

固底管桩单桩承载力的研究

李连营 白 牧 赵志峰

(天津市勘察院, 天津 300191)

【摘 要】 通过现场对预应力管桩底部采用高压旋喷法进行加固这一新的施工工艺试验, 探讨预应力管桩桩端为水泥土情况下的受力机理及提高管桩端阻力和单桩极限承载力的效果, 并探讨其在天津地区的适用性。

【关键词】 固底管桩; 高压旋喷桩; 水泥土; 极限端阻力

【中图分类号】 TU 473.11

Study on the Bearing Capacity of Bottom-consolidated Pipe Pile

Li Lianying Bai Mu Zhao Zhifeng

(Tianjin Institute of Geotechnical Investigation & Surveying, Tianjin 300191 China)

【Abstract】 Based on field tests of prestressed concrete pile that bottom soil is consolidated by high pressure rotary jet grouting. The mechanical property of the pipe pile that there is cement soil under the tip and how it effects on the pile tip resistance and single pile ultimate bearing capacity is studied. The applicability of bottom-consolidated pipe pile in Tianjin is discussed.

【Key Words】 bottom-consolidated pipe pile; high pressure rotary jet grouting pile; cement soil; ultimate tip resistance

0 引言

固底管桩是指在将要施工的预应力管桩底部施工高压旋喷桩进行加固, 然后在施工完成的高压旋喷桩上施工预应力管桩, 并将预应力管桩插入高压旋喷桩内一定深度, 从而达到对管桩底部进行加固、提高管桩端阻力和单桩极限承载力的目的。

预应力管桩在天津地区的应用越来越普及, 为探讨预应力管桩组合桩型的应用效果及固底管桩的

承载性能, 进行了现场试验, 研究固底管桩桩端水泥土的端阻力和单桩极限承载力。

1 具体试验情况

1.1 试验场地地质条件

埋深 25 m 以上地层土性、平均厚度及各层土的物理力学指标见表 1。试验场地先后施工过直径 $\phi 300$ 、 $\phi 400$ 预应力管桩及 $\phi 600$ 、 $\phi 700$ 钻孔灌注桩, 可对比性较强。

表 1 地层分布及主要物理力学指标表

层号	土层名称	土层厚度 /m	含水量 w /%	孔隙比 e	塑性指数 I_p	液性指数 I_L	压缩模量 $E_{s(1-2)}$ /MPa	标贯击数 N
1a	杂填土	1.90						
1b	素填土	1.10	29.1	0.91	17.7	0.70	4.9	3.9
2a	粘土	0.60	27.8	0.82	17.0	0.48	5.1	6.6
2b	粉质粘土	1.80	28.8	0.84	12.6	0.79	6.4	5.1
3a	粉质粘土	2.00	31.4	0.89	13.0	1.00	5.7	5.0
3b	粉质粘土	6.60	29.7	0.83	11.4	1.09	7.7	10.0
4	粉质粘土	2.50	24.7	0.68	11.7	0.67	5.7	7.5
5a	粉质粘土	0.50	23.5	0.69	13.3	0.43	6.4	16.3
5b	粉土	2.50	21.6	0.61			13.5	24.6
6a	粉质粘土	3.70	25.4	0.73	12.4	0.68	7.0	12.5
6b	粉土	1.50	24.8	0.70			11.8	28.1

1.2 试验工作量

本场地共进行了 7 组试桩, 具体实施工作量见表 2。

专利技术: ZL2003 2 0111974.4

作者简介: 李连营, 1965 年生, 男, 汉族, 天津市人, 教授级高工, 国家特许注册岩土工程师, 主要从事工程勘察、地基处理等岩土工程工作。E-mail: tigus@tigis.com.cn

