

DOI: 10.11779/CJGE201805017

# 考虑浆液扩散路径的多孔介质渗透注浆机理研究

张庆松, 王洪波, 刘人太, 李术才, 张乐文, 朱光轩, 张连震

(山东大学岩土与结构工程研究中心, 山东 济南 250061)

**摘要:** 多孔介质注浆的扩散方式以渗透注浆为主, 传统的多孔介质渗透注浆往往忽略了浆液渗透过程中的扩散路径, 导致理论结果与实际偏差较大。基于对多孔介质浆液渗透过程中扩散路径分析, 根据浆液扩散运动方程, 建立了考虑浆液扩散路径的多孔介质渗透注浆模型, 设计了一套多孔介质渗透注浆扩散模拟实验装置, 并采用常规注浆材料—水泥浆液, 获得不同被注介质渗透率及不同注浆速率下的注浆压力的时空变化规律。研究结果表明: 考虑浆液扩散路径的多孔介质浆液渗透注浆模型计算值为试验值的 1.1~1.3 倍, 计算值与试验值误差在允许的范围之内, 所建模型可较好的描述了浆液渗透扩散过程; 不考虑浆液扩散路径的多孔介质渗透注浆模型计算值为试验值的 1.8~3.2 倍, 显著高估了注浆扩散过程的浆液压力。研究成果成功用于青岛地铁砂层治理工程, 因此, 在多孔介质渗透注浆扩散设计中应充分考虑浆液扩散路径。

**关键词:** 多孔介质; 渗透; 注浆; 扩散路径; 模拟试验

中图分类号: TU443

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2018)05 - 0918 - 07

**作者简介:** 张庆松(1970 - ), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事地下工程灾害防治方面的教学与研究工作。E-mail: zhangqingsong@sdu.edu.cn。

## Infiltration grouting mechanism of porous media considering diffusion paths of grout

ZHANG Qing-song, WANG Hong-bo, LIU Ren-tai, LI Shu-cai, ZHANG Le-wen, ZHU Guang-xuan, ZHANG Lian-zheng

(Research Center of Geotechnical and Structural Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

**Abstract:** The diffusion mode of grouting in porous media is mainly infiltration grouting, and the traditional infiltration grouting in porous media often neglects the diffusion paths in the process of slurry infiltration, resulting in a large deviation between the theoretical results and the actual ones. Based on the analysis of the diffusion paths in the slurry infiltration process of porous media, an infiltration grouting model for porous media considering slurry diffusion paths is established according to the equation for slurry diffusion. A set of infiltration grouting simulation experiment device for porous media is designed. The slurry-cement slurry is used to obtain the spatiotemporal variation of grouting pressure under different permeabilities of grouting media and grouting rates. The results show that the calculated values of slurry grouting model are 1.1 ~ 1.3 times the experimental ones, and the error between the calculated and experimental values is within the allowable range. The model can be used to describe the diffusion process of slurry infiltration. The calculated values of the infiltration grouting model for porous media, without considering the diffusion paths of slurry, are 1.8 ~ 3.2 times the experimental ones, and the slurry pressure of the grouting diffusion process is significantly overestimated. The research results have been applied in sand layer management of Qingdao metro. Therefore, the diffusion paths of slurry should be fully considered in the design of infiltration grouting in porous media.

**Key words:** porous medium; infiltration; grouting; diffusion path; simulation test

## 0 引言

多孔介质是注浆工程需要加固的主要地层之一, 常见的多孔介质地层有砾石地层、沙层等。在多孔介质注浆过程中, 注浆材料主要为水泥浆液, 浆液扩散形式以渗透扩散为主<sup>[1-3]</sup>。由于多孔介质颗粒为刚性

体, 浆液在扩散过程中难以对介质颗粒进行压缩, 浆液扩散以围绕被注介质颗粒的“绕流”为主, 辅以挤

基金项目: 国家自然科学基金项目(41272385); 国家重点研发计划项目(2016YFC0801604)

