

# 旋喷搅拌加劲桩对软土基坑支护的机理及其支护刚度的确定方法

刘全林

(上海强劲地基工程股份有限公司, 上海 200235)

**摘 要:** 旋喷搅拌加劲桩是一种新型的基坑主动支护技术, 工程实践表明, 针对淤泥质软土地层, 相对于普通的锚杆、土钉支护形式, 加劲桩特有的桩身结构和成形工艺大大增强了桩体抗拔力和桩侧土体的强度, 对深基坑变形控制效果较好。基于斜向单桩的静载试验, 得到了加劲桩的荷载 - 变形规律, 给出了量化评定加劲桩支护对桩侧土体加固效果的方法; 提出了软土流变应力控制、桩侧土应力集度控制是加劲桩在淤泥质软土基坑中成功应用的关键, 建立了加劲桩的加固和支护刚度计算方法, 用以指导设计与施工。

**关键词:** 软土; 深基坑; 支护; 加劲桩; 作用机理

中图分类号: TU47

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2011)S1 - 0339 - 05

**作者简介:** 刘全林(1962 - ), 男, 安徽六安人, 博士, 教授, 主要从事地基基础、结构与介质相互作用分析及行业信息化技术的研究与应用工作。E-mail: tjql@126.com。

## Supporting mechanism and stiffness of jet grouting mixing stiffening piles in foundation pits in soft clay

LIU Quan-lin

(Shanghai Qiangjin Foundation Engineering Co., Ltd., Shanghai 200235, China)

**Abstract:** The jet grouting mixing stiffening pile is a new and initiative supporting technology in foundation pits. Engineering practices show that the unique structural design of stiffening piles enhances the pullout resistance and soil strength. The foundation deformation of stiffening piles is better than that of bolting and nailing in soft soil. The load-deformation laws of stiffening pile are illustrated by static load tests. A method to quantitatively assess the pile side soil reinforcement of stiffening piles is derived. It is proposed that the rheological stress and concentration stress are the key factors to apply the stiffening piles in soft foundation pits. The reinforcement and support stiffness method is put forward to guide the design and construction.

**Key words:** soft soil; deep foundation pit; support; stiffening pile; mechanism

## 0 引 言

近年来, 中国软土锚固技术发展迅速, 基坑工程支护技术创新不断<sup>[1-3]</sup>, 旋喷搅拌加劲桩(以下简称加劲桩)即是其中一种新型的基坑软土锚固技术, 其基本结构如图 1 所示。该技术结合了搅拌桩和高压旋喷桩的特点, 使水泥与土的拌合更均匀, 桩身强度大幅度提高, 从而形成水泥土复合式锚固结构。工程实践表明, 针对淤泥质软土深基坑, 加劲桩支护产生的锚固效果是普通锚杆、土钉等支护结构所不能达到的, 已成功应用于 100 多个基坑工程, 最大支护开挖深度达 27 m。

目前, 加劲桩支护机理的研究仍处于初级阶段,

对于其土层加固机理和效果仍还在探索之中, 支护结构的设计主要依据现行的基坑工程技术规程及一般的支护结构设计理论与方法, 难以体现该支护结构自身的特点, 从而阻碍了该技术的完善和推广应用。基于拉拔试验结果, 分析加劲桩在荷载作用下的变形规律; 通过对比分析, 阐明加劲桩对软土土层的加固机理, 与土体的相互作用关系, 并以此为基础建立淤泥质软土基坑中应用加劲桩支护的设计理论和方法, 将对加劲桩支护结构的设计与应用具有重要的参考价值。

