

高压注浆渗流分析与工程应用^{*}

张建山^{1,3}, 仵彦卿², 李哲¹

(1 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048; 2 上海交通大学 环境工程学院, 上海 200240;

3 机械工业勘察设计院, 陕西 西安 710043)

[摘要] 建立了高压注浆渗流的数学模型, 推求出高压注浆过程中浆体区和原水体区的压力分布, 以及停止注浆后井底压力的消退情况。分析了注浆井底压力和原区压力与注浆时间、浆液粘度、渗透率、计算点与注浆井距离等的关系; 通过现场试验建立了注浆井底压力和水灰比的经验关系, 并将结果用于指导灌注桩高压注浆补强工程。

[关键词] 高压注浆; 钻孔灌注桩; 渗流模型; 注浆压力; 水灰比; 工程应用

[中图分类号] TU473.1⁺4

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2004)12-0095-05

在农业和水利工程项目建设中, 有些工程项目对地基承载力的要求较高或对沉降量比较敏感, 对此类地基基础现多以钻孔灌注桩进行处理, 但如果钻孔灌注桩的沉渣和泥皮处理不当, 灌注桩的承载力和沉降量都受到较大的影响^[1,2], 特别是采用正循环成孔工艺的混凝土灌注桩, 有时同一类型桩在同一场地其承载力也相差很大, 在陕西有些地区相差甚至高达一倍, 给工程设计造成了极大不便。现工程中多采用后压浆技术解决钻孔灌注桩的沉渣和泥皮问题, 该技术是一种将低压水泥浆通过桩端和桩侧注浆喷头喷射入桩端和桩侧土体(砂层), 以固化沉渣、泥皮及加固桩端和桩侧一定范围的土体, 从而提高桩基承载力、减少桩基沉降^[2,3]。

在工程应用中, 由于该技术是低压注浆, 有时反浆不明显, 因需增加桩侧注浆^[1]而使工程成本加大。同时, 该技术国家还没有统一的规范, 对浆体区的压力分布, 以及停止注浆后井底压力消退情况缺乏理论指导, 对水灰比与注浆压力的关系还没有明确, 使得有些工程注浆效果不理想, 甚至注浆失败。针对这一现状, 本研究从有压注浆机理分析出发, 探讨了高压注浆的渗流机理, 以便指导工程实践、节约工程成本和提高注浆效率。

1 高压注浆渗流数学模型

假设1个承压含水层, 有1口注浆井, 在注浆井中压力注入水泥浆, 考虑活塞式驱替^[4], 将形成一

个两区系统: 区域1为水泥浆, 区域2为原地下水。

两个区域由动界面分开, 其数学模型^[5]为:

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial p_1}{\partial r} \right) &= \frac{1}{a_1} \frac{\partial p_1}{\partial t} & 0 < r \leq r_c, t > 0 & (1) \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial p_2}{\partial r} \right) &= \frac{1}{a_2} \frac{\partial p_2}{\partial t} & r_c < r \leq \infty, t > 0 & (2) \end{aligned} \right\}$$

其边界条件为:

$$\left. \begin{aligned} r \frac{\partial p_1}{\partial r} &= \frac{Q}{2\pi \lambda_1 h} & r \rightarrow 0, t > 0 & (3) \\ p_2(r, t) &= p_1(r, t) & r = r_c, t > 0 & (4) \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{k_1}{\mu_1} \frac{\partial p_1}{\partial r} &= \frac{k_2}{\mu_2} \frac{\partial p_2}{\partial r} & r = r_c, t > 0 & (5) \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} p_2(r, t) &= p_0 & r \rightarrow \infty, t > 0 & (6) \end{aligned} \right\}$$

其初始条件为:

$$p_1(r, t) = p_2(r, t) = p_0, 0 \leq r < \infty, t = 0 \quad (7)$$

式中, p_0 为初始压力; Q 为注浆流量; h 为注浆区厚度; a 为导压系数; p 为压力; μ 为流体粘度; λ (k/μ) 为流度; k 为有效渗透率; r 为计算点至注浆井点的距离; r_c 为两个区域动界面; t 为注浆时间; 下标1、2 分别为注浆区和原水区标识。

