

桩底注浆钻孔灌注桩承载力的研究

李连营 林波 邵建

(天津市勘察院, 天津 300191)

【摘要】 通过天津地区几例钻孔灌注桩桩底注浆的静载荷试桩结果, 分析天津地区钻孔灌注桩桩底注浆单桩竖向极限承载力标准值的估算方法。

【关键词】 钻孔灌注桩; 桩底注浆; 后压浆; 计试比; 水泥土

【中图分类号】 TU 473; TU 423

Study on Vertical Bearing Capacity of Post-injecting Paste Bored Pile

Li Liangying Lin Bo Shao Jian

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

【Abstract】 Through analysing several results of static loading test of bored pile which injected paste to pile tip after pile driving, a method of estimating for the standard vertical limited bearing capacity of single pile has been presented in Tianjin area.

【Key Words】 bored pile; injecting paste to pile tip; post-injecting paste; ratio of calculation and test; cement soil

0 引言

钻孔灌注桩桩底注浆技术是中国建筑科学研究院地基所的发明专利技术, 该技术已在天津多项高层建筑和大型公建中应用, 并均取得较好的应用效果, 而且施工简便、造价较低, 将有望成为天津地区基础工程的主要桩型。但该工艺所取得的单桩竖向极限承载力标准值一般多采用先期进行静载荷试桩的方法确定, 或根据地质条件和施工经验乘以一个大于 1 的提高系数, 目前尚无完善的计算方法。本文通过对几项工程实例的研究, 初步总结出钻孔灌注桩桩底注浆的单桩竖向极限承载力标准值的计算方法及与《建筑桩基技术规范》(JGJ94-94) 提供的桩基参数所估算的结果的关系。

1 桩底注浆工艺简介

桩底注浆法是将桩底土体加固与桩工技术结合为一体, 大幅提高桩基承载力, 减少沉降的一种有效方法。施工时, 有钢筋笼上设置 2 根底端带单向阀的注浆钢管, 注浆阀可插入沉渣及桩底土一定深度 (50~200 mm), 使注浆既可固化沉渣又可扩及桩底一定范围。注浆阀外装有保护套, 可防止阀膜被刺破, 以使浆液顺利流出。注浆浆液多采用水泥浆, 水灰质量比一般介于 0.50~0.55, 最终注浆压力一般

在 5 MPa 左右。从工程试验资料分析, 最佳的后注浆时间是在成桩后 2~7 天内进行。

经试验研究, 注浆量是影响注浆效果的主要因素, 单桩承载力随着注浆量的增大而增大, 但单桩注浆量达到一定数量后, 增幅将不再明显 (郭鹏举, 张明. 泥浆护壁灌注桩后压浆技术. 华北岩土工程勘察与治理学术交流论文集. 2000)。另外, 桩端持力层土体砂性越大, 注浆量越大, 单桩承载力提高幅度越大。桩底注浆量可按下式计算:

$$G_{cp} = \pi \times (htd + \zeta n_0 d^3) \times 1000 \quad (1)$$

式中: G_{cp} ——桩底注浆量, 以水泥用量计, kg;

ζ ——水泥填充率, 细粒土 0.2~0.3, 粗粒土 0.5~0.7;

n_0 ——孔隙率, $n_0 = e_0 / (1 + e_0)$, e_0 为天然孔隙比;

h ——桩底压浆时, 浆液沿桩身的上返高度, 一般 5~20 m, h 值与承载力增幅有关, m;

t ——包裹在桩侧浆液厚度, 一般为 10~30 mm, 粘性土及正循环取高值, 砂性土及反循环成孔取低值;

