

软土地基中应用后压浆技术的机理研究

黄生根 曹 辉

(中国地质大学, 武汉 430030)

【摘要】 软土中应用后压浆技术可大幅提高钻孔灌注桩的承载力, 缩短桩长。结合实际工程的试验结果, 对后压浆技术的作用机理进行了分析。

【关键词】 后压浆技术; 承载力; 摩阻力; 端阻力

【中图分类号】 TU473.1

Mechanism Study on the Post-Grouting Technology Applied In Soft Soil

【Abstract】 The post-grouting technology could improve the bearing capacity of bored piles and shorten their length in soft soils. The reinforcing mechanism of the post-grouting technology is analyzed deeply in association with the testing results of practical engineering.

【Key words】 the post-grouting technology; bearing capacity; frictional resistance; end bearing

1 概述

后压浆技术从开发成功以来, 在国内多个城市得到应用, 适用的地层也越来越广, 从最初主要应用于可灌性好的卵砾石层、砂土层, 扩展到在渗透性较小的粉细砂、粉土, 甚至渗透性差的黄土、粘性土中应用, 而且均取得了很好的效果^[1~3]。

2 软土中后压浆技术的应用

2.1 工程概况

某工程场地范围内土层分为9层: ①填土层, 层厚2.3~3.7 m。②粉质粘土, 黄色, 层厚0.7~1.7 m。③淤泥质粉质粘土夹砂层, 灰色, 层厚5.0~6.1 m。④淤泥质粘土, 灰色, 层厚4.8~7.0 m。⑤₁粘土, 灰色, 层厚3.0~4.0 m。⑤₂粉质粘土, 灰色, 层厚21.0~23.6 m。⑥粉质粘土, 暗绿色, 层厚1.7~2.2 m。⑦砂质粉土, 灰绿色, 层厚3.9~4.9 m。⑧₁粉质粘土, 灰色, 层厚16.9~

18.2 m。⑧₂粉质粘土与粉砂互层, 灰色, 层厚10~13.6 m。⑨粉细砂, 灰色, 未揭穿。

该工程为满足承载力和基础变形要求, 原设计采用钻孔灌注桩, 一栋持力层选在⑧₂层, 桩径850 mm, 桩长70.8 m; 另一栋持力层选在⑦层, 桩径600 mm, 桩长45.8 m; 并施工了 $\phi 850$ mm桩长70.8 m的试桩。后将设计调整为采用后压浆技术, 并确定了4组试桩, 桩径 $\phi 850$ mm和 $\phi 600$ mm各2组, 桩长44.3~45.4 m。在 $\phi 850$ mm和 $\phi 600$ mm试桩中各抽一根预埋钢筋应力计, 从 $\phi 850$ mm的试桩中抽一根进行压浆前后的静载荷试验。有关施工参数如下: ① $\phi 600$ mm试桩均采用端压工艺, 注浆管直径 $\phi 25$ mm, 注浆量1.41~1.59 m³, 水灰(质量)比0.6, 注浆压力0.2~0.45 MPa; ② $\phi 850$ mm试桩采用端压和侧压工艺, 侧压管分别置于离地面24 m和38 m的粉质粘土⑤₂层中, 总注浆量3.53 m³, 注浆压力0.2~0.45 MPa。

2.2 试验结果

2.2.1 静载荷试验结果

根据场地范围内 6 组试桩进行的静载荷试验,结果见表 1。

表 1 静载荷试验结果

桩号	桩长 L/m	桩径 d/mm	极限承载 力/kN	最大沉降 量 s/mm	残余变 形/mm	备注
Z1	70.8	850	9 200	38.62	16.6	未压浆
Z2	70.8	850	8 900	35.29	16.16	未压浆
ZH1	44.5	850	5 200 9 600	15.06 24.22	8.52 10.11	未压浆 端压、侧压
ZH2	44.3	850	9 600	25.86	10.25	端压、侧压
ZH3	45.3	600	6 000	24.42	6.71	端压
ZH4	45.4	600	6 000	29.04	9.05	端压

