

文章编号: 1000-7598-(2005) 12-1972-05

高压注浆渗流数学模型与工程应用

李 哲¹, 仵彦卿², 张建山^{1,3}

(1. 西安理工大学 水利水电学院, 西安 710048; 2. 上海交通大学 环境工程学院, 上海 200240; 3. 机械工业勘察设计研究院, 西安 710043)

摘 要: 依据活塞式驱替注浆渗流的数学模型, 推导出高压注浆过程中浆体区和原水体的压力分布, 以及停止注浆后井底压力消退情况。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关系; 依据理论分析, 并通过现场试验建立了注浆井底压力和水灰比的经验关系, 将结果用于指导灌注桩高压注浆补强工程, 取得了良好的实践效果。

关 键 词: 高压注浆; 渗流; 注浆压力; 水灰比; 工程应用

中图分类号: TV 543

文献标识码: A

Mathematical model of high pressure injection cement liquid and its application

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

(1. College of Water Resources and Hydroelectricity, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. School of Environment Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China; 3. Mechanical Industrial Prospecting Design Research Institute, Xi'an 710043, China)

Abstract: Based on the mathematical model of high pressure injection cement liquid, a formula of pressure distribution is derived in the district with the cement liquid injection and the raw water area, and the pressure in well bottom to fade away as stop injection cement liquid. The pressure in well bottom relation with the time of the injection and the viscosity of cement liquid, and the permeability in the confined aquifer are analyzed. The empirical formula of the injection pressure with the water-cement ratio is established. The formula can consequently guide the engineering; the good fulfillment results are obtained.

Key words: high pressure injection; seepage; injection pressure; water-cement ratio; engineering application

1 引 言

在某些土木工程、水利工程项目建设中, 对地基承载力的要求较高或对沉降量比较敏感, 对此类地基础础现较多的采用钻孔灌注桩, 若钻孔灌注桩的沉渣和泥皮处理不当, 会对灌注桩的承载力和沉降量产生较大的影响^[1,2], 特别是采用正循环成孔工艺的混凝土灌注桩, 有时在同一场地、同一类型的桩, 其承载力相差很大, 在西安有些地区其值相差高达一倍, 给工程设计造成了极大的不便。高压补强技术可有效的解决钻孔灌注桩的沉渣和泥皮问题; 高压补强技术是将有压水泥浆通过压浆管及桩端高压注浆入桩端土体(砂层), 达到固化沉渣、泥皮及加固桩端和桩侧一定范围的土体, 从而达到提高桩基承载力、减少桩基沉降的效果^[2,3]。

高压注浆在工程应用中, 对于浆体区的压力分布, 以及停止注浆后井底压力消退情况等缺少理论指导, 对于水灰比与注浆压力的关系还没有明确的关系式。使得有些工程注浆效果不理想, 甚至注浆失败。本文探讨了高压注浆渗流机理, 以便指导工程实践。

2 高压注浆渗流数学模型

假设一个承压含水层, 有一口注浆井, 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

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial p_1}{\partial r} \right) = \frac{1}{a_1} \frac{\partial p_1}{\partial t} \quad (0 < r \leq r_c, t > 0) \quad (1)$$

收稿日期: 2004-06-16

修改稿收到日期: 2004-08-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 10172071)。

作者简介: 李哲, 女, 1965 年生, 副教授, 博士研究生, 主要从事岩土工程与结构工程研究工作。E-mail: lizhe009@163.com

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial p_2}{\partial r} \right) = \frac{1}{a_2} \frac{\partial p_2}{\partial t} \quad (r_c < r \leq \infty, t > 0) \quad (2)$$

其边界条件为

$$r \frac{\partial p_1}{\partial r} = \frac{Q}{2\pi\lambda_1 h} \quad (r \rightarrow 0, t > 0) \quad (3)$$

$$p_2(r, t) = p_1(r, t) \quad (r = r_c, t > 0) \quad (4)$$

$$\frac{k_1}{\mu_1} \frac{\partial p_1}{\partial r} = \frac{k_2}{\mu_2} \frac{\partial p_2}{\partial r} \quad (r = r_c, t > 0) \quad (5)$$

$$p_2(r, t) = p_0 \quad (r \rightarrow \infty, t > 0) \quad (6)$$

其初时条件为

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

式中 p_0 为初始压力; Q 为注浆流量; h 为注浆区厚度; a_1, a_2 均为导压系数; p 为压力; μ 为流体粘度; 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。

将式(1)、式(2)和定解条件式(3)~(7)作玻耳兹曼变换, 并令

$$u = \frac{r^2}{4a_1 t}, u_c = \frac{r_c^2}{4a_1 t}, M = \frac{k_1/\mu_1}{k_2/\mu_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}, N = \frac{a_1}{a_2} \quad (8)$$

