

DOI: 10.16285/j.rsm.2016.2428

基于脉动注浆的宾汉流体渗透扩散机制研究

张 聪¹, 梁经纬², 张 箭³, 阳军生¹, 张贵金⁴, 叶新田¹

(1. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075; 2. 湖南省水利水电科学研究院, 湖南 长沙 410007;
3. 河海大学 土木与交通学院, 江苏 南京 210098; 4. 长沙理工大学 水利学院, 湖南 长沙 410114)

摘 要: 脉动注浆虽已在注浆防添加固工程中得到推广应用, 但浆液在脉动压力下的渗透扩散机制却鲜有报道, 导致理论远滞后于工程实践。以宾汉流体的流变方程、渗流方程及颗粒沉积理论为基础, 推导了脉动压力下宾汉流体的渗透扩散理论计算公式, 分析了脉动注浆参数对浆液扩散距离的影响, 并通过室内注浆模拟试验对其进行了验证。结果表明, 脉动压力下宾汉流体渗透注浆扩散理论计算值与试验实测值间存在一定误差, 但能满足工程要求, 可用于指导工程施工。随着脉动注浆连续时间的增长或地层初始孔隙率的增大, 浆液扩散距离随之增大, 而随着脉动注浆间隔时间的增长或地层初始孔隙率的减小, 浆液扩散距离随之减小, 实际注浆工程中为确保有效的浆液扩散距离, 宜根据岩土体孔隙率合理地调节脉动连续时间和脉动间隔时间。研究成果可为脉动注浆理论研究提供借鉴, 为实际施工提供理论指导。

关 键 词: 脉动注浆; 宾汉流体; 渗透扩散; 室内试验

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2018)08-2740-08

Mechanism of Bingham fluid permeation and diffusion based on pulse injection

ZHANG Cong¹, LIANG Jing-wei², ZHANG Jian³, YANG Jun-sheng¹, ZHANG Gui-jin⁴, YE Xin-tian¹

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410075, China;

2. Hunan Water Resources and Hydropower Research Institute, Changsha, Hunan 410007, China;

3. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China;

4. School of Hydraulic Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha, Hunan 410114, China)

Abstract: Pulsating grouting has been widely used in seepage prevention and reinforcement grouting and engineering, but the mechanism of infiltration grouting is not clear, which impairs theory development and current theory could not guide engineering practice. Based on the Bingham fluid rheological equation, the seepage equation, and the particle deposition theory, the infiltration grouting theory of Bingham fluid under pulsating pressure is deduced. Also, the effect of pulsating grouting parameters on slurry diffusion range is analyzed, and it is verified by the self-made indoor experimental device. The results show that there is an error between the calculated value based on the theory and the value measured in the test, but it can meet engineering requirements and can be used to guide project construction. The slurry diffusion range increases with the increase of grouting time and the initial porosity of the formation, and the slurry diffusion range decreases with the increase of grouting interval time and the decrease of the initial porosity of the formation. Therefore, it is necessary to adjust pulsation grouting parameters according to initial porosity of the formation to ensure the effective slurry diffusion range in grouting engineering. The research results can provide references for the study of theory and guidance for practical construction.

Keywords: pulse grouting; Bingham fluid; penetration diffusion; laboratory test

1 引 言

注浆作为一种非常有效的加固防渗施工技术, 已广泛应用于建筑物地基的加固和沉降防治, 大坝

和堤防防渗帷幕的形成, 垃圾填埋场、核废弃料处理等工程领域。随着注浆工程应用的不断扩大, 新型注浆工艺和注浆材料也不断出现。目前, 依据给压方式大致可将注浆分为稳压注浆、脉动注浆以及

收稿日期: 2016-10-17

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 51279019); 中南大学中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (No. 2016zzts075)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51279019) and the Special Fund of Fundamental Research Funds for the Central Universities for Central South University (2016zzts075).

第一作者简介: 张聪, 男, 1988 年生, 博士研究生, 主要从事基础处理等方面的科研工作。E-mail: zc8023cl@163.com

通讯作者: 张箭, 男, 1989 年生, 博士后, 主要从事隧道工程等方面的科研工作。E-mail: zhangj0507@163.com

间歇注浆，而依据浆液流变性能则主要包括牛顿流体、宾汉流体、幂律流体等 3 类，由于不同的给压方式和不同流型的浆液在岩土体中的扩散存在较大差异。因此，探明不同给压方式和浆液流型下浆液的扩散机制是工程师们普遍关注的问题。

