

文章编号:1001-7372(2017)08-0049-08

考虑黏度时效性与空间效应的 C-S 双液浆盾构 隧道管片注浆机理分析

叶飞¹, 孙昌海^{1,2}, 毛家骅³, 韩鑫¹, 陈治⁴

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 山东省交通规划设计院, 山东 济南 250031; 3. 北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044; 4. 广东省南粤交通投资建设有限公司, 广东 广州 510101)

摘要:在假定 C-S 双液浆符合宾汉姆流体的基础上, 考虑双液浆黏度时变性与空间效应, 并认为盾构隧道管片注浆符合球形渗透模型, 通过平衡方程与 Dupuit-Forchheimer 公式, 对宾汉姆流体壁后注浆渗透扩散规律进行理论分析, 得到 C-S 双液浆扩散半径计算公式以及管片受力计算公式。通过具体实例分析了注浆压力、注浆管内浆液流速以及 C-S 双液浆黏度参数 A 与参数 Y 对浆液扩散半径及管片受力的作用, 对比了不同注浆参数对注浆效果的影响。结果表明: 浆液扩散半径随注浆压力与注浆管内浆液流速的增大而增大, 随黏度参数 A 与参数 Y 增大而减小, 其中注浆压力与参数 Y 对浆液扩散影响较大, 注浆管内浆液流速与参数 A 对浆液扩散影响较小; 管片受力随注浆压力与注浆管内浆液流速增大而增大, 但注浆压力的影响效果不断增大而后趋于稳定, 注浆管内浆液流速的影响效果不断减弱而后趋于稳定; 管片受力随参数 A 与参数 Y 增大而减小, 其中参数 A 对管片受力的影响呈负线性关系, 影响效果较弱, 参数 Y 对管片受力的影响呈现“三段式”变化——缓慢减小阶段、加速减小阶段以及快速减小阶段, 影响效果明显。

关键字: 盾构隧道; C-S 双液浆; 理论分析; 浆液扩散; 管片注浆

中图分类号: U451

文献标志码: A

Analysis on Grouting Mechanism for Shield Tunnel Segment by Cement and Sodium Silicate Mixed Grout in Consideration of Time-dependency and Space Effect of Viscosity

YE Fei¹, SUN Chang-hai^{1,2}, MAO Jia-hua³, HAN Xin¹, CHEN Zhi⁴

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Shandong Provincial Communications Planning and Design Institute, Jinan 250031, Shandong, China; 3. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 4. Guangdong Nanyue Transportation Investment & Construction Co., Ltd., Guangzhou 510101, Guangdong, China)

Abstract: Supposing that cement and sodium silicate (C-S) mixed grout was in accordance with Bingham fluid pattern, time variation and space effect of viscosity of C-S mixed grout were taken into consideration and grouting through shield tunnel segment conforms to spherical penetration model. The theoretical derivation was carried out for grouting penetration and diffusion pattern of Bingham fluid by dint of equilibrium equation and Dupuit-Forchheimer formula to obtain calculation formula for diffusion radius of C-S mixed grout and calculation formula for pressure on

收稿日期: 2017-03-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(51478044, 51678062)

作者简介: 叶飞(1977-), 男, 陕西石泉人, 教授, 工学博士, 博士后, E-mail: xianyefei@126.com。

segment. With concrete examples, the influence of grouting pressure, the flow rate of grout in grouting pipe, viscosity parameter A and parameter Y of C-S mixed grout on grout diffusion radius and pressure of segment was analyzed and the influence of different grouting parameters on grouting effect was compared. The results show that grout diffusion radius increases with the increase of grouting pressure and flow rate of grout in grouting pipe and decreases with the increase of parameters A and Y . Grout diffusion was considerably influenced by grouting pressure and parameter Y and slightly influenced by the flow rate of grout in grouting pipe and parameter A . Besides, the pressure on segment increases with the increase of grouting pressure and the flow rate of grout in grouting pipe. The influence effect of grouting pressure constantly increases and tends to be stable. Whilst the influence effect of the flow rate of grout in grouting pipe constantly decreases and tends to be stable. The pressure on segment decreases with the increase of parameters A and Y , with negative linear relationship shown in the influence of parameter A on the pressure, ending up with minor influence. The "three-stage" changes are shown in the influence of parameter Y on the pressure, that is, slow decrease stage, accelerating decrease stage and rapid decrease stage, ending up with an obvious effect.

