

文章编号: 1000-7598(2014)增 2-0017-08

牛顿流体柱-半球面渗透注浆形式 扩散参数的研究

杨志全¹, 侯克鹏¹, 梁 维¹, 程 涌², 杨八九²

(1. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 昆明 650093; 2. 云南亚融矿业科技有限公司, 昆明 650093)

摘 要: 文献检索表明: 目前国内外还没有一个能较准确地计算牛顿流体柱-半球面渗透注浆形式扩散参数(如半球体部分扩散半径与柱体部分扩散高度等)的理论公式, 导致理论远滞后于工程应用。以牛顿流体流变方程及渗流运动方程为基础, 研究了牛顿流体柱-半球面渗透注浆形式半球体部分扩散半径与柱体部分扩散高度的理论计算公式; 分析了牛顿流体的流变性、注浆压力、地下水压力及配置流体的水体温度对牛顿流体柱-半球面渗透注浆形式半球体部分扩散半径与柱体部分扩散高度的影响; 并设计注浆试验对其进行验证。结果表明: 由牛顿流体柱-半球面渗透注浆形式半球体部分扩散半径与柱体部分扩散高度的理论公式计算得到的半球体部分扩散半径和柱体部分扩散高度理论值与注浆试验实测值间虽有 30%左右的差异, 但它们都处于可接受误差范围内。因此, 研究成果可为实际注浆施工提供理论支撑与指导作用。

关 键 词: 牛顿流体; 柱-半球面渗透注浆; 半球体部分扩散半径; 柱体部分扩散高度

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Study of diffusion parameters of Newtonian fluid based on column-hemispherical penetration grouting

YANG Zhi-quan¹, HOU Ke-peng¹, LIANG Wei¹, CHENG Yong², YANG Ba-jiu²

(1. Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;

2. Yunnan Yarong Mining Industry Technology Co., Ltd., Kunming 650093, China)

Abstract: The retical formula of diffusion parameters of Newtonian fluid based on column-hemispherical penetration grouting is not existence, such as, diffusion radius of hemispheroid, diffusion length belongs to cylinder etc; so it lag far behind the actual grouting engineering. In this study, according to combining with the rheological equation and seepage motion equation of Newtonian fluid, theory formula of diffusion radius of hemispheroid, diffusion length belongs to cylinder based on column-hemispherical penetration grouting were deduced. Relationships between some grouting factors and them based on cylindrical penetration grouting, such as, rheology of Newtonian fluid, grout pressure, groundwater pressure and water temperature of configuration cement, were analyzed theoretically. What's more, they were validated by means of designing grouting verifying experiments. Experimental results show the theoretical diffusion radius of hemispheroid, diffusion length belongs to cylinder calculated by the formula of diffusion parameters of Newtonian fluid based on column-hemispherical penetration grouting have about 30% of the differences with the actual measurement diffusion radius by grouting experiments; but they are all within the acceptable error limits. Therefore, research achievements may not only provide strong theoretical basis for perfecting the penetration grouting mechanism, but also play a reference guiding role for the theoretical research, design and construction on grouting technique.

Key words: Newtonian fluid; column-hemispherical penetration grouting; diffusion radius of hemispheroid; diffusion length belongs to cylinder

1 引 言

注浆是一种应用非常广泛的岩土施工技术, 已

遍及建筑、公路、地铁、矿山、隧道、水电、军事、铁路、冶金、地基处理等较多实践工程领域^[1]。依据不同的流变本构方程可将注浆流体分为牛顿流

收稿日期: 2014-06-04

基金项目: 国家自然科学基金(No. 51064012, No. 51264018, No. 41402272); 云南省省级人培项目(No. KKS Y201421016); 云南省教育厅科学研究基金重点项目(No. 2014Z031)。

第一作者简介: 杨志全, 男, 1983 年生, 博士, 讲师, 主要从事岩土力学方面的研究与教学工作。E-mail: yzq1983816@163.com

通讯作者: 侯克鹏, 男, 1962 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土力学方面的研究与教学工作。E-mail: gasihou@sina.com

体、宾汉姆流体及幂律流体 3 类^[1-2]；而这些流体在被注介质或材料中的渗透注浆可表现球面、柱面及柱-半球面 3 种注浆扩散形式^[2]。

目前，国内外学者对牛顿流体的球面及柱面渗透注浆理论方面进行了较深入研究，建立了一系列渗透注浆理论公式，如 Maag 球形扩散理论公式、Raffle 球形扩散理论公式及柱形扩散理论公式^[1-4]，虽然近年来也有学者对牛顿流体的柱-半球面渗透注浆理论开展过一定的研究，但由于所推导机制公式中的一些参数物理意义不明确^[2]，因此，阻碍了其在实际注浆工程中的应用。由此可见，当前国内外还没有一个能较准确地计算牛顿流体柱-半球面渗透注浆形式半球体部分扩散半径与柱体部分扩散高度的理论公式。因此，本文开展牛顿流体柱-半球面渗透注浆形式扩散参数的理论公式研究，为实际注浆施工提供理论支撑。