现阶段，相对较成熟的是稳压注浆下浆液的渗透扩散机制。如：牛顿流体渗透扩散理论^[1-2]、宾汉流体渗透扩散理论^[3-7]、幂律流体浆液渗透扩散理论^[8-10]等。但遗憾的是上述公式仅适用于压力连续性的稳压渗透注浆，对于压力非连续性的脉动渗透注浆并不适用。稳压渗透注浆时，注浆压力一直连续，浆液会在压力作用下持续扩散，而脉动渗透注浆时，注浆压力存在压力连续和压力间隔两种阶段，使得浆液在压力连续段扩散和压力间隔段絮凝沉积。

本文考虑浆液在脉动压力下存在压力连续段扩散和压力间隔段絮凝沉积两种状态，基于宾汉体流变方程、渗流方程以及颗粒沉积理论，开展脉动压力下宾汉体浆液渗透扩散的理论公式推导，以期在现场脉动注浆施工提供理论指导。

2 脉动压力下宾汉流体渗透扩散半径计算公式

2.1 脉动压力下浆液渗透扩散模型的提出

脉动注浆主要是依靠脉动泵内两个互相独立的大功率油缸以一定频率带动活塞进行重复的往返运动，活塞运动的同时挤压缸内浆液以同样的频率注入地层，实现一定频率的间隔性注浆。当处在脉动连续段，浆液流量一定，而处在脉动间隔段，则浆液流量为 0，具体过程见图 1。

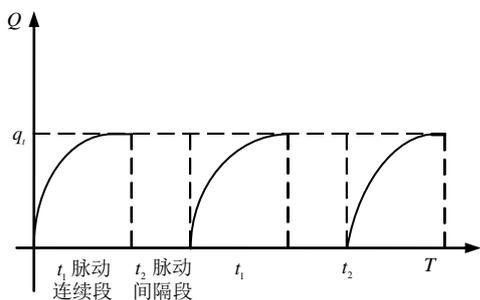


图 1 脉动压力过程
Fig.1 Pulse pressure process

由图可以看出，在脉动连续段 (t_1 段)，浆液在注浆压力的作用下以一定的速率扩散，其过程与稳压注浆一致；而在脉动间隔段 (t_2 段)，由于压力的不连续性，浆液扩散速率突然中断或瞬间减小，受此影响，浆液内颗粒将在岩土体孔隙内絮凝沉积，

堵塞岩土体内孔裂隙，导致地层孔隙率的减小。当注浆进入第 2 个脉动注浆段，由于第 1 个脉动注浆段使岩土体孔隙率减小，为保证注浆段内流量一定，注浆压力得到提高，随着上述过程反复的进行，直至注浆压力提高至注浆设计压力时，注浆结束。

经上述脉动注浆浆液渗透扩散过程的分析，提出如下假设：①被注岩土体为均质、各向同性的多孔介质；②浆液在注入过程中一直为宾汉体，且呈球形扩散；③采用填压法注浆，浆液在整个过程满足层流运动；④注浆过程中浆液可注性受浆液性质和地层环境影响会发生复杂变化，故理论推导忽略注浆过程中浆液可注性带来的影响；⑤浆液在脉动间隔段颗粒渗流速度恒定，絮凝沉积时颗粒均匀分布在岩土体内。

脉动压力下宾汉体的渗流扩散模型见图 2，且图 2 中各项满足如下关系：

$$\left. \begin{aligned} \text{注浆开始时段: } p = p_0, r = r_0 \\ \text{扩散 } t = t_1 \text{ 时刻: } p = p_1, r = r_1 \\ \text{扩散 } t = t_2 \text{ 时刻: } p = p_2, r = r_2 \\ \text{注浆结束时刻: } p = p', r = r_n \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中： p_0 为注浆压力； r_0 为注浆管的半径； r_1 、 p_1 分别为经过时间 t_1 后浆液的扩散距离和注浆压力； r_2 、 p_2 分别为经过时间 t_2 后浆液的沉积范围和注浆压力； r_n 、 p' 分别为经过 n 次脉动后浆液的最终扩散距离和注浆设计压力。

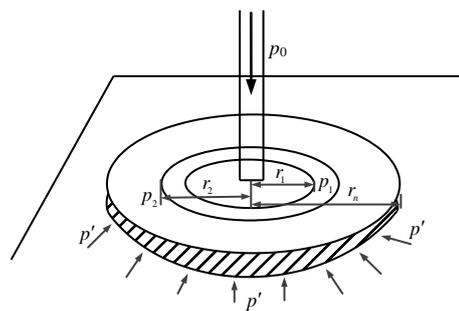


图 2 脉动压力下宾汉流体的渗流扩散模型
Fig.2 Diffusion model of seepage Bingham body under pulse pressure