Key words: shield tunnel; cement and sodium silicate mixed grout; theoretical analysis; grout diffusion; segment grouting

0 引言

目前盾构隧道壁后注浆材料主要有2种:单液浆和双液浆(常用C-S浆液)。单液浆主要以水泥基浆液为主,是一种悬浮性浆液,而C-S浆液为溶液,通常也称化学浆液。一般来说,单液浆常用于盾尾注浆,具有缓解地层变形、确保管片受力均匀、提高盾构隧道抗渗性、固定管片位置以及承受盾构附属设备产生的荷载等作用^[1];双液浆常用于管片注浆,具有填补管片背后空隙以及堵水抗渗^[2]的作用。

浆液的流变性是指浆液在外力下的流动性,是研究浆液渗透扩散的基础。近年来学者对双液浆扩散机理的研究较少,研究多集中在单液浆上,如叶飞等^[3-5]在分析盾构隧道上浮机理时,通过引入等效孔隙率替代土体本身的孔隙率来考虑建筑盾尾间隙的影响,分别基于球面和柱面扩散理论,推导出了浆液渗透扩散半径及对管片产生的压力计算式;刘健等^[6]考虑了宾汉姆流体黏度时变特性的渗流运动形态,并假设浆液呈柱形渗透扩散模型,推导了盾构隧道壁后注浆水泥浆液扩散规律及管片压力计算公式;杨志全等^[7]采用理论分析与室内试验相结合的方法,分析了黏度时变性的幂律型流体的渗透扩散形态,得出了幂律型浆液壁后注浆扩散公式;阮文军^[8-9]通过室内试验与理论分析,研究了不同水灰比条件下水泥浆的流变特性,并建立了岩体裂隙的稳定性浆液注浆扩散模型;刘人太^[10]通过建立单一平板裂隙注浆扩散模型,研究了速凝浆液在静水和动

水条件下的扩散规律,并得出了单一平板裂隙条件下的注浆扩散运移方程;梁禹等^[11]考虑了浆液在注入过程中黏度时变特性对地层渗透特性的影响,推导了基于浆液黏度时变性的浆体固结变形方程和浆液压力消散方程,分析了浆液固结、压力消散及浆液压力沿管片外壁分布的分布规律。

目前学者对双液浆的研究大多是通过试验手段研究其初凝时间、终凝时间、强度以及黏度时变性等特性,对双液浆的扩散机理研究较少。李术才等^[12]给出了C-S浆液浆-水相界面函数,提出了动水条件下C-S浆液扩散相界面由逆水相界面区、渐变相界面区、稳定相界面区以及顺水相界面区组成;刘强等^[13-14]根据土体中劈裂缝形状,并依据宾汉姆流体在平板裂隙中的流变方程,提出了不同土体内C-S浆液黏度、流量、注浆压力差、浆液扩散距离的计算公式。本文拟从C-S浆液本构关系、黏度时变性与空间效应入手,研究C-S浆液在盾构隧道壁后注浆过程中的扩散机理。

1 双液浆的物理力学性质

由于水泥浆液凝固时间长且难以控制,因而很少被用在不稳定地层中的盾构隧道壁后注浆,而双液浆(C-S)同时具有水泥浆液的优点(价格低、无污染且强度高)及化学浆液的某些特性(可灌性好、凝固时间短且可调等),因此被广泛运用到盾构隧道壁后注浆中,尤其是在盾构穿越砂性地层、砂砾地层等不稳定地层和含水量较高的地层时。据文献^[1]