收稿日期: 2017 - 01 - 11

密颗粒孔隙。因此, 在浆液的扩散过程中浆液扩散路径不是单纯的直线, 而是围绕被注介质颗粒的曲线扩散模式。

目前, 国内外学者对渗透注浆扩散理论进行了大量研究<sup>[4]</sup>。Saada 等<sup>[5-6]</sup>、Chupin 等<sup>[7]</sup>针对多孔介质进行试验, 建立了考虑渗滤效应的多孔介质渗透扩散机理; Kim 等<sup>[8]</sup>对多孔介质进行网络分析, 深入研究了砂柱渗透注浆扩散模型; 杨志全等<sup>[9]</sup>根据宾汉姆流体的黏度时变性, 建立了球形及柱形渗透扩散模型; 叶飞等<sup>[10-11]</sup>采用牛顿流体本构模型, 针对盾构隧道壁后注浆, 研究球面渗透扩散模型; 刘健等<sup>[12]</sup>考虑了浆液黏度时变性, 基于毛细管渗透理论, 推导了浆液扩散公式。杨坪<sup>[13]</sup>研究了砂卵石特征, 根据试验获取浆液扩散半径、加固后单轴抗压强度、注浆参数与被注介质性质的相互关系。钱自卫等<sup>[14]</sup>开展了弱胶结空隙介质化学浆液充填及减渗的基本规律。上述研究推动了多孔介质渗透注浆理论的发展, 但存在以下问题, 研究渗透注浆都是将浆液的扩散通道假定为线性通道, 浆液在多孔介质中实际的扩散路径是曲折的, 基于浆液扩散路径为线性的理论结果与工程实际存在较大误差。

本文基于对多孔介质浆液渗透过程中扩散路径分析, 根据浆液扩散运动方程, 选用工程实际常用浆液流型—牛顿流体, 建立了考虑浆液扩散路径的多孔介质渗透注浆模型; 并设计一套多孔介质渗透注浆扩散模拟实验装置, 采用常规注浆材料—硅酸盐水泥, 获得不同被注介质渗透率及不同注浆速率下的注浆压力的时空变化规律, 对考虑浆液扩散路径的理论计算结果、不考虑浆液扩散路径的理论计算结果及试验结果的进行分析对比验证, 同时, 该研究成果在青岛地铁砂层治理中成功应用, 为多孔介质渗透注浆工程实践提供必要的理论依据。

## 1 考虑浆液扩散路径的多孔介质渗透注浆理论模型

### 1.1 渗透注浆理论模型假设条件

(1) 浆液是均质的、不可压缩的流体, 且忽略浆液的重力。

(2) 浆液在扩散过程中为完全渗透模式, 忽略渗滤效应对其影响, 浆液黏度不随时间变化。

(3) 浆液为牛顿流体, 浆液流动为层流运动。

(4) 多孔介质为均质的, 各向同性的。

### 1.2 考虑浆液渗透路径分析

选取工程常用注浆材料水泥浆液, 水灰比为1:1, 试验测得浆液黏度为11.37 MPa·s。图1所示为浆液在

多孔介质中流动示意图, 假定浆液的流动方向为水平方向,  $l_1$ 为孔隙通道的实际路线长度;  $l_0$ 为孔隙的直线距离, 由图中可以看出, 浆液在多孔介质中的流动大多都不是水平直线流动, 而且沿着多孔介质的颗粒空隙曲线流动的。

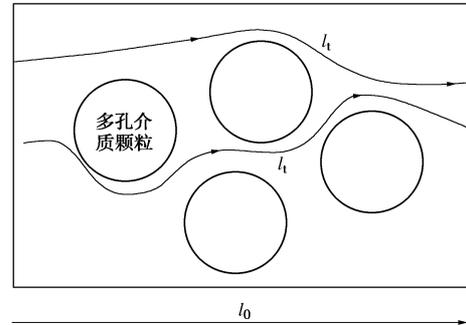


图1 浆液在多孔介质中流动示意图

Fig. 1 Sketch of grout flow in porous media

根据哈根—泊萧叶公式可得, 单位时间内通过单个孔隙的浆液流量为

$$q(r) = \frac{\pi}{8} \cdot \frac{\Delta p}{l_1} \cdot \frac{r^4}{\mu} \quad (1)$$

式中,  $\Delta p$  为截面压力差,  $\mu$  为浆液黏度,  $l_1$  为孔隙通道的实际长度,  $l_0$  为孔隙的直线距离。

假定一个单元体由  $N$  个孔隙通道组成, 单元体的浆液总流量  $Q$  为

$$Q = N \frac{\pi}{8} \cdot \frac{\Delta p}{l_1} \cdot \frac{r^4}{\mu} \quad (2)$$

