

钻孔灌注桩压浆后浆液沿桩侧上升高度 及其对桩周土的作用方式研究

黄生根

(中国地质大学(武汉)工程学院, 武汉 430074)

摘 要: 在后压浆过程中, 普遍存在浆液沿钻孔灌注桩上升的现象。在压力作用下, 浆液沿着桩土间软弱层向上运动, 对桩侧土进行挤压, 在使桩径扩大的同时, 对桩周土进行加固。通过对后压浆作用机制进行分析, 利用宾汉流体的本构方程与运动方程推导出浆液上升高度的计算公式; 应用圆柱孔扩张理论, 分别推导出桩周土处于弹性状态和弹塑性状态时的径向位移计算公式。计算结果与实际工程的实测结果进行对比, 基本吻合。

关 键 词: 钻孔灌注桩; 后压浆; 上升高度; 扩张

中图分类号: TU 472

文献标识码: A

Study on rising height of grout along a pile after grouting and effect of grout on soils

HUANG Sheng-gen

(Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: Grout rising along a pile is a general phenomenon in the process of post-grouting. The grout flew upward along the weak layer under pressure, squeezing the soil to a larger diameter and improving the shaft friction. By analyzing the mechanism of post grouting and applying the Bingham constitutive model and flowing equation, the formula to calculate the grout rising height was given. The formula to calculate radial displacement of soils around a pile was given by applying cavity-expanding theory. Compared with the measured results of a project, the calculated values were satisfactory relatively.

Key words: bored pile; post-grouting; grout rising height; expanding

1 引 言

钻孔灌注桩的承载性能除与土层条件、桩的几何尺寸等有关外, 还受施工工艺的影响。施工工艺的影响主要有以下几方面: (1) 在成孔过程中产生的泥皮不同程度地降低了桩侧摩阻力; (2) 成孔后, 地层中形成了较大的自由面, 使桩土间的法向应力减小, 使桩侧摩阻力降低; (3) 孔底沉渣的存在不仅降低端阻力, 还对一定范围内的桩侧阻力产生弱化作用; (4) 在孔内泥浆的浸泡下, 桩周一定范围内土层的抗剪强度会降低, 从而导致桩侧摩阻力的降低。以上影响因素具有很大的随机性, 使钻孔灌注桩的承载性能往往表现出很大的离散性, 大大降低了钻孔灌注桩的工程质量的可靠性。而且, 桩越长, 桩径越大或施工时间越长, 上述不利因素表现

得越为明显。

为保证桩的承载力达到要求, 或提高桩的承载力, 采用后压浆技术来改善桩的承载特性是一个很好的选择。后压浆可减少桩基施工的人为影响及施工质量的差异性, 使桩基性能的可靠度得到提高, 对确保工程质量具有重要意义。

根据有关试验结果, 即使是超长桩, 无论桩侧压浆或桩端压浆, 压浆后侧阻力得到大幅提高, 并成为承载力提高的主要原因。在一些采用后压浆技术的工程中, 开挖后可观察到浆液上升导致桩径增大的现象^[1-3]。P. A. Thompson^[4]所介绍的 8 根试验桩在载荷试验后, 进行了开挖测量。对于采用相同钻进工艺的 1~4 号桩, 桩端压浆后 (1 号桩), 桩径比未压浆桩增大 1.7%; 桩端桩侧压浆后 (3 号桩和 4 号桩), 桩径比未压浆桩增大 2.3%~2.6%。6

号桩在桩端桩侧压浆后, 桩径比未压浆桩增大 4.1 %。苏-通大桥超长直径桩在压浆前后所进行的钻孔取芯、标准贯入试验和 CT 试验中, 也检测到浆液沿桩侧上升并对桩周土进行加固的现象^[5~7]。

浆液上升现象对压浆加固机理具有很重要的作用, 但如何计算浆液的上升高度, 目前还未见相关报导。本文根据后压浆作用机理, 利用宾汉流体的流变方程推导出浆液上升高度的计算公式, 并与实际工程的量测结果进行对比。

