

软土区旋喷式插筋微型桩工艺试验研究

吴越琛, 王进明, 陆舟超

(浙江省岩土基础公司, 浙江 宁波 315000)

摘要:软土地质条件下建筑物的沉降变形和承载力要求越来越高,对基础施工工艺提出了较高要求。在高压旋喷施工工艺的基础上,提出旋喷式插筋微型桩施工工艺,开展了微型桩工艺试验研究,结果表明该工艺大幅提高了单桩桩基承载性能,为实际工程应用提供了技术数据支持。

关键词:软土区;旋喷式插筋微型桩;桩基承载力

中图分类号:TU473.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2018)12-0074-05

Experimental Research on Jet Grouted Micro Piles in Soft Soil Area/WU Yue-chen, WANG Jin-ming, LU Zhou-chao
(Zhejiang Geotechnical & Foundation Company, Ningbo Zhejiang 315000, China)

Abstract: Under the condition of soft soil, the requirements of buildings on settlement deformation and bearing capacity are getting higher and higher, leading to higher requirements on the foundation construction. Based on the high-pressure jet grouting process, the micro-pile construction process with jet grouting was proposed, and tested. The results show that the process greatly improves the bearing capacity of the single-pile pile foundation and provides data support for field applications.

Key words: soft soil area; jet grouted micro piles; pile foundation bearing capacity

0 引言

随着公路、铁路、码头、轨道交通等交通设施及大型工业民用设施的大量兴建,软土地质条件下建筑物的沉降变形和承载力要求越来越高,建筑物地基加固成为工程界关心的重点与难点。

既有建(构)筑物地基基础加固或功能区(特别是厂区)改造时,通常要保证既有建(构)筑物的正常生产使用,所以施工安全和周边环境的保护显得尤为重要。施工场地周边及上部均会有工艺管道及生产设备,面临着作业空间不足、距离生产区近等问题。很多建设场地塘渣层回填较厚,回填料粒径大,地下水水位高。为确保生产区域的安全,避免大面积开挖形成塌方,充分考虑抗压承载力、抗拔及与上部结构基础连接等要求,提出旋喷式插筋微型桩工艺。

微型桩一般是指桩径 <400 mm,长细比 >30 ,采用钻孔、强配筋和压力注浆施工工艺的灌注桩,是 20 世纪 50 年代由意大利的 Lizzi 提出,并被 Fondedile 公司首先开发利用。1982 年法国 soletanch 公司来华进行技术交流,介绍了微型桩技术在法国的应用情况,引起了国内学术界的广泛重视。孙剑平等^[1]对膨胀土地基上的建筑进行微型桩的地基加固处理,分析指出了桩长的计算公式;吕凡任等^[2]做了软土地基上

微型桩抗压和抗拔特性试验;黄涛^[3]在微型钢管桩在某地基加固工程中肯定了微型钢管桩的作用;方家强^[4]在对某沿海软土地区建筑物基础加固时,采用微型钢管桩控制其沉降,现场对 3 根微型钢管桩进行了单桩竖向抗压静载试验,并对加固后建筑物的沉降进行了观测,表明微型钢管桩有良好的抗压强度;屈勇等^[5]选择佛山地区典型软土地基条件,对微型桩单桩及群桩基础抗压强度进行了试验研究,试验结果表明所设计的微型群桩具有良好的抗压承载力;苏荣臻等^[6]在北仑电厂进行了微型桩的单桩、群桩抗压试验。综上,在软土地区微型桩的抗压、抗拔性能及单桩、群桩承载力均开展过一定的应用研究,主要采用的是混凝土灌注桩及钢管桩,根据收集资料,旋喷式插筋微型桩工艺在工程实践中应用较少,对于该技术的承载力、可靠性需要进行试验论证。

1 项目简介

1.1 场地工程地质概况

试验场地地形平坦开阔,地貌类型单一,属第四系滨海冲湖积平原,场地工程地质概况见表 1。

1.2 试验方案简介

1.2.1 设计方案

收稿日期:2018-07-16; 修回日期:2018-11-01

作者简介:吴越琛,男,汉族,1991 年生,勘查技术与工程(岩土钻掘工程)专业,从事地质工程、岩土工程施工技术管理工作,浙江省宁波市宝善路 206 号,649454824@qq.com。