## 1 加劲桩静载试验

某建设场地浅层主要为淤泥质黏土，其特征为灰色，饱和，流塑，含大量腐植质，属高含水率、高压缩性、低强度的浅海相沉积土层，土层物理力学指标：含水率 46%，重度  $\gamma=17.6 \text{ kN/m}^3$ ，黏聚力  $c=10.8 \text{ kPa}$ ，内摩擦角  $\varphi=8.0^\circ$ 。加劲桩试桩桩长 11.0 m，桩径 500 mm，内插入 2  $\phi 15.2 \text{ mm}$  的钢绞线，桩体进入到淤泥土层。静载试验的单根试桩极限抗拔承载力 208 kN，采用慢速维持荷载法加载。典型的试桩荷载 - 桩顶位移 ( $U-\delta$ ) 关系曲线如图 2~5 所示。

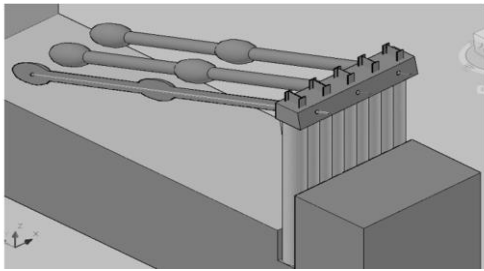


图 1 单排旋喷搅拌加劲桩支护结构

Fig. 1 Basic structure of stiffening piles of support

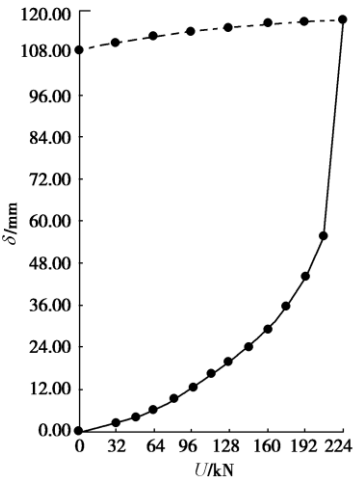


图 2 #SZ1 试桩  $U-\delta$  曲线

Fig. 2  $U-\delta$  curves of test pile #SZ1

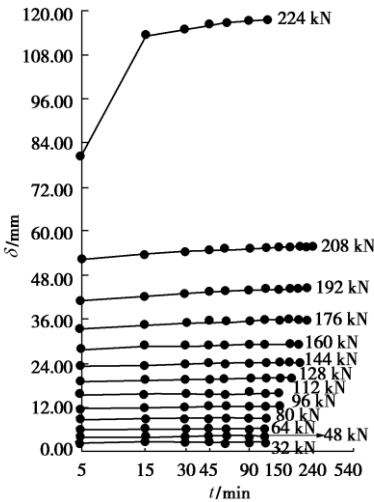


图 3 #SZ1 试桩  $\delta-lgt$  曲线

Fig. 3  $\delta-lgt$  curves of test pile #SZ1

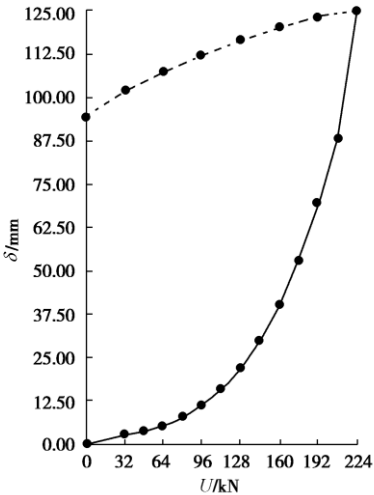


图 4 #SZ5 试桩  $U-\delta$  曲线

Fig. 4  $U-\delta$  curves of test pile #SZ5

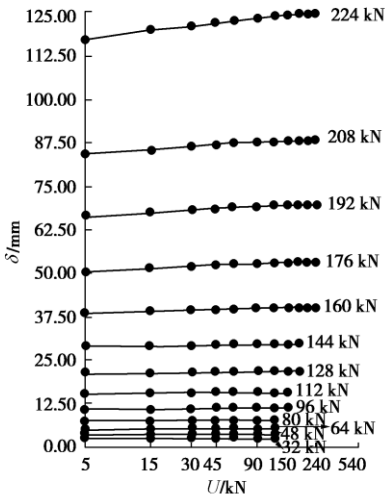


图 5 #SZ5 试桩  $\delta-lgt$  曲线

Fig. 5  $\delta-lgt$  curves of test pile #SZ5

1.1  $U-\delta$  曲线特征

(1) 由图 2, 4 可以看出, #SZ1, #SZ5 试桩的  $U-\delta$  曲线均为缓变型曲线。在前十二级荷载下, 桩顶位移

增加平缓;当荷载加至 224 kN,桩顶位移急剧增加,最大位移量分别为 118.0, 120.0 mm,达到终止加载的条件,确定其前一级荷载  $U=208$  kN 为抗拔极限承载力。卸载至零后,桩顶残余变形分别为 108.0, 95.0 mm。

