

渗透注浆扩散理论探讨

阙云^{1,*}, 刘强华², 李丹³, 孙远⁴, 梁永富⁵

(1. 同济大学道路与机场工程系, 上海 200092; 2. 中铁二十局集团第一工程有限公司, 江苏 苏州 215129;
3. 重庆高速公路公司渝东分公司, 重庆 400042; 4. 解放军理工大学工程兵工程学院人防工程系,
江苏 南京 210007; 5. 中国路桥集团第一公路工程局南宁分公司, 广西 南宁 530031)

摘要: 本文在现有渗透性注浆理论基础上, 考虑毛细力情况下, 运用渗流力学对平面径向流、球形向心流两种渗透性注浆模型进行了推导, 得到了球形和柱形渗透性注浆扩散公式. 并以球形扩散公式为例, 结合工程实例和现有常用的 Maag 球形扩散公式比较, 从结果可初步推断: 由 Maag 公式计算注浆所需时间偏小, 本文所推导公式相对 Maag 公式更接近工程实际. 最后对注浆参数对扩散半径的影响进行探讨, 得到扩散半径对注浆参数的变化均较敏感, 采用 Maag 公式和本文公式得出的趋势基本一致.

关键词: 渗透注浆; 毛细力; 渗流力学; 扩散半径

中图分类号: TU472 文献标识码: A 文章编号: 1001-716X(2006)05-0105-04

注浆理论是对浆液的流动形式和固结方式进行分析, 建立扩散半径、注浆压力、流量、注浆胶凝时间等之间的关系. 浆液在地层中的流动不仅受地质条件的影响, 而且受注浆材料、注浆参数等因素的影响. 一般来说, 浆液在地层中是渗透、劈裂以及挤密的复合过程, 但对于砂层, 主要是渗透过程. 本文主要对饱和砂层中渗透注浆扩散公式进行探讨.

1 现有渗透注浆扩散公式

近几十年来, 国内外学者对渗流注浆理论进行了深入的研究, 发展了一系列渗透注浆理论, 如 Maag 理论(球形扩散理论)、球形扩散 Raffle 理论、柱形扩散理论、袖套管法理论、Baker 公式、刘嘉才单平板裂隙注浆渗透模型、Wallner 公式、G. Lombad 公式等^{[1][2]}. 在砂层地基注浆中, 上述渗透理论以 Maag 扩散公式和柱形扩散公式运用最广, 其扩散公式分别如下:

$$\text{Maag 扩散公式: } R = 3 \sqrt{\frac{\beta k p r_0 t}{n \beta}} \quad (1)$$

$$\text{柱形扩散公式: } R = \sqrt{\frac{2kpt}{n \beta \ln \frac{R}{r_0}}} \quad (2)$$

式中, R —— 扩散半径 (cm); r_0 —— 注浆头半径 (cm); p —— 注浆压力 (cm 水头); k —— 砂土渗透系数 (cm/s); t —— 注浆时间 (s); n —— 砂土孔隙率;

β —— 浆液粘度对水的粘度比.

2 渗透注浆扩散公式推导

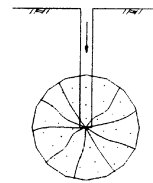


图1 球形渗透注浆

2.1 球形扩散公式推导

球形渗透注浆可视为球形向心渗流问题(图1), 注浆采用的端头相对于周围土体可简化为半径为 r_0 的圆球, 由拉普拉斯方程式^[3] 可得:

$$\frac{\partial}{\partial r} (r^2 \frac{\partial p}{\partial r}) = 0 \quad (3)$$

求解条件:

$$p(r = r_0) = p_{\infty}; p_g(r = R) = p_{\infty}; p_w(r = R) = p_{\infty} + p_c; V_g(r = R) = V_w(r = R); p(r = \infty) = p_u.$$

式中, R —— 浆水分界面半径(扩散半径, cm); V_g 、 V_w —— 分别为浆液和水的渗流速度 (cm/s); p_{∞} 、 p_{∞} —— 分别为注浆压力和浆水分界面处压力 (cm 水头); p_g 、 p_w —— 分别为浆液压力和水压力 (cm 水头); p_c —— 浆液在交界面处两侧压力差, 即毛细力 (cm 水头); p_u —— 与注浆端头同一水平面在无穷远

* 收稿日期: 2005-08-11; 修改日期: 2005-10-18

作者简介: 阙云(1980-), 男, 江西黎川人, 博士生, 主要从事路基及边坡稳定与防治方面研究.

