

灌注桩后注浆单桩竖向极限承载力研究

刘建茂, 杨子民, 王连力, 康宪泉

(天津市勘察院, 天津 300191)

摘 要: 近年来, 后注浆技术得到了广泛的应用。钻孔灌注桩可大大降低建筑物的沉降, 并使建筑物的沉降更加均匀。文章介绍后注浆工艺的承载力提高机理及在天津地区的几个工程实例, 分析了注浆前后单桩竖向极限承载力对比情况及影响单桩竖向极限承载力的几个因素。

关键词: 灌注桩后注浆; 受力机理; 注浆量; 单桩竖向极限承载力

中图分类号: TU473.14 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-1412(2010)04-0381-06

及成桩工艺之间的关系。

0 引言

后注浆技术从开发成功以来, 在国内多个省市地区得到应用, 适用的土层越来越广, 从渗透性强的卵砾石层、砂土层、粉砂, 扩展到渗透性较小的粉土、黏性土, 取得了很好的效果。根据多项工程实践表明, 采用后注浆技术可以减小桩基沉降、使建筑物的沉降更加均匀, 对稳定基桩质量、提高承载力、节约工程造价均有显著作用。

钻孔灌注桩在成孔过程中, 在桩侧会形成一层泥皮; 桩端形成一定厚度的沉渣; 在孔内泥浆浸泡下, 桩周土体的抗剪强度降低; 混凝土灌注完毕, 桩身产生体积收缩, 桩土间出现微小空隙, 桩身混凝土与桩周土的黏结受到影响。以上因素可使单桩极限承载力降低 10% ~ 30%, 甚至更高。但通过后注浆技术可有效克服以上缺陷, 提高单桩极限承载力, 减少沉降量, 改善桩的承载特性。后注浆技术的注浆量(水泥用量)、土层的物理参数、成桩工艺是影响单桩极限承载力的关键因素。适当提高注浆量, 采取合适的土层物理参数、改进桩机设备的施工工艺, 是提高单桩极限承载力的关键因素。为尽快解决提高单桩极限承载力的问题, 天津勘察院进行了一系列的现场实验, 掌握了一批比较可靠的数据。根据这些数据验算注浆前、后单桩极限承载力的对比情况, 掌握了单桩极限承载力与注浆量、土层的物理参数

1 钻孔灌注桩后注浆技术特征

后注浆技术是将土体加固技术与桩工技术结合为一体, 提高桩基承载力、减少沉降的有效方法。其特征如下:

1.1 桩端注浆

在钢筋笼底端一般设置 2 根注浆阀, 该注浆阀具备下列功能: ①抗刮撞、抗磨擦; ②抵抗不小 1 MPa 的静水压力; ③具备一定的逆止功能, 防止浆液回流。

钢筋笼沉入桩端后, 注浆阀可插入沉渣及桩端土的一定深度。注浆时, 浆液挤入沉渣, 产生劈裂和挤密效应, 提高沉渣的强度和变形模量, 桩端一定范围内的单一土体变成复合土体, 并在桩端形成树根状的扩大头, 提高桩端阻力。桩端饱和后, 浆液由桩端继续上升至桩端以上 12 m 左右的范围内, 随注浆量的增加, 上升范围会继续增高, 并使此范围内的桩侧泥皮及桩周土强度、刚度提高。

1.2 桩侧注浆

对于泥浆护壁灌注桩, 复式注浆时, 桩侧注浆管在钢筋笼入孔时和钢筋笼连接在同一个圆周上, 与加颈箍焊牢。桩侧喷浆环打开后, 浆液沿桩侧上行前进, 由于注浆压力、土层松散程度的影响, 对桩侧土层的影响深度在 12 m 左右。桩侧泥皮及更大范

收稿日期: 2009-07-27

作者简介: 刘建茂(1964), 男, 河北无极人, 国家一级注册建造师, 主要从事工程勘察、地基处理等岩土工程工作。通信地址: 天津市南开区红旗南路 428 号; 邮政编码: 300191; E-mail: tlgis@tligis.com.cn

