

粗颗粒土注浆加固扩散机理研究

游敬杰

(中铁二局第六工程有限公司, 四川 成都 610000)

摘要: 注浆工程的隐蔽性导致浆液扩散规律不易观察, 无法判断浆液扩散效果。针对浆液扩散机理不明确, 扩散规律未知的问题, 采用二维有限元模型, 在静水条件下, 对不同时刻、不同注浆压力和不同地层渗透率下的注浆扩散规律进行数值模拟分析。结果表明: 注浆压力的增大可以有效地增加扩散半径和扩散效率; 地层渗透率越大, 扩散半径越大且增长越快。

关键词: 注浆; 扩散规律; 数值模拟

中图分类号: TU472

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2020)05-0376-04

Study on diffusion mechanism of grouting in coarse-grained soil

YOU Jing-jie

(China Railway Erju 6th Engineering Co., Ltd., Chengdu 610000, China)

Abstract: The invisibility of grouting engineering makes it difficult to observe the diffusion mechanism of slurry and judge the effect of slurry diffusion. Based on the two-dimensional finite element model, the grouting diffusion regularity under different time, different grouting pressure and different formation permeability is simulated and analyzed under the same condition of water treatment. The analysis results show that the increase of grouting pressure can effectively increase the diffusion radius and diffusion efficiency. The diffusion radius is greater and grows faster with the increase of the formation permeability.

Key words: grouting; diffusion regularity; numerical simulation

0 引言

涌砂、涌水^[1]是富含水层的地下工程中常见的地质灾害, 严重威胁施工人员安全与施工进度。注浆^[2-4]是治理富水软弱地层的有效手段, 通过注浆可有效提升被注地层的力学性能及抗渗性能, 从而保证地下工程开挖施工期的围岩稳定性及涌水量满足设计要求。注浆的加固是由浆液的扩散^[5]来实现的, 如果浆液能够扩散到边界再凝结固化, 则能达到注浆加固的目的。然而岩土工程注浆具有隐蔽性、地层复杂性等特点, 其浆液扩散规律尚不清楚。因此, 本文采用 Comsol Multiphysics 多场耦合数值模拟软件, 对注浆过程进行模拟, 探究注浆压力、地层渗透率和注浆时间对浆液扩散规律的影响, 为注浆加固的设计和施工提供参考, 具有一定的研究意义。

1 模型建立

采用 Comsol Multiphysics 软件对注浆进行模拟, 将浆液和静水分别看作 2 种流体, 应用两相达西定律接口进行计算, 用以模拟浆液在静水中的扩散。

浆液与水在计算域内的分布采用体积分数进行表示, 模型计算初始状态为模型内部充满水, 即水的体积分数在整个模型空间内为 1, 浆液从计算开始后浆液由注浆孔以恒定压力注入裂隙内部。浆液与水的相对渗透率为体积分数的平方。模型网格形式采用自由三角形网格, 靠近注浆孔处适当加密网格。

1.1 几何模型

几何模型^[6-8]见图 1。

1.2 控制方程

(1) 流体运动方程

$$\rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \rho(\vec{u} \nabla) \vec{u} = \nabla \{-P\mathbf{I} + \mu[\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T]\} + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (1)$$

式中： ρ 为流体密度， kg/m^3 ； \vec{u} 为速度场； P 为压力； \vec{g} 为重力加速度， m/s^2 ； μ 为动力黏度， $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ； \vec{F} 为流体所受体积力， N 。

(2) 流动连续性方程

不考虑注浆过程中浆液和水的压缩性，在整体区域内都满足质量守恒方程：

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (2)$$

(3) 两相流界面控制方程

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \vec{u} \nabla \phi = \gamma \nabla \left[\zeta_{IS} \nabla \phi - \frac{\phi(1-\phi) \nabla \phi}{|\nabla \phi|} \right] \quad (3)$$