2.2 脉动连续段宾汉流体渗透扩散公式推导

由 2.1 节可知，脉动连续段宾汉流体渗透扩散与稳压注浆一致，而根据文献[3]可知，若地层孔隙率为 ϕ ，则稳压注浆下宾汉流体渗透扩散模型方程为

$$\Delta p = \frac{\phi\beta}{3tKr_0} r^3 - \frac{\phi\beta}{3tK} r^2 + \frac{4}{3} \lambda r - \frac{4}{3} \lambda r_0 \quad (2)$$

令地层初始孔隙率为 ϕ_0 ，当浆液处于脉动连续段时，满足 $\Delta p = p_1 - p_0$ 、 $t = t_1$ 以及 $r = r_1$ ，则可得到脉动连续段宾汉流体渗透扩散半径关系式：

$$\left. \begin{aligned} \Delta p = p_1 - p_0 &= \frac{\phi_0 \beta}{3t_1 K r_0} r_1^3 - \frac{\phi_0 \beta}{3t_1 K} r_1^2 + \frac{4}{3} \lambda r_1 - \frac{4}{3} \lambda r_0 \\ K &= \frac{\phi_0 r'^2}{8\eta}; \beta = \frac{\eta_p}{\eta}; \lambda = \frac{2\tau_s}{r'} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中： τ_s 为屈服应力； r' 为圆管半径； η 、 η_p 分别为水的黏度和浆液黏度，两者比值为 β ； K 为地层渗透系数； λ 为启动压力梯度。

2.3 脉动间隔段宾汉流体絮凝沉积公式推导

待注浆进入脉动间隔段，颗粒受水动力条件的影响产生絮凝沉积。在此过程中，假设颗粒渗流速度为 μ ，体积浓度为 c ，在厚度为 $\Delta \varepsilon$ ，面积为 Δs 的微元体内沉积，则颗粒沉积体积 Δv 和随浆液运动的颗粒体积 $\Delta v'$ 为

$$\Delta v = \Delta s \delta \cdot \Delta \varepsilon, \Delta v' = \Delta s \phi c \cdot \Delta \varepsilon \quad (4)$$

式中： δ 为单位体积内岩土体内滞留的颗粒体积。

由于颗粒沉积滞留，受颗粒和水的影响，岩土体孔隙率变化可表示为

$$\phi = \phi_0 - \theta \delta \quad (5)$$

式中： θ 为水引起的膨胀系数。

进一步对微元体内颗粒的积累速率进行分析可知，颗粒积累速率 = 流入颗粒质量 - 流出颗粒的质量，令 $\Delta s \mu c$ 为单位时间内流入岩土体内的颗粒体积，则有

$$\frac{\partial [\Delta s (\delta + \phi)]}{\partial t} + \frac{\partial \left[\Delta s \mu c - \Delta s D \frac{\partial c}{\partial \varepsilon} \right]}{\partial \varepsilon} = 0 \quad (6)$$

式中： $-D \frac{\partial c}{\partial \varepsilon}$ 为颗粒的扩散通量。

依据 2.1 节中假设条件 (5)，则式 (6) 可转化为

$$\frac{\partial}{\partial t} (\delta + \phi) + \mu \frac{\partial c}{\partial \varepsilon} - D \frac{\partial^2 c}{\partial \varepsilon^2} = 0 \quad (7)$$

考虑实际注浆工程，浆液颗粒粒径一般大于 $1 \mu\text{m}$ ，故可忽略颗粒扩散，式 (7) 可转化为

$$\frac{\partial}{\partial t} (\delta + \phi) + \mu \frac{\partial c}{\partial \varepsilon} = 0 \quad (8)$$

在脉动间隔段内，颗粒沉积体积由 $\Delta s \delta \Delta \varepsilon$ 增至 $\Delta s \left(\delta + \frac{\partial \delta}{\partial t} \Delta t \right) \Delta t$ ，而该时段流入微元体内的颗粒体

积为 $\Delta s \mu c \Delta t$ ，则可定义微元体内颗粒沉积的概率 α 为

$$\alpha = \frac{\Delta s \frac{\partial \delta}{\partial t} \Delta t \Delta \varepsilon}{\Delta s \mu c \Delta t} = \frac{\Delta \varepsilon}{\mu c} \frac{\partial \delta}{\partial t} \quad (9)$$