围的桩侧土强度、刚度提高,增大剪切滑动面,改变桩与桩侧土之间的性能;浆液在桩侧凝结以后增大了桩侧表面积,提高了桩侧摩阻力。

1.3 注浆参数

水灰比:根据土的饱和度、渗透性确定,对于饱和土,一般为0.45~0.65;对于非饱和土,一般为0.7~0.9。

注浆压力:根据土的性质、注浆点的深度确定,同时受水灰比大小、注浆阀体上的开口小孔的数量影响。在饱和土中注浆时,注浆压力控制在1~4 MPa。

流量:控制在50~75 L/min。

1.4 注浆顺序

复式注浆时,在饱和土中,后注浆施工遵从先桩侧,后桩端;在非饱和土中,后注浆施工遵从先桩端,后桩侧。对多个桩侧注浆横断面,后注浆宜先上后下,间歇时间2~4小时,当进行群桩注浆时,宜先外围、后内部,减少浆液流失。注浆作业宜于在成桩2天后开始,此时桩底沉渣、桩侧泥皮尚未充分固结和触变恢复,使水泥浆在桩侧、桩底渗透充分。一般不宜超过成桩后30天注浆。

2 后注浆提高承载力机理分析

在卵、砾、砂等粗粒中注浆时,水泥浆液以渗透等形式对桩周土体空隙部分进行充填,散粒被胶结,显示“充填胶结效应”,土体强度和刚度提高。如果是桩端,桩端阻力因扩底效应而提高;如果是桩侧,侧阻力因扩径效应而显著增大。

在黏性土、粉土、粉细砂中注浆时,后注浆液以劈裂形式使桩周土体加筋形成网状结石复合体,水泥浆液劈裂过程中还伴生土体固结和化学硬化作用。粉砂、黏性土与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生化学作用形成具有一定强度的结晶化合物,从而增大桩周土体强度,使被包围在水泥网格内的土变得更加紧密相连。桩顶受荷后,桩侧和桩底的复合土体能有效的传递和分担荷载,从而提高桩的单桩极限承载力。

注浆后的作用效果主要表现为:后注浆液可改善或根除循环介质形成的桩与桩周土间的泥皮和孔底沉渣,并进一步使桩周一定范围内的土体经过二次加固,加强被扰动和软化的松散土体强度,提高了桩周土体抗剪强度,亦增大了桩端承载面积及桩端土体强度。

3 影响后注浆单桩极限承载力增加的因素

3.1 注浆量(水泥用量)

在一定的条件下,注浆量的多少直接决定了单桩极限承载力的增加幅度。

后注浆单桩极限承载力的增加主要依赖于桩端阻力和桩侧阻力的增加,只有当足够的水泥浆遍布在桩身周围,以渗透或劈裂的模式加强桩端、桩侧一定范围或深度的土层时,土层的强度、刚度、压缩模量、抗剪能力才得到增加,其桩端阻力和桩侧阻力才能增加。

桩体后注浆量估算式如下:

$$G_c = \alpha_p \times d + \alpha_s \times n \times d$$

式中, α_p 为桩端注浆量经验系数(1.5~1.8); α_s 为桩侧注浆量经验系数(0.5~0.7); n 为桩侧注浆横断面数; d 为桩的直径。

依据上述估算式,注浆量的多少和桩侧、桩端注浆量经验系数取值及桩径、桩侧注浆横断面数有关。由于不同地区的地质条件不同,即便是桩长、桩径相同的桩,其承载力的差异是很大的。当承载力要求较高时,桩侧、桩端注浆量经验系数取高值,适当增加水泥用量来弥补承载力不足还是必要的。

3.2 地质条件

根据我院在天津市及周边地区施工的经验,相同桩长、相同桩径的桩其承载力的差异往往是很大的,其中地质条件是主要因素之一。注浆时,后注浆液沿桩土界面上升的高度受土的渗透性、抗剪强度及浆液压力等因素的影响,上升的高度不同,侧摩阻力的发挥就不一样。对于桩底和桩侧为砂、砾、卵石及含砂砾黏性土、粉土中的桩,由于土层的渗透性较大,注浆量也较大,注浆后承载力增幅也大;对于桩底和桩侧为黏性土的桩,由于土层的渗透性稍小,注浆量也稍小,注浆后,承载力增幅相对较小。