将方程(1)、(2)和定解条件(3)~(7)进行玻耳兹曼变换, 并令:

$$\left. \begin{aligned} u &= \frac{r^2}{4a_1t}, u_c = \frac{r_c^2}{4a_1t}, \\ M &= \frac{k_1/\mu_1}{k_2/\mu_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}, N = \frac{a_1}{a_2} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

^{*} [收稿日期] 2004-06-22

[基金项目] 国家自然科学基金项目(10172071)

[作者简介] 张建山(1963-), 男, 河南禹州人, 高级工程师, 在读博士, 主要从事岩土水力学研究。

式中, M 为流度比; N 为导压系数比。

解得 1 区的压力解为^[5]:

$$p_1(r, t) = \frac{QM\mu_1}{4\pi k_1 h} [-Ei(-u) + Ei(-u_c)] + \frac{QM}{4\pi\lambda_1 h} Ei(-u_c N) \exp(-u_c(1-N)) \quad (9)$$

2 区的压力解为^[5]:

$$p_2(r, t) = \frac{QM}{4\pi\lambda_1 h} Ei(-uN) \exp(-u_c(1-N)) \quad (10)$$

若不考虑液体的可压缩性,则由物质平衡原理知:

$$\pi r_c^2 h \phi = Qt \quad (11)$$

式中, ϕ 为孔隙率。

则两个区域动界面 r_c 为:

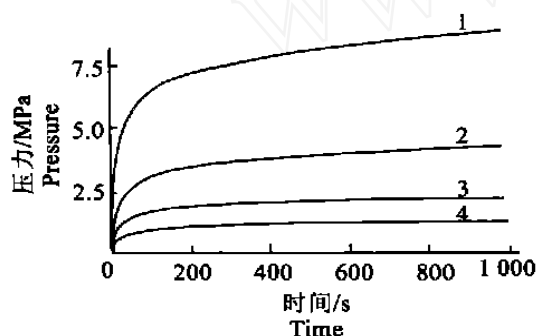


图 1 注浆区压力和时间关系

Fig. 1 Pressure versus time in area with the injection of cement liquid

1. $\mu = 0.4$ MPa; 2. $\mu = 0.2$ MPa; 3. $\mu = 0.1$ MPa; 4. $\mu = 0.05$ MPa

从图 1、图 2 可以看出,随着注浆时间的延长,注浆压力增加。同时从图 1 可以看出,注浆体粘度增加,注浆压力随之增加。据式(9)和式(10),可绘制出注浆区压力和原区压力与计算点至注浆井距离

2 注浆渗流解析分析

西安某小区高层建筑基础采用钻孔混凝土灌注桩高压注浆技术,桩端持力层为中粗砂,采用桩端高压注浆技术提高桩基承载力,根据该勘察报告,其注浆地质参数为: $k_1 = 0.000\ 023\ \text{m}^2$, $h = 2.5\ \text{m}$, $a_1 = 0.28$, $\phi = 0.3$;其注浆参数为: $Q = 0.002\ \text{m}^3/\text{s}$, $\mu_1 = 0.2\ \text{MPa}\cdot\text{s}$, $N = 1$ 。

据式(9)和式(10)可绘制出注浆区井底压力和原区 $r = 1.2\ \text{m}$ 处压力与时间的关系,如图 1、图 2 所示。

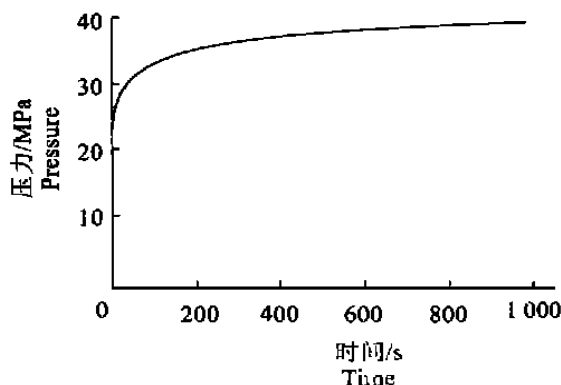


图 2 原水区压力和时间关系

Fig. 2 Pressure versus time in raw water area

的关系曲线(图 3、图 4)。从图 3、图 4 可以看出,随计算点至注浆孔距离的延长,注浆压力急剧下降,在区域动界面上压力已降至很小;也就是说注浆液主要靠注浆孔的注浆压力进行渗入和扩散。