d ——桩径, m。

2 实例

2.1 实例 1

某工程为地上 12 层综合楼, 高约 50 m, 地下 2

层, 埋深约 11.2 m, 设计采用 $\phi 650$ 钻孔灌注桩桩底注浆, 有效桩长 $L = 26.50$ m, 场地地质条件见表 1。

表 1 地层岩性及其物理力学性质指标

| 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_{s1-2}/MPa |
|----|------|---------|------------|---------|------------|------------|----------------------------|
| 1 | 素填土 | 1.4 | | | | | |
| 2 | 粘土 | 1.8 | 28.7 | 0.81 | 18.5 | 0.3 | 5.28 |
| 3 | 粉质粘土 | 1.95 | 25.5 | 0.70 | 10.4 | 0.76 | 8.14 |
| 4 | 粉质粘土 | 7.4 | 31.4 | 0.89 | 12.1 | 0.98 | 4.30 |
| 5 | 粉质粘土 | 4.3 | 25.6 | 0.71 | 11.6 | 0.56 | 4.79 |
| 6 | 粉质粘土 | 7.1 | 25.6 | 0.73 | 10.8 | 0.77 | 6.57 |
| 7 | 粉质粘土 | 5.2 | 24.2 | 0.65 | 11.1 | 0.57 | 5.82 |
| 8 | 粘土 | 1.95 | 25.8 | 0.72 | 17.1 | 0.34 | 6.83 |
| 9 | 粉质粘土 | 1.5 | 22.0 | 0.62 | 11.4 | 0.55 | 7.20 |
| 10 | 粘土 | 1.6 | 26.6 | 0.78 | 17.6 | 0.33 | 5.41 |
| 11 | 粉质粘土 | 3.4 | 21.0 | 0.61 | 10.7 | 0.51 | 6.73 |
| 12 | 粉砂 | 2.9 | 19.7 | 0.53 | | | 14.0 |

2.2 实例 2

某工程为地上 30 层的高层住宅楼, 高约 90 m, 地下 1 层, 埋深约 5.25 m, 设计采用 $\phi 700$ 的钻孔灌注桩桩底注浆, 有效桩长 $L = 39.50$ m, 场地地质条件见表 2。

2.3 实例 3

某工程为地上 16 层综合楼, 高约 38 m, 地下 1 层, 埋深约 4.0 m, 设计采用 $\phi 650$ 钻孔灌注桩桩底注浆, 有效桩长 $L = 22.0$ m, 场地地质条件见表 3。

表 2 地层岩性及其物理力学性质指标

| 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_{s1-2}/MPa |
|----|------|---------|------------|---------|------------|------------|----------------------------|
| 1 | 杂填土 | 4.30 | 32.4 | | | | |
| 2 | 粉质粘土 | 1.00 | 28.0 | 0.783 | 10.5 | 0.97 | 6.87 |
| 3 | 粉质粘土 | 8.05 | 32.9 | 0.92 | 12.1 | 1.19 | 4.61 |
| 4 | 粉质粘土 | 0.95 | 23.85 | 0.67 | 10.6 | 0.585 | 4.67 |
| 5 | 粉质粘土 | 2.20 | 23.67 | 0.603 | 12.7 | 0.47 | 6.12 |
| 6 | 粉砂 | 3.85 | 20.21 | 0.575 | | | 12.89 |
| 7 | 粉质粘土 | 8.80 | 26.7 | 0.744 | 12.3 | 0.7 | 6.78 |
| 8 | 粘土 | 0.85 | 27.4 | 0.784 | 16.0 | 0.46 | 5.28 |
| 9 | 粉质粘土 | 1.40 | 20.5 | 0.586 | 10.1 | 0.48 | 5.92 |
| 10 | 粉砂 | 4.70 | 21.16 | 0.588 | 5.9 | 0.58 | 13.7 |
| 11 | 粉质粘土 | 2.40 | 31.8 | 0.795 | 15.1 | 0.59 | 5.24 |
| 12 | 粘土 | 2.00 | 32.35 | 0.938 | 19.0 | 0.59 | 4.55 |
| 13 | 粉砂 | 1.50 | 18.67 | 0.533 | | | 12.6 |
| 14 | 粉质粘土 | 1.20 | 24.55 | 0.691 | 19.5 | 0.37 | 11.28 |
| 15 | 粉砂 | 4.85 | 19.11 | 0.556 | | | 16.54 |