由达西定律可得

$$Q = K A \Delta p / \mu l_1 \quad (3)$$

式中,  $K$  为渗透系数,  $A$  为截面面积。

该单元的孔隙度为

$$\phi = \frac{V_{\text{孔隙}}}{V_{\text{总}}} \quad (4a)$$

$$V_{\text{孔隙}} = N \pi r^2 l_1 \quad (4b)$$

$$V_{\text{总}} = A l_0 \quad (4c)$$

将式(4a)、(4b)、(4c)整体代入式(2)、(3)的合并式可得

$$\frac{l_1}{l_0} = \frac{\phi r^2}{8K} \quad (5)$$

孔隙通道数目  $N$  与孔隙通道直径关系可以用分形理论表示<sup>[15-16]</sup>:

$$N(\geq 2r) = (r_{\text{max}} / r)^{D_f} \quad (6a)$$

$$D_f = 2 - \frac{\ln \phi}{\ln \frac{r_{\text{min}}}{r_{\text{max}}}} \quad (6b)$$

式中,  $r_{\text{max}}$ ,  $r_{\text{min}}$  分别为孔隙通道最大半径和最小半径。

基于分形理论的孔隙度的表达式为

$$\phi = (r_{\min} / r_{\max})^{2-D_f} \quad (7)$$

对于孔隙通道的长度比率  $\eta$  有

$$\eta = l_0 / r \quad (8)$$

当表征距离  $l_0$  无限小时, 截面面积可以近似认为

$$A = l_0^2 \quad (9)$$

因此, 由文献[15~17]和式(6a)、(7)、(9)以及圆柱状面积的定义可得长度比率:

$$\eta = \frac{D_f - 1}{\sqrt{D_f}} \sqrt{\left[ \frac{1 - \phi}{\phi} \cdot \frac{\pi}{4(2 - D_f)} \right] \frac{r_{\max}}{r_{\min}}} \quad (10)$$

$$\frac{r_{\min}}{r_{\max}} = \frac{\sqrt{2}}{d^+} \sqrt{\frac{1 - \phi}{1 - 0.342\phi}} \quad (11)$$

$$D_f = 2 - \frac{\ln \phi}{\ln \left[ \frac{\sqrt{2}}{d^+} \sqrt{\frac{1 - \phi}{1 - 0.342\phi}} \right]} \quad (12)$$

式中,  $d^+$  一般取 24。

### 1.3 浆液扩散运动方程

根据高等渗流力学<sup>[18]</sup>, 牛顿流体管道内浆液扩散运动方程为

$$\bar{v} = -\frac{b^2}{8\mu} \frac{1}{dl} \frac{dp}{dl} \quad (13)$$

式中  $\bar{v}$  为平均流速;  $\mu$  为浆液的表现黏度;  $\phi$  为介质孔隙率;  $b$  为渗流通道半径;  $S$  为浆液扩散断面面积;  $q$  为注浆速率;  $dl$  为微元体长度;  $-dp/dl$  为浆液压力梯度。

被注介质内任一点的渗流速度  $v$  与该点处渗流管道平均流速及被注介质孔隙率满足

$$v = \phi \bar{v} \quad (14)$$

在恒定注浆速率条件下, 浆液流速也维持恒定, 满足

$$q = Sv \quad (15)$$

式中,  $v$  为扩散距离  $l$  处的渗流速度。

联立式(5)、(8)、(10)~(15)得浆液扩散区内压力梯度:

$$\frac{dp}{dl} = -\frac{8q\eta}{S\phi l_0^2} \mu \quad (16)$$

令  $l=0$ , 得注浆压力  $p_c = p_0$ , 得被注介质内压力时空分布方程:

$$p_c = \int_0^{l_t} \left( -\frac{8q\eta}{S\phi l_0^2} \mu \right) dl + p_0 \quad \left( l_t \leq \frac{\phi l_0^3}{8\eta K} \right) \quad (17)$$

式中,  $q$  为注浆流量,  $K$  为被注介质渗透系数,  $\phi$  为介质孔隙率,  $p_0$  为初始压力。

将  $l_t = \phi l_0^3 / 8\eta K$  代入式(17)得注浆压力与浆液扩散距离的关系:

$$p_c = \int_0^{\frac{\phi l_0^3}{8\eta K}} \left( -\frac{8q\eta}{S\phi l_0^2} \mu \right) dl + p_0 \quad (18)$$

式中,  $p_c$  为注浆压力。

## 2 多孔介质渗透注浆模拟试验

### 2.1 试验装置

基于考虑浆液扩散路径, 研究不同注浆压力、不同被注砂层有效粒径条件对注浆浆液扩散的相应机制, 选取工程常用注浆材料水泥浆液, 水灰比为 1:1, 设计了一套渗透注浆扩散模拟试验装置。见图 2, 3。