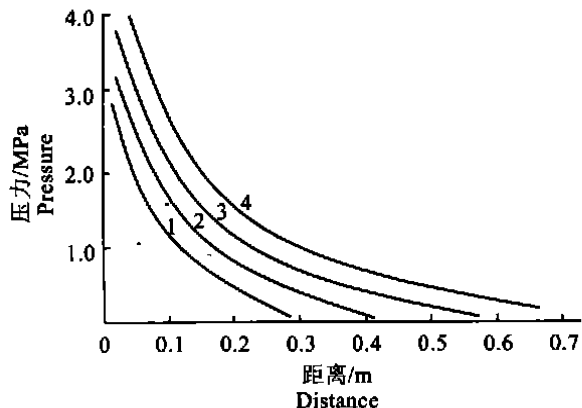


图 3 注浆区压力与计算点至井距离的关系

Fig. 3 Pressure versus distance in areas with the injection of cement liquid

1. $t = 100\ \text{s}$; 2. $t = 200\ \text{s}$; 3. $t = 400\ \text{s}$; 4. $t = 600\ \text{s}$

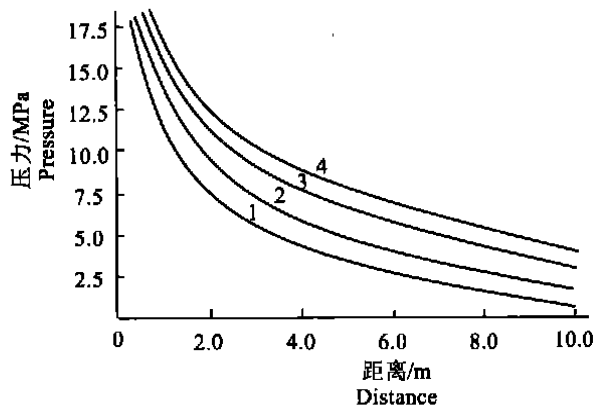


图 4 原水区压力与计算点至井距离的关系

Fig. 4 Pressure versus distance in raw water area

1. $t = 100\ \text{s}$; 2. $t = 200\ \text{s}$; 3. $t = 400\ \text{s}$; 4. $t = 600\ \text{s}$