2 后压浆机理分析

2.1 桩端压浆机理概述

由于桩土间存在一个软弱层(泥皮层), 其强度与桩周土相比要低, 故浆液在压力作用下对桩侧土进行挤压, 在使桩径扩大的同时, 总有沿着软弱面向上运动的趋势。软弱面有两个, 即桩-泥皮接触面和泥皮-桩周土接触面。浆液在压力作用下首先克服任一软弱面的阻力, 象楔子样沿桩身向上运动, 并对泥皮层和桩侧土体进行挤密, 甚至破坏泥皮结构。浆液充填于挤密后产生的空隙, 固结后形成强度高的水泥结石, 相当于增大了桩的直径。浆液上升的高度与软弱层的厚度、强度、土的可灌性、注浆压力、流量等因素有关。在可灌性好的土层中, 浆液在土层中容易扩散, 浆液压力较小, 则沿桩土界面上升的高度较小; 在可灌性差的土层中, 浆液在土层中不易扩散, 浆液压力较大, 上升高度也大; 软弱层的厚度越大, 浆液流动受到的阻力越小, 上升高度相应也大^[8,9]。图 1~3 为某工程压浆后进行基坑开挖得到的不同深度桩截面的变化情况。离地面 12 m 处(离注浆点 9.5 m)桩的半径普遍增大大约 5 cm, 少部分达 10 cm; 离地面 9 m 处(离注浆点 12.5 m)桩的半径普遍增大大约 2~3 cm; 离地面 6 m 处(离注浆点 15.5 m)桩的半径增大大约 0.5 cm。

土体受到压力作用后, 孔隙水压力增大, 压浆完成后, 随着孔隙水压力的消散, 桩周土体因压密而强度提高。



图 1 地面下-6 m 桩截面图

Fig.1 Section of pile at -6 m under ground surface



图 2 地面下-9 m 桩截面图

Fig.2 Section of pile at -9 m under ground surface



图 3 地面下-12 m 桩截面图

Fig.3 Section of pile at -12 m under ground surface

2.2 浆液上升高度计算

根据上述分析, 浆液在软弱层中的运动可归纳为: 软弱面劈裂—浆液上升—挤压—再劈裂—再上升—再挤压的过程, 并且从开挖情况来看, 整个环状截面基本是均匀分布的。因此, 浆液在软弱层中的运动实际上是一个流体在轴向环空中的运动问题。为方便分析, 假定浆液在软弱层中的运动是先流动上升, 再产生挤压作用, 从而将此过程分解为两个问题即浆液上升的计算问题和圆柱扩张问题。先讨论浆液上升的计算问题。

图 4 为浆液在轴向环空中的受力示意图, 设桩的半径为 r_0 , 软弱层厚度为 b , 在流场中某一点 $X(r, \theta, z)$ 处取一长度为 dz , 厚度为 dr 的流体微元薄筒进行分析^[10]。在流体达到稳定时, 微元薄筒在 z 方向所受外力达到平衡, 其表达式为

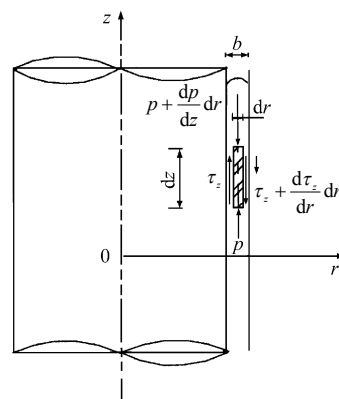


图4 轴向环空流受力示意图

Fig.4 Sketch of force diagram of axial circulation flow

$$2\pi r dr \cdot p + 2\pi r dz \cdot \tau_z - 2\pi(r+dr) \left(\tau_z + \frac{d\tau_z}{dr} dr \right) dz - 2\pi r dr \left(p + \frac{dp}{dz} dz \right) - 2\rho r dr dz \cdot \rho_c g = 0 \quad (1)$$