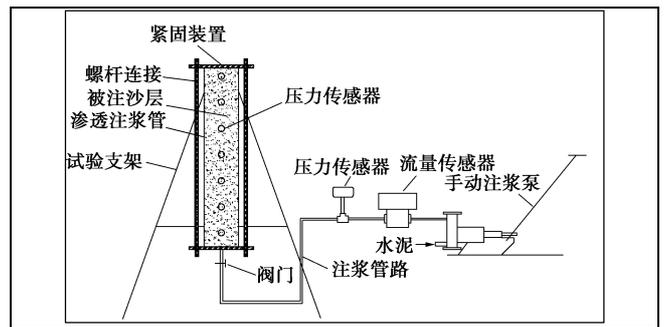


图 2 试验装置示意图

Fig. 2 Diagram of test devices



图 3 渗透注浆模拟试验系统

Fig. 3 Infiltration grouting simulation test system

其中透明有机玻璃管选用 PMMA 管, 可以承受 10 MPa 压力。透明有机玻璃管竖直方向布置, 渗透注浆管长度为 2 m, 内径为 10 cm, 被注介质填充于有机玻璃管内, 浆液扩散方向为沿有机玻璃管自下而上渗透。

浆液压力采用 XL2101G60 静态电阻应变仪连接渗压传感器, 在渗透注浆管上, 距离出浆口位置 20, 50, 80, 110, 140, 170 cm 分别设有渗压传感器, 测量该点的压力。对注浆过程中渗透注浆管内不同位置处的压力进行监测。



图 4 渗透注浆模拟试验被注砂样

Fig. 4 Sand samples of infiltration grouting simulation tests

2.2 试验方案

试验中的被注介质选择 3 种不同粒径级配的砂 (见图 4), 被注介质试验环境为无水环境, 通过《土工试验方法标准》<sup>[17]</sup>及常水头渗透试验<sup>[17]</sup>分别测定被注介质的孔隙率和渗透系数。

试验测得 3 种被注介质物理力学参数如表 1 所示。

表 1 被注介质物理力学参数

Table 1 Parameters of grouted media

被注介质 编号	粒径范围 /mm	孔隙率 $\phi/\%$	渗透系数 $k/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$
1	0.5~1	36.4	$2.218\times 10^{-2}$
2	1~2	37.4	$5.857\times 10^{-2}$
3	2~5	38.5	$1.512\times 10^{-1}$

本试验设计为恒速率注浆方式, 设计注浆速率分别为 4, 5, 6 L/min。基于本试验有被注介质渗透系数及注浆速率两个参数, 为明确每个参数对于注浆扩散的影响, 设计以下 5 组注浆试验 (见表 2), 其中工况 1, 2 和 3 为相同被注介质渗透系数下, 注浆速率对浆液扩散的影响, 工况 2, 4 和 5 为相同注浆速率下, 被注介质渗透系数对浆液扩散的影响。

表 2 试验工况

Table 2 Test conditions

工况编号	注浆速率 $/(L\cdot\text{min}^{-1})$	被注介质渗透系数 $/(cm\cdot s^{-1})$
1	4	$5.857\times 10^{-2}$
2	5	$5.857\times 10^{-2}$
3	6	$5.857\times 10^{-2}$
4	5	$2.218\times 10^{-2}$
5	5	$1.512\times 10^{-1}$

由于试验中浆液泵送采用手动注浆泵, 不可避免地会导致注浆速率有一定的波动性, 试验中认为注浆速率波动不超过 10%即为恒定注浆速率, 整个注浆过程持续时间为 2 min。

2.3 试验结果及分析

(1) 注浆参数对浆液压力影响分析

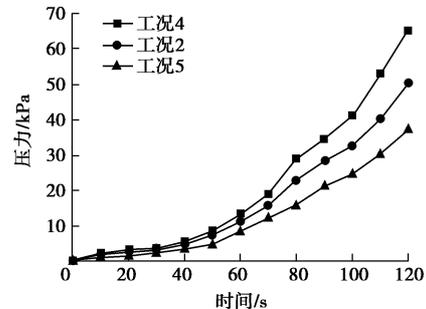
根据试验条件, 对不同粒径的沙进行注浆试验, 试验过程中, 渗透注浆管壁浆液锋面与被注介质浆液扩散锋面基本保持一致, 说明本试验注浆扩散符合渗透注浆理论模型假设条件。采集渗透注浆管内压力传感器的数据, 取浆液渗透扩散充满注浆管, 即扩散距离  $L=0\text{ cm}$  时的不同时刻的浆液压力变化情况如图 5。

分析图 5 可知:

