

# 土体压密注浆机理与工程应用的探讨

曹星<sup>1</sup>, 胡焕校<sup>2</sup>

(1. 郴州市建设工程质量安全监督管理站, 湖南 郴州 423000; 2. 中南大学, 湖南 长沙 410083)

**摘要:** 根据压密注浆的加固机理, 探讨和分析了压密注浆的临界极限值, 推导了临界极限压力的计算公式, 并在实际工程中进行了应用, 取得了较好的效果。

**关键词:** 压密注浆; 注浆压力; 效果检测

中图分类号: TU472

文献标识码: A

文章编号: 1673-9833(2008)03-0009-03

## Discussion on Compaction Grouting Mechanism and Engineering Application

Cao Xing<sup>1</sup>, Hu Huanxiao<sup>2</sup>

(1. Station of Construction Engineering for Quality Security and Supervision Management of Chenzhou City, Chenzhou Hunan 423000, China; 2. Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** According to compaction grouting mechanism principle, grouting design and effect examination are studied, and the calculation formula for the critical limitation pressure is also derived. It is proved that it can gain a perfect effect when used in the practical engineering.

**Key words:** compaction grouting; grouting pressure; effect examination

土体压密注浆始于美国<sup>[1]</sup>, 美国称其为CPG, 20世纪50年代早期用于工程, 但没有对其原理进行研究, 直到1969年格拉夫(Graf)才提出压密注浆的概念。1970年米切尔(Mitchell)研究了压密注浆的机理, 1973年布朗(Brown)和奥纳(Warner)论述了压密注浆力学及其应用。

### 1 压密注浆概述

根据美国土木工程学会(ASCE)注浆专业委员会1980年给出的定义: 压密注浆是把极稠的(塌落度<25 mm)低流动性浆液注入到预定的土层的注浆方法, 注入过程中浆液不进入土体的孔隙, 而是形成一个各向同性的整体, 能够产生可控的位移量, 以压密松散土体或抬高建筑物。压密注浆适应于加固比中砂细的砂土和能够充分排水的粘土、杂填土等, 其优点是对软

弱土区起到最大的压密作用。

压密注浆通过钻孔将极稠的浆液挤入土体, 在注浆处形成浆泡(球或柱形), 浆泡对周围土体压缩, 在浆泡临近区存在塑性变形区。离浆泡较远区域土体发生弹性变形, 因而土的密度明显增加, 钻杆自下而上注浆形成浆柱。压密注浆刚开始时浆泡的直径和体积较小, 压力主要是径向即水平方向, 随着浆泡体积的增加, 将产生较大的上抬力, 因而压密注浆的挤密作用和上抬力对沉降基础加固和抬升较为有效。

压密注浆不像渗透注浆那样<sup>[2]</sup>, 浆液深入土颗粒间孔隙内, 将土颗粒包围胶结起来; 也不像劈裂注浆那样发生劈裂, 浆液串入劈开的裂隙内形成脉状浆体, 它是利用浆泡挤走相邻土体使其周围土体得到压密。因此, 注浆压力是压密注浆过程中控制的关键, 压力过小, 起不到效果; 压力过大, 引起底层劈裂。

收稿日期: 2008-01-25

作者简介: 曹星(1972-), 男, 湖南永兴人, 郴州市建设工程质量安全监督管理站工程师, 主要从事建筑施工管理工作。

## 2 压密注浆临界极限压力的分析<sup>[3,4]</sup>

为了研究方便,假设注浆体在土中呈圆柱形。依据 Vesic 球孔扩张理论,作出以下假定:1) 假定塑性区内的土体是可压缩的塑性固体,具有 Mohr-Coulomb 所定义的强度指标  $\gamma$ 、 $c$  和  $\varphi$ , 以及平均体积应变  $\Delta$ , 其值是由塑性区内的应力状态和土的体积变化-应力关系所确定的;2) 假定塑性区以外的土体变形是线性变形、各向同性的固体,具有变形模量  $E$  和泊松比  $\nu$ ;3) 假定在注浆施加注浆压力之前,整个土体具有各向同性的有效应力  $q$ ,与现存的和新施加的应力相比较,塑性区内的应力可以忽略不计。

在深度为  $h$  处注浆,建立具有初始微小半径  $R_i$ 、被均匀分布的内压力  $P$  所扩张的柱形孔的模型,如图 1 所示,围绕柱形孔的土体是无限域的。