根据 Dupuit、Forchheimer 关系式^[11]可知，颗粒在微元体内的实际流动速度 v' 和通过单位距离所需时间 t 为

$$\left. \begin{aligned} v' &= \frac{\mu}{\phi} \\ t &= \frac{\phi}{\mu} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

则单位距离、单位时间内的沉积概率 α' 为

$$\alpha' = \frac{1}{t} \frac{\partial \delta}{\partial t} = \frac{1}{\mu c} \frac{\partial \delta}{\partial t} \mu = \frac{1}{c \phi} \frac{\partial \delta}{\partial t} \quad (11)$$

而现有研究表明^[12]，沉积概率与浆液浓度无关，则式 (11) 分离变量并积分可得

$$\delta = \alpha' c \phi t_2 \quad (12)$$

在脉动注浆间隔段，颗粒的沉积是从浆液突然进入 t_2 时刻，由外向内发展，则浆液分离的位置距出浆口距离 l 为

$$l = \frac{\sigma}{\Delta s} = \frac{\alpha' c \phi t_2}{\pi r_0^2} = \frac{k c t_2}{\pi r_0^2} \quad (13)$$

式中： $k = \alpha' \phi$ 为沉积系数。

2.4 脉动压力下宾汉体有效渗透扩散半径

待注浆进入第 2 次脉动时，则浆液第 2 次脉动的出浆口位置为 l 处，则出浆口半径 r'_0 为

$$r'_0 = \frac{k c t_2}{\pi r_1^2} \quad (14)$$

此时岩土体的孔隙率为

$$\phi_1 = \phi_0 - \theta \delta = \phi_0 - \theta k c t_2 \quad (15)$$

将式 (14)、(15) 代入式 (3) 即可求得第 2 次脉动时注浆压力与浆液扩散距离关系为

$$\Delta p = \frac{(\phi_0 - \theta k c t_2) \beta}{3t_1 K r'_0} r_2^3 - \frac{(\phi_0 - \theta k c t_2) \beta}{3t_1 K} r_2^2 + \frac{4}{3} \lambda r_2 - \frac{4}{3} \lambda r'_0 \quad (16)$$

当经过 n 次脉动后，则有

$$\Delta p = \frac{[\phi_0 - (n-1)\theta k c t_2] \beta}{3t_1 K \frac{k c t_2}{\pi r_1^2}} r_n^3 - \frac{[\phi_0 - (n-1)\theta k c t_2] \beta}{3t_1 K} \cdot \left[r_n^2 + \frac{4}{3} \lambda r_n - \frac{4}{3} \lambda \left[(n-1) \frac{k c t_2}{\pi r_1^2} \right] \right] \quad (17)$$

式 (17) 即为脉动压力下宾汉流体的渗透扩散半径计算公式。

3 公式中参数的确定方法及适用范围

3.1 公式中各参数的求解方法

式 (3)、(17) 中注浆管半径 r_0 通常为几厘米, 可结合现场施工获取; K 直接经压水试验测得; λ 工程上一般取 $2.1 \times 10^{-4} \text{ mL/}^\circ\text{C}$; 沉积系数 k 为恒定值, 工程上一般假设其在时间和空间上都是不变的; 依据现场施工经验, t_1 一般取 $4 \sim 8 \text{ s}$, t_2 取 $3 \sim 6 \text{ s}$; 岩土体初始孔隙度可依据 $\phi_0 = 1 - \gamma / [\gamma_s (1 + \omega)]$ 求得, γ 为岩土体的天然重度, γ_s 为土粒重度, ω 为岩土体的含水率; β 的取值可先采用流变仪测得浆液黏度, 在通过查询不同温度下的水的黏度, 代入式 (3) 即可求取。

3.2 公式适用范围

由 2.1 节假设条件③可知, 式 (17) 仅适用于宾汉流体为层流的状态, 而根据文献[13–14], 宾汉流体的层流或紊流状态可采用雷诺数 Re 来确定。当 $Re < 2\ 000$ 时, 宾汉流体表现为层流态, 当 $Re > 4\ 000$ 时, 宾汉流体为紊流状态, 当 $2\ 000 < Re < 4\ 000$ 时, 宾汉流体是紊流与层流与的混合流状态。而 Re 可表示为

$$Re = \bar{v}d/\eta \quad (18)$$

式中: \bar{v} 为牛顿流体在介质中运动的平均速度; d 为流体运动范围尺寸。

另根据文献[15]可知, 当注浆压力大于某一极限压力 p_μ 时, 浆液扩散将会由渗透注浆方式转化为劈裂注浆方式。故本文推导的脉动压力下宾汉流体的渗透扩散半径计算公式应满足: $\Delta p < p_\mu$ 。其中, p_μ 的表达式为