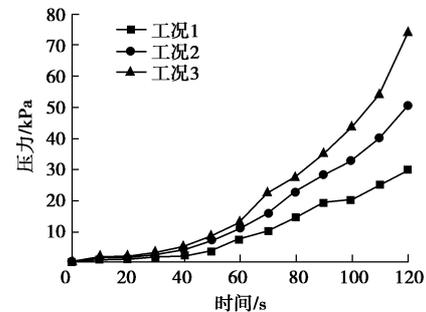
a) 浆液压力随时间变化出现线性增长, 随着注浆时间的增加, 注浆压力随之增加, 增长速率越来越明显, 分析原因为: 浆液为水泥浆液, 没有黏度时变性, 浆液压力产生的主要原因为被注介质本身对浆液的阻力, 随着注浆时间的增长, 对浆液产生阻力的被注介质随之线性增加, 浆液压力线性增加。

b) 不同孔隙率的被注介质及不同注浆速率对浆液压力影响明显, 孔隙率对浆液压力呈现负相关, 注浆速率对浆液压力呈现正相关, 同时发现, 注浆速率的影响程度偏大。

c) 被注介质的孔隙率及注浆速率对浆液压力的影响有差异性, 但其函数形式表现出一致性。



(a) 工况4, 2, 5



(b) 工况1, 2, 3

图 5 不同工况浆液压力时间分布

Fig. 5 Spatial distribution of slurry pressure under different conditions

(2) 浆液压力时空变化分析

注浆过程中, 离注浆孔距离  $L=0, 20, 50, 80, 110, 140, 170\text{ cm}$  七处测点的压力随注浆时间的变化如图 6(a) 所示,  $r=0\text{ cm}$  即代表注浆孔处的浆液压力; 不同时刻浆液扩散区内浆液压力自注浆孔的空间衰减规律如图 6(b) 所示。试验显示, 数据均为被注介质粒径为 1~2 mm 的沙层不同时刻的浆液压力随扩散距离的关系。

分析图 6 可知:

a) 随着距离出浆口位置的增加  $L=0\sim 170\text{ cm}$ , 所测的浆液压力的增加规律基本相同, 分析原因为: 由于浆液为水泥浆液, 注浆持续时间为 120 s, 浆液的黏度变化基本可以忽略, 不考虑浆液变化因素, 各处的点相互独立, 即都可以看做从浆液到达该点处开始出现压力, 且各点处相互独立。

b) 同一时刻, 浆液压力呈线性衰减。浆液压力产生的主要原因为被注介质本身对浆液的阻力, 随着注浆时间的增长, 对浆液产生阻力的被注介质随之线性增加, 注浆压力线性衰减。

c) 随着注浆时间的增加, 浆液压力的增加呈非线性, 分析原因为浆液渗透进入被注介质, 对其孔隙进行填充, 降低了流动浆液与被注介质颗粒的摩擦, 产生的阻力相应的降低。

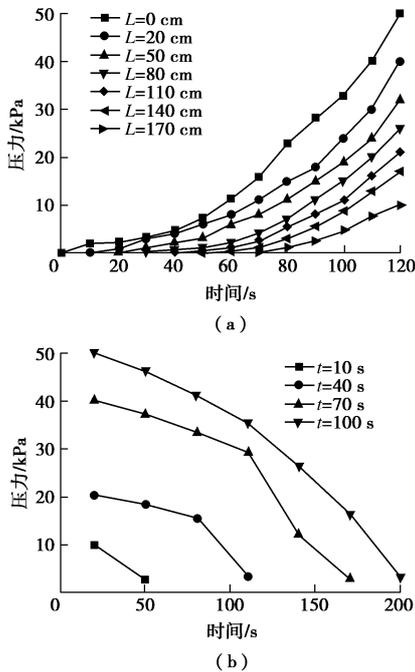


图6 不同位置和时刻浆液压力时间分布

Fig. 6 Spatial distribution of slurry pressure at different positions and time

### 3 理论与试验结果对比

#### 3.1 未考虑浆液渗透路径的理论分析结果

根据高等渗流力学, 被注介质的渗透率  $k$  与渗流通道半径  $b$  满足:

$$k = \phi b^2 / 8 \quad (19)$$

不考虑浆液渗流路径的浆液扩散, 则联立方程 (13) ~ (15)、(19) 可得

$$\frac{dp}{dl} = -\frac{q\mu k}{S} - \frac{8\tau_0}{3} \sqrt{\frac{8k}{\mu}} \quad (20)$$

令  $l=0$ , 得注浆压力  $p_c = p_0$ , 得被注介质内压力时空分布方程:

$$p_c = \int_0^l \left[ -\frac{q\mu k}{S} - \frac{8\tau_0}{3} \sqrt{\frac{8k}{\mu}} \right] dl + p_0 \quad (21)$$

