论文

考虑渗滤效应的水泥浆锋面扩散理论及试验研究

冯啸¹, 李术才¹, 刘人太^{1*}, 韩伟伟^{1,2}, 张世杰¹

1. 山东大学岩土与结构工程研究中心, 济南 250061;

2. 山东科技大学土木工程与建筑学院, 青岛 266590

* E-mail: rentailiu@163.com

收稿日期: 2017-03-18; 接受日期: 2017-07-14; 网络出版日期: 2017-08-21

国家重点基础研究发展计划(编号: 2013CB036001)和国家重点研发计划(编号: 2016YFC0801604)资助项目

摘要 基于渗流连续性方程、Darcy渗流定律、质量守恒方程、线性滤过定律及压力降方程, 建立了水泥浆锋面扩散理论模型, 分析了渗滤效应下水泥颗粒的运移滤出机制和浆液锋面的扩散规律; 应用自主研发的模型试验系统, 研究了水泥浆锋面压力的动态变化规律, 并与理论值进行了对比分析. 结果表明, 在渗滤效应作用下, 沉积层渗透系数沿浆液扩散距离增大; 锋面速度变化率与沉积层渗透系数呈负相关; 特定扩散距离处, 锋面压力降 p' 呈先增后减, 而锋面压力 p 及平均单位压力降 $\Delta P'$ 呈先减后增趋势; 锋面压力理论值与试验值偏差率仅为-10%~26%, 两者吻合度较高. 研究结论可指导注浆设计, 对实际工程具有一定的应用价值.

关键词 渗滤效应, 水泥浆, 锋面, 流速, 压力

1 引言

随着我国经济的飞速发展, 大规模水利水电、公路铁路、深井矿山及城市轨道交通工程相继投入建设, 由于工程面临的地质条件日趋复杂, 以致突水、涌沙、塌方等灾害时有发生, 造成了严重的人员伤亡和经济损失^[1-3]. 其中, 城市轨道交通建设中频繁遭遇第四系富水沙土层, 在地下水渗透作用下沙土层中细小颗粒发生潜蚀、冲刷及管涌, 造成沙土层孔隙扩展演化成贯穿、连续的过水通道, 极大提高了沙土层渗透性^[4,5]. 此外, 伴随着细小颗粒的逐渐流失, 沙土层强度相应降低, 成为了地下工程支护结构变形及周边围岩失稳的诱因^[6,7].

注浆法作为一种相对成熟的止水加固技术, 在各

工程领域得到了广泛的应用, 针对富水沙土层的注浆法可分为低压渗透和高压劈裂挤密. 当采用硅酸盐水泥悬浮液对富水沙土层进行渗透注浆时, 沙土层骨架颗粒对运移扩散中的水泥颗粒产生滤过及吸附作用, 使水泥颗粒发生非均匀滞留沉积, 降低了水泥浆扩散距离并导致固沙体抗渗效果沿程衰减, 此为渗滤效应^[8-11].

目前, 大批学者对悬浮颗粒滤出机制及沙土层注浆进行了深入的理论分析和系统的试验研究. 陈星欣等人^[12]通过室内试验揭示了粒径和渗流速度对悬浮颗粒迁移沉积的耦合机制; 张改玲^[13]研究了化学浆液在半胶结砂岩中的扩散规律、化学注浆固砂体的孔隙结构与渗透性关系; 郭密文^[14]通过沙土层化学注浆试验, 建立了高压环境下浆液扩散的宏观和微观

引用格式: 冯啸, 李术才, 刘人太, 等. 考虑渗滤效应的水泥浆锋面扩散理论及试验研究. 中国科学: 技术科学, 2017, 47: 1198-1206
Feng X, Li S C, Liu R T, et al. Theoretical and experimental research on the grout fronts diffusion considering filtration effect (in Chinese). Sci Sin Tech, 2017, 47: 1198-1206, doi: 10.1360/N092017-00078

概念模型; Bradford等人^[15]采用不可逆的一阶渗滤系数, 提出了多孔介质中悬浮颗粒的吸附和渗滤模型; Bedrikovetsky等人^[16]建立了可计算悬浮颗粒最大滞留浓度的岩石孔隙表面颗粒释放模型; Poruban和Xu^[17]建立了多孔介质中球型颗粒和非球型颗粒的渗滤模型, 得出随着悬浮颗粒在孔隙空间的积累, 渗流速率逐渐减小; Kampa等人^[18]建立了两种不同液体运移引起压力降变化的理论模型; Yoon和El Mohtar^[19]提出了一种可评估化学改性膨润土最大扩散距离的过滤模型。