处压力(cm 水头).

对式(3) 积分两次得:

$$p = C_1/r + C_2 \quad (4)$$

式中, C_1 、 C_2 —— 待定常数.

在 $r_0 \leq r \leq R$ 范围内, 由求解条件确定 C_1 、 C_2 :

$$p_g = \frac{1}{R - r_0} \left(\frac{p_{c0} - p_{cR}}{r} \cdot r_0 R + p_{cR} \cdot R - p_{c0} \cdot r_0 \right) \quad (5)$$

在 $R \leq r < \infty$ 范围内, 由求解条件确定 C_1 、 C_2 :

$$p_w = \frac{p_{cR} - p_u + p_c \cdot R + p_u}{r} \quad (6)$$

根据梯度定义^[4]:

$$I = - dp/dr \quad (7)$$

则有浆液压力头梯度 I_g 和水头梯度 I_w :

$$I_g = \frac{r_0}{R - r_0} \frac{p_{c0} - p_{cR}}{r^2} \cdot R \quad (r_0 \leq r \leq R) \quad (8)$$

$$I_w = \frac{p_{cR} - p_u + p_c \cdot R}{r^2} \cdot R \quad (R \leq r < \infty) \quad (9)$$

当 $r = R$ 时, 由 $V_g(r = R) = V_w(r = R)$ 得:

$$K_g I_g = K_w I_w \quad (10)$$

式中, K_g 、 K_w —— 分别为浆液和水在砂层中的渗透系数(cm/s).

联立式(8)、式(9)、式(10) 可得:

$$p_{cR} = \frac{K_g r_0 p_{c0} + K_w (p_u - p_c) (R - r_0)}{K_g r_0 + K_w (R - r_0)} \quad (11)$$

设被灌注的土体为半径 R 的球体, 土体的孔隙率为 n , 并且假定土骨架不可压缩, 在灌浆时这部分孔隙体积被浆液充满, 得:

$$Q = \frac{4}{3} \pi R^3 \cdot n \quad (12)$$

式中, Q —— 注浆总量(cm^3).

注浆总量 Q 还可以表示为:

$$Q = 4\pi R^2 \cdot K_w \cdot (I_w)_{r=R} \cdot t \quad (13)$$

式中, t —— 注浆时间(s).

则由式(12)、式(13) 可得注浆压力、时间、扩散半径的关系:

$$p_{c0} = \frac{R^2 n}{3K_w t} \left(1 + \frac{K_w}{K_g} \frac{R - r_0}{r_0} \right) + p_u - p_c \quad (14)$$

由式(14) 通过迭代试算得到扩散半径 R , 再由式(12) 可得到注浆总量 Q .

2.2 柱形扩散公式推导

柱形渗透注浆可视为平面径向渗流问题(如图2), 注浆管半径相对于周围土体可简化为半径为 r_0 的圆, 由拉普拉斯方程式^[3] 可得:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial p}{\partial r} \right) = 0 \quad (15)$$

求解条件:

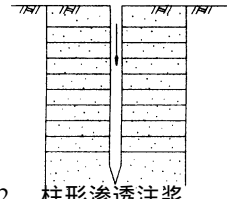


图2 柱形渗透注浆

$$p(r = r_0) = p_{c0}; p_g(r = R) = p_{cR}; p_w(r = R) = p_{cR} + p_c;$$

$$V_g(r = R) = V_w(r = R); p(r = \infty) = p_e.$$

式中, R —— 水分界面半径(扩散半径, cm); V_g 、 V_w —— 分别为浆液和水的渗流速度(cm/s); p_{c0} 、 p_{cR} —— 分别为注浆压力和浆水分界面处压力(cm水头); p_g 、 p_w —— 分别为浆液压力和水压力(cm水头); p_c —— 浆液在界面处两侧压力差, 即毛细力(cm水头); p_e —— 与注浆端头同一水平面在地下水影响半径处压力(cm水头).