3.3 成桩工艺

钻孔成桩后,在桩土界面附着一层结构松散、强度低的泥皮或沉渣,泥皮或沉渣影响了后注浆单桩极限承载力的发挥。目前在天津市场上对于桩径 $=550\sim 1\,000\text{ mm}$ 的钻孔灌注桩,施工设备大多为潜水钻机。潜水钻机在钻进过程中,要求操作人员吊打慢钻,以防缩径;混凝土灌注前,进行二次清孔,减小沉渣和泥皮,杜绝桩身夹泥,因为桩身缩径和夹

泥都会大大降低桩基承载力。对于桩径 $> 1\,000\text{ mm}$ 的桩, 施工时采取一些措施, 避免缩径和产生过多的沉渣和泥皮。

3.4 后注浆单桩极限承载力标准值估算式

$$Q_{uk} = Q_{sk} + Q_{gsk} + Q_{gp k}$$
$$= u \sum q_{j k} \cdot l_j + u \sum \beta_i \cdot q_{sik} \cdot l_{gi} + \beta_p q_{pk} \cdot A_p$$

根据上式^[1], 对后注浆增强段, 当桩身周长(u)、侧阻力标准值(q_{sik})、端阻力标准值(q_{pk})、桩端承载面积(A_p)增加后, Q_{uk} 得到增加。

侧阻力标准值(q_{sik})值和土的强度一样近似用库伦公式表达为:

$$q_{sik} = c + \sigma \cdot \tan \varphi$$

q_{sik} 值的大小和 c, φ 两值密切相关; 注浆后, 桩径(d)、法向有效应力(σ)、内摩擦角(φ)、桩土间黏聚力(c)不同程度地得到提高。

4 注浆前后单桩极限承载力对比实例

4.1 实例 1

该工程位于塘沽开发区, 为地上 32 层的高层住宅楼, 埋深约 3 m, 设计采用 $\phi = 650\text{ mm}$ 的钻孔灌注桩, 桩底注浆, 桩长 $L = 47.3 \sim 50.07\text{ m}$, 场地地质条件见表 1。

表 1 地层分布及主要物理力学指标

Table 1 Stratigraphic units and mechanic properties

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)	压塑模量 ($E_{s(1-2)}$ / MPa)	侧阻 (q_{sk})	端阻 (q_{pk})
1	素填土	6.0	218	4.44	54.4	2.11	/	5	
2	粉质黏土	2.0	28.3	0.8	12.1	0.85	3.7	5	
3	黏土	3.0	36.8	1.05	18.1	0.87	3.1	20	
4	粉质黏土	0.5	31.5	0.89	14.8	0.9	5.7	20	
5	黏土	9.8	43.4	1.22	21.2	0.89	2.5	20	
6	粉土	2.0	33.8	0.95	18.8	0.64	/	40	
7	粉质黏土	5.5	23.1	0.65	10.6	0.72	/	50	
8	粉质黏土	3.0	17.0	0.49	/	/	/	65	
9	粉土	5.0	29.7	0.84	17.1	0.57	/	54	
10	黏土	2.9	29.2	0.86	16.7	0.58	/	54	
11	粉质黏土	4.4	21.1	0.60	11.1	0.50	/	53	
12	粉质黏土	0.7	23.4	0.64	6.2	0.06	/	65	
13	粉土	16.3	19.4	0.6	/	/	/	80	

4.2 实例 2

该工程位于天津市西青区李七庄中石油桥。其中 5 栋 20 层的高层住宅楼, 采用 $\phi = 600\text{ mm}$ 钻孔灌注桩, 桩长 $L = 41.5\text{ m}$; 8 栋 34 层的高层住宅楼, 采用 $\phi = 700\text{ mm}$ 的钻孔灌注桩, 桩长 $L = 53.0\text{ m}$ 。全部实施桩底注浆。工程桩施工前, 分别对 $\phi = 600\text{ mm}$ 和 700 mm 的钻孔灌注桩进行了静载试验(各试桩 3 根)。场地地质条件见表 2。

实例 1 与实例 2 的计算结果与试桩结果对比:
以上 2 个实例数据是根据地质勘察报告提供的各层土的物理力学指标统计结果获得。按照统计结果计算注浆前的注浆单桩竖向极限承载力标准值($Q_{uk未}$), 注浆量按照《建筑桩基技术规范(JGJ94—2008)》中的要求去执行, 注浆后的 $Q_{uk注}$ 是根据静载