2 牛顿流体柱-半球面渗透注浆形式扩散参数的理论公式

2.1 牛顿流体渗流运动方程

牛顿流体流变方程为^[2,5]

$$\tau = \eta \gamma \quad (1)$$

式中： τ 为剪切应力； η 为动力黏度； γ 为剪切速率， $\gamma = -\frac{dv}{dr}$ 。

首先研究牛顿流体在圆管中的层流流动状态。根据文献[6]，设圆管半径为 r_0 ，在圆管内取一微流体柱，其以管轴为对称轴，半径 $r < r_0$ ，长度为 dl 。假设该微流体柱段 dl 左右两端压力分布为 p 与 $p+dp$ ，因此，微流段上压差为 dp ；且表面上所受剪切应力为 τ ，其方向向左与流速方向相反，如图 1 所示。

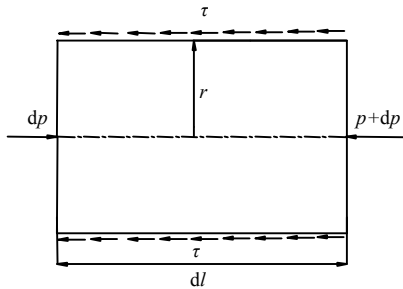


图 1 牛顿流体在圆管中的流动示意图

Fig.1 Flow diagram of Newton fluid in the circular tube

在不考虑牛顿流体重力情况下，图 1 所示的微流体柱上受力的平衡关系为

$$\pi r^2 dp + 2\pi r \tau dl = 0 \quad (2)$$

由此，微流体柱表面上所受剪切应力 τ 为

$$\tau = -\frac{r}{2} \frac{dp}{dl} \quad (3)$$

将式 (3) 代入式 (1) 可得

$$\gamma = -\frac{dv}{dr} = \frac{\tau}{\eta} = -\frac{r}{2\eta} \frac{dp}{dl} \quad (4)$$

对式 (4) 采用分离变量法求积分且考虑圆管壁处的边界条件 $r = r_0$ ， $v = 0$ 可求解得到牛顿流体在圆管道截面内运动的速度方程为

$$v = -\frac{1}{4\eta} \frac{dp}{dl} (r_0^2 - r^2) \quad (5)$$

圆管中单位时间内层流运动的牛顿流体流量 q 为

$$q = \int_0^{r_0} 2\pi r v dr \quad (6)$$

将式 (5) 代入 (6) 可得

$$q = -\frac{\pi r_0^4}{8\eta} \frac{dp}{dl} \quad (7)$$

因此，牛顿流体在圆管道横截面上的平均流速为

$$\bar{v} = \frac{q}{\pi r_0^2} = -\frac{r_0^2}{8\eta} \frac{dp}{dl} \quad (8)$$

牛顿流体在被注介质中实际运动的平均渗透速度满足式 $V = \phi \bar{v}$ ，并令^[6]