现有研究多集中于孔隙结构、浆液流速及注浆压力对悬浮颗粒吸附与释放的影响机制, 而关于渗滤效应下水泥浆锋面扩散规律的研究鲜有报道, 因此本文开展了理论模型研究和沙土体渗透注浆试验, 揭示了渗滤效应下水泥颗粒的运移滤出机理及浆液锋面的扩散规律, 研究结论不仅可以促进渗透注浆理论的发展, 而且对土壤-地下水污染修复及石油天然气开发等工程具有较高的应用价值。

2 理论模型建立

2.1 锋面速度模型

水泥悬浮液在沙土层内运移扩散时, 水泥颗粒发生不均匀的滞留沉积。图1为水泥浆二维锋面扩散示意图, 沿程分区依次为: 水泥浆区(水泥沉积层)、混合过渡区及水区^[20]。

假设考虑由中、粗沙组成的有界沙土层^[5], 外半径为 R , 注浆孔半径 $r=r_0$, 注浆压力 $p=p_0$; 水泥浆区半径 $r_0 \leq r \leq r_c$, 压力 $p=p_1$; 混合过渡区半径 $r_c \leq r \leq R$, 压力 $p=p_2$; 水区 $r=R$, $p=p_w$ 恒定不变(图1)。

图1 二维锋面扩散示意图

设定水泥浆为牛顿流体, 黏度 $1.63 \sim 4.42 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ ^[5], 则其渗流运动方程为

$$\begin{cases} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial p_1}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 p_1}{\partial \theta^2} = 0, & (r_0 < r \leq r_c), \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial p_2}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 p_2}{\partial \theta^2} = 0, & (r_c < r \leq R), \end{cases} \quad (1)$$

其中, r 为浆液扩散距离, 单位cm; θ 为极角, 单位°; p_1 为水泥浆区压力, 单位kPa; p_2 为混合过渡区压力, 单位kPa。

水泥浆锋面处Darcy渗流定律为

$$\frac{K_c}{\rho_{cs} g} \frac{\partial p_1}{\partial r} = \frac{K_0}{\rho_w g} \frac{\partial p_2}{\partial r}, \quad (r = r_c), \quad (2)$$

其中, K_c 为水泥沉积层渗透系数, 单位cm/s; K_0 为沙土层初始渗透系数, 单位cm/s; ρ_{cs} 为水泥浆密度, 单位g/cm³; ρ_w 为水的密度, 单位g/cm³; g 为重力加速度, 单位m/s²。

锋面运移的边界条件为

$$\begin{cases} p_1 = p_0, & (r = r_0), \\ p_1 = p_2, & (r = r_c), \\ p_2 = p_w, & (r = R). \end{cases} \quad (3)$$

由式(1)~(3)解得水泥浆区压力导数为

$$\frac{\partial p_1}{\partial r} = \frac{p_0 - p_w}{\frac{\rho_w K_c}{\rho_{cs} K_0} \ln \frac{r_c}{R} - \ln \frac{r_c}{r_0}} \cdot \frac{1}{r}. \quad (4)$$

当沙土层厚度为 H 时, 依据式(4)可得水泥浆进入沙土层的体积流量为

$$Q = 2\pi H \frac{K_c}{\rho_{cs} g} \frac{p_0 - p_w}{\frac{\rho_w K_c}{\rho_{cs} K_0} \ln \frac{r_c}{R} - \ln \frac{r_c}{r_0}}. \quad (5)$$

在二维直角坐标系中, 选取某一质点的质量 m_i 进行研究。时刻 t 时, 该质点位于点 (x, y) , 质量为 $m_i(x, y, t)$ 。经过时间 Δt 后, 该质点以速度 $v=(v_x, v_y)$ 移至点 $(x', y')=(x+v_x \Delta t, y+v_y \Delta t)$, 而质量表示为 $m_i(x', y', t')=m_i(x+v_x \Delta t, y+v_y \Delta t, t+\Delta t)$ 。

按泰勒级数展开质量 m_i 的物质导数为

$$\frac{dm_i}{dt} = \frac{\partial m_i}{\partial t} + (v \cdot \nabla) m_i. \quad (6)$$

在渗滤效应的作用下, 悬浮液中的水泥颗粒或吸附于介质骨架或滤出于沙土层孔隙中。假设将滞留的

水泥颗粒作为沙土颗粒考虑, 则渗滤效应可看作是水泥颗粒与介质骨架的质量交换^[15,17].