将上式展开, 并略去高阶项得

$$\frac{dp}{dz} + \frac{1}{r} \tau_z + \frac{d\tau_z}{dr} + \rho_c g = 0 \quad (2)$$

宾汉流体的流变方程为

$$\tau = \tau_0 + \eta \frac{dv}{dr} \quad (3)$$

式中 v 为流场中的剪切速率; τ_0 为宾汉流体的剪切屈服强度 (Pa)。

边界条件为 $r = r_0 + b/2$, $\tau = 0$, $r = r_0$, $v = 0$, $r = r_0 + b$, $v = 0$ 。

由式 (2) 求解得:

$$\tau = -\frac{r}{2} \left(\frac{dp}{dz} + \rho_c g \right) + \frac{c_1}{r} \quad (4)$$

由 $r = r_0 + b/2$, $\tau = 0$ 及式 (4) 可得

$$\tau = c_1 \left[\frac{1}{r} - \frac{r}{(r_0 + b/2)^2} \right] \quad (5)$$

将上式代入式(3), 并由 $r = r_0$, $v = 0$, $r = r_0 + b$, $v = 0$, 可得

$$c_1 = \frac{\tau_0 b}{\ln \left(1 + \frac{b}{r_0} \right) - \frac{b}{r_0 + b/2}} \quad (6)$$

将式 (6) 代入式 (5), 并令 $\frac{b}{r_0} = R_h$, 可求得最大上升高度的表达式:

$$z = \frac{p - p_c}{\gamma_c + \frac{2\tau_0 b}{r_0^2 [R_h - \ln(1 + R_h)]}} \quad (7)$$

式中 p 为出浆口压力 (kPa); p_c 为软弱面的起裂压力 (kPa); γ_c 为浆液重度 (kN/m^3); $\gamma_c = \rho_c g$, 地下水水位以下取浮重度。

$$p_c \text{ 值可按下式确定: } p_c = k_0 \gamma h + \sigma_{cl} \quad (8)$$

式中 k_0 为桩周土的侧压力系数; γ 为土的重度;

h 为土中某一深度; σ_{cl} 为软弱层与桩或土间的抗拉强度。

2.3 桩周土的扩张问题

浆液在上升过程中对桩周土产生挤压, 由于桩长一般远大于桩径, 特别是长桩和超长桩长径比更大, 故可将其作为平面应变问题, 按轴对称圆柱孔扩张问题来考虑。

图5为一圆柱孔在均匀压力 P 作用下扩张的情况。圆柱孔的初始半径为 r_0 , 随着浆液压力的增大, 孔径逐渐扩大, 扩孔后的半径为 r_u 。当压力增加到一定值, 孔周围将由弹性状态进入塑性状态, 从而出现塑性区, 塑性区最大半径为 r_p , 在半径 r_p 以外的土体仍保持弹性状态。

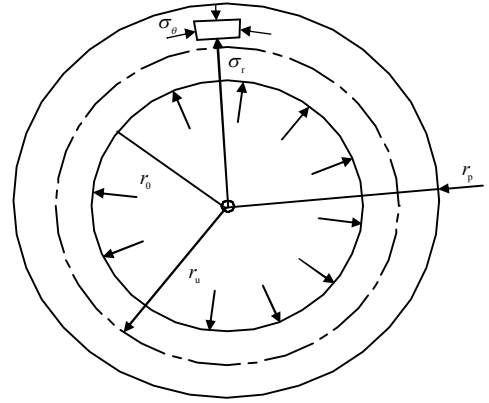


图5 圆柱孔扩张示意图

Fig.5 Sketch of extension of cylindrical hole

2.3.1 桩周土临塑荷载

根据圆柱孔扩张理论, 在应力轴对称状态下, 浆液压力在桩周土层中引起的应力为

$$\sigma_r = A/r^2 + 2C_1 \quad (9)$$

$$\sigma_\theta = -A/r^2 + 2C_1 \quad (10)$$

式中 σ_r , σ_θ 分别为径向和环向的应力分量(kPa); A , C_1 均为系数。当 $r \rightarrow \infty$ 时, $\sigma_r = \sigma_\theta$, 得 $C_1 = 1/2\sigma_0$, σ_0 为初始应力(kPa)。