式中： ϕ 为水平集变量； γ 为重新初始化参数； ζ_{IS} 为控制界面厚度参数。

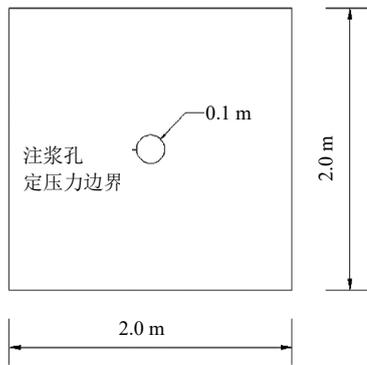


图1 几何模型

Fig. 1 Geometric model

1.3 数值模型

数值模型^[9]基本参数与网格划分如表 1 和图 2 所示。

表 1 数值模型计算参数

Tab. 1 Calculation parameters of numerical model

属性	数值	单位
水的密度 ρ_w	1 000	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
水的黏度 μ_w	0.001	$\text{Pa}\cdot\text{s}$
水的初始速度 v_0	0	m/s
浆液密度 ρ_s	1 300	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
浆液黏度 μ_s	0.008	$\text{Pa}\cdot\text{s}$
孔隙率	0.3	-
初始压力 p_0	0	MPa

2 浆液扩散模拟

2.1 注浆时间对扩散规律的影响

选择对注浆压力为 5 MPa，地层渗透率为 $1 \times 10^{-10} \text{ m}^2$ 的浆液扩散形态进行分析，每隔一段时间

记录一次浆液扩散形态，如图 3 所示，图中圆形部分代表浆液，周围部分代表水，数值代表水所占的体积分数。

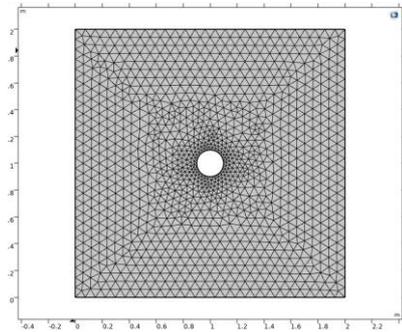


图2 数值模型

Fig. 2 Numerical model

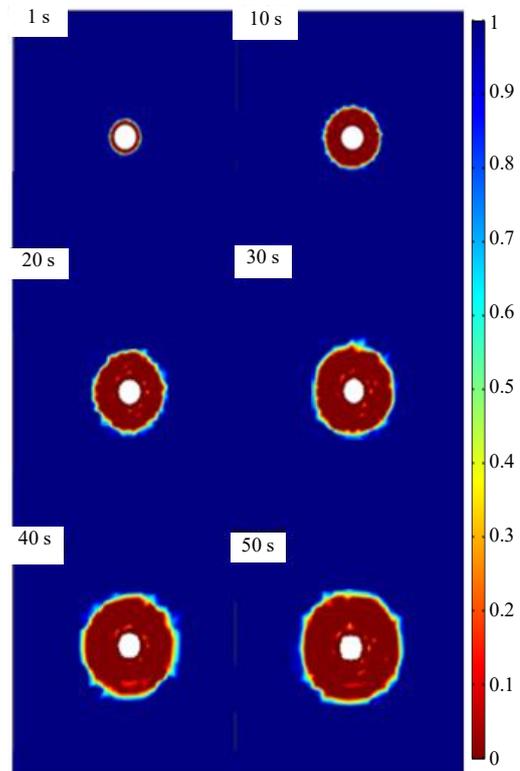


图3 浆液扩散形态

Fig. 3 Morphology of slurry diffusion

由图 3 可知，浆液在静水中的近似圆形扩散，同时浆液与水直接存在一定宽度的过渡区即浆液与水混合存的区域。随着时间的增长扩散距离增加，1~10 s 内，扩散半径增大幅度最大。

图 4 中初始注浆压力均为 5 MPa，从图中可以看出浆液压力场分布从注浆孔开始沿着扩散半径方向进行衰减。1~20 s 内高压区半径明显增大，从 20~50 s 内，高压区范围基本不变，而压力的扩散半径却越来越大，分析认为 1~20 s 内的是浆液将水挤压出去，而 20~50 s 是由于浆液已经扩散到一定距离了，此时在这个范围内，发生的是浆液挤压