表 1 场地工程地质概况

层号	名称	层厚/ m	天然含 水率/%	天然重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	孔隙 比	饱和 度/%	压缩系数/ MPa^{-1}	压缩模 量/ MPa	粘聚力 c/MPa	内摩擦角 $\phi/(\circ)$	静力触探锥头 阻力 q_c/MPa	静力触探侧 阻力 f_s/kPa
① ₀	回填土	1.5									0.00	1.93
① ₁	粘土	2.4	26.0	19.6	0.755	94.0	0.39	4.49	28.0	14.2	0.82	32.82
② _{1a}	粉质粘土	4.5	31.1	18.7	0.907	93.3	0.42	4.51	19.0	10.3	0.84	14.38
② _{2a}	淤泥质粘土	8.1									1.55	18.71
② _{2b}	淤泥质粉质粘土	3.3	35.6	18.4	1.005	96.4	0.45	4.48	21.0	8.9	0.72	13.80
② _{3b}	淤泥质粉质粘土	6.1	36.3	18.2	1.044	94.9	0.76	2.67	23.0	9.6	0.76	11.35

旋喷式插筋微型桩桩型设计如下:高压旋喷桩设计桩长 22 m,桩间距 < 3 m。旋喷桩直径 600 mm,采用 P.O42.5 普通硅酸盐水泥,水泥浆水灰比 0.8~1.0。插筋设计采用 20 号无缝钢管,直径 108~127 mm,插筋位置为旋喷桩中心,插筋长度 11 m。

1.2.2 设计试验方案

设计试验微型桩 7 根,分别开展对旋喷式插筋微型桩的插筋体抗压静载试验 1 次、旋喷式插筋微型桩单桩轴向受压静载试验 1 次、旋喷式插筋微型桩插筋体抗拔承载力试验 1 次、旋喷式插筋微型桩插筋体水平承载力试验 1 次,未插筋的高压旋喷桩轴向受压承载力试验 1 次以及高压旋喷桩水泥土取样桩 2 根。

2 施工工艺

2.1 回填土层成孔

回填土层大多为直径较大的块石、碎石夹粘性土,需要钻孔至原土层为高压旋喷及插筋提供施工条件,且孔径不宜小于 150 mm,保证孔壁稳定。

综合考虑工程实际应用中的施工条件及工艺要求,回填土层成孔选择 $\text{O}175$ mm 气动潜孔锤跟管钻进工艺成孔护壁,见图 1。施工设备为小型多功能履带式工程钻机、移动式空压机,见图 2。若回填土层孔壁较稳定,则直接采用气动潜孔锤成孔。小型履带式工程钻机在钻进时需注意控制给进压力,开孔时轻压慢转,钻进时不可盲目加压进尺导致钻孔偏斜,钻进过程中宜反复提动钻具扫孔,防止卡钻



图 1 护壁套管



图 2 施工钻机

及孔壁周围松动石块或探头石影响下一步施工。

2.2 高压旋喷施工

2.2.1 成桩机理

高压喷射注浆法是在高压水射流切割技术基础上发展而来的施工工艺,是通过高压发生装置,使液流获得巨大能量后,经过注浆管道从一定形状和孔径的喷嘴中以很高的速度喷射出来,形成一股能量高度集中的液流。当喷射流的动压超过土体结构强度时,土粒便从土体剥落下来,将浆液与土粒强制搅拌混合,一部分细小的土粒随着浆液冒出地面,其余土粒在喷射流的冲击力、离心力和重力等作用下,在横截面上土粒按质量大小有规律地排列起来,小颗粒在中间部位居多,大颗粒多在外侧或边缘部分,形成了以浆液为主体、搅拌混合和压缩渗透等部分,经过一定时间便凝固成强度较高、渗透系数小的固结体^[7]。