据式(9)可绘制出注浆井底压力与粘度的关系,如图 5 所示。由图 5 可以看出,注浆井底压力与粘度基本呈正比关系,并且增加很快。因此,可以通过

增加注浆液的粘度即调整水泥浆的配合比来增加或降低注浆压力。据式(9)可得注浆井底压力与渗透率的关系(图 6)。

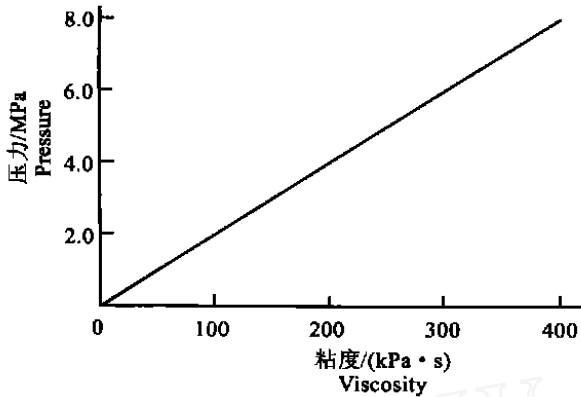


图 5 注浆井底压力与粘度的关系

Fig. 5 Pressure versus viscosity in area with the injection of cement liquid

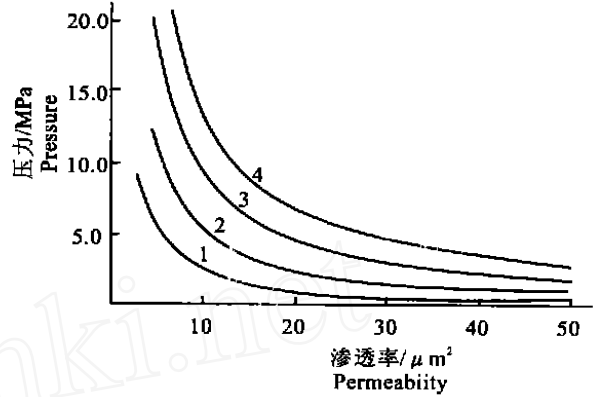


图 6 注浆井底压力与渗透率的关系

Fig. 6 Pressure versus permeability in area with the injection of cement liquid
1. $\mu=0.05 \text{ MPa}\cdot\text{s}$; 2. $\mu=0.1 \text{ MPa}\cdot\text{s}$;
3. $\mu=0.2 \text{ MPa}\cdot\text{s}$; 4. $\mu=0.3 \text{ MPa}\cdot\text{s}$

从图 6 可以看出,注浆井底压力与渗透率呈反比关系,渗透率大则压力降低。但注浆液的粘度增加,则注浆压力增加。因此,对不同渗透性的注浆地层,应通过调整水泥浆的配合比,来满足注浆压力的要求。

3 压力衰减的计算与分析

若停止注浆时刻为 t_d ,从停止注浆时刻起的时间增量为 Δt ,界面半径乃为 r_c ,且只考虑液体的压缩性,而不考虑液体的重力和毛管力,则停注后可视作同一位置的两个井,其中一井注浆,一井抽浆,可由叠加原理^[6~8]进行计算。设注浆井的时间为 $t = t_d + \Delta t$,抽浆井的时间为 $t = \Delta t$;并令:

$$\Delta u = \frac{r^2}{4 a_1 \Delta t}; \Delta u_c = \frac{r_c^2}{4 a_1 \Delta t};$$
$$r_c^2 = \frac{Q t_d}{\pi h \phi} \quad (13)$$

则,注浆井的压力同式(9);抽浆井的压力为:

$$\Delta p_1(r, t) = \frac{Q u_1}{4 \pi k_1 h} [-Ei(-\Delta u) + Ei(-\Delta u_c)] + \frac{QM}{4 \pi \lambda_1 h} Ei(-\Delta u_c N) \text{Exp}(-\Delta u_c(1-N)) \quad (14)$$

因此,停止注浆后的压力为注浆井的压力与抽浆井的压力之差,即:

$$p_d(r, \Delta t) = p_1(r, t) - \Delta p_1(r, \Delta t) \quad (15)$$

取 $t_d = 600 \text{ s}$, $r = 0.02 \text{ m}$,其他参数同前;据式

(15)可绘制出停止注浆后井底压力的衰减曲线(图 7)。

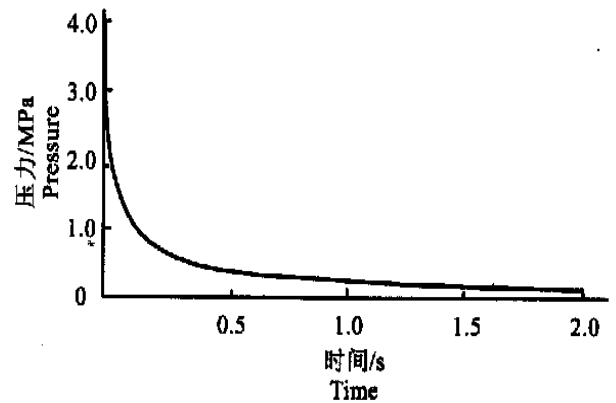


图 7 停止注浆后井底压力的衰减曲线

Fig. 7 Pressure versus time when stoping injecting cement liquid

从图 7 可以看出,停止注浆后井底压力急剧衰减;因此,对于注浆区埋藏较浅的地层,一次注浆时,可能会出现地面冒浆现象,导致注浆量满足不了设计要求,由于停止注浆后井底压力急剧衰减,可采用停注后,二次注浆或多次注浆的办法来达到设计要求。

