土接触面试验研究及后注浆抗拔桩承载特性数值分析[J]. **岩土力学**, 2011, 32(4): 662—668.
- QIAN Jian-gu, JIA Peng, CHENG Ming-jin, et al. Experimental study of grouting pile-soil interface and numerical simulation of bearing behavior of side-grouting uplift pile[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(4): 662—668.
- [6] MURRAY E J, GEDDES J D. Uplift of anchor plates in sand[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1987, 113(3): 202—215.
- [7] ILAMPARUTHI K, DICKIN E A, MUTHUKRISNAIAH K. Experimental investigation of the uplift behaviour of circular plate anchors embedded in sand[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2002, 39(3): 648—664.
- [8] DASH B K, PISE P J. Effect of compressive load on uplift capacity of model piles[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2003, 129(11): 987—992.
- [9] GHALY A, HANNA A, HANNA M. Uplift behavior of screw anchors in sand. I: dry sand[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1991, 117(5): 773—793.
- [10] MERIFIELD R S, SLOAN S W. The ultimate pullout capacity of anchors in frictional soils[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2006, 43(8): 852—868.
- [11] 黄茂松, 酆建俊, 王卫东, 等. 开挖条件下抗拔桩的承载力损失比分析[J]. **岩土工程学报**, 2008, 30(9): 1291—1297.
- HUANG Mao-song, LI Jianjun, WANG Wei-dong, et al. Loss ratio of bearing capacity of uplift piles under deep excavation[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2008, 30(9): 1291—1297.
- [12] 刘文白, 周健. 上拔荷载作用下桩的颗粒流数值模拟[J]. **岩土工程学报**, 2004, 26(4): 516—521.
- LIU Wen-bai, ZHOU Jian. Numerical simulation of particle flow code for pile under uplifting load[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2004, 26(4): 516—521.