浆液，而浆液的黏度比水大很多，因此注浆压力衰减的更快。

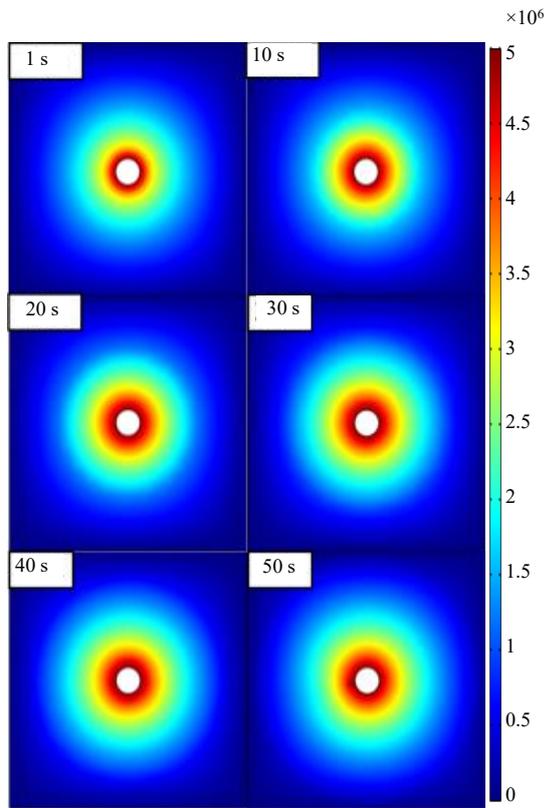


图4 注浆压力扩散形态

Fig. 4 Grouting pressure diffusion pattern

2.2 注浆压力对扩散规律的影响

图5为当地层渗透率等于 $1 \times 10^{-10} \text{ m}^2$ 时，不同注浆压力下的注浆扩散半径的发展情况。由图5所示：在注浆初期，扩散半径增长较快，且注浆压力越大，半径增长越快，随着注浆过程的进行，扩散半径增长速度变慢，最终会趋于一个稳定值，即扩散的极限值。在静水中进行注浆加固时，注浆压力的增大可以有效地增加扩散半径和扩散效率。

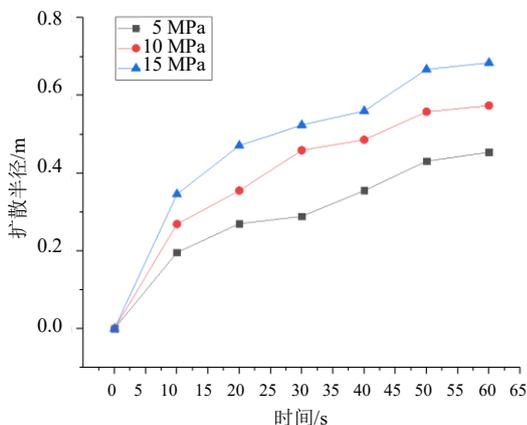


图5 不同注浆压力下的扩散半径变化规律

Fig. 5 Variation law of diffusion radius under different grouting pressure

2.3 地层渗透率对扩散规律的影响

图6为注浆压力等于5 MPa时，不同地层渗透率时，注浆扩散半径的发展情况。由上图所示：注浆前期，扩散半径增长较快。随着注浆过程的进行，地层渗透率为 $1 \times 10^{-8} \text{ m}^2$ 的扩散半径增长速度一直较快，但总的来说，3种渗透率的扩散半径增长速度变慢。在相同注浆压力下，地层渗透率越大，扩散半径越大且增长越快。