依据式(6), 水泥颗粒的质量平衡方程为

$$-\mu = \frac{\partial(\rho_c n_c)}{\partial t} + (v_c \cdot \nabla)(\rho_c n_c). \quad (7)$$

水的质量平衡方程为

$$\frac{\partial(\rho_w n_w)}{\partial t} + (v_w \cdot \nabla)(\rho_w n_w) = 0. \quad (8)$$

沙土骨架的质量平衡方程为

$$\mu = \frac{\partial(\rho_s n_s)}{\partial t} + (v_s \cdot \nabla)(\rho_s n_s), \quad (9)$$

其中, ρ_c 为水泥颗粒的密度, 单位 g/cm^3 ; ρ_w 为水的密度, 单位 g/cm^3 ; ρ_s 为沙土骨架的密度, 单位 g/cm^3 ; n_c 为单位体积内水泥颗粒的体积百分含量, 无量纲量; n_w 为单位体积内水的体积百分含量, 无量纲量; n_s 为单位体积内沙土骨架的体积百分含量, 无量纲量; t 为时间, 单位 s ; v_c 为水泥颗粒的速度, 单位 cm/s ; v_w 为水的速度, 单位 cm/s ; v_s 为沙土骨架的速度, 值为 0 cm/s ; μ 为质量交换系数, 代表单位时间内单位体积水泥浆中滤出的水泥颗粒质量, 单位 $\text{g cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$).

假设沙土层孔隙被水泥浆填充, 且沙土颗粒密度与水泥颗粒密度相等, 则沙土层的孔隙率为

$$n = n_c + n_w = 1 - n_s, \quad (10)$$

其中, n 为沙土层孔隙率, 无量纲.

由式(7)~(10)可得

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{\mu}{\rho_c}. \quad (11)$$

μ 受多因素的影响, 其与水泥颗粒浓度呈正相关, 而与孔隙率呈负相关. 依据线性滤过定律^[13-17,19]

$$\frac{\mu}{\rho_c} = -\lambda \frac{n_c}{n_0} = -\lambda \delta, \quad (12)$$

其中, λ 为渗滤系数, 单位 s^{-1} , 取值范围为 $1.60 \times 10^{-2} \sim 4.78 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ ^[13-17,19], n_0 为沙土层初始孔隙率, 无量纲量; δ 为孔隙中浆液的水泥颗粒含量, 无量纲量.

结合式(11)和(12)可得:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\lambda \delta. \quad (13)$$

在 $r=r_0$ 界面, 水泥颗粒和水的质量平衡方程为

$$\varphi \cdot v_0 = n_c(r_0, t)v(r_0, t), \quad (14)$$

$$(1 - \varphi) \cdot v_0 = n_w(r_0, t)v(r_0, t), \quad (15)$$

其中, φ 为水泥颗粒的体积分数, 无量纲; v_0 为水泥浆初始流速, 单位 cm/s .

结合式(10)并将式(14)和式(15)相加可得:

$$n(r_0, t)v(r_0, t) = v_0. \quad (16)$$

依据式(7), (8), (13)及式(16)并参照Saada等人^[21]的简化方法, 可得:

$$n_0 \frac{\partial \delta}{\partial t} + v_0 \frac{r_0}{r} \frac{\partial \delta}{\partial r} = \lambda \delta^2 - \lambda \delta. \quad (17)$$

式(17)即为考虑渗滤效应的水泥颗粒运移基本方程, 该问题的初始条件和边界条件为

$$\left. \begin{aligned} \delta(r_0, t) &= \varphi, \\ n(r_0 \leq r \leq r_c, t=0) &= n_0, \\ \delta(r_0 \leq r \leq r_c, t=0) &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

由式(17)和(18)可得:

$$\delta(r, t) = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{\varphi} - 1 \right) \exp \left[\frac{\lambda}{r_0 v_0} \left(\frac{r_c^2 - r_0^2}{2} \right) \right]}, \quad (19)$$

$$(r_0 \leq r \leq r_c).$$

将式(19)代入式(12)得:

$$n_c = \frac{n_0}{1 + \left(\frac{1}{\varphi} - 1 \right) \exp \left[\frac{\lambda}{r_0 v_0} \left(\frac{r_c^2 - r_0^2}{2} \right) \right]}, \quad (20)$$

$$(r_0 \leq r \leq r_c).$$

在渗滤效应的影响下, 沙土层孔隙空间被水泥颗粒占据的体积分数为 n_c , 则水泥颗粒的流量为

$$Q \cdot \varphi = 2\pi r_c H \cdot v \cdot n_c, \quad (21)$$

其中, v 为水泥浆流速, 单位 cm/s .