荷试桩结果得来(表 3)。

从表 3 的对比可看出, 注浆后单桩极限承载力可提高 40% ~ 79%, 除实例 2 的 3 根 $\phi = 600\text{ mm}$ 的试桩未压至破坏外, 其余试桩全部压至破坏, 表中所列的静载荷试桩结果为破坏值的前一级数据。

4.3 实例 3

该工程位于西青区解放南路, 为地上 27 层住宅楼, 地下 1 层, 埋深约 12.4 m, 设计采用 $\phi = 700\text{ mm}$ 钻孔灌注桩, 有效桩长 $L = 34.0\text{ m}$ 。场地地质条件见表 4。

为准确获得注浆后较注浆前提提高的具体数值, 本次选取 6 根试桩, 2 根未注浆, 其他 4 根桩进行后注浆, 注浆量按照《建筑桩基技术规范(JGJ94—2008)》中的要求去执行, 其静试桩结果如表 5。

表 2 地层分布及主要物理力学指标

Table 2 Stratigraphic units and mechanic properties

层号	岩性	土层厚度	含水量	孔隙比	液性指数	压缩模量	侧阻	端阻
		(m)	($w/\%$)	(e)	(I_L)	($E_{s(1-2)}/\text{MPa}$)	(q_{sk})	(q_{pk})
1-1	杂填土	3.3	33.3	/	0.99	5.16	/	/
2	淤泥质土	1.2	46.8	/	1.15	2.38	/	/
3-1	粉质黏土	1.5	30.2	0.84	0.86	5.37	45	/
3-2	粉质黏土	1.9	26.4	0.98	1.01	12.2	35	/
4	粉质黏土	6.3	33.7	0.86	1.14	4.48	25	/
5	粉质黏土	1.9	24.1	0.68	0.66	5.48	50	/
6	粉质黏土	3.9	26.4	0.76	0.56	6.08	55	/
7	粉质黏土	10.1	26.0	0.74	0.54	6.07	60	550
8	粉质黏土	3.9	24.0	0.68	0.46	6.12	63	/
9-1	粉质黏土	2.2	23.0	0.67	0.48	6.25	63	750
9-2	粉质黏土	2.8	23.0	0.67	0.59	12.9	65	880
9-3	粉砂	1.0	20.4	0.62	/	16.1	75	1000
9-4	粉质黏土	8.6	27.0	0.76	0.52	6.1	60	750
9-5	粉砂	1.5	21.0	0.63	/	13.9	82	1010
10	粉质黏土	5.2	24.5	0.70	6.5	6.5	66	900

表 3 计算结果与静试桩结果对比

Table 3 Calculation result-static loading test result comparison

工程 项目	桩长	桩径	单桩竖向极限承载力标准值 Q_{uk}			
			未注浆	桩底注浆		
			计算结果(kN)	静载荷试桩结果(kN)	对应的沉降(mm)	$Q_{uk\text{注}}/Q_{uk\text{未}}$
实例 1	47.30	0.65	3891	6000	13.86	1.54
	47.35	0.65	3899	5500	12.93	1.41
	47.4	0.65	3907	6500	16.05	1.66
	49.60	0.65	4266	7000	21.60	1.64
	49.65	0.65	4274	7000	20.23	1.64
	50.07	0.65	4343	6500	23.92	1.50
实例 2	41.5	0.60	3906	7000	20.25	1.79
	41.5	0.60	3906	7000	17.24	1.79
	41.5	0.60	3906	6300	21.02	1.61
	53.0	0.70	6410	11000	26.34	1.72
	53.0	0.70	6410	9000	29.76	1.40
	53.0	0.70	6410	10000	20.24	1.56