$$K = \frac{\phi r_0^2}{8\mu} \quad (9)$$

$$\beta = \frac{\eta}{\mu} \quad (10)$$

将式 (9) 与 (10) 代入 (8) 可得到牛顿流体的渗流运动方程为

$$V = \left(\frac{K}{\beta} \right) \left(-\frac{dp}{dl} \right) \quad (11)$$

式中： ϕ 为被注介质或材料的孔隙率； V 为牛顿流体在被注介质中实际运动的平均渗流速度； μ 为水的黏度。

2.2 牛顿流体柱-半球面渗透注浆形式扩散参数的理论公式

根据文献[6-7]，本文在研究牛顿流体柱-半球面渗透注浆形式扩散参数理论公式时，提出如下假设：

(1) 牛顿流体为不可压缩且在注浆过程中流型保持不变。

(2) 流速较小, 流体除在注浆孔周围局部的很小区域流态呈紊流状态外其余皆为层流。

(3) 采用填压法注浆, 牛顿流体通过非完整孔或自上而下分段注浆注入被注介质或材料。

(4) 牛顿流体的重力影响作用在注浆过程中忽略不计。

(5) 被注介质或材料满足各向同性与均质。

探讨牛顿流柱-半球面渗透注浆形式扩散参数理论公式时采用的扩散理论模型见图 2。

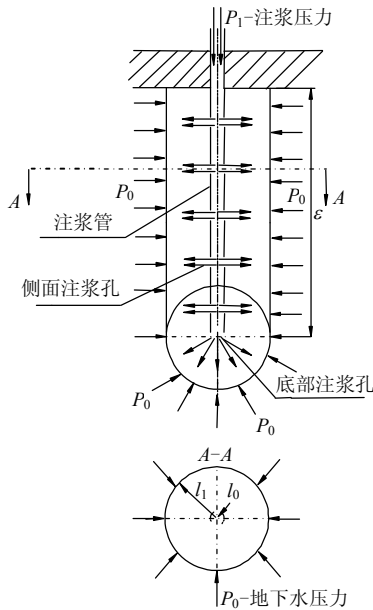


图 2 牛顿流体的柱-半球面扩散理论模型

Fig.2 Column-hemispherical diffusion theory model of Newton fluid

在图 2 中, p_1 为注浆压力; p_0 为注浆点处地下水压力; l_1 为第 t 时刻牛顿流体在半球体部分的扩散半径; l_0 为注浆管半径; m 为 t 时刻牛顿流体在柱体部分的扩散高度。

由牛顿流体在被注介质中的平均渗透速度满足 $V = \frac{q}{A}$, 则由 (11) 得

$$dp = -\frac{q\beta}{AK}dl \quad (12)$$

式中: A 为牛顿流体注浆扩散的总表面积。图 2 所示的牛顿流体柱-半球面扩散理论模型的扩散总表面积 A 为

$$A = 2\pi l(l + m) \quad (13)$$

据文献[8], 在图 2 所示的理论扩散模型中, 柱体部分扩散高度与半球体部分扩散半径间具有以下

的关系:

$$m = \frac{2l}{3}(2g + 1) \quad (14)$$

式中: g 为注浆管侧面的注浆孔数目。

将式 (13)、(14) 代入式 (12) 得

$$dp = -\frac{3q\beta}{2\pi(5+4g)K}l^2dl \quad (15)$$

式 (15) 采用分离变量法求积分且考虑注浆边界条件: 即 $p = p_1$ 时, $l = l_0$; $p = p_0$ 时, $l = l_1$, 得

$$\Delta p = p_1 - p_0 = \frac{3q\beta}{2\pi(5+4g)K} \left(\frac{1}{l_0} - \frac{1}{l_1} \right) \quad (16)$$

又因为注浆量满足:

$$Q = \phi \pi l_1^2 \left(m + \frac{2}{3}l_1 \right) = \frac{4\phi\pi(g+1)}{3}l_1^3 = qt \quad (17)$$

将式 (17) 代入式 (16), 可得

$$\Delta p = p_1 - p_0 = \frac{2(g+1)\phi l_1^3 \beta}{(5+4g)tK} \left(\frac{1}{l_0} - \frac{1}{l_1} \right) \quad (18)$$

在实际注浆实践工程中, 因 $l_1 \gg l_0$, 也即 $\frac{1}{l_0} - \frac{1}{l_1} \approx \frac{1}{l_0}$, 则式 (18) 化简为

$$\Delta p = p_1 - p_0 = \frac{2(g+1)\phi l_1^3 \beta}{(5+4g)tKl_0} \quad (19)$$

式 (14) 与 (19) 分别为牛顿流体柱-半球面渗透注浆形式柱体部分扩散高度与半球体部分扩散半径的理论计算公式, 即由式 (19) 求得牛顿流体柱-半球面渗透注浆形式的半球体部分理论扩散半径后, 代入 (14) 便可得到其柱体部分扩散高度的理论值。

3 公式参数确定及适用范围

3.1 公式确定参数

对求解式 (14) 与 (19) 需获取各个参数的确定方法如下:

孔隙度 ϕ 为被注介质或材料中孔隙体积与总体积二者的比例, 可采用下式求得

$$\phi = \frac{\gamma_s(1+\omega) - \gamma}{\gamma_s(1+\omega)} \quad (20)$$

式中: ω 为被注介质或材料含水率; γ 为天然重度; γ_s 为其土粒容重。它们可依据文献[9]测定。

被注介质或材料的渗透系数 K 反映了其渗透特

性,可采用室内或野外现场测定方法确定,但为真实地反映被注介质或材料的渗透性,常采用现场注水试验的方法获得。

牛顿流体的动力黏度 η 可采用以下两种方法中的一种获得:

(1)依据目前已取得的牛顿流体的流变特征研究成果获取,如文献[6, 9-10]等。

(2)采用毛细管黏度计或旋转黏度计等流体黏度计进行测量、分析与计算获取。

注浆时间 t 与注浆管上侧面注浆孔数目 g 可根据实际工程情况或现场经验设计选取,而注浆管半径 l_0 可采用直接测定多次并取平均值确定。

在获得被注介质或材料的孔隙度 ϕ 与渗透系数 K 基础上,通过查询不同温度下水的黏度 μ 值,依据式(9)计算得到 r_0 ,再由式(10)计算得到 β 参数值。