将式(5)及(20)代入式(21)得:

$$v = \frac{K_c \varphi}{\rho_{cs} g r_c n_0 \delta} \frac{p_0 - p_w}{\frac{\rho_w K_c}{\rho_{cs} K_0} \ln \frac{r_c}{R} - \ln \frac{r_c}{r_0}}, \quad (22)$$

$$(r_0 \leq r \leq r_c).$$

依据式(22)可求得渗滤效应下水泥浆锋面的运移速度, 进而为研究水泥浆极限扩散距离及浆液锋面扩散压力提供依据.

2.2 锋面压力模型

依据Ives^[22]及Herzig^[23]提出的压力降公式:

$$\frac{\Delta P'}{\Delta P_0'} = \frac{1}{(1-j\sigma)^m}, \quad (23)$$

其中, $\Delta P'$ 为水泥浆运移单位距离时的压力降, 单位kPa/cm; $\Delta P_0'$ 为洁净沙土层中水运移单位距离时的压力降, 单位kPa/cm; σ 为滞留率, 单位体积内滞留颗粒的体积, 无量纲量; j 为标量, m 为标量, $m \times j$ 取值范围28.4~79.3^[22,23].

当 j, σ 较小时, 将式(23)展开得:

$$\frac{\Delta P'}{\Delta P_0'} = 1 + mj\sigma. \quad (24)$$

在厚度为 H 的沙土层范围内, 滤出水泥颗粒的体积为

$$2\pi v t H \cdot \varphi = 2\pi \int_{r_0}^{r_c} \sigma dr \cdot H. \quad (25)$$

结合式(24), 对式(25)积分得:

$$p' = p_0' \left[(1 - mj\varphi) + \frac{mj\varphi \cdot vt}{r_c - r_0} \right], \quad (26)$$

其中, p' 为水泥浆锋面压力降, 单位kPa; p_0' 为洁净沙土层中水运移 r_c 时的压力降, 单位kPa.

依据式(26)可求得渗滤效应下水泥浆锋面在不同扩散位置处的压力降和渗透压力.

3 因素分析

3.1 锋面速度-扩散距离分析

为研究渗滤效应下水泥浆锋面运移的特征规律, 现对 $K_c=0.2K_0$, $K_c=0.5K_0$ 及 $K_c=0.8K_0$ 时的水泥浆锋面速度进行分析, 并与未考虑渗滤效应时的锋面速度进行对比. 各相关参数为注浆孔半径 $r_0=4.5$ cm, 注浆孔压力 $p_0=600$ kPa, 沙土层初始渗透系数 $K_0=2.42 \times 10^{-2}$ cm/s, 初始孔隙率 $n_0=0.3$, 水泥浆密度 $\rho_{cs}=1.5$ g/cm³, 水泥浆黏度 4.42 mPa s, 水泥颗粒的体积分数 $\varphi=0.25$, 水泥浆初始流速 $v_0=21.3$ cm/s, 初始地下水压力 $p_w=0$ kPa, 水的密度 $\rho_w=1.0$ g/cm³, 重力加速度 $g=10$ m/s², 渗滤系数 $\lambda=2.8 \times 10^{-2}$ s⁻¹.

依据式(22)求得应选取的圆柱形沙土层外半径

$R=700$ cm, 同时得出 $K_c=0.2K_0$, $K_c=0.5K_0$ 及 $K_c=0.8K_0$ 时水泥浆锋面速度和扩散距离的变化趋势(图2).