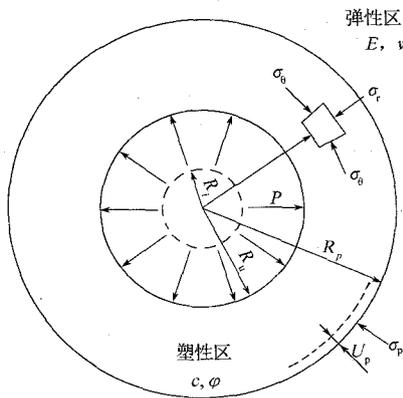


图 1 圆柱形孔扩张问题

Fig. 1 Expand problem of cylindrical hole

当内压  $P$  逐渐增加时,围绕着孔的柱形区域内的土体将成为塑性状态。这时,塑性区将随着内压力  $P$  的增加而不断地扩张,一直达到最终值  $P_u$  为止,此时孔的半径为  $R_u$ ,而包围着孔的塑性区的半径则扩大到  $R_p$ 。在  $R_p$  以外的土体仍保持为弹性平衡状态,因而得出应力平衡方程式:

$$\frac{d\sigma_r + \sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0, \quad (1)$$

式中:  $r$  为孔中心到任一点的距离;

$\sigma_r$ 、 $\sigma_\theta$  分别为径向应力和切向应力。

在弹塑性边界上须满足 Mohr-Coulomb 破坏准则:

$$\sigma_r - \sigma_\theta = (\sigma_r + \sigma_\theta) \sin \varphi + 2c \cdot \cos \varphi. \quad (2)$$

以下为 Vesic 圆筒形孔扩张问题的弹塑性解:

$$\text{塑性区最大半径 } R_p = \sqrt{I_r \sec \varphi} R_i, \quad (3)$$

注浆的极限压力<sup>[5]</sup>为:

$$P_u = (q + c \cdot \cot \varphi)(1 + \sin \varphi) \times [I_r \cdot \sec \varphi]^{\frac{\sin \varphi}{1 + \sin \varphi}} - c \cdot \cot \varphi, \quad (4)$$

其中:

$$I_r = \frac{I_r(1+\Delta)}{1+I_r \Delta \sec \varphi}, \quad I_r = \frac{E}{2(1+\nu)(c+q \cdot \tan \varphi)};$$

$q$  为土体内的初始应力,  $q = k_0 \cdot \gamma \cdot h$ ,  $k_0$  为侧压力系数,  $k_0 = 1 - \sin \varphi$ ,  $\varphi$  为土体内摩擦角。

可以认为注浆达到此压力值后,浆体对土体的压密作用达到最好效果。若超过此值,则有可能发生劈裂或者隆起。

## 3 压密注浆工程实例

### 3.1 工程概况

某教学大楼改建,根据勘察资料显示,自地表向下,土层结构如表 1 所示。

表 1 土层分布

Table 1 Soil distribution

土层名称	土层厚度 / m	土层特性	土性参数
素混凝土	0.1		
杂填土	0~0.50		
粉质粘土	0.50~4.00	软塑	$\gamma = 19.0 \text{ kN/m}^3$ $c = 25 \text{ kPa}$ $\varphi = 15^\circ$ $E = 1000 \text{ kPa}$ $\nu = 0.3$
粉质粘土	6~7	硬塑~坚硬状网纹	
圆砾层		中密	

拟建建筑物采用独立基础,地基承载力要求大于 130 kPa,现有地基达不到设计要求,必须进行地基加固处理。

### 3.2 注浆设计

经过多种方案比较,设计采用压密注浆法对该地基土层进行加固,以提高承载力。硬塑~坚硬状网纹粉质粘土层厚度较大、承载力较高,故只需对软塑粉质粘土层进行加固即可。

根据压密注浆极限压力的计算公式,结合土体参数  $c = 25 \text{ kPa}$ ,  $\varphi = 15^\circ$ ,  $E = 1000 \text{ kPa}$ , 泊松比  $\nu = 0.3$  以及工程经验,塑性区平均体积应变  $\Delta > 10^{-2}$  时,土体结构破坏<sup>[5]</sup>。所以,这里令平均体积应变  $\Delta = 0.01$ 。将上述参数代入式(4)中,求得  $P_u = 194.51 \text{ kPa}$ 。考虑浆液从注浆泵到达注浆深度时压力的损耗,损耗系数取 1.1~1.2,采取的注浆压力  $P = (1.1 \sim 1.2)P_u$ ,求得  $P = (196.34 \sim 214.18) \text{ kPa}$ ,设计注浆压力为 0.2 MPa。