统计,在砂性地层中,盾构隧道壁后注浆的浆材采用双液浆的比例约为 60%。

1.1 双液浆黏度性质

1.1.1 双液浆的时间黏度

双液浆的时间黏度特性可以直观反映在凝结时间的长短上。一般而言,凝结时间可分为:凝胶时间(浆液混合至浆液失去流动性所需时间)、初凝时间(浆液凝胶至部分失去塑性所需时间)、终凝时间(浆液全部固化所需时间)。对于渗透注浆,只考虑浆液的凝胶时间,而浆液的凝胶时间一般在几秒至几十分钟左右,即浆液的黏度增长速率较快,因此在盾构壁后注浆过程中不可忽略。

1.1.2 双液浆的空间黏度

一般而言,单液浆同步注浆时,浆液是分批运输到后方台车上再注入盾尾空隙中,即可认为注入到同一环管片衬砌背后的浆液是同时配制的,但注入到管片背后的时间不同,因此,各浆液质点在盾构注浆的任一时刻,管片背后的浆液黏度值一样,但随着注浆时间的继续,浆液各质点的黏度持续增大。

对于双液浆而言,浆液一般在注浆孔处按一定比例混合后再注入到管片背后(注入过程如图 1 所示),假定以开始注浆为起点时刻(即时间为 0),注浆总时间为 T ,对于任意时刻 t ,浆液的扩散距离为 l (即时间 t 内浆液扩散到 l 处), t_s ($0 \leq t_s \leq t$) 时刻注入的浆液质点在地层内的扩散时间为 $t_u = t - t_s$ (即该质点的黏度变化时间 t_u)。因此,浆液的黏度不仅随时间变化,而且还随空间变化,即可表示为 $\mu(t, l)$ 。为了更形象地描述,取时间 t 时浆液锋面质点 M ,此时 M 点的黏度为 $\mu(t, l, \theta)$, θ 为角度,经过时间 Δt 后,浆液锋面质点 M 运动至 N 点,此时浆液锋面 N 点的黏度为 $\mu(t + \Delta t, l + \Delta l, \theta)$,而此时点 M 处的浆液质点黏度依然为 $\mu(t, l, \theta)$,即同一时刻浆液黏度随空间位置变化而变化,如图 2 所示。

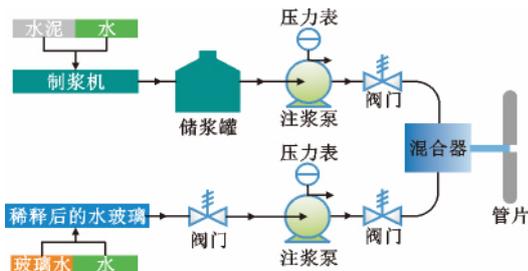


图 1 双液浆注浆

Fig. 1 Grouting of C-S Mixed Grout

1.2 双液浆的本构关系

文献[12]基于试验研究结果,证明了水泥-水玻

璃双液浆为黏度时变性宾汉姆流体,其本构关系可表示为

$$\tau(t) = \tau_0(t) + \mu(t)\gamma \quad (1)$$

式中: $\tau(t)$ 为宾汉姆流体剪切应力; $\tau_0(t)$ 为宾汉姆流体屈服应力,由于宾汉姆流体的屈服应力随时间变化可以忽略[9],因此有 $\tau_0(t) = \tau_0(0) = \tau_0$; $\mu(t)$ 为宾汉姆流体动力黏度函数,对于单液浆宾汉姆流体, $\mu(t)$ 符合指数函数变化规律[8],对于双液浆宾汉姆流体, $\mu(t)$ 符合幂函数变化规律[10,13]; γ 为浆液剪切速率, $\gamma = dv/dr$, v 为半径 r 处的质点运动速度,即孔隙速度。