至此,式(19)需要获取的各个参数均完全确定,在已知注浆压力与注浆点地下水压力差 Δp 的条件下,能求解得到牛顿流体在被注介质或材料中的柱-半球面渗透注浆的理论扩散半径 l_1 ;由式(14)可求得柱体部分的扩散高度 m 。

3.2 适用范围

牛顿流体柱-半球面渗透注浆形式半球体部分扩散半径与柱体部分扩散高度的理论计算公式是以流体为层流运动状态为基础开展推导,因此,对于紊流不适用。

据文献[5, 12],牛顿流体的层流或紊流状态采用雷诺数 Re 来确定。当 $Re > 4000$ 时,牛顿流体为紊流状态;当 $2000 < Re < 4000$ 时,牛顿流体是紊流与层流的混合流状态,而当 $Re < 2000$ 时,牛顿流体表现为层流态。 Re 可通过下式计算获得:

$$Re = \frac{\bar{v}d}{\eta} \quad (21)$$

式中: $\bar{v}$ 为牛顿流体在被注介质与材料中运动的平均速度; d 为流体运动范围尺寸(如:管径,在本文中指流体在被注介质中通过的孔隙尺寸); η 代表的意义同上。

4 数值分析

假设某砾石土地基渗透系数 $K = 1.5 \text{ cm/s}$,孔隙度 $\phi = 0.45$,注浆管半径 $l_0 = 3 \text{ cm}$ 。在该地层开展牛顿流体柱-半球面形式渗透注浆过程中,牛顿流体流变性(牛顿水泥浆液水灰比,它们的流变方程参考文献[10]的研究成果)、注浆压力、地下水压力及配置浆液的水体温度对半球体部分扩散半径与柱

体部分扩散高度的影响。这4种因素对其的影响效果分别见图3~6。

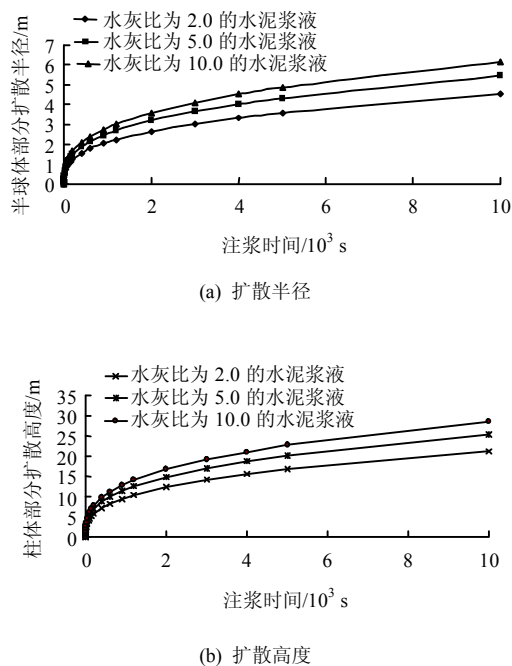


图3 牛顿水泥浆液水灰比对半球体部分扩散半径与柱体部分扩散高度的影响

Fig.3 Effects of water cement ratio of Newton fluid on diffusion radius of hemispheroid, diffusion length belongs to cylinder based on column-hemispherical penetration grouting

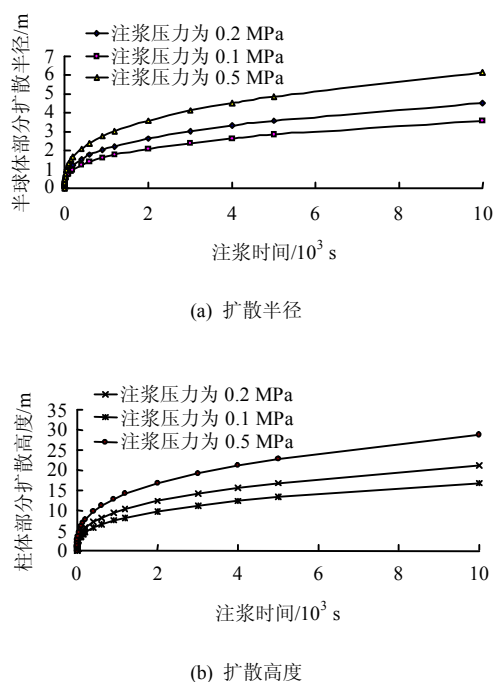
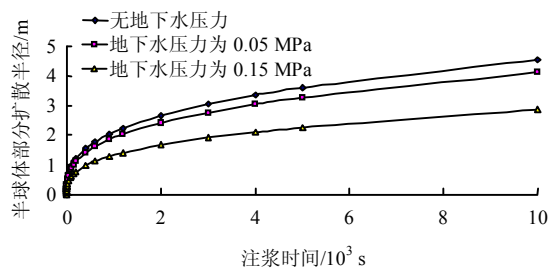
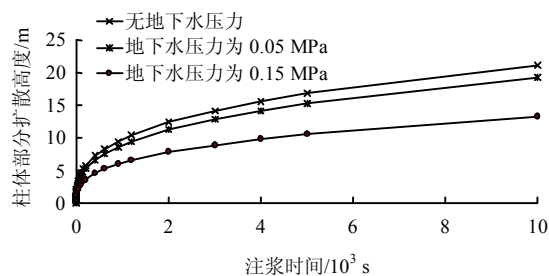