表3 地层岩性及其物理力学性质指标

| 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/MPa |
|----|-------------|---------|------------|---------|------------|------------|-----------------------|
| 1 | 素填土 | 2.6 | | | | | |
| 2 | 粘土 | 1.3 | 25.2 | 1.021 | 20.0 | 0.52 | 3.82 |
| 3 | 粉质粘土 夹粉土 | 1.7 | 27.2 | 0.778 | 12.2 | 0.69 | 5.74 |
| 4 | 粘土 | 2.3 | 37.3 | 1.043 | 21.4 | 0.57 | 4.15 |
| 5 | 粘土 | 6.2 | 38.7 | 1.101 | 19.0 | 0.82 | 3.29 |
| 6 | 粉质粘土 夹粉土 | 2.2 | 34.5 | 1.049 | 14.1 | 0.52 | 14.56 |
| 7 | 粉质粘土 | 2.2 | 29.6 | 0.858 | 13.9 | 0.66 | 5.15 |
| 8 | 粉土 | 2.5 | 22.7 | 0.648 | 8.3 | 0.54 | 22.2 |
| 9 | 粉质粘土 | 4.1 | 28.9 | 0.805 | 16.3 | 0.5 | 5.45 |
| 10 | 粉质粘土 夹粉土 | 4.0 | 25.9 | 0.736 | 12.6 | 0.45 | 6.82 |

2.4 计算结果与试桩结果

根据《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—94)提供的钻孔灌注桩桩基参数,3项实例严格按各层土的物

理力学指标统计结果内插所获得桩基参数,计算的桩底未注浆单桩竖向极限承载力标准值 Q_{uk} 及桩底注浆单桩竖向极限承载力标准值 Q_{uk} 静载试桩结果见表4。

表4 计算结果与静试桩结果

| 工程项目 | 桩长 L/m | 桩径 D/m | 桩顶埋深 /m | 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 | 水泥用量 /kg |
| 实例1 | 26.50 | 0.65 | 11.20 | 2 813.5 | 3 900 | 6.8 | 1 000 |
| 实例2 | 39.50 | 0.70 | 5.25 | 4 568.9 | 6 000 | 11.5 | 1 200 |
| 实例3 | 22.00 | 0.65 | 4.00 | 2 413.2 | 3 127 | 9.0 | 1 000 |

3 结果对比及原因分析

3.1 结果对比

将桩底注浆的单桩竖向极限承载力标准值 Q_{uk} (静试桩结果)与桩底未注浆的单桩竖向极限承载力标准值 Q_{uk} (计算值)的比值见表5。

表5 计算结果与试桩结果比值

| 工程项目 | $Q_{uk\text{注}}/Q_{uk\text{未}}$ |
|------|---------------------------------|
| 实例1 | 1.386 |
| 实例2 | 1.313 |
| 实例3 | 1.296 |
| 平均值 | 1.332 |

从表5对比可看出,注浆的单桩竖向极限承载力标准明显高于孔底未注浆的单桩竖向极限承载力标准值,提高值介于38.6%~29.5%,平均在33.2%左右;另外,从静载荷试桩结果所对应的沉降值可以看出,试桩均未压至破坏,反映出孔底注浆的

单桩竖向极限承载力标准值的试桩结果还有一定的承载力储备。

3.2 原因分析

从3.1节分析可看出,注浆的单桩竖向极限承载力标准值明显高于孔底未注浆的单桩竖向极限承载力标准值的试桩结果,主要是由于以下几个原因:

1)常规泥浆护壁钻孔灌注桩成桩时,往往在桩底形成一个沉渣软弱层,因此,《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—94)提供的钻孔灌注桩极限端阻力标准值很小;而孔底注浆后,浆泡逐步扩大并对外挤压,就会压密沉渣软弱层而硬化此层,继而对桩端土层产生压密^[2],彻底解决了桩底沉渣问题。