对式(15) 积分两次得:

$$p = C_1 \ln r + C_2 \quad (16)$$

式中, C_1 、 C_2 —— 待定常数.

在 $r_0 \leq r \leq R$ 范围内, 由求解条件确定 C_1 、 C_2 :

$$p_g = \frac{p_{c0} - p_{cR}}{\ln r_0 - \ln R} \cdot \ln r + \frac{p_{cR} \ln r_0 - p_{c0} \ln R}{\ln r_0 - \ln R} \quad (17)$$

在 $R \leq r \leq R_e$ 范围内, 由求解条件确定 C_1 、 C_2 :

$$p_w = \frac{p_{cR} - p_e + p_c}{\ln R - \ln R_e} \ln r + \frac{p_e \ln R - p_{cR} \ln R - p_c \ln R_e}{\ln R - \ln R_e} \quad (18)$$

同样根据公式(7) 定义浆液压力头梯度 I_g 和水头梯度 I_w , 有:

$$I_g = - \frac{p_{c0} - p_{cR}}{\ln r_0 - \ln R} \cdot \frac{1}{r} \quad (r_0 \leq r \leq R) \quad (19)$$

$$I_w = - \frac{p_{cR} - p_e + p_c}{\ln R - \ln R_e} \cdot \frac{1}{r} \quad (R \leq r < \infty) \quad (20)$$

当 $r = R$ 时, 由 $V_g(r = R) = V_w(r = R)$ 得:

$$K_g I_g = K_w I_w \quad (21)$$

式中, K_g 、 K_w —— 分别为浆液和水在砂层中的渗透系数(cm/s).

联立式(19)、(20)、(21) 可得:

$$p_{cR} = \frac{K_g p_{c0} \ln(R/R_e) + K_w p_e \ln(r_0/R) - K_w p_c \ln(r_0/R)}{K_w \ln(r_0/R) + K_g \ln(R/R_e)} \quad (22)$$

设被灌注的土体为半径 R , 高 h 的柱体, 土体的孔隙率为 n , 并且假定土骨架不可压缩, 在灌浆时这部分孔隙体积被浆液充满, 得:

$$Q = \pi R^2 \cdot h \cdot n \quad (23)$$

式中, Q —— 注浆总量(cm^3).

注浆总量 Q 还可以表示为:

$$Q = 2\pi R \cdot h \cdot K_w \cdot (I_w)_{r=R} \cdot t \quad (24)$$

式中, t —— 注浆时间(s).

则由式(23)、式(24) 可得注浆压力、时间、扩散半径的关系:

$$p_{c0} = \frac{R^2 n}{2K_w t} \left[\frac{K_w}{K_g} \ln(R/r_0) + \ln \frac{R_c}{R} \right] + p_e - p_c \quad (25)$$

由式(25) 通过迭代试算得到扩散半径 R 后, 再由式(23) 可得到注浆总量 Q .

从式(14) 和式(25) 来看, 它们相对于 Maag 公式和柱形扩散公式, 分别多考虑了毛细力 p_c 、 p_u 和毛细力 p_c 、 p_e , 因此更加合理些.

3 浆液扩散实例计算比较

如图 3, 某防洪堤其下为 10m 的砂土地基, 为防止其发生管涌现象, 拟采用注浆法进行防渗治理, 现通过现场试验得砂土容重 $\gamma = 17.5 \text{ kN/m}^3$; 孔隙率 $n = 0.42$; 渗透系数 $K_w = 5 \times 10^{-4} \text{ m/s}$; 浆液粘度对水的粘度比, 即水与浆液在砂土地基中的渗透系数比 $K_w/K_g = 2$; 毛细力 $p_c = 0.001 \text{ MPa}$, 即 10cm 水头; 注浆管半径 $r_0 = 2.5 \text{ cm}$; 设计注浆半径为 100cm.