刘人太[10]、刘强等[13]在研究过程中发现,双液浆宾汉姆流体动力黏度随时间变化呈现幂函数变化规律,即

$$\mu(t) = At^Y \quad (2)$$

式中: A, Y 均为与双液浆黏度性质有关的常数,可由试验数据拟合得到。

2 双液浆管片注浆渗透扩散模型

假设浆液扩散为球形渗透模型,可由均匀管组理论[15]推导出双液浆的渗透扩散公式。

2.1 基本假设

(1)双液浆为黏度时变性宾汉姆流体[本构关系式满足式(1)],其流型不随时间改变;

(2)假定浆液在渗透扩散范围内做层流运动,浆液以半球形扩散(图 3,4);

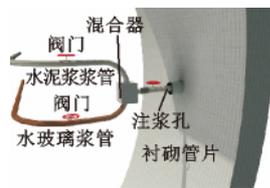


图 3 双液浆注浆效果

ig. 3 Grouting Effect of

C-S Mixed Grout

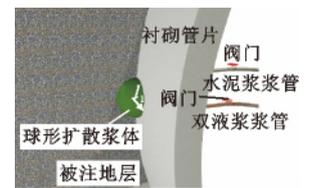


图 4 双液浆扩散示意

ig. 4 Diffusion Schematic

of C-S Mixed Grout

(3)忽略浆液自重,盾尾间隙采用等效孔隙率模拟,将砂性地层视为均质、各向同性材料,且认为浆液不可压缩;

(4)忽略注浆过程中浆液对地层的挤压作用,即认为毛细管组半径不随时间发生变化;

(5)忽略管片曲率影响,在浆液影响范围内假设管片外侧为平面。

2.2 理论推导

假定砂性地层中浆液在渗流通道内做层流运动,地层毛细管均匀分布,符合均匀毛细管组理论,其地层毛管道直径为 r_0 。取一段与毛管轴同轴的圆柱形微元体(l 为长度, r 为半径, P 为微元体单位面积上所受压力),忽略重力影响,微元体受力情况如图5所示。

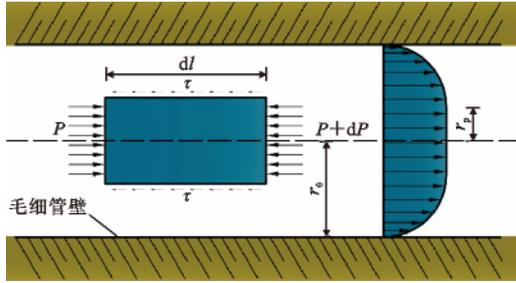


图5 浆体受力分析

Fig. 5 Grout Stress Analysis

由微元体受力平衡可得

$$P\pi r^2 - (P + dP)\pi r^2 = 2\pi r\tau dl \quad (3)$$

简化可得

$$\tau = -\frac{r}{2} \frac{dP}{dl} \quad (4)$$

将式(4)代入式(1)可得

$$\frac{dv}{dr} = \frac{\tau_0 - \tau(t)}{\mu(t)} = \frac{1}{\mu(t)} \left(\tau_0 + \frac{r}{2} \frac{dP}{dl} \right) \quad (5)$$

式(5)表明,浆液某点剪应力与该点到管轴的距离成正比,而由宾汉姆流体定义可知,当施加的剪切力 $\tau = -r/2(dP/dl) > \tau_0$ 时,浆液发生相对流动,其余部分流体像固体一样向前流动,无相对运动的部分称为流核区,流核区以外的部分称为速递区^[12]。因此,管中存在一个半径为 r_p 的流核,当 $0 < r < r_p$ 时,这部分流体无相对运动;当 $r_p < r < r_0$ 时,这部分流体出现相对运动。