#### 3.2 试验结果与理论对比分析

对试验的参数进行测试计算, 将试验结果与考虑浆液渗透路径的理论计算结果以及不考虑浆液渗透路径的理论计算结果进行对比分析, 验证理论的科学性。渗透注浆模拟试验所对应的各项计算参数如表3所示。

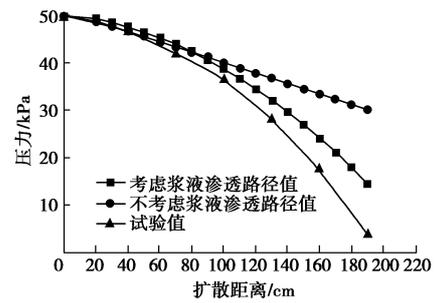
将上述工况 1~5 计算参数带入式 (20)、(23), 分别得到考虑浆液渗透路径和不考虑浆液渗透路径的注浆压力随扩散距离的关系曲线如图7所示。

表3 计算参数

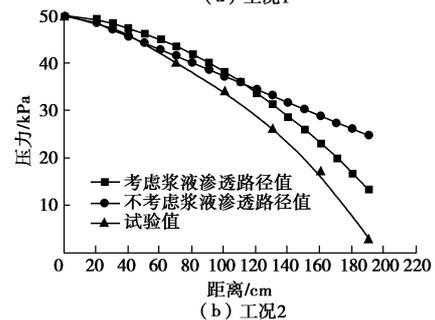
Table 3 Calculation parameters

工况编号	$q/(L \cdot \min^{-1})$	$K/(10^{-2} \text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	$\phi$	$S/\text{m}^2$	$P_0/\text{kPa}$
1	4	5.857	0.374		
2	5	5.857	0.374		
3	6	5.857	0.374	0.00785	50
4	5	2.218	0.364		
5	5	15.12	0.385		

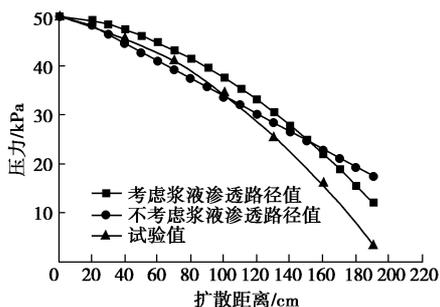
分析图7可知: 注浆初始时间段, 由于浆液压力变化较为平缓, 两种模型的计算结果与试验结果吻合较好, 无显著误差。随着浆液扩散距离的增加, 两种模型的浆液压力差值逐渐增大, 函数形式有明显区别, 不考虑浆液渗透路径的模型压力呈线性衰减, 衰减较慢; 考虑浆液渗透路径的模型压力呈增长性线性衰减, 衰减较快, 且与试验数据吻合更好。当扩散距离为 200 cm 时, 不考虑浆液渗透路径的模型浆液压力为为注浆试验压力的 1.8~3.2 倍; 考虑浆液渗透路径的模型所得注浆压力与试验结果函数形式较为吻合, 同时, 浆液压力值为试验值的 1.1~1.3 倍之间, 计算值与试验值的误差在可接受范围内, 故考虑浆液渗透路径对指导注浆设计有重要意义。



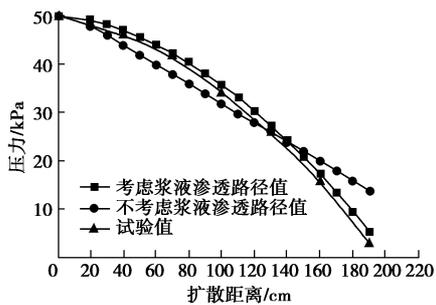
(a) 工况1



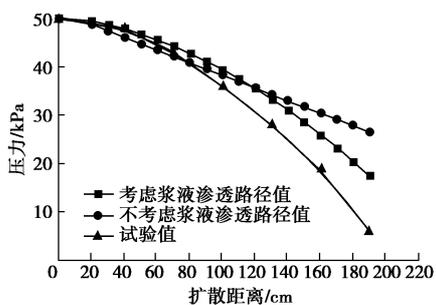
(b) 工况2



(c) 工况3



(d) 工况4



(e) 工况5

图 7 两种理论计算结果与试验数据对比(压力)

Fig. 7 Comparison between test and theoretical results (pressure)

分析考虑渗透路径的模型与不考虑渗透路径的多孔介质渗透注浆扩散模型浆液压力变化的区别主要有以下 2 点: ①考虑渗透路径的浆液扩散过程中, 扩散路径相对增加, 浆液压力衰减更为迅速; ②与不考虑渗透路径的浆液扩散过程相比, 考虑浆液渗透路径的过程中浆液需克服被注介质的碰撞阻力, 浆液压力衰减更快。