式中 λ 为流度 ($\lambda = k/\mu$); M 为流度比; N 为导压系数比; u, u_c 均为玻耳兹曼变换的无量纲量。

解得 1 区的压力解为^[5]

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

解得 2 区的压力解为^[5]

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

当不考虑液体的可压缩性, 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

$$r_c = \sqrt{Qt/\pi h \phi} \quad (12)$$

3 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, 根据勘察报告, 其注浆地质参数为: $k = 0.000\,023\text{ m}^2$, $h = 2.5\text{ m}$, $a_1 = 0.28$, $\phi = 0.3$; 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 ($\mu_2 = 1\text{ MPa}\cdot\text{s}$) $r = 1.2\text{ m}$ 处压力与时间的关系, 如图 1、图 2 所示。

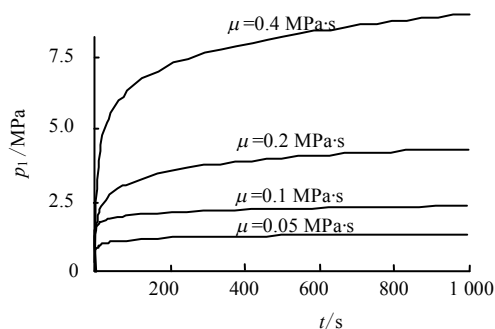


图 1 1#区压力和时间关系

Fig.1 p_1 versus t in district #1

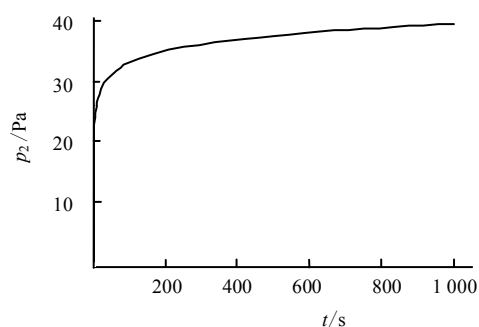


图 2 2#区压力和时间关系

Fig.2 p_2 versus t in district #2

从图 1、图 2 可看出, 随着注浆时间的延长, 注浆压力增加, 在初始段, 压力增加较快, 当注浆时间达 200 s 以后, 随着注浆时间的延长, 注浆压力增加渐缓, 压力逐渐趋向稳定。同时从图 1 可看出, 注浆体粘度的增加, 注浆压力也增加; 从图 1 和图 2 的比较看, 1 区注浆压力较大, 一般达到 1~7 MPa, 而原区压力值比注浆区压力值小得多。

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的关系, 如图 3、图 4 所示。

从图 3 可看出, 注浆压力随着计算点至注浆孔距离的延长, 压力急剧下降; 在两个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。

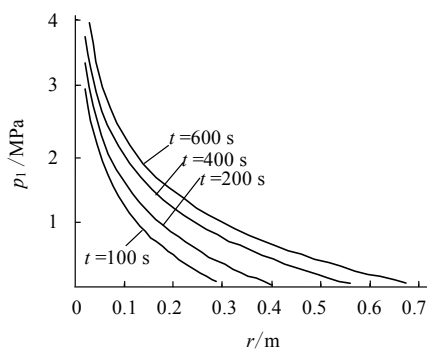


图3 1#区压力与计算点至井的距离关系
Fig.3 p_1 versus r in district #1

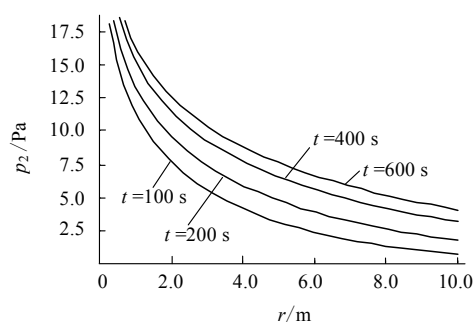


图4 2#区压力与计算点至井的距离关系
Fig.4 p_2 versus r in district #2

同时,根据式(12)和图3可看出,随着时间的延长,两个区域的动界面 r_c 增大;从图4可看出,原区压力随着计算点至注浆孔的距离的延长,压力也逐渐降低,但其斜率比注浆区缓慢的多。