2.2.2 成桩施工

钻机更换高压水龙头及连接管路至高压注浆泵,在护壁套管内下入旋喷钻具,高压旋喷施工采用 $\text{O}65$ mm 双喷嘴单管旋喷钻具,喷嘴直径 2.0 mm,下钻至预定孔深,将配置好的水泥浆借助高压注浆泵进行高压旋喷施工,水泥浆采用 P.O42.5 普通硅酸盐水泥配置,水灰比控制在 0.8~1.0。高压旋喷施工的具体施工参数:注浆压力 20~25 MPa,钻杆提升速度 20~30 cm/min,钻杆旋转速度 20~30 r/min。为获得较大的旋喷桩直径以及对水泥土强度值,在部分位置采用驻喷及复喷措施。

2.3 插筋施工

2.3.1 插筋体加工

插筋体采用 $\text{O}108\text{ mm}\times 8\text{ mm}$ 规格的 20 号无缝钢管,单根长度 1.5 m,丝扣连接,为增加插筋体与旋喷桩水泥土之间的摩擦力,钢管外绕螺旋箍筋并电焊牢固,钢管之间连接采用方牙丝扣确保同心度和垂直度,并在 $\text{O}108\text{ mm}$ 无缝钢管丝扣连接处外侧套 $\text{O}127\text{ mm}$ 无缝钢管短节并焊接牢固,底部制作十字桩尖。将每根桩的钢管自上而下编号排序放置,在钢管布设应变片的位置对称开直径约 20 mm 的圆孔,作为屏蔽线穿线连接应变片的通道。

2.3.2 插筋

高压旋喷桩施工完成后,立即进行插筋作业。将加工好的钢管按序号排列,钢管间采用丝扣连接。在钢管接头外侧焊接外接箍,接着利用加工好的压入接头逐根连接,静压入孔内,见图 3。



图 3 插筋



图 4 水泥土心样

表 2 水泥土心样抗压强度

桩号编号	取样深度/ m	实际龄期/ d	试件直径/ mm	试件高度/ mm	破坏荷载单值/ kN	抗压强度/ MPa	
						单值	平均值
427-1-30	4.10	28	88.5	90.0	64.0	10.40	
427-2-30	6.20	28	86.0	87.0	92.5	15.92	14.61
427-3-30	9.50	28	88.0	90.5	106.5	17.51	
427-4-60	5.30	60	89.0	91.0	83.0	13.34	
427-5-60	6.70	60	87.0	89.0	82.5	13.88	12.94
427-6-60	9.90	60	88.0	89.5	70.5	11.59	
427-7-90	5.80	90	88.5	89.0	80.0	13.01	
427-8-90	6.90	90	88.0	90.0	111.5	18.33	15.76
427-9-90	10.80	90	88.5	90.0	98.0	15.93	
428-1-30	3.30	28	86.0	88.0	34.0	5.85	
428-2-30	9.20	28	86.0	88.0	49.5	8.52	8.38
428-3-30	10.00	28	87.0	89.5	64.0	10.77	
428-4-60	3.40	60	88.0	89.0	49.5	8.14	
428-5-60	8.60	60	89.0	91.0	61.0	9.81	9.35
428-6-60	11.00	60	87.0	89.5	60.0	10.09	
428-7-90	3.60	90	87.5	88.5	62.0	10.31	
428-8-90	9.40	90	88.0	90.0	72.0	11.84	10.72
428-9-90	12.00	90	88.5	88.5	61.5	10.00	

注:428号桩进行一次高压旋喷施工;427号桩进行二次复喷。

3 试验成果

3.1 水泥土强度

成桩施工 28 d 后,组织 GXY-200 型地质钻机进场对 2 根水泥土取样桩进行钻心取样,施工采用金刚石钻头单动岩心管钻进,所取样品见图 4。

分别取 2 根水泥土桩不同深度的桩身水泥土心样,进行 28、60、90 d 龄期的抗压强度试验。试验数据见表 2。

3.2 静载试验与数据采集

按试验设计分别进行了旋喷式插筋微型桩插筋体抗压静载试验、旋喷式插筋微型桩单桩轴向受压静载试验、旋喷式插筋微型桩插筋体抗拔承载力试验、旋喷式插筋微型桩插筋体水平承载力试验、单根