表2 实施工作量一览表

桩号	管桩桩长/m	高压旋喷桩(加固体)				水泥掺入质量分数/%	每米水泥用量/(kg·m ⁻¹)	每桩水泥用量/kg	备注
		旋喷压力/MPa	直径/m	深度/m	高度/m				
1	10.0	28	0.8	9.5~11.5	2.0	35.0	350	700	压入 0.5 m
2	8.0	28	0.8	7.5~9.5	2.0	35.0	350	700	压入 0.5 m
3	8.0	28	0.8	7.5~10.5	3.0	35.0	350	1 050	压入 0.5 m
4	8.0	36	1.0	7.5~9.5	2.0	35.0	525	1 050	压入 0.5 m
5	8.0	28	0.8	7.0~10.0	3.0	35.0	350	1 050	压入 1.0 m
6	8.0	28	0.8	0.0~9.5	9.5	30.0	300	2 850	压入 8.0 m
7	8.0								

注:试桩均压至地表

2 试验结果及受力机理

2.1 单桩竖向极限承载力标准值

极限承载力静载荷试验,试验结果见表3。

高压旋喷桩成桩满28天后^[1]进行了单桩竖向

表3 静载荷试桩结果

桩号	管桩桩长/m	高压旋喷桩(加固体)			单桩最大加载/kN	对应沉降/mm	单桩极限承载力取值/kN
		直径/m	高度/m	插入深度/m			
1	10.0	0.8	2.0	0.5	1 600	48.21	1 500
2	8.0	0.8	2.0	0.5	1 400	45.79	1 300
3	8.0	0.8	3.0	0.5	1 400	29.17	1 300
4	8.0	1.0	2.0	0.5	1 400	39.86	1 300
5	8.0	0.8	3.0	1.0	1 500	50.26	1 400
6	8.0	0.8	9.5	8.0	1 700	41.24	1 600
7	8.0				550	42.32	500

2.2 受力机理分析

从表3可看出,在高压旋喷桩上施工预应力管桩,并将预应力管桩插入高压旋喷桩内一定深度,明显提高预应力管桩单桩承载能力,得出结论:

1)从桩2、桩3、桩5的试桩结果可看出,固底管桩承载能力与预应力管桩插入高压旋喷桩的深度、预应力管桩下高压旋喷桩的厚度和高压旋喷桩高度关系不大,三根试桩的承载力基本相同;

2)从桩2、桩4的试桩结果可看出,固底管桩承载能力与高压旋喷桩的直径没有关系,直径0.8 m和1.0 m承载力是相同的;

3)从桩1、桩2的试桩结果可看出,固底管桩承载能力与预应力管桩的长度有直接关系,长度越大,承载力越高;

4)从桩2、桩6的试桩结果可看出,固底管桩承载能力与预应力管桩桩端和桩周全部施工高压旋喷桩有关,承载力比仅在桩端施工高压旋喷桩高;

5)从桩2、桩7的试桩结果可看出,固底管桩承载能力与预应力管桩下是否有高压旋喷桩关系极大。施工了高压旋喷桩,单桩极限承载力很高。

从以上分析可看出,固底管桩下高压旋喷桩的施工质量(强度和均匀性)是决定固底管桩承载力的关键因素。固底管桩承载力高低与高压旋喷桩的直径、厚度、高度等关系不大。这说明固底管桩的受力机理主要是提高了预应力管桩下持力层的强度(即提高 q_p 值),形成了一个具有高强度的持力层,从而提高固底管桩单桩承载力。

3 水泥土持力层的极限端阻力值

3.1 根据试桩结果反推

假定各层土的极限摩阻力值均无提高,各层土的极限摩阻力值根据各层土的物理力学指标统计结果按《建筑桩基技术规范》(JGJ 94-94)提供的桩基参数^[2]内插并结合土层时代成因、力学性质综合确定^[3],计算单桩竖向极限总侧阻力,再根据试桩结果推算本场地固底管桩水泥土持力层的极限端阻力值见表4。

表4 水泥土的极限端阻力值

试桩号	水泥土的极限端阻力值/kPa
试桩1	8 450.4
试桩2	7 489.1
试桩3	7 489.1
试桩4	7 489.1
试桩5	8 431.9
平均值	7 869.2