### 4 工程应用

青岛地铁啤酒城站—苗岭路站左右线 ZSK39+263.26—ZSK39+255.56, YSK39+263.96—YSK39+250.56, 埋深为 11.0~12.0 m。长度总计 21.101 m, 依据地勘资料本段主要地层介质包括第四系表土层、粗砾砂层, 该段地铁穿经粗粒砂层, 由于砂层黏结强度低, 作为隧道结构的拱顶及侧墙岩层时自稳性差, 易出现坍塌、掉块。同时, 该段地处香港路正下方, 香港路交通繁忙, 车流量大, 在支护及防水措施选择不当或不及时的情况下, 砂层会与水一起涌出, 在地面汽车动荷载的影响下会导致地面坍塌或下陷; 同时香港路地下热力、燃气等管线密集, 对地表隆起要求极高。

基于青岛地铁啤酒苗区间工程实际, 水泥—水玻璃浆液以劈裂加固为主, 极易造成地表隆起, 化学浆液污染环境且造价较高。故采用以水泥浆液的渗透注浆进行加固。前期加固采用经验方法, 注浆扩散半径选为 2 m, 开挖出现二次涌水溃沙。

后续采用基于本文研究的注浆设计方法, 对该段粗粒砂层取样进行粒度分析, 测试结果显示, 该砂层有效直径为 1.5 mm, 孔隙率为 0.374, 渗透系数为  $5.7 \times 10^{-2}$  cm/s, 基于管线隆起控制, 最大注浆压力不超

过 0.8 MPa; 根据韩伟伟<sup>[2]</sup>等研究, 水泥单液在沙层中达到目标加固强度的最低注浆压力为 0.3 MPa, 即注浆加固体渗透系数为  $1 \times 10^{-6}$  cm/s, 单轴抗压强度为 0.4 MPa 的注浆管采用  $\phi 50$ 。根据式 (18), 初始压力为 0.8 MPa, 扩散半径为 1.45 m 时, 浆液压力为 0.3 MPa, 即浆液有效扩散范围为 1.45 m, 故注浆扩散半径选为 1.45 m。



图 8 注浆加固后开挖图

Fig. 8 Excavation after grouting reinforcement

对该区段进行注浆治理后(图 8), 地表沉降监测结果表明, 注浆过程中该段地表隆起 7 mm; 对渗透注浆加固后取样进行单轴抗压强度和渗透性测试发现, 实际测试注浆加固体单轴抗压强度和渗透系数与设计值误差在 10% 以下。水泥单液渗透注浆不仅加固了隧道拱顶砂层, 更极好的控制了地表变形, 保证了工程安全进行。

### 5 结 论

(1) 针对多孔介质浆液扩散过程中扩散路径分析, 基于浆液扩散运动方程, 建立了考虑浆液渗透路径的多孔介质浆液扩散模型。

(2) 设计了一套多孔介质渗透注浆扩散模拟实验装置, 并采用常规注浆材料—水泥浆液, 获得不同被注介质渗透率及不同注浆速率下的注浆压力的时空变化规律。

(3) 考虑浆液渗透路径的多孔介质浆液扩散模型计算值为试验值的 1.1~1.3 倍, 相对误差在允许的范围之内, 文中所建模型可较好的描述了浆液渗透扩散过程。

(4) 在注浆设计时, 不考虑浆液渗透路径的多孔介质浆液扩散时的计算会引起较大误差, 模型计算值为试验值的 1.8~3.2 倍。研究成果在青岛地铁的成功应用证明, 在多孔介质渗透注浆扩散设计中充分考虑浆液渗透路径有重要意义。

#### 参考文献:

[1] 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. (KUANG Jian-zheng, ZAN Yue-wen, WANG Jie, et al. Theory and project example