高压旋喷桩的轴向受压承载力试验各 1 次,均为破坏性试验。试验曲线均呈陡降型,试验结果见表 3。

通过对静载试验中桩身应变数据的采集,以旋喷式插筋微型桩单桩抗压试验为例,可以在桩身应变总图(图 5)中看到,桩身主要应力集中在桩身 3~6 m 范围内,在静载试验的后期,桩身应力有一部分已传递到下部桩体。图 6 为旋喷式插筋微型桩插筋体抗拔试验插筋体应变曲线图,由于试验过程中受周边堆载扰动,后期应变数据失真。可看到插筋体受拉荷载达到 175 kN 时,插筋体应变主要集中在 6 m 深度以上,还未传递至下部,按 11 m 插筋体长度计算抗拔力与试验结果基本吻合。

表 3 静载试验结果汇总

序号	试验项目	桩径/mm	桩长/m	最大试验荷载/kN	最大试验荷载对应位移量/mm	单桩竖向抗压极限承载力/kN
1	高压旋喷桩单桩	600	22.7	325	44.83(沉降)	216
2	旋喷式插筋微型桩单桩抗压	600	22.7	1191	41.68(沉降)	1083
3	旋喷式插筋微型桩插筋体抗压	600	22.7	1300	112.69(沉降)	1191
4	旋喷式插筋微型桩插筋体抗拔力	600	22.7	399	45.11(上拔)	333
5	旋喷式插筋微型桩插筋体水平承载力	600	15.5	60	78.94(水平)	50

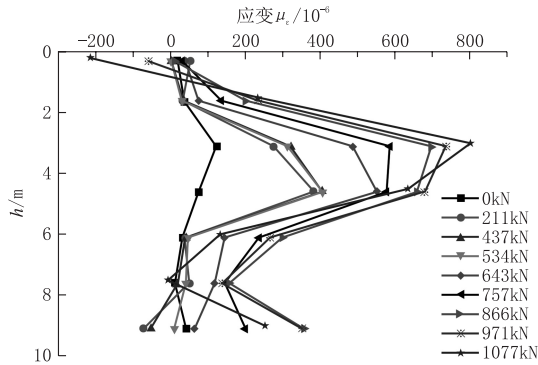


图 5 抗压试验桩身应变曲线

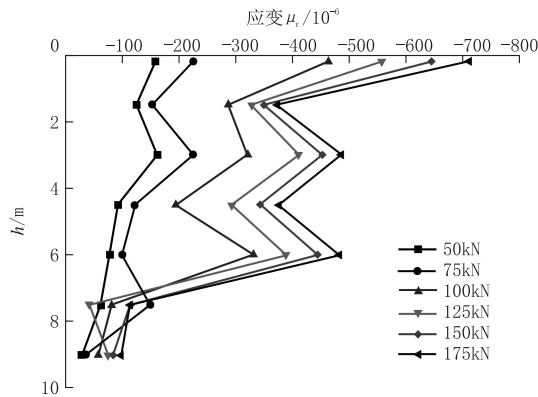


图 6 抗拔试验桩身应变曲线

4 数据分析

4.1 试验结果与理论计算

静载试验的结果表明,回填土区旋喷式插筋微型桩的抗压承载力比单一旋喷桩提高了 426%,在单一旋喷桩没有抗拔力的基础上增加了抗拔承载性能,达到了抗压承载力的 30%。旋喷式插筋微型桩在插筋体受压的情况下可以取得相同的抗压承载力。

根据《建筑桩基技术规范》(JGJ 94-2008)中对于双桥探头静力触探资料确定单桩竖向极限承载力的公式:

$$Q_{uk} = Q_{sk} + Q_{pk} = u \sum l_i \beta_i f_{si} + \alpha q_c A_p \quad (1)$$

式中: f_{si} ——第 i 层土的探头平均侧阻力, kPa; q_c ——桩端平面上、下探头阻力,取桩端平面以上

$4d$ (d 为桩的直径或边长)范围内按土层厚度的探头阻力加权平均值,然后再和桩端平面以下 $1d$ 范围内的探头阻力进行平均, kPa; α ——桩端阻力修正系数,对于粘性土、粉土取 $2/3$,饱和砂土取 $1/2$; β_i ——第 i 层土桩侧阻力综合修正系数,粘性土、粉土 $\beta_i = 10.04(f_{si})^{-0.55}$,砂土 $\beta_i = 5.05(f_{si})^{-0.45}$ 。