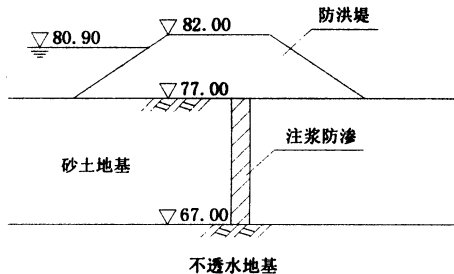


图 3 防洪堤防渗注浆(单位: m)

将上述试验参数(其中 $P_u = \gamma h = 0.175 \text{ MPa}$) 分别代入 Maag 公式和本文公式(12) 计算在注浆压力为 0.3MPa 时, 所需要的注浆时间分别为 747s 和 1756s. 文献[5] 指出: 渗透注浆用 Maag 公式进行计算所得出的时间偏小, 实际上本工程注浆时间前后将近半个小时, 由此可初步得出本文的公式更接近渗透注浆工程的实际情况, 至于本文公式在工程中的适用性还需大量试验和工程实例所检验.

4 渗透注浆参数对扩散半径影响分析

为分析注浆参数对扩散半径的影响, 选用以下参数: 注浆压力 0.3MPa, 注浆时间 900s, 注浆深度 8m, 毛细力 10cm 水头, 砂容重 17.5 kN/m^3 .

4.1 地基土渗透系数对扩散半径的影响

从图 4 可以看出: 在孔隙率为 0.42, 浆液对水的

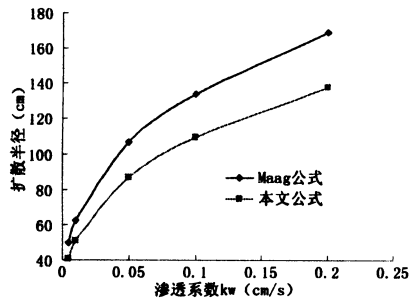


图 4 渗透系数与扩散半径的关系

粘度比为 2, 注浆管半径为 2.5cm 时, 当地基土渗透系数从 0.005cm/s 增加到 0.2cm/s 时, 其扩散半径分别增加了 119.54cm(Maag 公式)、97.13cm(本文公式), 说明地基土渗透系数对扩散半径有显著影响.

4.2 浆液对水的粘度比对扩散半径的影响

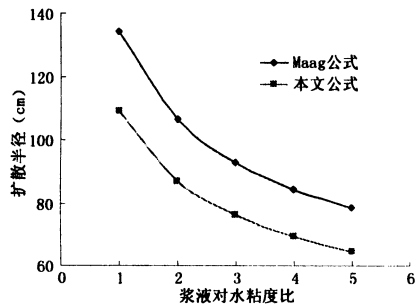


图 5 浆液对水粘度比与扩散半径的关系

从图 5 可以看出: 在孔隙率为 0.42, 地基土渗透系数从 0.05cm/s, 注浆管半径为 2.5cm 时, 当浆液对水的粘度比从 1 增加到 5 时, 其扩散半径分别降低了 55.68m(Maag 公式)、44.56cm(本文公式), 说明浆液对水的粘度比对扩散半径有较大影响.

4.3 地基孔隙率对扩散半径的影响

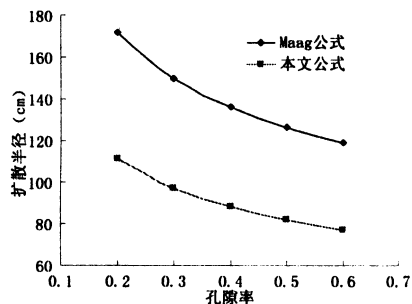


图 6 孔隙率与扩散半径的关系

从图 6 可以看出: 在砂土渗透系数为 0.05cm/s, 浆液对水的粘度比为 2, 注浆管半径为 2.5cm 时, 当地基土孔隙率从 0.2cm/s 增加到 0.6cm/s 时, 其扩散半径分别降低了 52.65cm(Maag 公式)、33.96cm(本文公式), 说明扩散半径对地基土孔隙率变化较敏感.