(2)由图 3, 5 可以看出, #SZ1, #SZ5 试桩的  $\delta - \lg t$  曲线尾部无明显向上弯曲现象,由此说明,在某一恒载作用下,随着时间的增长,淤泥质软土中的加劲桩锚固力变化比较稳定,周边土体得到了较好的改良,表现出无明显的流变变形特性。

(3)图 3 中试桩第十三级荷载加载初期(即  $U=224$  kN),桩顶位移有一个明显的增长过程,是加筋体的拉伸变形和桩体的初始变形,其后这种变化趋于平缓,这一现象说明,随着荷载的增大,加劲桩桩周土体与桩体之间的黏接仍然较好,在较长的作用时间内没有明显的流变效应。即使在较高的拉拔力作用下,加劲桩仍没有发生破坏性流变变形。

1.2 桩体变形规律

(1) 回弹率

回弹率是反映桩土相互作用关系的重要指标。经计算, #SZ1 和 #SZ5 试桩的桩体回弹率分别为 9.3%, 20.8%, 由此说明试验卸载后土体的回弹量较大,在极限抗拔力作用下淤泥质软土处于弹性变形阶段;另一方面也说明加劲桩体对土体的压缩和增强作用明显,与普通锚杆和土钉相比,加劲桩的承载力由桩侧土体的“摩阻作用”和周边土体与桩体的“挤压嵌固作用”共同来提供。

(2) 桩顶位移发展规律

加劲桩  $U - \delta$  曲线表明,桩顶位移逐渐增大的过程,也即荷载向深层稳固土层传递的过程,桩顶位移发展规律一定程度上反映了桩的荷载传递规律。因此建议对加劲桩分级施加应力,充分发挥加劲桩桩体与桩周土体的相互作用,其对控制软土变形效果较好。从加劲桩的  $U - \delta$  曲线可看出,随着承载力的增大,其支护变形的刚度将随之减少。

2 加劲桩成桩对桩周土体的加固作用

在加劲桩的成桩过程中,在高压旋喷压力作用下,通过搅拌和泄压孔,能将桩孔中的淤泥质土给置换出来,如图 6 所示。



图 6 旋喷搅拌加劲桩成桩对软土的置换过程

Fig. 6 Process of replacement for soft soil by jet and mixing stiffening piles

在加劲桩的成桩过程中,通过高压旋喷和搅拌,将淤泥质土体从桩孔中置换出来,代之以水泥为主固化剂的浆液填充进去,这样不仅能将较多的加固浆液注入到淤泥质软土中,而且更有效地提高了加劲桩桩体的强度,与此同时,高压旋喷的压力对桩周土体的压缩作用,使桩周土体有一个固结过程,从而也提高了土体强度,因此说,加劲桩对软土的加固作用效果是十分显著的。此外,保证桩体淤泥质土体的置换,能有效控制高压旋喷作用对地层的扰动范围。从作用机理来讲,加劲桩体与桩周土体在一个嵌入结合范围内,当桩体内的加筋体受力时,其实质就是将拉力通过旋喷桩体,传递到桩周的土体中,产生了加劲桩与土体的相互作用,被加固后的桩侧土体与加劲桩共同完成荷载传递过程。本文从研究桩侧土体对加劲桩的摩阻力分布入手,根据荷载传递过程<sup>[4-8]</sup>中土体力学特性的变化规律,分析加劲桩与土的相互作用关系,确定加劲桩对软土的支护作用机理。