图4 注浆压力对半球体部分扩散半径与柱体部分扩散高度的影响

Fig.4 Effects of grout pressure on diffusion radius of hemispheroid, diffusion length belongs to cylinder based on column-hemispherical penetration grouting



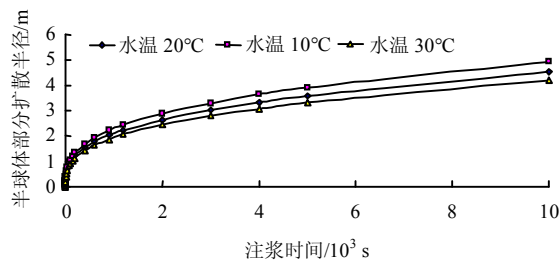
(a) 扩散半径



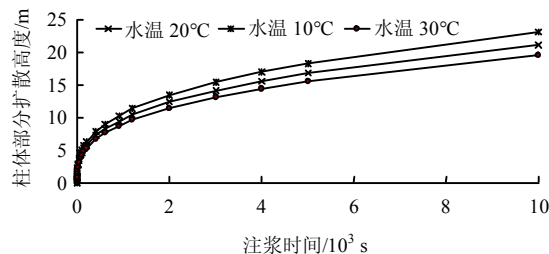
(b) 扩散高度

图 5 地下水压力对半球体部分扩散半径与柱体部分扩散高度的影响

Fig.5 Effects of groundwater pressure on diffusion radius of hemispheroid, diffusion length belongs to cylinder based on column-hemispherical penetration grouting



(a) 扩散半径



(a) 扩散高度

图 6 配置浆液的水体温度对半球体部分扩散半径与柱体部分扩散高度的影响

Fig.6 Effects of water temperature of configuration cement on diffusion radius of hemispheroid, diffusion length belongs to cylinder based on column-hemispherical penetration grouting

分析图 3~6 可得到以下结论:

(1) 随着注浆时间的增长, 牛顿水泥浆液在被注介质中的半球体部分扩散半径与柱体部分扩散高度不断增大。它们的增长幅度都随注浆时间的增长逐渐变缓, 注浆前期的增长幅度大于后期, 且都逐渐靠近一渐近线。

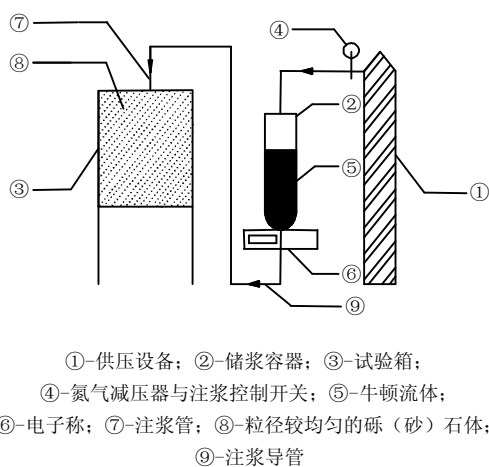
(2) 牛顿流体流变性、注浆压力、地下水压力及配置流体的水体温度对半球体部分扩散半径与柱体部分扩散高度具有重要影响。牛顿流体的水灰比与注浆压力越大, 其半球体部分扩散半径与柱体部分扩散高度也越大; 但它们均随地下水压力及配置流体的水体温度的增大而减小。

5 验证试验

为验证本文研究的牛顿流体柱—半球面渗透注浆形式半球体部分扩散半径与柱体部分扩散高度的理论计算公式, 笔者设计室内注浆试验对其开展验证。

5.1 注浆试验装置

本文采用如图 7 所示的注浆试验装置。



①-供压设备; ②-储浆容器; ③-试验箱;
④-氮气减压阀与注浆控制开关; ⑤-牛顿流体;
⑥-电子称; ⑦-注浆管; ⑧-粒径较均匀的砾(砂)石体;
⑨-注浆导管