表 4 地层分布及主要物理力学指标

Table 4 Stratigraphic units and mechanic properties

层号	岩性	土层厚	含水量	孔隙比	塑性指数	液性指数	压缩模量	侧阻	端阻
		(m)	($w/\%$)	(e)	(I_P)	(I_L)	($E_{s(1-2)}/\text{MPa}$)	(q_{sk})	(q_{pk})
1	杂填土	0.9							
2	淤泥及淤泥质土	1.0	60.7	1.76	26.5	1.16	2.1	11	
3	粉质黏土	2.3	28.8	0.81	13	0.81	6.9	42	
4a	粉质黏土	7.5	31.4	0.9	13	0.94	5.3	34	
4b	粉土及砂性粉质黏土	2.3	25.6	0.73	9.3	0.67	12.2	48	
5	粉质黏土	2	37.1	1.05	12	0.52	5.7	46	
6	粉质黏土	4.7	28.0	0.79	13.4	0.6	6.2	50	
7	粉质黏土	6.7	26.4	0.74	14.1	0.56	6.2	53	500
8	粉质黏土	1.8	23.3	0.64	12	0.54	7.3	55	
9a	粉质黏土	11.4	31.6	0.90	11.7	0.45	7.4	60	700
9b	粉土、粉砂	5.4	25.0	0.71			16.5	75	950
10a	黏土	0.4	29.7	0.85	20.7	0.29	7.2	68	900

表 5 计算结果与静试桩结果对比表

Table 5 Calculation result-static loading test result comparison

桩长 (m)	桩径 (m)	单桩竖向极限承载力标准值(Q_{sk})			
		未注浆		桩底注浆	
		静载荷试桩结果(kN)	累计对应的沉降(mm)	静载荷试桩结果(kN)	累计对应的沉降(mm)
43.0	0.70	3000	9.33	3360	6.23
		3500	14.59	3920	8.02
		4000	20.65	4480	9.77
		4500	29.58	5040	11.87
		5000	39.26	5600	14.53
43.0	0.70	3000	9.64	3360	6.13
		3500	14.44	3920	8.16
		4000	20.28	4480	10.34
		4500	27.66	5040	12.96
		500	37.49	5600	16.27
43.0	0.70			5600	14.91
43.0	0.70			5600	15.68

数据来自该工程的检测报告,从表 5 看出,2 根未注浆桩沉降较快,其中 1 根未注浆桩在压至 5 000 kN 时,沉降量为 39.26 mm,在其附近处经过后注浆处理的桩在压至 5 600 kN 时,沉降量为 14.53 mm。在本场地选取的另 2 根经过后注浆处理的桩,在压至 5 600 kN 时,沉降量分别为 14.91 mm 和 15.68 mm。现选取 1 根未注浆桩和 1 根注浆桩进行对比,其承载力与沉降关系对比曲线如图 1 所示。

还有一定的储备。

5 结论

经过对 3 个实例的参数分析,验证了注浆后使单桩极限承载力增加的主要因素:

- (1) 与注浆水泥量有关:注浆量在一定的幅度范围内,单桩极限承载力随注浆量的增加而增加。
- (2) 与桩端、桩侧土层性质有关:①如果桩端、桩侧土是黏性土,其液性指数越小,注浆后桩侧阻(q_{sk})、端阻(q_{pk})值增加得越多;②桩端、桩侧土如果是粉土,其孔隙比越小,注浆后桩侧阻(q_{sk})、端阻(q_{pk})值增加得越多;③桩端、桩侧土如果是粉细砂、中砂、粗砂、砾砂、角砾、砾石,其标贯击数越大,注浆后桩侧阻(q_{sk})、端阻(q_{pk})值增加得越多。
- (3) 与同成桩工艺有关:根据以上实例及其他几十项工程的数据表明,如果按照《建筑桩基技术规范(JGJ94—2008)》中要求的注浆量执行,并结合土层采取合适的注浆参数,注浆后单桩极限承载力比注浆前的增幅应不小于 35%。

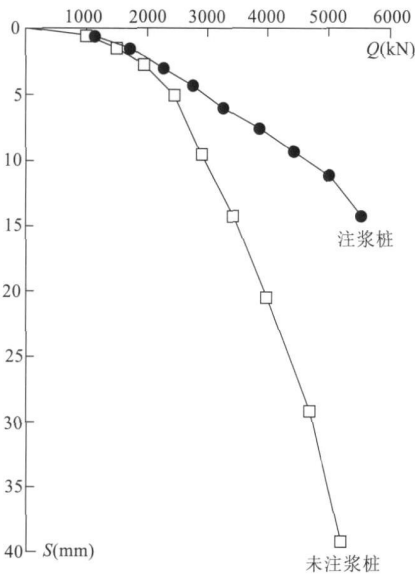


图 1 注浆前后承载力与沉降关系对比

Fig.1 Pre post grouting bearing capacity VS subduce

从表 5 及图 1 的对比可以看出,在沉降量相同的情况下,注浆后桩承载力提高 50% 以上,效果比较明显,而且 4 根后注浆桩没有压至破坏,其承载力

参考文献:

[1] 中国建筑科学研究院. 中华人民共和国行业标准 建筑桩基技术规范(JGJ94—2008)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.