$$p_\mu = \sigma + 2K_0\gamma H(1 - \nu) \quad (19)$$

式中: σ 为岩土体的抗压强度; H 为注浆孔深度; K_0 为静止侧压力系数; ν 为岩土体泊松比。

4 验证试验

为了验证本文推导的扩散理论公式, 研制了一套脉动注浆模拟试验装置, 开展了室内脉动注浆渗透试验, 并结合试验探讨了脉动注浆参数对扩散半径的影响。

4.1 试验装置

试验装置由供压系统、储浆系统、受注体容器、地层控制系统和监控量测系统 5 部分组成。其中, 供压系统主要是利用减压器可控的特点, 将气

压源内的气压以预设的频率输出, 形成脉动与稳压两种不同的灌浆压力; 储浆系统主要由储浆罐及其联接装置组成, 储浆罐有效容积 30 L , 设计压力 5 MPa , 其作用是将供压系统产生的压力在储浆罐内转化为注浆压力, 并将浆液注入地层; 受注体容器用于装载受注体介质, 由厚 15 mm 的普通钢, 弯转成内径为 1 m 的圆筒型容器; 地层控制系统主要是用于调节地层孔隙率, 采用 $130 \text{ cm} \times 62 \text{ cm}$ 的气囊包裹受注体, 通过调节气囊内气压大小来控制地层孔隙率大小; 监控量测系统包括摄像机、照相机、皮尺等, 用于监测和记录试验过程及数据, 如图 3、4 所示。

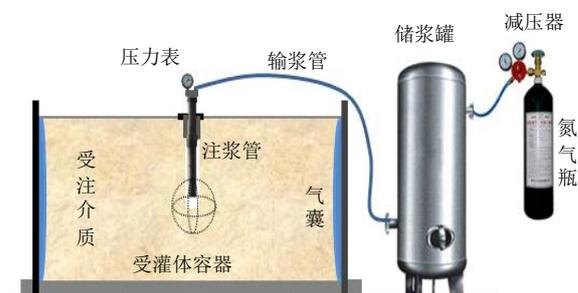


图 3 注浆模拟试验装置示意图

Fig.3 Schematic of grouting simulation test device



图 4 注浆模拟试验装置

Fig.4 Grouting experimental device

4.2 受注介质与注浆材料

选取均质的砂砾石(土)混合物为受注体介质, 设置受注体介质相对密度为 1.98 , 渗透系数为 3.03 cm/s , 含水率为 10% , 孔隙度为 41% , 并尽量保证该混合物均质和各向同性。

注浆材料采用自制的黏土水泥固化浆液。其中, 黏土原浆相对密度为 1.25 , 水泥为 $42.5\#$ 普通硅酸盐水泥, 添加剂 2% , 配置浆液的水温控制在 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ (该温度下, 水的黏度为 $1.01 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$), 水固比为 $1:1$ 。经测试雷诺系数为 2.78 , 小于 $2\ 000$ 。采用流变仪对其进行测试, 为典型的宾汉体, 具体流变参数测试结果见图 5。

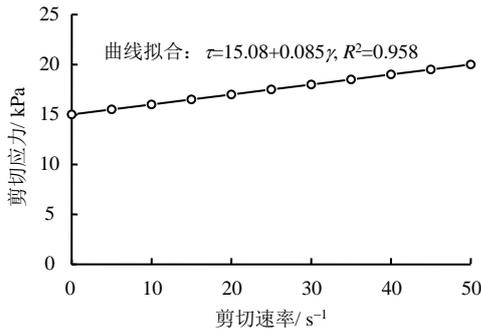


图 5 浆液流变曲线
Fig.5 Rheological curve of slurry

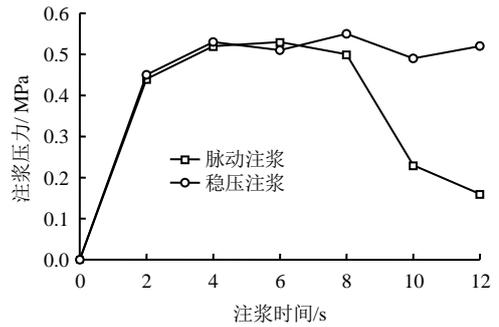


图 6 注浆压力变化过程
Fig.6 Change process of grouting pressure

4.3 试验设计

分别采用稳压注浆和脉动注浆进行 3 次重复对比试验，主要试验步骤如下：

(1) 检查各组件气密性，按图 4 所示连接好试验装置，并按级配要求装载好受注介质，安装好注浆管（内径 4 cm），调节气囊压力至设计压力值。

(2) 将配制好的浆液倒入储浆罐内，闭合储浆罐，打开氮气瓶，调节减压器至注浆设计压力（见表 1）。若为稳压注浆则在设定压力值下持续注入 10 min 后停止注浆；若为脉动注浆则通过调节减压器上的启闭开关，按表 1 所设脉动频率脉动 50 次后停止注浆，试验过程中记录注浆管孔口压力值和观察受注介质地表情况。