2.1 加劲桩对软土的加固效果

旋喷搅拌加劲桩桩体与地层土体之间的摩阻力不仅决定了旋喷搅拌加劲桩的锚固力,而且表示了旋喷搅拌加劲桩桩体与地层土体之间的共同作用特性。较高的摩阻力使桩体与地层结合成整体,起到加固土体、约束土体变形、提高边坡稳定性的作用。

对实测摩阻力  $q_{sik}$  的反演是基于式(1)进行的,得到的结果如表 1 所示。

表 1 加劲桩对淤泥质黏土的加固效果反演分析

Table 1 Reinforced effect of inversion for stiffening piles in muddy clay				
加劲桩号	实测 $q_{sik}$ /kPa	重度 $\gamma/(\text{kN m}^{-3})$	反演黏聚力 $c/\text{kPa}$	反演内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$
#SZ1— #SZ6	26.9	17.6	18.6	22.0
#SZ7— #SZ12	24.0	16.9	16.5	20.0

旋喷搅拌加劲桩与桩周土体中的摩阻力为

$$q_{sik} = (c_i + \sum r_i H \tan \varphi_i) \quad , \quad (1)$$

式中,  $H$  为加劲桩所处的地层深度 (m)。

从表 1 可以看出, 加劲桩对桩周土体性能的改进是明显的。

2.2 大直径加劲桩降低了对桩周土的应力作用水平

村山塑郎提出软土强度上屈服值的概念, 指出如果作用于土体上的荷载小于该土体的流变临界荷载时, 则软土蠕变变形随时间而逐渐减小, 最后并趋于停止, 土体不至于达到破坏; 当作用于土体上的荷载大于流变临界荷载时, 则变形速度增加, 最后导致土体破坏。上海某淤泥质粉质黏土基坑(开挖深度 8.4 m)采用加劲桩支护结构, 斜向采用三排加劲桩, 加劲桩结构设计参数如表 2 所示, 支护效果如图 7 所示。通过计算可知, 在最大设计承载力下, 桩侧土体需要提供的极限摩阻力为 25.0 kPa。根据夏冰等<sup>[4]</sup> 软土蠕变试验结论, 在此应力水平作用下, 加劲桩桩周土体处于可收敛流变变形阶段。基坑开挖后, 支护结构水平变形为 40 mm, 这表明, 由加劲桩桩周土体提供的极限摩阻力, 在满足其抗拔承载力的基础上, 还能满足软土自身的可收敛流变变形要求。由此证明, 具有大直径的加劲桩降低了对软土的应力作用水平。

表 2 加劲桩桩周土体极限摩阻力  $q_{sik}$  计算结果

Table 2 Results of limit friction of soil for stiffening piles

项目	桩长 /m	桩径 /mm	设计承载力 /kN	桩侧土体摩阻力 $q_{sik}$ /kPa
第 1 排	16.0	500	300	20.0
第 2 排	16.0	500	350	25.0
第 3 排	16.0	500	350	25.0

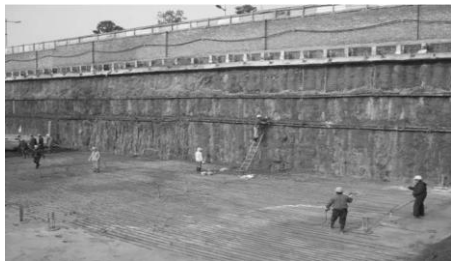


图 7 三排旋喷搅拌加劲桩的支护效果

Fig. 7 Supporting effect of three rows of stiffening piles

2.3 加劲桩的支护刚度

岩土锚固理论指出锚固体的荷载传递是一个渐变的过程, 是土体的摩阻力逐渐增大并向深层稳固土体传递的过程<sup>[1]</sup>。对于淤泥质软土, 如果在较大的荷载作用下, 这种传递过程很难在短时间内完成, 只有浅层土体来平衡这一外部荷载, 这时土体极限摩阻力大于其收敛应力水平并产生非收敛蠕变变形。随着时间的延长, 这种变形逐渐向深部土层扩展, 从而影响锚固体的抗拔承载力。这种由于应力集中现象而产生的软土非收敛蠕变变形也是锚杆、土钉等支护不能在软