根据《复合地基技术规范》(GB/T 50783-2012),对于由桩体材料强度可能提供的单桩竖向抗压承载力特征值应按公式(2)计算:

$$R_a = \eta f_{cu} A_p \quad (2)$$

式中: R_a ——单桩竖向抗压承载力特征值, kN; A_p ——单桩截面积, m^2 ; η ——桩体强度折减系数,取 0.33。

静载试验前处理桩头过程中开挖 3 m 深度,发现上部回填土层成桩质量差,原土层桩体直径较小,实际桩径为 400~450 mm,后在 0~3 m 范围内采取了钢护筒内浇筑混凝土的接桩措施。根据实际桩径将该场地的双桥探头静力触探数据代入公式(1)计算得出高压旋喷单桩理论极限侧阻力值 Q_{sk} 为 1232 kN,极限端阻力值 Q_{pk} 为 100 kN(在超过一定长度时,桩端阻力对水泥土单桩承载力的影响可以忽略不计)。根据桩身水泥土强度平均值按公式(2)计算得出高压旋喷单桩理论极限承载力 R_a 值为 1229 kN,与公式(1)得出结果比较接近。而静载试验的结果表明,高压旋喷单桩在最大试验荷载 325 kN 时已发生沉降破坏,旋喷式插筋微型桩的竖向抗压极限承载力则很接近理论计算值。

4.2 水泥土桩特性

从已有对水泥土桩的研究与认识看,王蕊^[8]认为水泥土桩承载力的关键在于浅层桩身强度,水泥土单桩的破坏模式表现为桩体材料强度破坏而造成的陡降型。增加桩长来提高桩体承载力是有一定限度的,存在有效桩长的问题。随着桩长增加,在桩长 5~8 m 内桩体承载力增加很快,桩长到 8 m 后幅度减小至趋于定值。

赵顺波等^[9]在回填土区深层搅拌桩和高压旋喷

桩复合地基的静承载性能研究中认为增加桩长来提高桩体承载力收效甚微,增加桩体强度尤其是上部桩体的强度则能够较大地提高复合地基承载力。即上部桩体的材料强度在提高水泥土桩承载能力上起主要作用。在回填土区,回填土深度范围内的桩周侧限压力小,桩体分担压力较大,因此容易造成桩体破坏而使下部桩体和下部桩间土体承载力不能充分发挥。

段继伟等^[10]认为水泥土桩存在着临界桩长 l_c ,为 $14d\sim 17.7d$ (d 为桩径),单桩桩身变形、轴力和侧摩阻力主要集中在 $0\sim l_c$ 深度内,对于单桩其最大应变发生在桩顶,对于单桩带台其最大应变不发生在桩顶,而是桩身 $3\sim 4$ m深度处,其原因是绝对刚性承台带动桩、土同时下沉,使靠近桩顶附近侧摩阻力来不及发挥引起的。认为桩的破坏主要发生在浅层,即所谓浅层破坏。这一点与本次试验图5显示的结果类似,其最大应力发生在3 m测点处,其原因是3 m以上桩身开挖处理后形成了绝对刚性的钢护筒混凝土桩身。

4.3 原因分析

按有效桩长 $14d$ 考虑重新计算桩侧极限摩阻力值 Q_{skl} 为376 kN,仍然大于目前试验得到的高压旋喷桩单桩竖向抗压极限承载力,分析原因一为高压旋喷桩成桩过程中由于施工因素仍然存在桩身强度薄弱部位,钻心法检测的往往是经过机械扰动破坏后人为选择的完整柱状水泥土心样,其强度值并不能说明高压旋喷桩桩体强度值是稳定连续的;二是结合以往一些工程经验来看,由于回填土区地质条件特点,特别是孔隙较大的块石、碎石回填层成桩质量差,甚至有时形不成有效桩体,浅层桩体传递荷载效果不理想。