式 (9) 和式 (10) 相加可得

$$\sigma_r + \sigma_\theta = 2\sigma_0 \quad (11)$$

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, 此时应满足摩尔-库仑破坏条件:

$$\sigma_\theta = \sigma_r \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} - 2c \frac{\cos \varphi}{1 + \sin \varphi} \quad (12)$$

式中 c 为黏聚力(kPa); φ 为内摩擦角($^\circ$)。

联立式 (11) 和式 (12), 解得

$$782 \quad p_{ep} = \sigma_0(1 + \sin \varphi) + c \cos \varphi \quad (13)$$

式中 p_{ep} 为桩周土的临塑荷载 (kPa); 当 $p < p_{ep}$ 时, 桩周土处于弹性状态; 当 $p > p_{ep}$ 时, 桩周土处于弹塑性状态。

2.3.2 桩周土处于弹性状态

对轴对称问题, 桩周土平衡方程式可表示为

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (14)$$

几何方程为

$$\varepsilon_r = -\frac{du}{dr} \quad (15)$$

$$\varepsilon_\theta = -\frac{u}{r} \quad (16)$$

本构方程为

$$\varepsilon_r = \frac{1+\nu}{E}[(1-\nu)\sigma_r - \nu\sigma_\theta] \quad (17)$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{1+\nu}{E}[(1-\nu)\sigma_\theta - \nu\sigma_r] \quad (18)$$

边界条件为

$$r = r_0, \sigma_r = p, r = r_0, u = u_0 \quad (19)$$

式中 σ_r 为径向应力; σ_θ 为沿 θ 方向的正应力; u 为径向位移; ν 为土的泊松比; E 为土的压缩模量; p 为注浆压力。

由几何方程、本构方程及边界条件可得

$$u_0 = \frac{1+\nu}{E}[p - \sigma_0]r_0 \quad (20)$$

式中 u_0 为桩土界面的位移。

浆液对桩周土进行挤密产生位移后, 充填于其间, 故 u_0 即相当于桩径增大的部分。

2.3.3 桩周土处于弹塑性状态

当浆液压力增加到一定值, 桩周土中将出现塑性区, 土体服从 Mohr-Coulomb 破坏准则。

求解式(12)及平衡方程式(14), 并由 $r = r_0 + u_r$, $\sigma_r = p$, 解得

$$\sigma_r = (p + c \cot \varphi) \left(\frac{r_0 + u_r}{r} \right)^{\frac{2 \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}} - c \cot \varphi \quad (21)$$

式中 u_r 为桩土界面的位移。

将 $r = r_p$, $\sigma_r = p_{ep}$ 代入上式, 并取 $r_0 + u_r \approx r_0$, 经变换得

$$r_p = \left(\frac{p_{ep} + c \cot \varphi}{p + c \cot \varphi} \right)^{\frac{1 + \sin \varphi}{2 \sin \varphi}} r_0 \quad (22)$$

根据孔的体积变化等于弹性区的体积变化加上塑性区体积的变化, 得

$$\pi(r_0 + u_r)^2 - \pi r_0^2 = \pi(r_p + u_p)^2 - \pi r_p^2 + \pi(r_p^2 - (r_0 + u_r)^2) \Delta \quad (23)$$