图 7 注浆试验装置示意图

Fig.7 Schematic diagram of grouting experiments device

图 7 所示的注浆试验装置由供压装置、储浆容器和试验箱 3 部分组成。试验箱是用来放置被注介质的设备, 是完成注浆整个试验过程的装置。供压装置采用有压氮气为注浆提供注浆压力, 且通过调节氮气减压阀与注浆控制开关可实现对注浆试验过程中注浆压力与注浆时间的精确定量控制。储浆容器用来盛装牛顿流体, 在注浆过程中, 通过电子称可较精确测量在整个注浆试验过程中注入被注介质的牛顿流体量。注浆试验装置实物图见图 8。

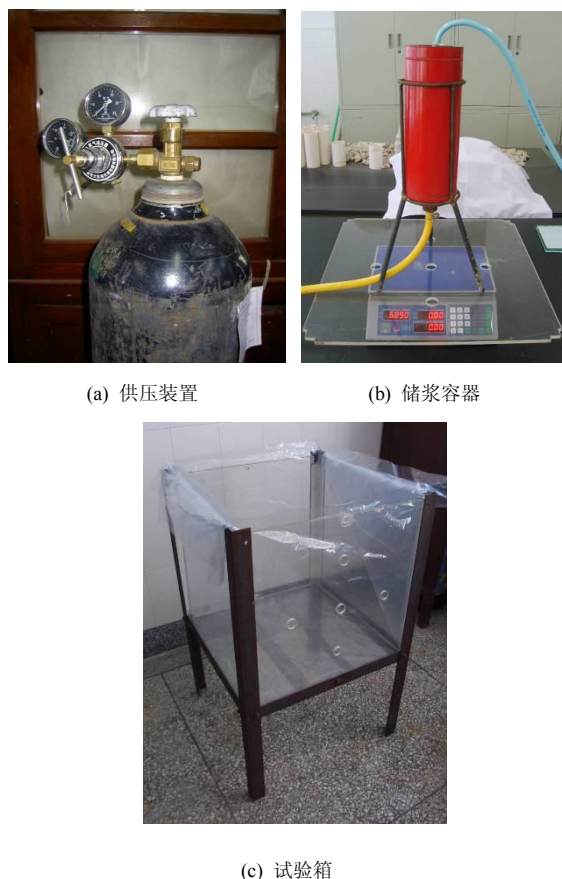


图 8 注浆试验装置实物图

Fig.8 Physical photos of grouting experiments device

5.2 注浆材料与被注介质

注浆材料选用昆明水泥厂生产的标号为 32.5 的普通硅酸盐水泥。该标号水泥在目前工程上作为注浆材料被广泛运用。在本文的验证试验中,分别配置水灰比为 2.0、5.0 与 10.0 的水泥浆液,据文献[9]可知,这 3 种水泥浆液为典型的牛顿流体。它们各自的流变方程可见文献[10]中的研究成果。

本文选取颗粒粒径分别分布在 5~10、3~5 及 1~3 mm 范围的砾(砂)石体作为验证试验的被注介质。为使这 3 种被注的砾(砂)石体最大限度满足本文作出的均质与各向同性的假设,注浆试验开展前在清水中均洗淘 3 次。

3 种被注砾(砂)石体的基本性质参数见表 1。

表 1 3 种被注砾(砂)石体基本性质参数

Table 1 Basic character parameters of three grouted gravel (sand) stone body

被注砾(砂) 石体颗粒级配 /mm	比重 G_s	渗透系数 K /(cm/s)	孔隙度 Φ /%	本文 标号
1~3	1.82	0.65	39.93	材料 1
3~5	2.07	2.11	45.05	材料 2
5~10	2.33	8.94	50.74	材料 3

5.3 注浆验证试验

5.3.1 试验设计

本文设计的注浆验证试验见表 2。开展试验的室内环境温度及配置水泥浆液的水温均为 20℃ (20℃时,水的黏度 $\mu = 1.01 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$) ; 试验采用的注浆管均为直径为 15 mm 的 PVC 管,注浆管侧面设计的注浆孔个数为 2 个,即 $g = 2$,其底部与侧面注浆孔半径都为 7.5 mm; 注浆管底部注浆孔与相邻侧面注浆孔间的距离等于每相邻两侧面注浆孔间的距离,即 $L = X$,其分布见图 9。

表 2 注浆麻验设计参数

Table 2 Design parameters of grouting experiments

试验 编号	牛顿水泥浆 液的水灰比	被注 介质	注浆压力 /m	注浆时间 /s
G1	10.0	材料 1	4.08	8
G2	5.0	材料 2	6.12	6
G3	2.0	材料 3	8.16	4