分析图2可知, (1) $K_c=0.48 \times 10^{-2}$ cm/s($0.2K_0$)时, 水泥浆锋面的扩散距离为32 cm; $K_c=1.21 \times 10^{-2}$ cm/s($0.5K_0$)时, 水泥浆锋面的扩散距离为46 cm; $K_c=1.94 \times 10^{-2}$ cm/s($0.8K_0$)时, 水泥浆锋面的扩散距离为66 cm. 可见, 注浆孔近域内沉积层渗透系数 K_c 较小, 远域处沉积层渗透系数 K_c 较大, 即固沙体抗渗性沿水泥浆扩散距离呈衰减趋势. (2) $K_c=0.2K_0$ 时, 水泥浆锋面速度的平均变化率为0.59; $K_c=0.5K_0$ 时, 锋面速度平均变化率为0.41; $K_c=0.8K_0$ 时, 锋面速度平均变化率为0.28; 当忽略渗滤效应时, 锋面速度沿扩散距离不变. 分析认为, 当沉积层渗透系数 K_c 较大时, 沙土层孔隙通道较为顺畅, 故水泥浆锋面速度 v 变化较小; 随着渗滤效应的不断进行, 沉积层渗透系数 K_c 逐渐减小, 孔隙通道渐渐封堵, 导致锋面速度变化率逐渐增大.

3.2 锋面压力-扩散距离分析

为研究渗滤效应下水泥浆运移过程中压力降及锋面压力的变化规律, 现仅对 $K_c=0.8K_0$ 时的水泥浆锋面进行分析, 各相关参数为 $p_0'=0.42$ kPa, $m \times j=53.8$ (平均值), 其他参数同3.1节.

依据式(26)得出 $K_c=0.8K_0$ 条件下, $r_c=10, 15, 20$ 及 40 cm时水泥浆锋面压力降 p' 和时间 t 的变化趋势(图3). 同时, 得出 $t=5, 10$ 及 25 s时锋面压力 p 与扩散距离的变化曲线(图4).

分析图3可知, (1) 在 $r_c=10$ cm处: $t \leq 15$ s时, 压力降

图2 (网络版彩图) 锋面速度-扩散距离图

图3 (网络版彩图)压力降-时间曲线

图4 (网络版彩图)压力-扩散距离曲线

p' 与时间正相关,且在 $t=15$ s达到极大值63.8 kPa; $15 < t \leq 25$ 时,压力降 p' 与时间负相关,终值为37.3 kPa. 依据式(26)分析认为,前期水泥浆流速相对较大,流速 v 与时间 t 的乘积值逐渐增大,造成压力降 p' 随之增大;后期在渗滤效应作用下,水泥颗粒逐渐滞留封堵了孔隙通道,使得浆液流速随时间显著减小,导致压力降 p' 相应降低. (2) 在 $r_c=20$ cm及 $r_c=40$ cm处,压力降 p' 与时间 t 呈近似线性关系. 分析认为,水泥浆锋面到达上述位置的流速仅为3.94及2.06 cm/s,且流速随时间的变化已十分缓慢,故压力降 p' 随时间的推移而增大.

分析图4可知, (1) 水泥浆锋面运移到 $r_c=5$ cm处时,锋面速度 $v=18.7$ cm/s,依据式(26)得压力降 $p'=206$ kPa,故此处锋面压力 $p=394$ kPa. (2) 当 $t=5$ s时,水泥浆扩散距离为25 cm,锋面压力为309.4 kPa,平均单位压力降 $\Delta P'$ 为4.23 kPa/cm; 当 $t=10$ s时,水泥浆扩散距离为40 cm,锋面压力为306 kPa,平均单位压力降 $\Delta P'$ 为

2.51 kPa/cm. (3) 当 $t=25$ s时,在 $5 \text{ cm} \leq r_c \leq 30 \text{ cm}$ 区域内,锋面压力沿程降低,平均单位压力降 $\Delta P'$ 为3.70 kPa/cm; 在 $30 \text{ cm} \leq r_c \leq 65 \text{ cm}$ 区域内,锋面压力沿程增大,平均单位压力降 $\Delta P'$ 为-0.23 kPa/cm.

分析认为,水泥浆前期主要为渗透扩散阶段,压力降 p' 逐渐增大,锋面压力 p 及平均单位压力降 $\Delta P'$ 均逐渐减小;而后期主要为孔隙通道淤堵阶段,压力降 p' 逐渐减小,锋面压力 p 及平均单位压力降 $\Delta P'$ 均逐渐增大.

基于以上研究,在实际注浆设计中应考虑渗滤效应的影响,结合工程要求的沉积层渗透系数和注浆参数,确定水泥浆的扩散距离及钻孔的排间距,以保证注浆防渗的效果.