4 注浆工程项目设计与分析

西安某工程设计采用正循环钻孔钢筋混凝土灌注桩,设计 4 组试验桩,桩径 $\phi = 800 \sim 1\,000 \text{ mm}$,桩长 13 m,经静载荷试验,当极限承载力为 3 300 kN

时,其沉降量结果如表 1 所示。

表 1 未注浆前各桩静载荷试验沉降量

Table 1 Subsidence of static tests before injection of cement liquid

桩号 Pile code	沉降量/mm Subsidence	桩号 Pile code	沉降量/mm Subsidence
SZ1	25	SZ3	30
SZ2	26	SZ4	40

由于该建筑结构对沉降较为敏感,经专家和设计人员研究,工程桩采用注浆补强技术降低沉降量;设计要求桩端注浆后沉降量控制在 10 mm 左右。

根据该工程岩土工程勘察报告,桩端持力层为中粗砂层,有利于采用桩端高压注浆补强技术,施工单位与设计单位协商后认为,采用该技术可确保满足设计要求,该技术可同时满足以下 3 个条件:①桩底注入水泥浆不少于 1 000 kg;②注浆压力大于 3 MPa;③注浆时地面产生反浆现象。

施工压浆管采用管径为 40 mm,壁厚为 3.50 mm 的焊接钢管,压浆管间采用管箍连接,桩端喷头采用高压注浆补强喷头(专利号 ZL03 2 18935.4)。每桩布设 2 根注浆管(其中 1 根为备用),注浆泵采用 ZJB/BP-30 型高压注浆泵,水泥采用秦岭 P. O 32.5R 普通硅酸盐水泥。

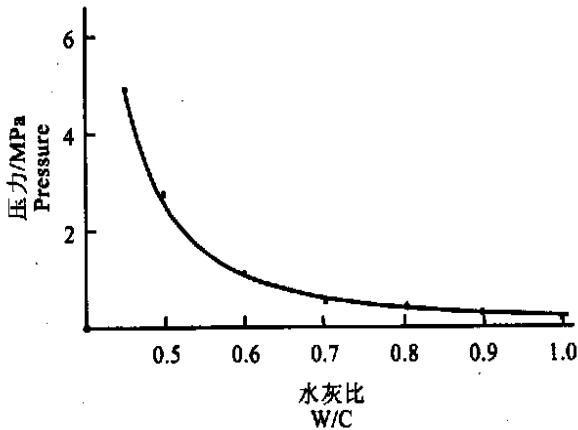


图 8 注浆压力与水灰比的关系

Fig. 8 Injecting pressure versus the ratio of water to cement

从高压注浆渗流理论分析可知,注浆压力与注浆液的粘度和桩端持力层中的中粗砂渗透率有关系,因此,工程桩施工前应进行现场注浆压力与注浆液水灰比试验,其结果如图 8 所示。从图 8 中可以看出,注浆液水灰比的比值减少,注浆压力增加,特

别是当水灰比的比值减少到 0.65 以后,注浆压力显著提高。试验还发现,当注浆量在 700~800 kg 时,地面开始冒浆。

采用该方案,对该工程 399 根工程桩进行注浆,第一次地面冒浆时,注浆量为 500~800 kg,注浆压力为 2.0~3.5 MPa;第二次注浆时压力为 3~6 MPa;个别桩因第二次注浆后注浆量未满足设计要求,而采用了第三次注浆。

该工程桩经过桩端高压注浆补强后,再进行 4 组试验测定实际沉降量,静载荷试验发现,当静载压力为 3 300 kN 时,各桩沉降量如表 2 所示。

表 2 注浆后各桩静载荷试验沉降量

Table 2 Subsidence of static tests after injection of cement liquid

桩号 Pile code	沉降量/mm Subsidence	桩号 Pile code	沉降量/mm Subsidence
SZ5	4.5	SZ7	4.9
SZ6	4.8	SZ8	9.8