土地区应用的一个重要原因。

加劲桩通过水泥浆液地面加压, 以高速喷射到土体中, 在高压水泥浆液的作用下, 软土的孔隙被填充, 细小的土颗粒发生重新排列, 形成一大直径水泥土复合式承载体, 并通过往复加压喷浆形成大直径的加固体, 按一定的间、排距排列于软土边坡中, 形成一个似重力的支护结构, 如图 8 所示。

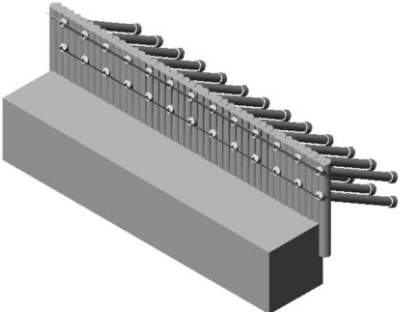


图 8 旋喷搅拌加劲桩支护结构形式

Fig. 8 Supporting structure of stiffening piles

与传统锚杆、土钉等支护结构相比, 旋喷搅拌加劲桩的直径大于 3 倍以上 (一般情况下能达到 500~1000 mm), 加劲桩与土体的接触面积增大, 成桩过程对基坑边坡土体的压缩固结, 加劲桩在土体中分布较密, 这些都将表现在其支护体系刚度的提高上。对于软土基坑, 要控制其支护变形, 关键在于提高其支护体系刚度。当前的加劲桩支护刚度设计计算一般参照《基坑工程技术规程》<sup>[9]</sup>附录中的支护刚度计算公式进行计算, 其支护刚度值为 18 MPa/m, 支护结构最大水平位移为 65 mm, 与实测值 40 mm 相差较大。

为此, 利用旋喷搅拌加劲桩检测的  $U-\delta$  曲线, 取其支护荷载标准值 (单桩 160 kN) 对应的割线斜率  $E$ , 得到加劲桩的单桩支护刚度  $K = 0.01E(\text{kN/mm})$ 。

根据上述 SZ 的 12 根测桩曲线, 得到平均  $K=38.1$  MPa/m, 对于水平间距为  $dh(\text{m})$ , 竖向间距为  $dv(\text{m})$  分布的加劲桩支护结构, 取其整体支护刚度  $K_s = K (1.5/dh) \cdot (2.5/dv)$ 。按上述支护结构, 其  $dh=1.5$  m,  $dv=3$  m, 计算得加劲桩的整体支护刚度为 31.8 MPa/m。代入其值, 计算得到加劲桩支护结构的水平位移为 45 mm, 与实测的 35 mm 相比, 这样确定的加劲桩支护刚度对计算加劲桩支护结构的变形是比较合适的。

3 结 论

工程实践表明, 基坑侧壁范围内的多排斜向加劲桩组成的桩群, 与竖向挡土结构组成空间支架体系, 改良了软土的结构体系, 达到了稳定基坑边坡的目的。经对加劲桩体和支护结构的检测, 得到了如下结论:

(1) 加劲桩对支护土体具有明显的加固作用。与普通锚杆、土钉相比, 加劲桩的高压旋喷作用使一定范围内的土体结构发生重新组合, 形成一种新型的水泥-土互嵌式结构, 改善了土体的力学性质, 特别对软土的加固效果显著, 本文建立的加固效果量化评定方法, 对加劲桩的加固效果的评定具有重要价值。