注浆采用 PVC 材制作的花管注浆,注浆深度为地面下 2.0~4.5 m (即深入硬塑~坚硬状网纹粉质粘土 0.5 m),注浆速度为 20~30 L/min。当注浆压力达到设计值后稳压 10 min,注浆孔按 1.0 m 的间距以梅花形布置,注浆材料采用 32.5 普通硅酸盐水泥,水灰比为 0.8:1~0.6:1。

在注浆施工过程中,施工单位为了加快进度,部分钻位采用了 0.4~0.5 MPa 的注浆压力,结果临近注浆

孔2 m处一砖混结构的民房墙壁发生开裂, 裂缝长度达2 m, 最大宽度处为10 mm。该事故发生后, 施工单位立即降低注浆压力, 继续保持在0.2 MPa左右。之后, 直到工程结束, 未出现任何事故。

### 3.3 注浆效果检测

注浆结束2周后, 甲方对注浆进行了荷载板试验检测。按照场地情况, 等距布置3个测试点, 荷载板面积为0.50 m<sup>2</sup>, 试验中采用地锚结合重物堆载提供反力。3个点的试验结果见表2, 1号测试点的Q-S曲线见图2。

表2 测试成果表

Table 2 Table of test result

试验点号	极限荷载 /kN	对应沉降 /mm	地基承载力 /kPa	平均值 /kPa
1	150	7.64	≥ 150	
2	150	7.85	≥ 150	≥ 150
3	150	7.84	≥ 150	

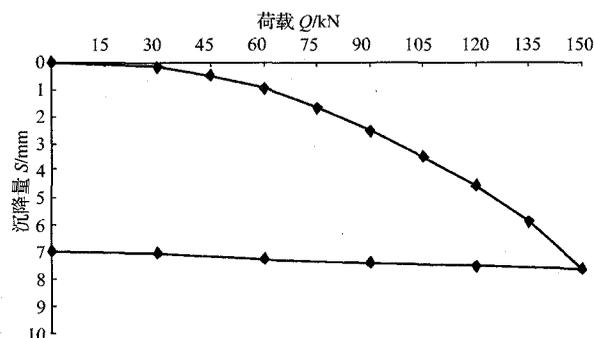


图2 静荷载试验Q-S曲线图

Fig. 2 The Q-S chart of static load test

经过综合分析得出结论, 注浆后地基土承载力能够达到150 kPa, 完全满足设计要求的130 kPa。

本次注浆后, 基础开挖发现注浆管周围结石体呈近似圆柱形, 直径约38 cm左右, 如图3、4所示。



图3 浆柱1

Fig. 1 Caisson pile 1

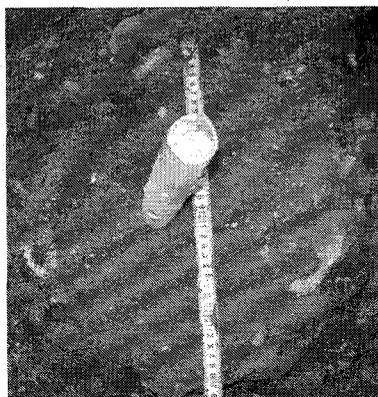


图4 浆柱2

Fig. 2 Caisson pile 2

## 4 结果讨论

1) 压密注浆法占用场地小, 可以在狭窄的场地进行施工; 采用塌落度较小的浆材, 减小了对土体的劈裂作用, 使注浆影响范围得到一定程度的控制; 浆材在注入过程中压缩周围土体, 使土层密度加大, 承载力得以提高。

2) 柱形孔扩张理论在解释压密注浆机理方面有一定的适用性, 可利用该理论计算注浆极限压力, 用以控制注浆压力, 使施工安全合理地进行。

3) 压密注浆的设计与施工必须以理论来指导, 不能仅靠经验; 施工过程中必须加强监测, 及时作出调整, 避免事故发生。

压密注浆是一种注浆工法新技术, 工程应用中应以注浆理论为指导, 以工程实际条件为应用出发点, 以达到工程设计质量目标。但在压密注浆设计方面尚无具体可行的方法, 所以其理论研究仍需加强。

### 参考文献:

- [1] 岩土注浆理论与工程实例编委会. 岩土注浆理论与工程实例[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [2] 笱月稳. 国外高压喷射注浆技术的发展[J]. 岩土工程技术, 1998(2): 63-65.
- [3] Vesic A S. Expansion of cavities in infinite soil mass[J]. Soil Mech. And Found. Div, 1998(3): 265-290.
- [4] 王广国, 杜明芳. 压密注浆机理研究及效果检验[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(5): 36-41.
- [5] 巨建勋. 压密注浆加固机理的研究[D]. 长沙: 中南大学土木建筑学院, 2006.

(责任编辑: 张亦静)