2.2.2 桩侧摩阻力分布及对比

由于在试桩不同深度埋设了电阻片式钢筋应力计,根据各级荷载作用下实测的钢筋应力可计算桩身轴力,再由桩身轴力求出桩侧摩阻力。桩侧摩阻力对比见表 2、表 3。

表 2 $\Phi 850$ mm 桩侧摩阻力对比

序号	桩段	土层	摩阻力计 算值/kPa	摩阻力实 测值/kPa	提高幅度
1	I—II	①、②、③	19.5	62.3	2.2
2	II—III	④、⑤ ₁	36.7	75	1.04
3	III—IV	⑤ ₂	45	92.5	1.06
4	IV—V	⑤ ₂	45	91.1	1.02
5	V—VI	⑤ ₂ 、⑥	65	74	0.14

表 3 $\Phi 600$ mm 桩侧摩阻力对比

序号	桩段	土层	摩阻力计 算值/kPa	摩阻力实 测值/kPa	提高幅度
1	I—II	①、③	18	47.1	1.62
2	II—III	③、④、⑤ ₁	36.2	70.5	0.95
3	III—IV	⑤ ₂	45	71.6	0.59
4	IV—V	⑤ ₂	45	64	0.42
5	V—VI	⑤ ₂ 、⑥	46	63.2	0.37

2.2.3 桩端阻力

在试验中测出的桩端阻力及桩端阻力占总荷载比例见表 4。

表 4 桩端阻力表

桩径 d/mm	最大荷载 /kN	桩端阻力 /kN	桩端阻力占总 荷载比例/%
850	9 600	197.3	2.1
600	6 000	210	3.5

2.3 试桩结果分析

1) 压浆后承载力大幅提高,桩长可大幅缩短。ZH1、ZH2 平均桩长 44.4 m,平均极限承载力大于 9 600 kN,平均沉降 25.04 mm;ZH1 压浆后比压浆前提高了 85%。Z1、Z2 桩长皆为 70.8 m,平均极限承载力 9 050 kN,平均沉降 36.9 mm。说明该工程采用后压浆技术至少可缩短桩长 26.4 m,缩短幅度达 37.3%,而且沉降减少了 32%。

2) 由表 2、表 3 可看出,压浆后桩承载力的提高来源于桩侧摩阻力的提高,最高增幅达 1.62~2.2 倍,而桩端阻力在总荷载中所占比例仅 2.1%~3.5%,基本可忽略不计,但这不一定表示后压浆对桩端没有加固作用。由于压浆后桩土界面的作用条件大幅改善,桩顶荷载沿深度方向衰减速度加快,越往下桩土相对位移减小,桩侧摩阻力发挥程度越小,具体表现为表 2、表 3 中摩阻力提高幅度随深度增加的减少,至桩底时,传递下来的荷载已经很小,很难发挥桩端阻力。

3) 4 组试桩采用了两种压浆工艺,ZH3、ZH4 采用端压,ZH1、ZH2 采用双压,但最终结果均反映为桩侧摩阻力的提高,说明在渗透性差的软土层中,水泥浆液的作用并不局限于某个或几个部位,而基本上是连续地作用于大部分或全部桩长范围。对钻孔灌注桩而言,因工艺因素影响,钻孔成桩后,在桩土界面附着一层结构松散、强度低的泥皮,压浆时,浆液在压力作用下破坏泥皮结构并与其混合在一起,重新固结后形成强度较高的水泥石,浆液沿桩土界面上升的高度受土的渗透性、土的抗剪强度及浆液压力等因素的影响。在本工程中,桩身全长范围得到加固,说明浆液上升高度到达地