3.2 取芯试验结果

为检验高压旋喷桩的均匀性及成桩质量,现场钻探取芯进行室内抗压强度试验,试验结果见表5。

表5 反推水泥土的极限端阻力值

试验号	抗压强度 /MPa	反推极限端阻力/kPa
1	9.0	7 168.6
2	7.5	5 971.3
3	9.7	7 722.9
4	9.2	7 324.8
5	8.0	6 369.4
6	8.6	6 847.1
平均值	8.7	6 900.2

3.3 与未加固前的极限端阻力比值

持力层土的极限端阻力值根据土的物理力学指标统计结果按《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—94)提供的桩基参数内插确定^[2],采用高压旋喷桩加固后根据试桩结果和取芯试验结果推算的水泥土持力层极限端阻力值与未加固前的持力层极限端阻力值的比值见表6。

表6 与未加固前的极限端阻力比值

取值依据	极限端阻力/kPa	加固后提高系数
未加固前(查表)	600	
加固后(试桩反推)	7 869	13.1
加固后(取芯反推)	6 900	11.5

3.4 计算结果分析

从试桩结果可以看出,采用高压旋喷桩加固后,明显提高了预应力管桩下持力层的极限端阻力标准值,加固后的极限端阻力标准值达 6 900 ~ 7 869 kPa,能比加固前提高 11.5~13.1 倍,形成了一个具有很高强度的持力层,从而达到提高固底管桩单桩承载力的目的。

4 单桩极限承载力预估公式

4.1 极限端阻力标准值与压缩模量建立关系

由于浅部土层液性指数普遍偏大,查表确定的极限端阻力标准值不能真实反映持力层土的性质,而土的压缩模量直接反映土的性质,故笔者建议采用加固后水泥土的抗压强度(偏于安全)与土的压缩模量的比值反映水泥土持力层的极限端阻力标准值。比值确定详见表7。

表7 与未加固前的压缩模量比值

加固后抗压强度/kPa	未加固前压缩模量/kPa	比值
6 900.2	7 700	0.896

4.2 单桩极限承载力预估公式

邓泽洪等人推导出下组合高喷插芯组合桩的估算公式^[4],公式考虑较全面,但计算相对较复杂,笔者建议采用的估算公式如下:

$$Q_{uk} = Q_{sk} + Q_{pk} = u \sum q_{sik} l_i + q_{pc} A_p \quad (1)$$

式中: Q_{uk} 为预估的单桩极限承载力标准值, kN; U 为管桩的周长, m; q_{sik} 为水泥土持力层以上第 i 层土的极限摩阻力标准值, kPa; l_i 为第 i 层土的厚度, m; q_{pc} 为水泥土持力层的极限端阻力标准值, $q_{pc} = 0.896 E_s$, kPa; E_s 为未加固前持力层的压缩模量, kPa; A_p 为管桩的横截面积, m^2 。

5 经济效益分析

根据本场地静载荷试桩结果,本场地曾经施工过的各种桩型的单桩竖向极限承载力标准值见表8。

表8 单桩竖向极限承载力标准值表

桩型	桩顶埋深/m	桩端埋深/m	桩长/m	桩径/m	Q_{uk}/kN
预应力管桩	1.00	18.00	17.00	0.30	1 000
	0.70	18.70	18.00	0.40	1 600
钻孔灌注桩	0.80	23.35	22.55	0.60	2 275
	0.90	20.35	19.45	0.70	2 200

对 $\phi 300$ 、 $\phi 400$ 预应力管桩、高压旋喷桩及 $\phi 600$ 、 $\phi 700$ 钻孔灌注桩按市场成本价格计算,固底管桩的单位承载力费用比最低,比 $\phi 400$ 短预应力管桩节省 32.0%,比 $\phi 300$ 长预应力管桩节省 31.2%,比 $\phi 400$ 长预应力管桩节省 25.4%,比 $\phi 600$ 钻孔灌注桩节省 58.1%,比 $\phi 700$ 钻孔灌注桩节省 60.1%。

6 结论

1) 试验结果表明,固底管桩的受力机理主要是
(下转第 169 页)