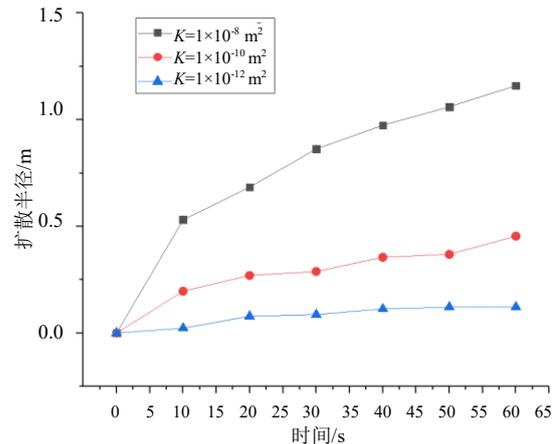


图6 不同地层渗透率的扩散半径变化规律

Fig. 6 Variation law of diffusion radius of different formation permeability

3 结论与展望

本文通过 Comsol Multiphysics 静水条件下浆液的扩散进行模拟，对不同注浆压力和不同泥浆黏度的扩散规律进行了分析，可得如下主要结论：

(1) 在静水条件下，浆液呈近似圆形扩散。浆液压力场分布从注浆孔开始沿着扩散方向进行衰减。

(2) 随着注浆过程的进行，浆液扩散半径变大，而变大的速度越来越慢。

(3) 在静水中进行注浆加固时，注浆压力的增大可以有效地增加扩散半径和扩散效率。

(4) 在相同注浆压力下，地层渗透率越大，扩散半径越大且增长越快。

(5) Comsol Multiphysics 中将浆液和水分别看作2种互不相融的流体，无法更准确地研究浆液和水混合后的扩散。

参考文献

- [1] 李万里. 基于注浆支护的巷道围岩浆液扩散规律研究[J]. 能源与环保, 2019, 41(9): 162-165.

- LI Wan-li. Study on slurry diffusion law of roadway surrounding rock based on grouting supporting[J]. China Energy and Environmental Protection, 2019, 41(9): 162-165.
- [2] LI S C, LIU R T, ZHANG Q S, et al. Protection against water or mud inrush in tunnels by grouting: a review[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2016, 8(5): 753-766.
- [3] 邝键政, 管月稳, 王杰, 等. 岩土工程注浆理论与工程实例[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [4] 张庆松, 韩伟伟, 李术才, 等. 灰岩角砾岩破碎带涌水综合注浆治理[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(12): 2412-2419.
- ZHANG Qing-song, HAN Wei-wei, LI Shu-cai, et al. Comprehensive grouting treatment for water gushing analysis in limestone breccias fracture zone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(12): 2412-2419.
- [5] 姜玉松, 崔玉龙, 陈海明, 等. 岩土注浆技术与理论研究现状与展望[C]//中国岩石力学与工程学会锚固与注浆分会、广东省岩土力学与工程学会锚固与注浆专业委员会. 2017 年全国锚固与注浆技术学术研讨会论文集. 广州, 2017: 17-23.
- JIANG Yu-song, CUI Yu-long, CHEN Hai-ming, et al. Reserch status and prospect of grouting technology and theory[C]//Anchor and Grouting Branch of Chinese Society of Rock Mechanics and Engineering, Anchoring and Grouting Professional Committee of Guangdong Geotechnical Mechanics and Engineering Society. Proceedings of 2017 National Symposium on anchorage and Grouting technology. Guangzhou, 2017: 17-23.
- [6] 孙珞, 赵卫强. 冒落区巷道支护及注浆技术研究[J]. 煤炭技术, 2017, 36(2): 26-27.
- SUN Luo, ZHAO Wei-qiang. Research on roadway bolting and grouting technology in caving zone[J]. Coal Technology, 2017, 36(2): 26-27.
- [7] 刘旭锋, 刘广超, 张耀辉, 等. 高强易渗透水泥注浆材料研究[J]. 煤矿安全, 2015, 46(9): 54-56, 60.
- LIU Xu-feng, LIU Guang-chao, ZHANG Yao-hui, et al. Research on high strength easy penetration of cement grouting material[J]. Safety in Coal Mines, 2015, 46(9): 54-56, 60.
- [8] 刘健, 刘人太, 张霄, 等. 水泥浆液裂隙注浆扩散规律模型试验与数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(12): 2445-2452.
- LIU Jian, LIU Ren-tai, ZHANG Xiao, et al. Diffusion law model test and numerical simulation of cement fracture grouting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(12): 2445-2452.
- [9] 季卫斌, 张召千, 王琳. 巷道最佳注浆加固时机的分析研究[J]. 山西煤炭, 2006, 26(1): 17-18, 44.
- JI Wei-bin, ZHANG Zhao-qian, WANG Lin. Research on the best time for injecting to reinforce an entry[J]. Shanxi Coal, 2006, 26(1): 17-18, 44.