而本次试验方案通过利用在水泥土桩上部桩体中插筋的方式,极大地提高了单桩承载性能,由高压旋喷成桩机理可知,桩中心部分强度低,边缘部分强度高,旋喷桩中心的插筋体起到加强上部桩体整体强度的作用,使插筋体范围内桩体不易破坏,这一点起到了关键的作用;二是利用插筋体将荷载向下传递给下部桩体和深层土体,提高了有效桩长值,充分发挥了高压旋喷桩的桩侧摩阻力;三是在回填土区,通过开挖发现回填土深度范围内的成桩质量不佳,而通过插筋体直接连接上部荷载的方式,避免了回填土范围内的成桩质量因素以及桩体分担压力过大综合导致的上部桩身破坏的问题。

5 结论

(1)旋喷式插筋微型桩工艺大幅提高了水泥土桩的承载性能,且具有一定的抗拔承载能力,为工程应用提供了技术数据支持。

(2)通过插筋体直接连接上部荷载的方式,有效解决了水泥土桩荷载传递的问题。

(3)旋喷式插筋微型桩工艺可以实现狭窄、限高场地内基础加固及基础施工的要求,且施工效率高,对周边建筑物及环境影响小。

(4)在实际工程应用后定期观测上部结构沉降情况并记录,可继续开展下一步工作确定群桩基础受力承载性能。

参考文献:

- [1] 孙剑平,李安起,张少华,等.微型桩在膨胀土地基加固中的应用[C]//第八届全国结构工程学术会议论文集(第1卷).中国力学学会结构工程专业委员会、中国力学学会《工程力学》编委会、云南工业大学、清华大学土木工程系,1999:928-933.
- [2] 吕凡任,陈仁朋,陈云敏,等.软土地上微型桩抗拔和抗拔特性试验研究[J].土木工程学报,2005,38(3):99-105.
- [3] 黄涛.微型钢管桩在美的海岸花园地基加固中的应用[J].西部探矿工程,2005,17(S1):66-67.
- [4] 方家强.微型钢管桩在桩基础加固中的应用[J].福建建设科技,2006,(2):10-11,19.
- [5] 屈勇,张继强.佛山地区微型桩基础下压试验[J].山西建筑,2001,(36):67-68.
- [6] 苏荣臻,陈培.微型桩基础下压试验研究[J].建筑技术开发,2012,(5):4-5,13.
- [7] 陈礼仪,胥建华.岩土工程施工技术[M].四川成都:四川大学出版社,2008:127-129.
- [8] 王蕊.考虑破坏模式的水泥土桩承载力计算与研究[J].地下空间与工程学报,2015,11(5):52-58.
- [9] 赵顺波,姚贤华,裴松伟,等.回填土区深层搅拌桩和高压旋喷桩复合地基的静承载性能[J].中国港湾建设,2008,(1):16-20.
- [10] 段继伟,龚晓南,曾国熙.水泥搅拌桩的荷载传递规律[J].岩土工程学报,1994,16(4):1-7.
- [11] 郑刚,刘松玉.对水泥土桩承载力确定的几个问题的分析[J].东南大学学报(自然科学版),2001,31(5):62-66.
- [12] 吴雄志,王志军,葛云海.水泥土桩单桩承载力影响因素的探讨[J].河北建筑科技学院学报,2004,21(1):39-41.
- [13] JGJ 94-2008,建筑桩基技术规范[S].
- [14] 龚晓南.地基处理技术手册[M].北京:中国建筑工业出版社,2008.
- [15] JGJ 79-2012,建筑地基处理技术规范[S].
- [16] 石建磊,张杰,唐世杰.高压旋喷桩在软基加固中若干问题探讨[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2009,36(1):52-54.
- [17] 田宏图.钻芯检测旋喷桩水泥土抗压强度中的若干问题[J].铁道建筑,2007,(4):75-76.
- [18] 孙铭心.高压旋喷桩工程特性研究[D].辽宁大连:大连理工大学,2000.
- [19] 秦建庆,陈建峰.水泥土桩复合地基变形控制中的若干问题探讨[J].岩土工程技术,1999,(2):8-11,16.