4 模型试验及结果

4.1 渗透注浆试验

4.1.1 试验材料

考虑水泥浆特性和沙土层特征对悬浮颗粒滤出及浆液扩散的影响,注浆材料选用42.5普通硅酸盐水泥,其 $d_{85}=37 \mu\text{m}$, $d_{95}=78 \mu\text{m}$,品质符合《通用硅酸盐水泥》(GB175-2007)^[24]的要求,浆液基本性能见表1.

被注介质选用天然沙土介质,其颗粒级配见表2,结构参数见表3.

表1 水泥浆基本性能

性能		数值
水灰比		1:1
黏度(mPa s)		4.42
密度(g/cm ³)		1.45
结石率(%)		85
凝胶时间(min)	初凝	776
	终凝	1347

表2 沙样颗粒级配

分级粒径(mm)	筛余量(%)
20~2	
2~0.5	0.031
0.5~0.25	0.671
0.25~0.075	0.11
0.075~0.05	0.151
<0.05	0.037

表 3 沙样结构参数

参数	数值
含水率(%)	29
密度(g/cm ³)	1.83
孔隙率 n_0	0.21
渗透系数 $K(10^{-2} \text{ cm/s})$	2.29
孔隙直径(mm)	0.16
沙样颗粒有效粒径(μm)	499

4.1.2 模型系统

模型系统分为4个部分: 浆液输入系统、恒压注浆装置、模型试验架及监测系统, 如图5.

浆液输入系统主要包含空气压缩机及气动泵等, 准备阶段时采用气动泵将水泥浆液泵入恒压注浆装置.

为解决往复式注浆泵压力波动的问题, 研发了由储浆罐、液面显示器、气压调节器及内置搅拌机组成的恒压注浆装置. 其中储浆罐最大耐受压力为1.5 MPa, 气压调节器将注浆压力稳定于设计压力, 内置搅拌机使水泥浆处于流动状态防止絮凝沉积.

模型试验架是由6片厚度为5 mm的钢板组成的长方体, 内部空间尺寸为150 cm×140 cm×50 cm, 钢板上均设置高5 cm的肋板以减小钢板的变形挠度. 此外, 各钢板通过高强螺栓连接, 可任意拆卸, 便于对浆液

沉积层进行取样.

监测系统主要由光纤压力传感器、XL2101G应变箱及计算机控制平台组成, 以实时监测注浆过程中不同位置处的水泥浆锋面压力.

4.1.3 沙样填筑

模型试验架的体积为1.05 m³, 结合表3的沙样密度得出试验架中需填入沙样1.92 t.

参照《土工试验方法》(GB50123-1999)^[25]的要求, 将沙样分5层填入模型试验架, 每层沙样厚度为10 cm(即384 kg), 沙样填入后用橡皮锤以每边56击的次数敲打试验架四周, 并在同一时间内用表面振捣器振击沙样表面, 表面振捣器在同一位置的振捣时间为25~40 s, 直至沙样体积不变为止. 两层交界处的沙土面应刨毛, 如此重复填入各层沙样.

4.1.4 注浆及监测设计

为研究渗滤效应下水泥颗粒运移滤出及锋面压力的变化规律, 设计对沙样进行恒压渗透注浆试验.

设定注浆孔半径 $r_0=2.5 \text{ cm}$, 注浆孔压力 $p_0=600 \text{ kPa}$, 浆液水灰比为1:1(即水泥浆密度 $\rho_{cs}=1.5 \text{ g/cm}^3$, 水泥浆黏度4.42 mPa s, 水泥颗粒的体积分数 $\phi=0.25$)、水泥浆初始流速 $v_0=69 \text{ cm/s}$.

渗透注浆过程中通过渗压传感器实时监测不同位置处的压力变化, 渗压传感器布置以注浆孔为基点,

图 5 模型试验装置示意图

监测点1距注浆孔10 cm, 监测点2距注浆孔15 cm, 每侧均间隔10 cm埋设, 监测点布置见图6.

4.2 试验结果

恒压渗透注浆过程中, 采用XL2101G应变箱监测不同时刻的各传感器压力值, 数据见表4, 模型试验见图7.