(2) 加劲桩支护的骨架约束作用对控制软土的变形作用明显。由于加劲桩本身的强度和刚度, 以及它在土体中的空间分布, 形成一复合式挡土结构, 从而对土体变形(特别是软土的流变变形)起到骨架约束作用, 有效限制基坑边坡滑裂面的移动, 增强土体的整体性。

(3) 大直径的加劲桩实现了应力扩散和传递作用。试验表明, 大直径、压缩与置换所形成的加劲桩大大削弱了软土的流变应力水平, 改善了桩体的应力分布状态, 降低了应力集中程度, 解决了软土锚固支护的变形控制难题。

(4) 基于单桩  $U-\delta$  曲线, 建立了软土基坑的支护刚度计算方法, 经与实测结果比较, 能较好地反映加劲桩支护结构的支护机理。

#### 参考文献:

- [1] 程良奎. 岩土锚固的现状与发展[J]. 土木工程学报, 2001, **34**(3): 7 - 12. (CHENG Liang-kui. Current State and development of anchorage support for rocks and soils[J]. China Civil Engineering Journal, 2001, **34**(3): 7 - 12. (in Chinese))
- [2] 徐希萍, 杨永卿. 深基坑支护技术的现状与发展趋势[J]. 福建建筑, 2008, **2**: 34 - 36. (XU Xi-ping, YANG Yong-qing. Study on the status quo and prospect of deep base-pit retaining system[J]. Fujian Architecture & Construction, 2008, **2**: 34 - 36. (in Chinese))
- [3] 王卫东, 吴江斌, 黄绍铭. 上海地区建筑基坑工程的新进展与特点[J]. 地下空间与工程学报, 2005, **1**(4): 22 - 26. (WANG Wei-dong, WU Jiang-bin, HUANG Shao-ming. Recent progress and characteristics of pit foundation in Shanghai[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, **1**(4): 22 - 26. (in Chinese))
- [4] 钱德玲. 支盘桩抗压和抗拔特性的研究[J]. 岩石力学, 2003, **24**: 517 - 520. (QIAN De-ling. A study of compression and extraction resistance behavior of squeezed supporting disk piles[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2003, **24**: 517 - 520. (in Chinese))
- [5] 张栋樑, 杨龙才, 王炳龙. 扩底抗拔桩试验分析与抗拔承载力计算方法[J]. 地下空间与工程学报, 2006, **2**(5): 25 - 29. (ZHANG Dong-cai, YANG Long-cai, WANG Bing-long. Experimental analysis and calculation of the up-lift resistance bearing capacity of bored cast-in-place pile with enlarged bottom[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, **2**(5): 25 - 29. (in Chinese))
- [6] 孙洋波, 王 华, 朱苦竹. 软土地区扩底桩群桩抗拔试验分析[J]. 施工技术, 2008, **37**(7): 43 - 45. (SUN Yang-bo, WANG Hua, ZHU Ruo-zhu. Field tests on uplift behavior of pile group with enlarged bottom in soft ground[J]. Construction Technology, 2008, **37**(7): 43 - 45. (in Chinese))
- [7] 夏 冰, 夏明耀. 上海地区饱和软土的流变特性研究及基坑工程的流变时效分析[J]. 地下工程与隧道, 1997, **3**: 11 - 18. (XIA Bing, XIA Yao-ming. Shanghai, the rheological properties of soft soil foundation engineering studies and analysis of flow limitation in Shanghai[J]. Underground Engineering and Tunnels, 1997, **3**: 11 - 18. (in Chinese))
- [8] 曹国金, 姜弘道, 张建斌. 锚固技术的支护机理和试验分析研究动态[J]. 地下空间, 2002, **1**: 86 - 89. (CAO Guo-jin, JIANG Hong-dao, ZHANG Jian-bin. Supporting mechanism and experimental analysis for anchoring technology[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2002, **1**: 86 - 89. (in Chinese))
- [9] JGJ120—99 建筑基坑支护技术规程[S]. 1999. (JGJ120—99 Technical specification for retaining and protection of building foundation excavations[S]. 1999. (in Chinese))

(本文责编 胡海霞)