据式(9)可绘制出注浆井底压力与粘度的关系图,如图5所示。

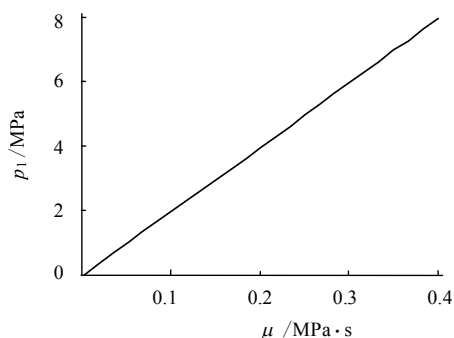


图5 注浆井底压力与粘度的关系
Fig.5 p_1 versus μ in District #1

从图可看出,注浆井底压力与粘度基本为正比关系,并且增加很快;因此,可以用增加注浆液的粘度来增加或降低注浆压力,即调整水泥浆的配合比增加或降低注浆压力。

据式(9)可绘制出注浆井底压力与渗透率的关系,如图6所示。

从图可看出,注浆井底压力与渗透率为反比关系,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,对不同的渗透性注浆地层,应调整不同的水泥浆的配合比,来满足注浆压力的要求。

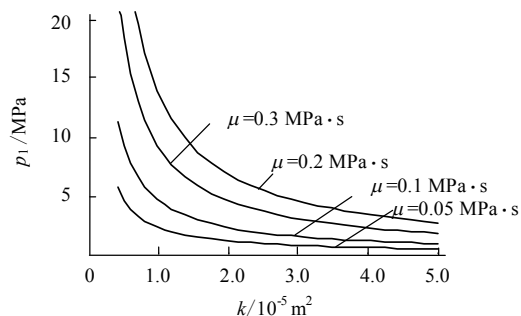


图6 注浆井底压力与渗透率的关系
Fig.6 p_1 versus k in District #1

4 压力衰减计算与分析

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 ,界面半径为 r_c ,考虑液体的压缩性,不考虑液体的重力和毛管力,停注后可看成同一位置的两井,其中一井注浆,另一井抽浆,即用叠加原理^[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:

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

则注浆井的压力同式(9),抽浆井的压力为

$$\Delta p_1(r, \Delta t) = \frac{Q\mu_1}{4\pi k_1 h} [-Ei(-\Delta u) + Ei(-\Delta u_c)]$$

$$\frac{QM}{4\pi\lambda_1 h} Ei(-\Delta u_c N) \text{Exp}(-\Delta u_c(1-N)) \quad (14)$$

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 $t_d = 600$ s, $r = 0.02$ m,其它参数同前;据式(15)可绘制出停止注浆后井底压力衰减曲线如图7所示;从图可看出,停止注浆后井底压力急剧衰减;因此,对于注浆区地层埋藏较浅的地层,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满足设计要求。

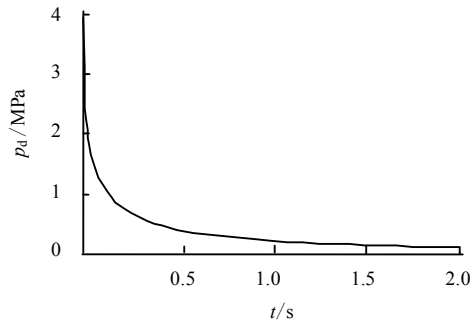


图 7 停止注浆井底压力衰减曲线

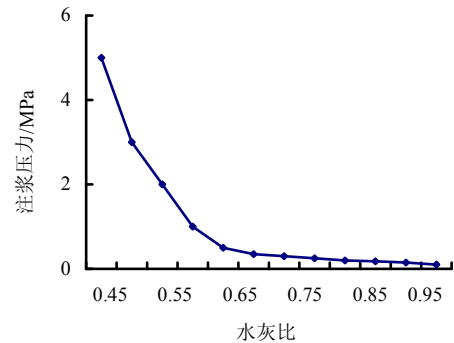
Fig.7 p_d versus t when stoping injection cement liquid

图 8 注浆压力与水灰比的关系图

Fig.8 Injecting pressure versus comparison the water with cement

5 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 $\phi 800 \sim 1\,000$ mm,桩长 13 m,经静载荷试验当极限承载力为 3 300 kN 时,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表

Table 1 Subsidence of static tests before injection cement liquid

桩号	SZ1	SZ2	SZ3	SZ4
沉降量/mm	25	26	30	40

由于该建筑结构对沉降较为敏感,设计要求采用桩端注浆后沉降量控制在 10 mm 左右。同时因时间原因,业主要求工程桩与试桩同时进行;为确保设计要求,经专家和设计人员研究,工程桩采用高压注浆补强技术减低沉降量;要求桩底注入水泥浆不少于 1 000 kg,注浆压力大于 3 MPa,同时要求注浆时地面产生反浆现象,这 3 个条件需同时满足时才可停止注浆。