式中 Δ 为塑性区平均体积应变。

略去高阶项后, 整理得

$$u_r = \frac{2r_p u_p + (r_p^2 - r_0^2) \Delta}{2r_0(1 + \Delta)} \quad (24)$$

将式 (19) 中 u_0 , r_0 分别换成 u_p , r_p , 则得弹塑性边界的位移值为

$$\frac{u_p}{r_p} = \frac{1+\nu}{E}[p - \sigma_0] \quad (25)$$

将式(22)、式 (25) 代入式 (24), 可得桩土界面位移值的表达式:

$$\frac{u_r}{r_0} = \left(\frac{p + c \cot \varphi}{p_{ep} + c \cot \varphi} \right)^{\frac{1 + \sin \varphi}{\sin \varphi}} \left[\frac{1 + \nu}{E}[p - \sigma_0] + \frac{1}{2} \Delta \right] - \frac{1}{2} \Delta \quad (26)$$

3 计算实测

3.1 工程概况

某大厦由主楼和群楼等组成。主楼 27 层, 框架剪力墙结构; 附楼 15 层, 框架剪力墙结构; 建筑物采用桩筏基础。

建筑场地土层情况如下: ①杂填土: 层厚 0.5~1.5 m, 平均厚度为 0.9 m; ②粉土: 褐黄色, 稍密, 平均厚度为 1.8 m; ③粉土: 褐黄色, 饱和, 稍密, 平均厚度为 3.1 m; ④粉质黏土: 灰色, 软塑, 平均厚度 6.6 m; ⑤粉质黏土: 灰色-深灰色, 软塑, 平均厚度为 5.1 m; ⑥粉砂: 灰色, 饱和, 中密-密实, 平均厚度为 1.7 m; ⑦中砂: 灰色, 饱和, 密实, 平均厚度为 10.0 m; ⑧粉土: 灰黄色, 湿、密实, 平均厚度为 7.2 m; ⑨细砂: 褐黄色, 密实, 平均厚度为 6.1 m; ⑩粉质黏土: 褐黄色, 硬塑, 平均厚度为 7.9 m; ⑪粉质黏土: 黄褐-褐红色, 湿, 硬塑, 平均厚度为 7.8 m; ⑫粉质黏土: 棕红色, 硬塑, 平均厚度为 6.4 m; ⑬粉土: 褐黄色, 湿, 密实, 平均厚度为 7.6 m。

工程桩持力层选在第⑩层粉质黏土层, 桩长 40 m, 桩径为 800 mm, 进行桩端桩侧压浆, 桩侧压浆部位选在第⑦层中砂层。桩侧压浆的表压一般为 0.8 MPa, 桩侧压浆量为 1 t, 桩端压浆的表压一般为 2 MPa, 压浆量为 2 t。

桩基施工完成后, 对基坑进行了开挖, 最深处为 14 m。根据观测得到的压浆对桩土界面的影响情况见图 1~3。

3.2 计算分析

(1) 上升高度计算

注浆管口压力 p_j 表达式:

$$p_j = p_b + p_y - \Delta p \quad (27)$$

式中 p_j 为表压; p_y 为浆液静压力; Δp 压力损失。

取上层侧压管进行计算, 将 $p_b = 1\ 000\ \text{kPa}$; $p_y = 168\ \text{kPa}$, $\Delta p = 455\ \text{kPa}$, 代入上式可求得侧压管出口压力 $p_j = 718\ \text{kPa}$ 。将 $b = 1.5\ \text{mm}$, $\rho = 1.8\ \text{g/cm}^3$, $\tau_0 = 8\ \text{Pa}$ 及 p_j 代入式 (7), 求得侧压浆的上升高度为 $z = 24.3\ \text{m}$ 。

(2) 临塑荷载

土的抗剪强度指标取桩侧土的加权平均值, $c = 15\ \text{kPa}$, $\varphi = 20^\circ$, 则桩侧土的临塑荷载计算值分别为 $340\ \text{kPa}$ 。

(3) 桩侧土体的位移

压浆过程中可能既有挤密作用又有劈裂作用, 这里只考虑挤密作用引起的位移。

将 $p = p_j = 718\ \text{kPa}$, $p_{ep} = 340\ \text{kPa}$, $E = 8\ \text{MPa}$, $z = 24\ \text{m}$ 代入式 (26), 计算得 24 m 处桩侧土位移为 $60\ \text{mm}$ 。