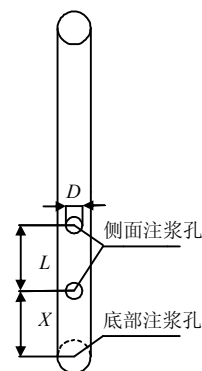
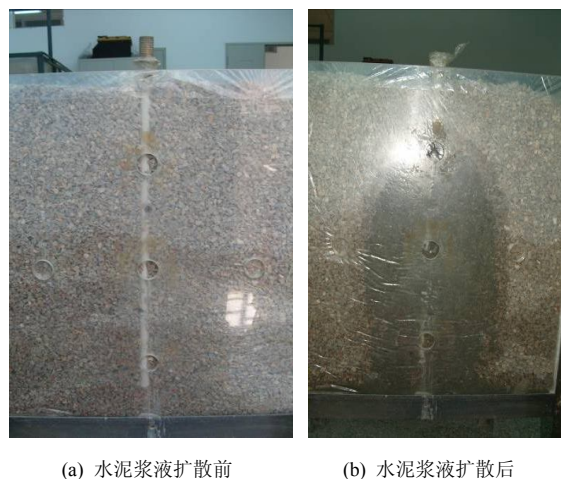


图 9 注浆管上注浆孔分布示意图

Fig.9 Grout pore distribution diagram of grouting pipe

注浆验证试验过程的实物照片见图 10。



(a) 水泥浆液扩散前

(b) 水泥浆液扩散后

图 10 注浆试验过程实物图片

Fig.10 Physical photos of grouting experiments process

5.3.2 牛顿水泥浆液流动状态的判断

在开展以上设计的注浆试验前, 首先必须采用式(21)判定牛顿型水泥浆液在被注砾(砂)石体中的流动状态。

对表 2 中的注浆验证试验, 先计算在配置好水泥浆液瞬间其在注浆管流动的雷诺数 Re_b : 水灰比为 10.0 水泥浆液的 $Re_{10.0b} = 167.83$, 水灰比为 5.0 水泥浆液的 $Re_{5.0b} = 505.17$; 而水灰比 2.0 的水泥浆液的 $Re_{2.0b} = 944.41$; 随着这 3 种水泥浆液被注入砾(砂)石体, 其运动黏度逐渐变大, 引起浆液在砾(砂)石体可流动的孔隙尺寸及平均运动速度均逐步减小, 则导致在注浆过程中水泥浆液的瞬时雷诺数 Re 也相应逐步降低, 即在注浆过程中, 水灰比分别为 10.0、5.0 及 2.0 的牛顿水泥浆液的瞬时雷诺数均满足关系 $Re_s < Re_b < 2\ 000$ 。这表明本文开展的注浆验证试验采用的水灰比 10.0、5.0 及 2.0 的水泥浆液在被注砾(砂)石体的注浆过程中都符合层流状态理论基础。

5.3.3 注浆扩散参数的确定

在表 2 所设计的注浆验证试验中, 半球体部分扩散半径与柱体部分扩散高度用卷册或直尺均分别至少测量 3 次后, 取其平均值确定。注浆试验完成且待水泥浆液与被注砾(砂)石体一起完全固结与变干后, 拆卸试验箱, 用卷册分别测量注浆结石体的半球体部分扩散半径与柱体部分扩散高度值, 且对每个注浆试验扩散参数至少测量 3 次, 取其平均值。

5.3.4 结果分析

由牛顿流体柱-半球面渗透注浆形式半球体部分扩散半径与柱体部分扩散高度的理论计算公式得到的半球形部分扩散半径和柱体部分扩散高度的理论计算值与其对应的实际测量值及差值分析见表 3。

表 3 注浆试验的理论计算值、实际测量值及差值分析
Table 3 Theoretical calculation values, actual measured values and differential analysis of grouting experiment

试验 编号	半球形部分扩散半径			柱体部分扩散高度		
	理论计算	实际测量	差值	理论计算值	实际测量值	差值
	值 l_t /cm	值 l_a /cm	分析/%	m_t /cm	m_a /cm	分析/%
G1	16.5	11.8	28.48	55.0	39.2	28.73
G2	21.7	15.2	29.95	72.3	51.0	29.49
G3	27.0	18.4	31.85	90.0	61.3	31.89

分析表 3 可得到: 由本文研究的牛顿流体柱-半球面渗透注浆形式半球体部分扩散半径与柱体部

分扩散高度的理论公式计算得到的半球体部分扩散半径与柱体部分扩散高度理论值均大于注浆试验的实际测量值, 二者间具有 30%左右的差异。由国外一些研究表明: 试验实际测量值与理论计算值间的差异在-50%~100%内都是可接受的误差范围, 并在国内的试验研究中得到较广泛的运用^[11,13]。因此, 本文研究的牛顿流体柱-半球面渗透注浆形式半球体部分扩散半径与柱体部分扩散高度的理论公式可为实际注浆施工提供理论支撑与指导作用。