根据该岩土工程勘察报告,桩端持力层为中粗砂层,有利于施工采用桩端高压注浆补强技术,施工压浆管采用管径为 $\phi 40$ mm,壁厚为 3.50 mm 的焊接钢管,压浆管连接采用管箍连结,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(其中一根备用),对于未布设注浆管的前试锚桩采用桩侧钻孔补埋注浆管;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。

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,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,试验结果如图 8 所示。

从图中可看出,注浆液水灰比中水量的减少,注浆压力增加,特别是当水灰比减少到 0.65 以后,注浆压力显著提高。试验中发现,当注浆量在 700~800 kg 时,地面开始冒浆。

根据试验结果,为了满足设计要求,注浆采用两次注浆方案,即第 1 次注浆水灰比采用 0.5,注浆压力应在 2.5~3.5 MPa 之间,当出现地面冒浆时,停止注浆;从高压注浆渗流理论分析可知,停止注浆后,井底压力会很快消退,同时为防止水泥浆的凝固,第 2 次注浆应在第 1 次停注后 30 min 内进行,水灰比采用 0.45,注浆压力应在 3~5 MPa 之间,当注浆量大于 1 000 kg 时,地面再次冒浆时停止注浆。

采用该方案,对该工程 399 根工程桩进行注浆,第 1 次地面开始冒浆时,注浆量一般在 500~800 kg 之间,注浆压力在 2.0~3.5 MPa 之间;第 2 次注浆压力在 3~6 MPa 之间,个别桩因第 2 次注浆后注浆量满足不了设计要求,采用第 3 次注浆。

该工程桩经过桩端高压注浆补强后,再进行 4 组静载荷试验,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表

Table 2 Subsidence of static tests after injection cement liquid

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

从表可看出,经高压注浆补强后沉降量都小于 10 mm,满足设计要求。其中有 3 根桩沉降量小于 5 mm,有一根桩沉降量比平均值偏大,此可能和桩基成孔采用正循环钻孔工艺泥浆比重控制不当有关;总的来看,其检测注浆效果均满足设计要求。工程桩采用桩端高压注浆补强技术减低沉降量效果显著。

6 结 论

通过理论分析和实例对比,可以得出如下结论:

(1) 依据高压注浆渗流的数学模型,分析高压注浆机理,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,为钻孔灌注桩桩端高压注浆补强技术提供了理论基础。

(3) 在该理论的指导下,制定的高压注浆工程施工方案,经实践证明切实可行,并取得了显著效果;以该工程为例建立的注浆井底压力和水灰比的经验关系对其它高压注浆工程也有一定的指导意义。

参 考 文 献

- [1] 张忠苗, 吴世明, 包凤. 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, 21(6): 681—686.
ZHANG Zhong-miao, WU Shi-ming, BAO Feng. Study of mechanism and application on bored pile and grouting[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1999, 21(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.
- [3] 平扬, 白世伟, 徐燕萍. 深基坑工程渗流-应力耦合分析数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2001, 22(1): 37—39.
- PING Yang, BAI Shi-wei, XU Yan-ping. Numerical simulation of seepage and stress coupling analysis in deep foundation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2001, 22(1): 37—39.
- [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.
CHEN Zhong-xiang, LIU Ci-qun. Theory of fluid displacement in a medium with double-porosity[J]. **ACTA Mechanica Sinica**, 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.
- [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, 25(1): 43—46.
WU Yan-qing. Double porosity media models of coupled groundwater flow and stresses in fractured rock mass[J]. **Journal of Hydrogeology and Engineering Geology**, 1998, 25(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.

第五届断裂与损伤力学国际会议将于 2006 年 9 月召开

第五届断裂与损伤力学国际会议(FDM2006)将于 2006 年 9 月在哈尔滨召开,此次会议由哈尔滨滨滨工程大学承办。历届此会议均得到许多国家断裂与损伤力学领域专家的支持,现已成为国际上在该领域最具权威的学术论坛。本次会议将邀请该领域的国际和国内的顶尖学者参加,组织科技专题并开展讨论,以推动国际协作,了解该领域的最新动态,促进各相关技术领域的发展。本次会议所有通过审核的论文都将在 **Engineering Fracture Mechanics and Key Engineering Materials** 出版,并可以 SCI 检索,现在论文摘要正在征集中,请有关人员积极参与,详细信息请参看会议网主页: <http://conference-heu.com/fdm2006/index.asp>

重要日期: 2005 年 12 月 1 日: 论文摘要接收截止日期; 2006 年 1 月 15 日: 论文摘要录取通知; 2006 年 3 月 30 日: 论文全文接收截止日期

哈尔滨工程大学 FDM2006 国际会议办公室
2005 年 10 月 28 日