将 $p = p_j = 359\ \text{kPa}$, $E = 5\ \text{MPa}$, $z = 12\ \text{m}$, 代入式 (26) 计算得 12 m 处桩侧土位移为 $30.6\ \text{mm}$ 。

将 $p = p_j = 245\ \text{kPa}$, $E = 5\ \text{MPa}$, $z = 9\ \text{m}$, 代入式 (20) 计算得 9 m 处桩侧土位移为 $16.2\ \text{mm}$ 。

根据实测数据, 12 m 处约为 $50\ \text{mm}$; 9 m 处约为 $20 \sim 30\ \text{mm}$, 计算数据略偏小, 但误差不大。

4 结 论

(1) 在压力作用下, 浆液沿着桩土间软弱层(泥皮层)向上运动, 对桩侧土进行挤压, 使桩径扩大的同时, 对桩周土进行加固。

(2) 浆液在软弱层中的运动实际上是一个流体在轴向环空中的运动问题, 利用宾汉流体的本构方程与运动方程推导出浆液上升高度的计算公式。

(3) 应用圆柱孔扩张理论, 分别推导出桩周土处于弹性状态和弹塑性状态时的径向位移计算公式。

(4) 计算结果与实际工程的实测结果相比比较接近, 计算数据略偏小。

参 考 文 献

- [1] Bruce D A. Enhancing the performance of large diameter piles by grouting[J]. **Grouting Engineering**, 1985, (48): 9—15.
- [2] Bruce D A. Enhancing the performance of large diameter piles by grouting[J]. **Grouting Engineering**, 1985, (5): 11—19.
- [3] Fleming W G K. The Improvement of pile performance by base grouting[J]. **Proc. Instn. Civ. Engrs**, 1993, (8): 88—93.
- [4] Stocker M F. The influence of post grouting on the load bearing capacity of bored piles[A]. **Proc. 8th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering**[C]. Helsinki: [s.n.], 1983.
- [5] 黄生根, 龚维明. 苏通大桥一期超长直径试桩承载特性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(19): 3 370—3 375.
- HUANG Sheng-gen, GONG Wei-ming. Analysis on bearing behavior of 1-stage super long-large diameter testing piles in Sutong bridge[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(19): 3 370—3 375.
- [6] 黄生根, 张晓炜, 龚维明. 后压浆钻孔灌注桩的荷载传递机理研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(2): 251—254.
- HUANG Sheng-gen, ZHANG Xiao-wei, GONG Wei-ming. Mechanism study on bored cast-in-place piles with post-grouting technology[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(2): 251—254.
- [7] 黄生根, 王辉, 张晓炜. 超长直径桥桩的压浆效果研究[J]. 公路交通科技, 2004, 21(5): 70—73.
- HUANG Sheng-gen, WANG Hui, ZHANG Xiao-wei. Study on the grouting effects of super long large diameter bridge piles[J]. **Journal of Highway and Transportation Research and Development**, 2004, 21(5): 70—73.
- [8] 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, (1): 36—39.
- HUANG Sheng-gen, CAO Hui. Study on the mechanics of post grouting in soft soils[J]. **Geotechnical Engineering Technique**, 2002, (1): 36—39.
- [9] 黄生根, 曹辉. 后压浆对钻孔灌注桩承载特性的影响[J]. 建筑技术, 2002, (3): 200—201.
- HUANG Sheng-gen, CAO Hui. Effect analysis of post grouting on bored piles[J]. **Architecture technology**, 2002, (3): 200—201.
- [10] 李兆敏, 王渊, 张琪. 宾汉流体在环空中流动时的速度分布规律[J]. 石油学报, 2002, (2): 87—91.
- LI Zhao-ming, WANG Yan, ZHANG Qi. The law of

velocity distribution of Bingham fluid's flowing in the encircle pipe[J]. **Acta Petrolei Sinica**, 2002, (2): 87—91.