采用本文探讨的牛顿流体柱-半球面渗透注浆形式半球体部分扩散半径与柱体部分扩散高度的理论公式得到的半球体部分扩散半径与柱体部分扩散高度理论值大于注浆试验的实际测量值的原因, 主要有以下 3 个方面:

(1)较多因素影响牛顿水泥浆液在被注介质中的渗透扩散效果, 如, 水泥浆液可能会出现沉淀、堵塞与滤水等实际扩散问题; 又如, 在注浆试验中, 配置的牛顿水泥浆液一般因析水率等性能的超标常为不稳定浆液, 而在采用牛顿水泥浆液柱-半球面渗透注浆形式的半球体部分扩散半径与柱体部分扩散高度理论公式计算时均假设其为稳定性浆液。

(2)选择颗粒粒径分布较均匀的砾(砂)石体作为被注介质, 且在试验前淘洗 3 次, 虽然能最大限度地满足各向同性与均质假设, 但还是不能达到推导理论公式的完全均质和各向同性的假设要求。

(3)未考虑牛顿水泥浆液的时变性, 这点笔者认为是最主要的原因。

6 结 论

(1)以牛顿流体流变方程及渗流运动方程为基础, 探讨了牛顿流体柱-半球面渗透注浆形式半球体部分扩散半径与柱体部分扩散高度的理论计算公式。

(2)理论分析了牛顿流体的流变性、注浆压力、地下水压力及配置流体的水体温度对牛顿流体柱-半球面渗透注浆形式半球体部分扩散半径与柱体部分扩散高度的影响。分析结果表明: 牛顿流体水灰比及注浆压力越大, 半球体部分扩散半径与柱体部分扩散高度也越大; 但它们随地下水压力及配置流体的水体温度的增大而减小; 它们的增长幅度都随注浆时间的增长逐渐变缓, 注浆前期的增长幅度大于后期, 且逐渐靠近一渐近线。

(3)设计室内注浆试验验证了牛顿流体柱-半球面渗透注浆形式半球体部分扩散半径与柱体部分扩散高度的理论计算公式。结果表明: 由本文研究

的理论公式计算出的半球体部分扩散半径与柱体部分扩散高度理论值与注浆试验实测量值间具有 30% 左右的差异。但这些差异都处于可接受误差范围内, 因此, 本文建立的牛顿流体柱-半球面渗透注浆形式半球体部分扩散半径与柱体部分扩散高度的理论计算公式可为实际注浆施工提供理论支撑与指导作用。

参 考 文 献

- [1] 《岩土注浆理论与工程实例》编写组. 岩土注浆理论与工程实例[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [2] 王国际. 注浆技术理论与实践[M]. 北京: 中国矿业大学出版社, 2000.
- [3] 杨米加, 陈明雄, 贺永年. 注浆理论的研究现状及发展方向[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(6): 839—841.
YANG Mi-jia, CHEN Ming-xiong, HE Yong-nian. The development trend and research present condition of grouting theory[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2001, 20(6): 839—841.
- [4] 郝哲, 杨栋. 土体注浆理论评述[J]. 有色矿冶, 2004, 20(3): 16—19.
HE Zhe, YANG Dong. Animadversion on soil grouting theory[J]. **Colored Mine Metallurgy**, 2004, 20(3): 16—19.
- [5] 张伟, 陈文义. 流体力学[M]. 天津: 天津大学出版社, 2009.
- [6] 孔祥言. 高等渗流力学[M]. 北京: 中国科学技术大学出版社, 1999.
- [7] ZENIT R, KOCH D L, SANGANI A S. Measurement of the average properties of a suspension of bubbles rising in a vertical channel[J]. **Journal of Fluid Mechanics**, 2001, 429: 307—342.
- [8] 杨志全, 侯克鹏, 郭婷婷, 等. 粘度时变性宾汉体浆液的柱-半球形渗透注浆机理研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(9): 2698—2703.
YANG Zhi-quan, HOU Ke-peng, GOU 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): 2698—2703.
- [9] 南京水利科学研究院. GB/T50123-1999 土工试验方法标准[R]. 北京: 中国计划出版社, 1999.
- [10] 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.
- [11] 阮文军. 浆液基本性与岩体裂隙注浆扩散研究[博士学位论文D]. 吉林: 吉林大学, 2003.
- [12] 曾祥熹. 泥浆流变学与粘度测量[M]. 湖南: 湖南地质学会, 1981.
- [13] 阮文军. 基于浆液黏度时变性的岩体裂隙注浆扩散模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(15): 2709—2714.
RUAN Wen-jun. Spreading model of grouting in rock mass fissures based on time-dependent behavior of viscosity of cement-based grouts[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(15): 2709—2714.