[2] 龚晓楠. 地基处理手册(第三版)[M]. 中国建筑工业出版社, 2008.

[3] 黄生根, 曹辉. 软土地基中应用后压浆技术的机理研究[J]. 岩土工程技术, 2002, 16(1): 36-39.

[4] 朱奎,周鹏飞. 钻孔灌注桩桩底注浆技术的应用研究[J]. 岩土

工程技术, 2008, 22(1): 47-50.

RESEARCH ON VERTICCAL BEARING CAPACITY LIMIT OF SINGLE POST GROUTTING PILE

LIU Jian-mao, YANG Zi-min, WANG Lian-li, KANG Xian-quan

(Tianjin Prospecting Institute, Tianjin 300191, China)

Abstract: Post grouting technique is widely used in resent years. Drill+hole-grouting piling can largely reduce subsidence and lead to homogeneous subsidence. This paper introduces mechanism of raising the bearing capacity by post grouting and some project examples to which post grouting technique is applied and compares vertical bearing capacity limit before and after the grouting then analyses factors that influence the vertical bearing capacity limit.

Key Words: post grouting technique of piling; force mechanism; grouting volume; vertical bearing capacity limit of single pile

欢迎订阅 2011 年《地质找矿论丛》

《地质找矿论丛》(《地质找矿论丛》)为国家新闻出版总署批准出版, 由中钢集团天津地质研究院有限公司主管、主办的地学科技期刊, 于 1986 年创刊, 公开发行。中国标准连续出版物号: ISSN 1001-1412, CN 12-1131/P。

《地质找矿论丛》作为中国科技核心期刊, 被美国《化学文摘》(CA)、俄罗斯《文摘杂志》、《中国学术期刊文摘(中文版)》等国内外著名文摘刊物收录, 是《中国科技论文统计》、《中国学术期刊综合评价数据库》和《中国科学引文数据库》的来源期刊, 期刊同时全文入编《中国学术期刊(光盘版)》、《中国期刊网》、《万方数据系统科技期刊群》、《中文科技期刊数据库》和《华艺 CEPS 中文电子期刊》等电子出版物和数据库, 以多种媒体方式向读者提供服务。

《地质找矿论丛》主要报道矿产成矿理论与成矿预测、物质成分及综合利用、矿产地质勘查新技术新方法及其应用、地学信息技术、水文地质与工程地质、环境地质调查与治理、资源勘查工程、矿产品深加工技术、地质矿产技术经济等方面的科研成果、进展评介、研究简报, 并不断开拓报道领域与深度。

《地质找矿论丛》面向从事地质科研、矿产勘查、矿山企业、矿产品开发的科技人员和地学院校师生。热忱欢迎地矿行业、地学院校、文献信息部门的单位和个人踊跃订阅并投稿。

《地质找矿论丛》为季刊; 每期 120 页, A 4(297 mm × 210 mm) 开本, 每季度末月 25 日出版; 每期定价 10.00 元, 全年共计 40.00 元。

订阅办法:

(1) 通过“全国非邮发报刊联合发行部”订阅

地址: 天津市大寺泉集北里别墅 17 号 全国非邮发报刊联合发行部

邮政编码: 300385

电话: 022-23973378; 23962479 传真: 022-23973378

E-mail: LHZD@public.tpt.tj.cn 网址: www.LHZD.com

(2) 向《地质找矿论丛》编辑部函索订单订阅。

编辑部地址: 天津市河东区友爱道平房 4 号, 中钢地质院《地质找矿论丛》编辑部

邮政编码: 300181 电话: 022-84283083

E-mail: luncong@163.com; luncong@yeah.net