4.4 注浆管半径对扩散半径的影响

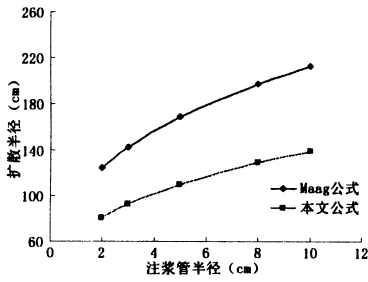


图 7 注浆管半径与扩散半径的关系

从图 7 可以看出: 在孔隙率为 0.42, 浆液对水的粘度比为 2, 地基土渗透系数为 0.05 cm/s 时, 当注浆管半径从 2cm 增加到 10cm 时, 其扩散半径分别增加了 88.38cm (Maag 公式)、58.35cm (本文公式), 说明注浆管半径对扩散半径有较大影响。

5 结 语

通过以上分析, 可以得到以下结论:

1) 本文在考虑毛细力情况下, 根据渗流力学理论推导了球形和柱形渗透性注浆扩散公式, 并结合

工程实例, 将所推导的球形扩散公式与 Maag 球形扩散公式进行比较, 初步得到本文公式相对 Maag 公式更接近工程实际;

2) 渗透半径对几个注浆参数 (地基土渗透系数、浆液对水的粘度比、地基孔隙比和注浆管半径) 的变化均较敏感, 采用 Maag 公式和本文公式得到的趋势基本一致;

3) 限于篇幅, 本文未对文中推导的柱形扩散公式进行验证和分析, 文中推导的柱形扩散公式验证和分析也可按上述思路进行。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 卓越. 饱水砂层渗透注浆加固理论探讨[J]. 岩土工程技术, 2002, (5): 284-289.
- [3] 张祥言. 高等渗流力学[M]. 合肥: 中国科技大学出版社, 1997.
- [4] 黄敏, 张克绪, 张尔齐. 桩底灌浆分析[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 2001, 34(6): 39-44.
- [5] 高大钊. 地基加固新技术[M]. 北京: 机械出版社, 2000.

Research on diffusion theory of permeation grouting

QUE Yun¹, LIU Qiang-hua², LI Dan³, SUN Yuan⁴, LIANG Yong-fu⁵

(1 Department of Highway & Airport Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2 China Railway 20th bureau group NO. 1 engineering Co., Ltd, Suzhou 215129, China; 3 Chongqing Express Highway Co Yudong Branch, Chongqing 400042, China; 4 Engineering Institute, PLA University of Science & Technology, Nanjing 210007, China; 5 China road & bridge Corporation Nanning Branch, Nanning 530031, China)

Abstract: The paper deduces two kinds of permeation grouting model including plane radial flow and ball-type centripetal flow based on mechanics of seepage flow. Then the formula of this paper compares with Maag's formula based on engineering example. The computation results preliminarily show that diffusion time of Maag's formula is less than the practical time and the formula of this paper is more accordant with reality. Finally the influence of diffusion radius on grouting parameters is discussed. The results show that diffusion radius is sensitive to grouting parameters and the analytical results used by Maag's formula are basically keeping with those used by the formula of this paper.

Key words: permeation grouting; capillary force; mechanics of seepage flow; diffusion radius

(上接 104 页)

The impact energy analyses of high-speed landslide rockmass falling to pieces

WU Wen-xue¹, TANG Shu-ming², LIU Yong-jiang²

(1. School of River & Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. Chongqing Communications Research & Design Institute, Chongqing 400067, China)

Abstract: In the paper, the relations of the transferring and translating of energy while high-speed landslide rockmass impact immobile roadblock are analyzed in detail. The expressions of the distributive energy when landslide rockmass fall to pieces, and the average velocity and direction after impacting are putted forward. All of those establish a base to study the formation of debris flow, and are important to reduce and prevent disaster.

Key words: high-speed landslide; impact; energy; analyses; rockmass