表。

3 软土中后压浆技术的机理研究

后压浆技术的加固机理概括起来有4种作用:①渗透固结作用;②固化泥皮作用;③充填挤密作用;④劈裂加筋作用。对渗透性差的土层而言,基本不具备渗透固结的条件,占主导地位的是后三种作用,而这三种作用之间又有着密切的联系。软土中,浆液在压力作用下首先对桩周(端)土进行挤密,同时对桩土界面附着的一定范围的泥皮产生扰动,当水泥浆克服泥皮阻力后,沿桩侧上行,充填于桩土界面间,并对桩周土进行挤压,挤压过程中又对泥皮产生扰动,直至克服阻力再次沿桩侧上行,如此反复作用。在上述过程中,若泥皮阻力大或注浆速度过大,浆液压力在土中产生的应力使土达到破坏时,会产生劈裂现象。

3.1 应用圆柱孔扩张理论分析桩土界面位移与劈裂起始压力

假定桩身全长范围得到加固,且浆液沿桩侧上行时,压力线性递减,在地面处为0。设注浆管浆液出口压力为 p_0 ,则出浆口以上任一深度处的压力为

$$p = Z / (H \cdot p_0) \quad (1)$$

式中: H 为出浆口埋深,m; Z 为出浆口以上某一深度,m; p 为深度 Z 处的浆液压力,kPa。

根据圆柱孔扩张理论^[3],在轴对称弹性状态下,浆液压力在桩周土层中引起的应力为:

$$\sigma_r = A / r^2 + 2 \cdot C \quad (2)$$

$$\sigma_\theta = -A / r^2 + 2 \cdot C \quad (3)$$

式中: σ_r 、 σ_θ 为分别为径向和环向的应力分量,kPa; A 、 C 为系数。

当 $r \rightarrow \infty$ 时, $\sigma_r = 0$

得 $C = 1/2 \sigma_0$

式中: σ_0 为初始应力,kPa。

当 $r = r_0$ 时, $\sigma_r = p$,得:

$$A = (p - \sigma_0) \cdot r_0^2$$

式中: r_0 为桩的半径。

则式(2)、式(3)可表示为:

$$\sigma_r = (p - \sigma_0) \cdot \frac{r_0^2}{r^2} + \sigma_0 \quad (4)$$

$$\sigma_\theta = -(p - \sigma_0) \cdot \frac{r_0^2}{r^2} + \sigma_0 \quad (5)$$

在桩土界面,即 $r = r_0$ 处, $\sigma_r = p$,

$\sigma_\theta = 2\sigma_0 - p$,由弹性定律的Lame方程,在轴对称条件下,桩土界面径向位移为:

$$u_0 = 1 + \nu / E \cdot r_0 \cdot (p - \sigma_0) \quad (6)$$

式中: ν 为土的泊松比; E 为土的压缩模量MPa。

随土中应力的增大,桩周土将首先在 $r = r_0$ 处进入塑性状态,从而产生劈裂,此时应满足摩尔-库伦破坏条件:

$$\sigma_\theta = \sigma_r \cdot \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} - 2C \frac{\cos \varphi}{1 + \sin \varphi} \quad (7)$$

把 $\sigma_r = p$, $\sigma_\theta = 2\sigma_0 - p$ 代入上式可得到劈裂起始压力:

$$p_e = \sigma_0(1 + \sin \varphi) + 2C \cdot \cos \varphi \quad (8)$$

3.2 加固机理分析

根据试验结果,桩承载力的提高主要来源于摩擦力的提高,桩侧总摩阻力可表示为:

$$Q_{sk} = \pi \cdot d \sum q_{sik} \cdot l_i \quad (9)$$

式中: Q_{sk} 为桩侧总摩阻力,kPa; d 为桩径,m; q_{sik} 为桩侧第 i 层土的极限侧阻力标准值,kPa; l_i 为桩穿越第 i 层土的厚度,m。

由式(9)总摩阻力的增大来源于两方面:

①桩土作用表面增大;②极限侧阻力标准值 q_{sik} 的提高。

3.2.1 由挤密引起的桩土作用表面增大

由式(6),在浆液压力作用下,桩周土将产生径向位移 u_0 ,由各土层的土质参数、每根桩的施工参数计算得 $\phi 850$ mm桩的平均径向位移约25 mm, $\phi 600$ mm桩的平均径向位移约16.6 mm。若桩土间环状间隙全部充满浆液, $\phi 850$ mm桩的浆液计算用量为 3.02 m^3 ,施工实际用量为 3.53 m^3 ,占86%; $\phi 600$ mm桩的浆液计算用量为 1.4 m^3 ,施工实际用量为 $1.41 \sim 1.59 \text{ m}^3$,平均 1.5 m^3 ,占93%。