2)后压注浆导致持力层土的性质已改变为水泥土,不仅使桩端阻力值得到大幅度的提高,使摩擦型的灌注桩转化为端承摩擦桩或摩擦端承桩。

3)后压注浆导致桩下部几米甚至十几米范围内土的强度增强,使桩侧阻力值得到大幅度的提高,使

桩的总侧摩阻力有一定的提高。

4) 桩底压浆显著增强了桩土的整体性能, 改变了桩土相互作用特性^[3], 有效地减少了基础变形。

4 计算公式的建立

经过多项工程试算, 在计算单桩竖向极限承载力标准值时, 考虑下部桩侧摩阻力的提高, 并对桩端持力层极限端阻力标准值进行修正, 修正公式如下:

$$Q_{uk} = Au \sum h_i q_{sik} + A_p q_{pk} \quad (2)$$

$$q_{pk} = BE_s + CG_{cp} \quad (3)$$

式中: u ——桩的周长, m;

A_p ——桩的横截面积, m^2 ;

q_{sik} ——按 JGJ94-94 确定的各层土的极限侧阻力标准值, kPa;

q_{pk} ——桩底注浆后的极限端阻力标准值, kPa;

G_{cp} ——桩底注浆所用水泥用量, kg;

E_s ——持力层的压缩模量, MPa;

h_i —— i 层土的厚度, m;

A ——侧阻力提高系数;

B ——压缩模量提高系数;

C ——桩底水泥土的修正系数。

将实例 1~实例 3 参数分别带入公式(2)、式(3)并求解, 得:

$$A = 1.176$$

$$B = 176.16$$

$$C = 0.259$$

将 A 、 B 、 C 值带入式(2)、式(3), 得:

$$Q_{uk} = 1.176 u \sum h_i q_{sik} + (176.16 E_s + 0.259 G_{cp}) A_p \quad (4)$$

5 工程验证

其它 3 项工程按式(4)计算的结果、试桩结果及比值见表 6。

表 6 按修正公式的计算结果与试桩结果比值

| 工程 | 桩径 D/m | 桩长 L/m | 持力层 土层名称 | 计算 Q_{uk}/kN | 静载 Q_{uk}/kN | $Q_{uk计}/Q_{uk试}$ |
|------|-------------|-------------|-------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 工程 4 | 700 | 30.10 | 粉砂 | 4 407.6 | 4 800 | 0.925 |
| 工程 5 | 700 | 36.90 | 粉质粘土 | 5 281.0 | 5 300 | 0.996 |
| 工程 6 | 750 | 44.00 | 粉土 | 8 670.9 | 9 000 | 0.963 |
| 平均值 | | | | | | 0.961 |

6 结论

1) 对钻孔灌注桩实施合理的桩底注浆, 能显著增强桩土的整体性能, 改变了桩土相互作用特性, 可大幅度提高桩的竖向承载力, 一般可提高 25%~35%左右;

2) 经上述 6 项工程的验证, 按式 4 计算的单桩竖向极限承载力标准值与试桩结果较吻合, 计试比平均值介于 0.925~0.996, 平均值为 0.963, 计算效果较理想;

3) 由于钻孔灌注桩的试桩间歇期普遍较短(一般在 15 天左右), 且试桩一般不压至破坏, 因此, 桩底注浆后的实际单桩竖向极限承载力标准值比试桩

结果均有一定的承载力储备, 按提高后的单桩承载力使用是安全的。

参 考 文 献

- 1 JGJ 94——94. 建筑桩基技术规范北京: 中国建筑工业出版社, 1995. 33~36
- 2 王步云, 吴 宏, 钟信营. 钻孔灌注桩桩底压浆技术的应用. 山西勘察, 2002(2): 10~12
- 3 刘金砺, 高文生. 后压浆群桩基础的承载变形特性. 高层建筑桩基工程技术. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998. 25~26
- 4 李连营, 路 清. 预应力管桩单桩竖向极限承载力分析. 岩土工程技术, 2003(4): 220~223

收稿日期: 2004-12-06