从表 2 可以看出,经高压注浆补强后,各桩沉降量都小于 10 mm,满足设计要求。其中有 3 根桩沉降量小于 5 mm,有 1 根桩沉降量较平均值大,这可能与施工中沉渣清理不彻底有关;总的来看,其检测注浆效果均满足设计要求,采用工程桩桩端高压注浆补强技术减低沉降量是可行的。

5 结 论

1) 依据高压注浆渗流的数学模型,分析了高压注浆机理,推求出注浆时浆体区和原水体区的压力分布,以及停止注浆后井底压力消退情况。

2) 分析了注浆井底压力与粘度的关系以及注浆井底压力与渗透率的关系。

3) 在该理论的指导下,制定的某高压注浆工程施工方案,建立的注浆井底压力和水灰比的经验关系,实践证明其切实可行,效果显著。

4) 当循环成孔混凝土灌注桩桩端持力层为中粗砂层时,采用桩端高压注浆补强技术,对减低桩基沉降量的效果是显著的。

5) 高压注浆除了具有渗入性机理外,还有压密性和劈裂性效果,这些机理还需进一步探讨。当桩端持力层为土层时,高压注浆的适应性也需要实践的检验。

[参考文献]

[1] 张忠苗. 钻孔灌注桩桩底后注浆机理与应用研究[J]. 岩土工程学报, 1999, 1(6): 681 - 686.

- [2] 张忠苗. 软土地基大直径桩受力性状与桩端注浆新技术[M]. 杭州:浙江大学出版社,2001. 23 - 29.
- [3] 丁翠红,顾建文,王心键. 某基坑事故工程桩和基础承台的加固处理[J]. 建筑结构,2004,34(3):21 - 22.
- [4] 陈钟祥,刘慈群. 双重孔隙介质中二相驱替理论[J]. 力学学报,1980,12(2):152 - 165.
- [5] 孔祥言. 高等渗流力学[M]. 北京:中国科学技术大学出版社,1999. 310 - 322.
- [6] 作彦卿. 岩体渗流场与应力场耦合的双重介质模型[J]. 水文地质工程地质,1998,(1):43 - 46.
- [7] Helm D C. Horizontal aquifer movement in a Theis- Theim confined system[J]. Water Resources Research,1994,30:953 - 964.
- [8] Chen C,Pei S,Jiao J. Land subsidence caused by groundwater exploitation in Suzhou City,China[J]. Hydrogeology Journal,2003,11:275 - 287.

Seepage analysis and engineering application of high pressure injection of cement liquid

ZHANG Jian-shan^{1,3}, WU Yan-qing², LI Zhe¹

(1 College of Water Resource and Hydroelectricity, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;

2 College of Environment Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;

3 Institute of Geotechnical Investigation & Design, Xi'an, Shaanxi 710043, China)

Abstract :Based on the mathematic model of the high pressure injection of cement liquid ,the formula of pressure distribution was presented in the district with the cement liquid injection and the raw water area ,and the pressure in well bottom to fade away when stopping injection cement liquid. The correlation between the pressure in well bottom and the time of the injection ,the viscosity of cement liquid ,the permeability in the confined aquifer. The empirical formula of the injection pressure with ratio of water to cement was established. Application of the formula consequently guided the engineering ,and obtained good fulfillment result.

Key words :high pressure injection ; cast-in-situ pile ; seepage model ; injection pressure ; ratio of water of cemen ; engineering application

(上接第 94 页)

Study on the designing of the rainwater harvesting irrigation system

ZHANG Xin-yan , CAI Huan-jie , WANG Jian , CHENG Dong-ling

(College of Water Resource and Architectural Engineering , Northwest A & F University , Shaanxi 712100 , China)

Abstract :The design of the rainwater harvesting system for irrigation has been developed. The system includes the analyzing subsystem of the sequential precipitation ,calculating subsystem of harvested rainwater amount ,optimizing subsystem of the runoff storing engineering ,optimizing model subsystem of crop irrigation system and economic model. The application of the system for field crops (wheat ,corn) in North Liquan ,Shaanxi is summarized. The results indicate the system is practical.

Key words :irrigation ; rainwater harvesting ; system designing