对式(5)进行积分,并代入边界条件 $r=r_0, v=0$,可以得到

$$v = - \left[\tau_0(r_0 - r) + \frac{1}{4} \frac{dP}{dl} (r_0^2 - r^2) \right] / \mu(t) \quad r_p < r \leq r_0$$

$$v_p = - \left[\tau_0(r_0 - r_p) + \frac{1}{4} \frac{dP}{dl} (r_0^2 - r_p^2) \right] / \mu(t) \quad 0 < r \leq r_p \quad (6)$$

式中: v_p 为流核速度。

管道内总流量 Q 为

$$Q = \int_{r_p}^{r_0} 2\pi r v dr + \pi r_p^2 v_p = -\frac{\pi r_0^4}{8\mu(t)} \left[1 - \frac{4}{3} \frac{2\tau_0/r_0}{-dP/dl} + \right.$$

$$\left. \frac{1}{3} \left(\frac{2\tau_0/r_0}{-dP/dl} \right)^4 \right] \frac{dP}{dl} \quad (7)$$

当 $Q=0$ 时,解出的正根为浆液的启动压力梯度 φ ,其值为

$$-dP/dl = 2\tau_0/r_0 = \varphi \quad (8)$$

假定注浆时间为 T ,开始注浆时刻为 0 ,注浆管内浆液速率不变。由于双液浆注入过程与单液浆不同,因此浆液黏度时变性起算点不同。注浆起始时刻注入的浆液时变性变化时间为 T ,扩散半径为 l_1 ;注浆时间为 t 时,浆液时变性变化时间为 $(T-t)$,扩散半径为 l ;注浆时刻为 T 时,浆液时变性变化时间为 0 ,扩散半径为 0 (图6)。

图6 浆液扩散时间-范围
Fig. 6 Grout Diffusion
Time and Range

T 时间内浆液注入地层的总量 Q 为

$$Q = v_0 \pi l_0^2 T = qT = \frac{2}{3} \pi l_1^3 \phi \quad (9)$$

注浆时间 T 为

$$T = \frac{2}{3} \pi l_1^3 \phi q^{-1} = \frac{2l_1^3 \phi}{3v_0 l_0^2} \quad (10)$$

式中: l_0 为初始扩散半径,即注浆管半径; q 为单位时间注入量; ϕ 为地层孔隙度。

$T(t < T)$ 时刻注浆孔处的双液浆黏度时变性的时间变化为 0 ,在 t 时刻后,该点处浆液黏度变化时间 t_u 为

$$t_u = T - t \quad (11)$$

$T(t < T)$ 时刻进入地层的浆液质点扩散至半径 l 处,则 t 至 T 时间段内浆液的流量 Q_{T-t} 为

$$Q_{T-t} = v_0 \pi l_0^2 (T - t) = q(T - t) = \frac{2}{3} \pi l^3 \phi \quad (12)$$

则有

$$t_u = \frac{2}{3} \pi l^3 \phi q^{-1} = \frac{2l^3 \phi}{3v_0 l_0^2} \leq T = \frac{2l_1^3 \phi}{3v_0 l_0^2} \quad (13)$$

即可认为浆液黏度时间与浆液质点的扩散半径 l 一一对应,即

$$\mu(l, t) = \mu(t_u) = \mu \left(\frac{2l^3 \phi}{3v_0 l_0^2} \right) \quad (14)$$

由式(7)可以得出浆液平均流速 \bar{v} 为

$$\bar{v} = \frac{Q}{\pi r_0^2} = -\frac{r_0^2}{8\mu(t)} \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{2\tau_0/r_0}{-dP/dl} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{2\tau_0/r_0}{-dP/dl} \right)^4 \right] \frac{dP}{dl} \quad (15)$$