由于挤密充填作用,桩土作用表面增大, $\phi 850$ mm的桩增大6%, $\phi 600$ mm的桩增大5.5%,即桩土作用表面增大对总摩阻力提高的贡献为5.5%~6%。

3.2.2 极限摩阻力标准值的提高

压浆后,桩土表面结合紧密,桩土之间发生剪切位移时,剪切破坏往往发生在桩土界面,因此 $q_{s,k}$ 值和土的强度一样可以近似地用库伦公式表示为

$$q_{s,k} = c + \sigma \cdot \tan \varphi \quad (10)$$

式中: c 、 φ 为桩土间粘聚力和内摩擦角,近似取桩间土的粘聚力和内摩擦角; σ 为正应力,等于桩侧的有效水平应力。

压浆前,桩土间存在一层泥皮,桩周土受到扰动,产生应力释放。压浆后,浆液固结了泥皮并对桩周土进行挤压,使其产生再固结,固结后的桩土结合更紧密,桩土间的 c 、 φ 值及有效应力将明显增强,从而使摩阻力大幅提高。另外,劈裂注浆作用也有助于提高土体强度。由式(8)可求出任意深度处土体产生劈裂所需要的压力,经计算 $p_e > p$ (p 为施工压力),即本工程施工所用压力不足以使土体产生劈裂。但这并不意味着没有劈裂现象,由于土体总是存在软弱面,在施工压力作用下浆液沿软弱面产生劈裂是可能的,但范围不会太大,这一点可由浆液在桩土界面间的平均计算充填率达87%~93%来说明,因此劈裂注浆对摩阻力提高的贡献很有限。

在本工程中,摩阻力的提高主要来源于桩

土界面结合条件的改善和挤压作用引起的土体抗剪强度及法向有效应力的提高。

4 结论

1)软土中应用后压浆技术可大幅提高桩的承载力,从而达到缩短桩长、降低造价的目的。对大长径比的桩,桩端阻力所占比例极小,承载力的提高来源于桩侧摩阻力的提高,无论是端压还是双压均表现出相同的规律。

2)后压浆技术在软土中的作用机理主要表现为由挤压作用引起的土体抗剪强度指标的提高、法向有效应力的增大及泥皮固化作用。另外,压浆后桩身表面积增大与劈裂注浆对摩阻力的提高也有一定作用,但在本工程中所占比例很小。

3)软土中后压浆技术的加固机理受工艺参数、土层条件等多方面因素的影响,许多问题需要作更深入、细致的研究。

参 考 文 献

- 1 费鸿庆等.黄土地基中超长钻孔灌注桩超高承载力性状试验研究.见:魏道堃等主编.岩土工程的实践与发展.上海:上海交通大学出版社,2000.172~180
- 2 陶兴文等.钻孔灌注桩后压浆技术在上海地区的试验.探矿工程,1999(6):4~5
- 3 黄生根等.超长钻孔灌注桩应用后压浆技术的效果分析.建筑技术,1999(3):178
- 4 郑颖人,龚晓南.岩土塑性力学基础.北京:中国建筑工业出版社,1989.292~297

收稿日期:2001-09-29

本刊2001年11月9日讯 刊于《岩土工程技术》2000年第3期的“二层砖混结构客房建筑增加五层尝试”(作者:陈国政,陈守平)被《中国科技发展精品文库》收录,并在“北京第二届中国现代精英文库代表作大会”上被评为一等奖,获得在北京《中国现代精英文库》科学档案永久性陈列、收藏、入库的荣誉,且在中国香港正式列入“国际优秀作品(论文)”的评选范围。《岩土工程技术》编辑部特向论文的作者陈国政,陈守平先生表示祝贺。