图6 压力传感器布置图

表4 监测压力值

监测点 编号	距注浆孔 距离 (cm)	压力 (kPa)	
		$t=10\text{ s}$	$t=30\text{ s}$
1	10	487	463
2	15	467	356
3	20	444	382
4	25	422	337
5	30	404	323
6	35	389	357
7	40	378	364
8	45	370	370
9	50		359
10	55		355
11	60		333
12	65		327
13	70		315

图7 (网络版彩图)恒压渗透注浆试验

5 理论值-试验值对比分析

为揭示渗滤效应下水泥颗粒运移滤出机制及浆液锋面的扩散规律, 现将理论计算结果与模型试验结果进行对比分析, 验证考虑渗滤效应的水泥浆锋面理论模型的合理程度并为富水沙土层注浆设计提供参考.

依据4.1.1和4.1.4节中的参数, 并设定渗滤系数 $\lambda=2.80\times 10^{-2}\text{ s}^{-1}$. 依据Ives^[22]及Herzig^[23]的研究成果, $m\times j$ 取值范围为28.4~79.3, 现取其平均值 $m\times j=53.8$, 不同时间 t 的理论值-试验值对比见图8.

据图8可知, (1) 当 $t=10\text{ s}$ 时, 理论值较试验值小23~97 kPa, 偏差率为7%~26%; 水泥浆锋面压力的理论值和试验值均沿程减小. 分析认为, 该阶段浆液以渗透扩散为主, 沙土层孔隙通道顺畅且滞留沉积的水泥颗粒较少, 以致锋面压力沿扩散距离降低. (2) 当 $t=30\text{ s}$ 时, 理论值与试验值相差35~27 kPa, 偏差率为-10%~8%. 在 $10\text{ cm}\leq r_c\leq 30\text{ cm}$ 范围内试验压力逐渐降低, $30\text{ cm}\leq r_c\leq 45\text{ cm}$ 范围内试验压力逐渐升高, $45\text{ cm}\leq r_c\leq 70\text{ cm}$ 范围内试验压力同样逐渐降低. 分析认为, 随着渗滤效应的进行, 注浆孔近域内孔隙通道逐渐被封堵, 浆液进入沙土层的压力降越来越大, 导致锋面压力逐渐降低; 而此前进入沙土层的浆液压力相对较大, 该部分浆液在随后的扩散过程中锋面压力同样逐渐降低. (3) 理论计算中采用了 $m\times j$ 的平均值, 并非为试验过程中的实际值, 故导致水泥浆锋面压力理论值与试验值存在一定的偏差, 但两者波动范围较小, 相近程度较高. 表明考虑渗滤效应的水泥浆锋面理论

图8 (网络版彩图)理论值-试验值对比分析图. (a) $t=10$ s; (b) $t=30$ s

模型可准确描述水泥颗粒的滤出机制和浆液锋面扩散规律.

6 总结

本文通过理论分析和模型试验,研究了渗滤效应下水泥颗粒的运移滤出机理和浆液锋面的扩散规律,得到以下有意义的结论.

(1) 基于渗流连续性方程、Darcy渗流定律、质量守恒方程、线性滤过定律及压力降方程建立了水泥浆锋面扩散的理论模型.

(2) 在渗滤效应下,沉积层渗透系数沿浆液扩散距离而增大;浆液锋面速度变化率随沉积层渗透系数的减小而增大.

(3) 随着浆液由渗透扩散转变为滞留淤堵,锋面压力降 p' 呈先增后减,而锋面压力 p 及单位压力降 $\Delta p'$ 呈先减后增趋势;水泥浆锋面压力理论值与模型试验值偏差率仅为-10%~26%,吻合程度较高.

(4) 水泥浆锋面扩散理论模型可定量描述渗滤效应下水泥颗粒的运移滤出机理和浆液锋面扩散规律,所得结论可指导注浆设计,具有一定的工程应用价值.