(3) 待注浆结束后，关闭氮气瓶，拆卸管路并清洗。浆液凝固后，进行开挖量测，记录浆液扩散距离，浆脉厚度以及结石体扩散形态等，取 3 次试验测试平均值为最终测试结果。

表 1 注浆试验设计参数

Table 1 Design parameters of grouting experiments

注浆方式	水固比	注浆压力 / MPa	注浆时间
稳压注浆	1:1	0.5	10 min
脉动注浆	1:1	0.5	$t_1 = 8\text{ s}, t_2 = 5\text{ s}$, 脉动 50 次

4.4 试验结果及分析

(1) 注浆压力的分析

将注浆过程中记录的孔口注浆压力进行整理分析，如图 6 所示。

由图可知，在注浆初期，脉动注浆和稳压注浆两者注浆压力均随着注浆时间的增长而增大，当注浆压力增大至设计压力值后，稳压注浆压力在设计压力值附近波动，脉动注浆压力受间歇阶段的影响呈下降趋势。

(2) 注浆浆液扩散形态分析

对注浆后的受注体进行开挖量测，脉动注浆孔周边浆液扩散形态和注浆孔孔端球形结石体形态见图 7、8。

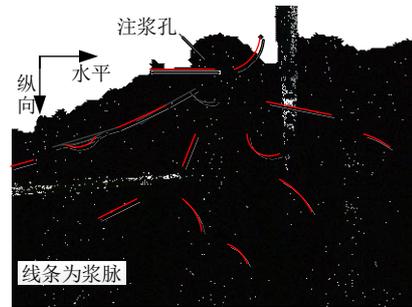


图 7 注浆孔周边浆脉扩散
Fig.7 Slurry pulse diffusion surrounding grouting hole

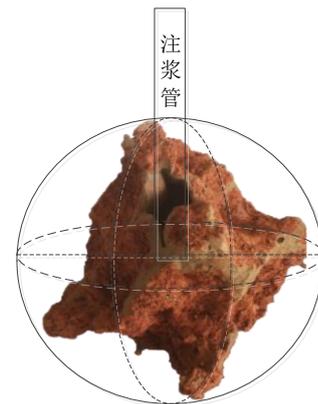


图 8 注浆孔孔端球形结石体
Fig.8 Spherical stone body with grouting hole

由图 7、8 可知，脉动注浆下浆液以注浆孔底为中心呈球状向四周土体扩散，最终形成球状形态的结石体。

(3) 浆脉扩散范围和厚度对比分析

对比同一水平面高度上的脉动和稳压注浆浆液扩散距离与浆脉厚度如图 9、10 所示，并将测试

结果与理论计算值进行对比，脉动注浆理论计算时采用式 (17)，稳压注浆理论计算采用式 (3)，计算结果见表 2。

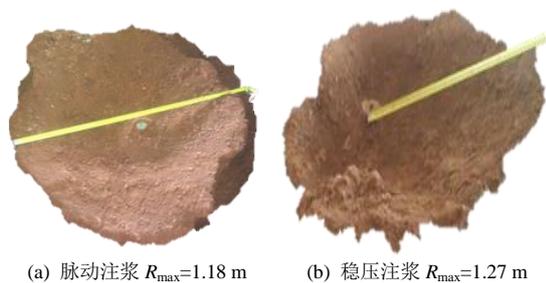


图 9 脉动与稳压注浆下浆液水平面扩散距离
Fig.9 Distance of slurry diffusion under fluctuating and constant pressure

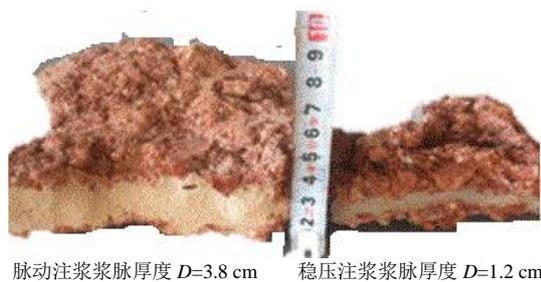


图 10 浆脉厚度对比
Fig.10 Comparison of pulp thickness under fluctuating and constant pressure