- of grout in geotechnical engineering[M]. Beijing: Science Press, 2001. (in Chinese))
- [2] 韩伟伟. 基于渗滤效应的水泥浆液多孔介质注浆机理及其工程应用[D]. 济南: 山东大学, 2014. (HAN Wei-wei. Grouting mechanism and engineering application of cement grout in porous media based on percolation effect[D]. Jinan: Shandong University, 2014. (in Chinese))
- [3] 阮文军. 注浆扩散与浆液若干基本性能研究[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(1): 69 - 73. (RUAN Wen-jun. Research on diffusion of grouting and basic properties of grouts[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(1): 69 - 73. (in Chinese))
- [4] 李术才, 刘人太, 张庆松, 等. 基于黏度时变性的水泥-玻璃浆液扩散机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(12): 2415 - 2421. (LI Shu-cai, LIU Ren-tai, ZHANG Qing-song, et al. Research on C-S slurry diffusion mechanism with time-dependent behavior of viscosity[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **32**(12): 2415 - 2421. (in Chinese))
- [5] SAADA Z, CANOU J, DORMIEUX L, et al. Evaluation of elementary filtration properties of a cement grout injected in a sand[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2006, **43**(12): 1273 - 1289.
- [6] CHUPIN O, SAIYOURI N, HICHER P Y. The effects of filtration on the injection of cement-based grouts in sand columns[J]. Transport in Porous Media, 2008, **72**(2): 227 - 240.
- [7] SAADA Z, CANOU J, DORMIEUX L, et al. Modeling of cement suspension flow in granular porous media[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2005, **29**(7): 691 - 711.
- [8] KIM Y S, WHITTLE A J. Particle network model for simulating the filtration of a micro fine cement grout in sand[J]. Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering, 2009, **135**(2): 224 - 236.
- [9] 杨志全, 侯克鹏, 郭婷婷, 等. 基于考虑时变性的宾汉姆流体的渗透注浆机制研究[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2011, **43**(增刊 1): 67 - 72. (YANG Zhi-quan, HOU Ke-peng, GUO Ting-ting, et al. Study on penetration grouting mechanism based on Bingham fluid of time-dependent behavior[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2011, **43**(S1): 67 - 72. (in Chinese))
- [10] 叶飞, 苟长飞, 刘燕鹏, 等. 盾构隧道壁后注浆浆液时变半球面扩散模型[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2012, **40**(12): 1789 - 1794. (YE Fei, GOU Chang-fei, LIU Yan-peng, et al. Half-spherical surface diffusion model of shield tunnel back-filled grouts[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2012, **40**(12): 1789 - 1794. (in Chinese))
- [11] 叶飞, 苟长飞, 陈治, 等. 盾构隧道黏度时变性浆液壁后注浆渗透扩散模型[J]. 中国公路学报, 2013, **26**(1): 127 - 134. (YE Fei, GOU Chang-fei, CHEN Zhi, et al. Back-filled grouts diffusion model of shield tunnel considering its viscosity degeneration[J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, **26**(1): 127 - 134. (in Chinese))
- [12] 刘健, 张载松, 韩焯, 等. 考虑黏度时变性的水泥浆液盾构壁后注浆扩散规律及管片压力模型的试验研究[J]. 岩土力学, 2015, **36**(2): 361 - 368. (LIU Jian, ZHANG Zai-song, HAN Ye, et al. Backfilled grouting diffusion law and model of pressure on segments of shield tunnel considering viscosity variation of cement grout[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, **36**(2): 361 - 368. (in Chinese))
- [13] 杨坪. 砂卵砾石层模拟注浆试验及渗透注浆机理研究[D]. 长沙: 中南大学, 2005. (YANG Ping. Simulated grouting test and mechanism of percolation grouting in sandstone shimmering stone layer[D]. Changsha: Central South University, 2005. (in Chinese))
- [14] 钱自卫, 姜振泉, 曹丽文, 等. 弱胶结孔隙介质渗透注浆模型试验研究[J]. 岩土力学, 2013, **34**(1): 139 - 142. (QIAN Zi-wei, JIANG Zhen-quan, CAO Li-wen, et al. Experiment study of penetration grouting model for weakly cemented porous media [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(1): 139 - 142. (in Chinese))
- [15] XU Peng, YU Bo-ming. Developing a new form of permeability and Kozeny-Carman constant for homogeneous porous media by means of fractal geometry[J]. Advances in Water Resources, 2008, **31**(1): 74 - 81.
- [16] 周子龙, 杜雪明, 陈钊, 等. 考虑孔隙曲折效应的浆液扩散压力[J]. 中国有色金属学报, 2016, **26**(8): 1721 - 1727. (ZHOU Zi-long, DU Xue-ming, CHEN Zhao. Pressure grout diffusion considering the effect of porosity[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2016, **26**(8): 1721 - 1727. (in Chinese))
- [17] 孔祥言. 高等渗流力学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2010: 50 - 53. (KONG Xiang-yan. Advanced mechanics of fluids in porous media[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2010: 50 - 53. (in Chinese))
- [18] GB/T50123—1999 土工试验方法标准[S]. 1999. (GB/T50123—1999 Standard of geotechnical test method[S]. 1999. (in Chinese))