参考文献

- 钱七虎. 地下工程建设安全面临的挑战与对策. 岩石力学与工程学报, 2012, 31: 1945-1956
- 罗汀, 姚仰平, Chu J. 饱和砂土的渐近状态特性及其模拟. 中国科学E辑: 技术科学, 2009, 39: 39-47
- 鞠杨, 杨永明, 徐文静, 等. 岩石孔隙结构的统计模型. 中国科学E辑: 技术科学, 2008, 38: 1026-1041
- 陈耀松, 单肖文, 陈沪东. 计算流体力学的新方向及其在工业上的应用. 中国科学E辑: 技术科学, 2007, 37: 1107-1116
- 岩土注浆理论与工程实例协作组. 岩土注浆理论与工程实例. 北京: 科学出版社, 2001. 16-17
- 雷进生. 碎石土地基注浆加固力学行为研究. 博士学位论文. 武汉: 中国地质大学, 2013
- 李术才, 冯啸, 刘人太, 等. 考虑渗滤效应的砂土介质注浆扩散规律研究. 岩土力学, 2017, 38: 925-933
- 湖南大学, 同济大学, 天津大学, 等. 土木工程材料. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005
- 冯啸, 刘人太, 李术才, 等. 考虑深层渗滤效应的水泥浆动界面特征研究. 岩石力学与工程学报, 2016, 35: 1000-1008
- 刘人太. 水泥基速凝浆液地下水工程动水注浆封堵机制及应用研究. 博士学位论文. 济南: 山东大学, 2012
- 冯啸, 李术才, 刘人太, 等. 孔隙介质中水泥浆三维锋面特征研究. 岩土力学, 2015, 36: 3171-3179
- 陈星欣, 白冰, 于涛, 等. 粒径和渗流速度对多孔介质中悬浮颗粒迁移和沉积特性的耦合影响. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增1): 2840-2845
- 张改玲. 化学注浆固砂体高压渗透性及其微观机理. 博士学位论文. 徐州: 中国矿业大学, 2011
- 郭密文. 高压封闭环境孔隙介质中化学浆液扩散机制试验研究. 博士学位论文. 徐州: 中国矿业大学, 2010
- Bradford S A, Simunek J, Bettahar M, et al. Modeling colloid attachment, straining, and exclusion in saturated porous media. *Environ Sci Technol*, 2003, 37: 2242-2250
- Bedrikovetsky P, Siqueira F D, Furtado C A, et al. Modified particle detachment model for colloidal transport in porous media. *Transp Porous*

- Media, 2011, 86: 353–383
- 17 Porubcan A A, Xu S. Colloid straining within saturated heterogeneous porous media. *Water Res*, 2011, 45: 1796–1806
- 18 Kampa D, Wurster S, Buzengeiger J, et al. Pressure drop and liquid transport through coalescence filter media used for oil mist filtration. *Int J Multiphase Flow*, 2014, 58: 313–324
- 19 Yoon J, El Mohtar C S. A filtration model for evaluating maximum penetration distance of bentonite grout through granular soils. *Comput Geotech*, 2015, 65: 291–301
- 20 孔祥言. 高等渗流力学. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2010. 153–155
- 21 Saada Z, Canou J, Dormieux L, et al. Modelling of cement suspension flow in granular porous media. *Int J Numer Anal Meth Geomech*, 2005, 29: 691–711
- 22 Ives K J. Rapid filtration. *Water Res*, 1970, 4: 201–223
- 23 Herzig J P, Leclerc D M, Goff P L. Flow of suspensions through porous media—Application to deep filtration. *Ind Eng Chem*, 1970, 62: 8–35
- 24 中国建筑材料科学研究总院. 通用硅酸盐水泥(GB 175-2007). 北京: 中国标准出版社, 2007
- 25 中华人民共和国水利部. 土工试验方法标准(GB/T 50123-1999). 北京: 中国计划出版社, 1999

Theoretical and experimental research on the grout fronts diffusion considering filtration effect

FENG Xiao¹, LI ShuCai¹, LIU RenTai¹, HAN WeiWei^{1,2} & ZHANG ShiJie¹

¹ Research Center of Geotechnical and Structural Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

² College of Civil and Architecture Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China

Based on the seepage continuity equation, Darcy law, mass conservation equation, linear filtering law and pressure drop equation, the theoretical model of grout fronts diffusion was established. And through the model, the filtration mechanism of cement particles and the diffusion law of slurry fronts were analyzed. By applying the model test system developed independent, the dynamic variation law of the pressure of grout fronts is studied and compared with the theoretical value. The results show that, the permeability coefficient of the precipitated cement increases along the grout diffusion distance under the filtration effect. The change rate of frontal velocity is negatively correlated with the permeability coefficient of precipitated cement. At the specific diffusion distance, the frontal pressure drop p' increases first and then decreases, while the frontal pressure p and the average unit pressure drop $\Delta P'$ show the trend of decreasing first and then increasing. The deviation rate of frontal pressure value between theory and test is only from –10% to 26%, which reveal a high degree of coincidence. The conclusions can be used to guide the grouting design, which has certain application value to the practical engineering.

filtration effect, grout, front, velocity, pressure

doi: 10.1360/N092017-00078