表 2 注浆理论值与试验测试值分析

Table 2 Analysis of grouting theory values and test values

试验名称	理论计算 /m	实际测量 /m	差值分析 /%
稳压注浆	1.34	1.27	5.2
脉动注浆	1.23	1.18	4.0

由表 2 可知，推导的理论计算值较试验实测值大，但差值在可接受范围内，表明本文推导的脉动压力下宾汉体浆液渗透扩散半径计算公式可行，能为实际注浆施工提供理论指导。分析理论值偏大的原因，主要为：①本文在进行理论推导时未考虑宾汉流体的浆液时变性和注浆压滤效应，未考虑注浆过程中浆液可注性变化带来的影响等；②理论推导所用压力为注浆孔底压力而试验注浆压力为注浆管孔口压力；③在进行注浆模式试验时，很难达到本文所述的受注体均质和各向同性的要求，且注浆过程浆液扩散受影响因素太多，如浆液搅拌、温度等。

另外，由表 2 及图 9、10 可知，脉动注浆浆液扩散距离较稳压注浆扩散距离小，且脉动注浆下浆脉厚度要明显大于稳压注浆下浆脉厚度，上述规律与本文阐述的脉动扩散机制一致，即在不连续的压

力作用下，浆液重复进行脉动连续段扩散和脉动间隔段沉积两个过程，而颗粒的沉积与浆液扩散的多次叠加，必然导致脉动注浆扩散距离相对较小，浆脉相对较厚，注浆效果更佳。

5 脉动注浆参数影响分析

由式 (17) 可知，脉动注浆参数和地层特性是影响浆液扩散半径的主要因素。因此，本文着重就浆液在不同脉动控制参数和不同初始孔隙度岩土体内的扩散规律进行定量分析。结合现场施工经验，提出如下假设：注浆管半径 $r_0 = 0.04$ m，颗粒体积浓度 $c = 0.43$ ， $\lambda = 2.1 \times 10^{-4}$ mL/°C，沉积系数 k 取 0.002，脉动连续时间 $t_1 = 3 \sim 8$ s，脉动间隔时间 $t_2 = 1 \sim 6$ s， $n = 20$ 次，地层渗透系数 $K = 0.0001$ m/s，注浆压力差 $\Delta P = 0.3$ MPa，数值计算结果见图 11、12。

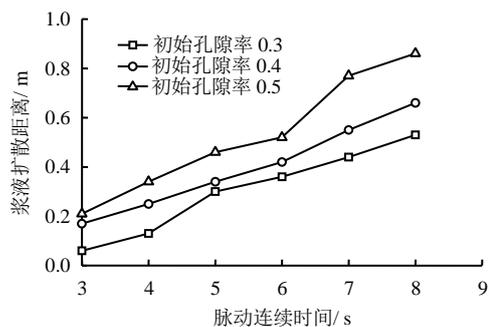


图 11 脉动注浆连续时间对不同初始孔隙度的岩土体加固范围影响规律 (脉动间隔时间 4 s)
Fig.11 Effect of pulse duration on the reinforcement of rock and soil with different initial porosities (pulse interval 4 s)

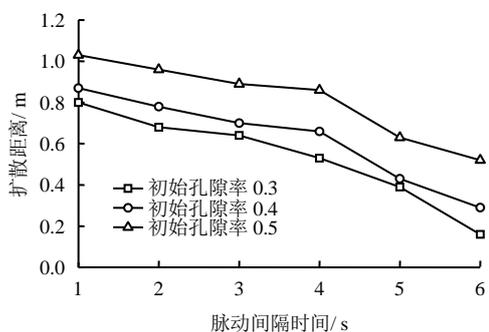


图 12 脉动注浆间隔时间对不同初始孔隙度的岩土体加固范围影响规律 (脉动连续时间 8 s)
Fig.12 Effect of pulse interval time on the reinforcement of rock and soil with different initial porosities (pulse duration 8 s)

由图 11、12 可知，浆液扩散半径受脉动参数和地层初始孔隙率影响明显。随着脉动注浆连续时间

的增长或地层初始孔隙率的增大,浆液扩散距离随之增大,而随着脉动注浆间隔时间的增长或地层孔隙率的减小,浆液扩散距离随之减小。因此,实际注浆工程中为确保有效的浆液扩散距离,宜根据岩土体孔隙率合理地调节脉动连续时间和脉动间隔时间。