从表2中可以看出,采样频率2 500 kHz下砂岩岩样的声发射信号在0~468.75 kHz间的能量分别占该信号能量的百分比为94.621 9%、98.671 5%、96.914 4%、98.795 6%,这表明岩石声发射信号的能量在频域上虽然分布比较广泛,但绝大部分能量集中在0~468.75 kHz间。500 kHz以上的高频部分所占的能量很小,可近似忽略不计。

表2中,岩样Kaiser点信号在0~156.250 kHz间的能量占该信号能量的百分比为64.191 3%,非Kaiser点信号(点1,2,3)在0~156.250 kHz间的能量仅占该信号能量的百分比为15.905 5%、7.537 4%和4.192 8%。表明Kaiser点信号的优势能量主要分布在0~156.250 kHz,非Kaiser点信号能量主要分布在156.25~312.50 kHz频带上,两者主要能量的分布频带差异显著。

由此可以认为采样频率2 500 kHz下0~156.250 kHz是能够表征砂岩Kaiser点声发射信号的特征频带。当有一定数量的试验样本后,利用Kaiser点声发射信号的特征频带就可精确地确定Kaiser点位置。

3 结 论

1)岩石声发射信号含有丰富的信息,小波包分解能根据信号特性和分析要求自适应地选择相应频带与信号频谱相匹配,是一种比小波分解更为精细的分解方法。

2)通过试验表明Kaiser点信号小波包降噪是一种有效的信噪分离方法,降噪后的波形更为直观地显现了Kaiser点声发射原始信号的特征,也便于精确地确定Kaiser点位置。

3)对Kaiser点信号和非Kaiser点信号进行小波包分析得到了砂岩声发射信号的频带范围。然后在能量分析基础上得到各频带能量分布,由此获得了0~156.250 kHz能够表征砂岩Kaiser点声发射信号的特征频带。当有一定数量的试验样本后,利用Kaiser点声发射信号的特征频带就可精确地确定Kaiser点位置,进而测定该点的地应力状态。

参 考 文 献

- [1] 蔡美峰. 地应力测量原理和技术[M]. 北京:科学出版社,2000:3-48.
- [2] 赵奎,金解放,赵康,等. 声发射测量原岩应力研究现状及进展[J]. 矿业快报,2005,24(12):4-6.
- [3] 张贤达,保铮. 非平稳信号分析与处理[M]. 北京:国防工业出版社,1998:1-12.
- [4] 飞思科技. 小波分析理论与MATLAB7实现. 电子工业出版社,2005:13-358.
- [5] 凌同华,李夕兵. 多段微差爆破振动信号频带能量分布特征的小波包分析. 岩石力学与工程学报,2005,24(7):28-33.

收稿日期:2006-06-05

(上接第165页)

提高了预应力管桩下持力层的强度(即提高端阻力 q_p 值,加固后的 q_p 值可达7 000 kN以上,比加固前提高10倍以上),形成了一个具有很高强度的持力层,充分利用高压旋喷桩加固持力层后端截面所产生的端阻力,从而达到提高固底管桩单桩承载力的目的。

2)通过计算对比表明,固底管桩的经济效益较明显,比常规预应力管桩可节省25%~30%左右,比钻孔灌注桩可节省50%以上。

3)试验结果表明,固底管桩对于天津地区海相层分布砂性大的粉质粘土、粉土及砂粘互层的场地适用性较好,处理效果也较明显。

4)按修正公式(1)计算的单桩竖向极限承载力标准值与试桩结果较吻合,按公式估算的单桩承载

力使用是比较安全的^[5]。

5)由于该工法仅在2个场地进行过17组试验,试验结果的合理性和适用性还有待进一步验证。

参 考 文 献

- [1] 汪正荣主编. 地基与基础施工手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1997:266-270.
- [2] JGJ 94-94 建筑桩基技术规范[S].
- [3] 苏东明,卢天宝,王建生. 钻孔摩擦灌注桩岩土设计参数取值商榷[J]. 岩土工程技术,2005(4):184-185.
- [4] 林宗元主编. 岩土工程治理手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2005:424-425.
- [5] 李连营,路清. 预应力管桩单桩竖向极限承载力分析[J]. 岩土工程技术,2003(4):220-223.

收稿日期:2006-05-15