6 结 论

(1) 在分析了脉动压力下浆液渗透扩散过程的基础上,建立了脉动压力下宾汉流体的渗透扩散模型,基于宾汉流体流变方程、渗流方程以及颗粒沉积理论,推导了脉动压力下宾汉流体的渗透扩散计算公式,并给出了公式中各参数的求解方法和适用范围。

(2) 通过室内注浆模拟试验对推导的浆液扩散计算公式进行了验证。结果表明,脉动压力下宾汉体渗透注浆扩散理论计算值与试验实测值间存在一定的差异,但在可接受误差范围内,能满足工程要求,可用于指导工程施工。

(3) 采用数值计算方法,定量分析了脉动注浆参数对宾汉浆液渗透扩散距离的影响。结果表明,浆液扩散距离受脉动注浆参数和地层初始孔隙率的影响明显。浆液扩散距离随脉动注浆连续时间的增长或地层初始孔隙率的增大而增大,随着脉动注浆间隔时间的增长或地层初始孔隙率的减小而减小。实际注浆工程中为确保有效的浆液扩散距离,宜根据岩土体孔隙率合理地调节脉动连续时间和脉动间隔时间。

参 考 文 献

- [1] 杨志全,侯克鹏,梁维,等. 牛顿流体柱-半球面渗透注浆形式扩散参数的研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(增刊2): 17-24.
YANG Zhi-quan, HOU Ke-peng, LIANG Wei, et al. Study of diffusion parameters of Newtonian fluid based on column-hemispherical penetration grouting[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(Supp.2): 17-24.
- [2] 汪磊,李涛. 基于牛顿流体的海底隧道穿越裂隙岩体注浆扩散半径计算[J]. 土工基础, 2012, 26(5): 51-53.
WANG Lei, LI Tao. Application of Newton fluid theory to estimate effective radius of grout zone for tunneling through fractured rock under sea[J]. **Soil Engineering and Foundation**, 2012, 26(5): 51-53.
- [3] 杨秀竹,王星华,雷金山. 宾汉体浆液扩散半径的研究及应用[J]. 水利学报, 2004, 35(6): 75-79.
YANG Xiu-zhu, WANG Xing-hua, LEI Jin-shan. Study on grouting diffusion radius of Bingham fluids[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2004, 35(6): 75-79.
- [4] 杨志全,侯克鹏,郭婷婷,等. 黏度时变性宾汉体浆液的柱-半球形渗透注浆机制研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(9): 2697-2703.
YANG Zhi-quan, HOU Ke-peng, GUO Ting-ting, et al. Study of column-hemispherical penetration grouting mechanism based on Bingham fluid of time-dependent behavior of viscosity[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(9): 2697-2703.
- [5] 王晓玲,王青松,周正印,等. 南水北调工程采空区三维宾汉姆流体紊流模拟[J]. 水利学报, 2013, 44(11): 1295-1302.
WANG Xiao-ling, WANG Qing-song, ZHOU Zheng-yin, et al. Three-dimensional turbulent numerical simulation of Bingham fluid in the goaf grouting of the South-to-North Water Transfer Project[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2013, 44(11): 1295-1302.
- [6] 汪磊,李涛. 基于宾汉流体的海底隧道穿越裂隙岩体注浆扩散半径计算[J]. 铁道标准设计, 2013, (6): 96-100.
WANG Lei, LI Tao. Calculation of grouting diffusion radius for submarine tunnel passing through fractured rock mass based on Bingham fluid[J]. **Railway Standard Design**, 2013, (6): 96-100.
- [7] 杨秀竹,雷金山,夏力农,等. 幂律型浆液扩散半径研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(11): 112-115.
YANG Xiu-zhu, LEI Jin-shan, XIA Li-nong, et al. Study on grouting diffusion radius of exponential fluids[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(11): 112-115.
- [8] 张连震,张庆松,刘人太,等. 考虑浆液黏度时空变化的速凝浆液渗透注浆扩散机制研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(2): 443-452.
ZHANG Lian-zhen, ZHANG Qing-song, LIU Ren-tai, et al. Penetration grouting mechanism of quick setting slurry considering spatiotemporal variation of viscosity[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(2): 443-452.
- [9] 杨志全,牛向东,侯克鹏,等. 幂律型流体柱形渗透注浆机制[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(3): 178-183.
YANG Zhi-quan, NIU Xiang-dong, HOU Ke-peng, et al. Column penetration grouting mechanism researches based on power-law fluid[J]. **Journal of Harbin Institute of Technology**, 2016, 48(3): 178-183.