对式(15)进行简化,令渗透率 $K = \phi r_0^2/8$,由于地层注浆压力较大,此时有 $r_p \ll r_0$,因此可以忽略高

阶微量,并根据 Dupuit-Forchheimer 公式(浆液在地层中的渗透速度 $V=\phi v$)、式(9)以及式(15)可得

$$V = -K\mu^{-1} \left(\frac{2l^3\phi}{3v_0 l_0^2} \right)^{-1} \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{\phi}{-dP/dl} \right) \right] \frac{dP}{dl} \quad (16)$$

对式(16)变形可以得到

$$-\frac{dP}{dl} = \frac{4}{3}\phi + \frac{v_0 l_0^2}{2l^2} \mu \left(\frac{2l^3\phi}{3v_0 l_0^2} \right) K^{-1} \quad (17)$$

由式(17)可知,浆液扩散压力为式(17)的积分上限函数。对式(17)积分有

$$P = P_0 - \int_{l_0}^l \left[\frac{4}{3}\phi + \frac{v_0 l_0^2}{2K} \frac{1}{l^2} \mu \left(\frac{2l^3\phi}{3v_0 l_0^2} \right) \right] dl \quad (18)$$

由式(2)、(14)、(18)可得浆液压力表达式为

$$P = P_0 - \frac{4}{3}\phi(l-l_0) - \frac{A\phi l^2}{3K(3Y-1)} \left(\frac{2l^3\phi}{3v_0 l_0^2} \right)^{Y-1} \left[1 - \left(\frac{l_0}{l} \right)^{3Y-1} \right] \quad (19)$$

由于 $1 - \left(\frac{l_0}{l} \right)^{3Y-1} \approx 1$,因此式(19)可简化为

$$P = P_0 - \frac{4}{3}\phi(l-l_0) - \frac{A\phi l^2}{3K(3Y-1)} \left(\frac{2l^3\phi}{3v_0 l_0^2} \right)^{Y-1} \quad (20)$$

将 $l=l_1, P=P_w$ 代入式(20),并令 $\Delta P = P_0 - P_w$,从而可得浆液扩散半径为

$$l_1 = \sqrt[3Y-1]{\left[\Delta P - \frac{4}{3}\phi(l_1-l_0) \right] \frac{3K(3Y-1)}{A\phi} \left(\frac{3v_0 l_0^2}{2\phi} \right)^{Y-1}} \quad (21)$$

浆液对管片的注浆压力为

$$F_g = P_0 \pi l_1^2 - \frac{4}{9} \pi \phi (2l_1^3 - 3l_1^2 l_0) - \frac{2\pi A\phi}{3K(3Y-1)} \cdot \left(\frac{2\phi}{3v_0 l_0^2} \right)^{Y-1} \left[\frac{l_1^{3Y+1}}{3Y+1} - \frac{l_0^{3Y+1}}{2} \right] \quad (22)$$

3 实例分析

3.1 案例背景

兰州地铁一号线“迎马”区间穿黄盾构工程双液浆注浆机恒定排浆量为 $7 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$,出浆口半径 $l_0 = 0.016 \text{ m}$,工作压力为 $0 \sim 16 \text{ MPa}$ (排浆速度 $v_0 = 2.42 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$);盾尾间隙 $d = 0.06 \text{ m}$,水在地层的渗透系数 $K_w = 0.01 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$,地层初始孔隙率 $\eta = 0.3$,取 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 水的黏度 $\mu_w = 1.005 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$,双浆液水灰比取 1.0 ,水泥浆水玻璃体积比为 1.0 ,宾汉姆流体屈服应力 $\tau_0 = 1.563 \text{ Pa}$,C-S 双液浆的黏度取值为 $\mu_{cs} = 0.0096 \text{ Pa} \cdot \text{s}$,流体重度取值为 $\gamma_{cs} = 1.47 \times 10^{-2} \text{ N} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。由于考虑盾尾间隙的影响采用等效孔隙率代替,本文引用文献[3]的结论,球形扩散模型的等效孔隙率 η' 的计算式为

$$\eta' = \eta + \frac{3d(1-\eta)}{2l_1} \quad (23)$$

由孔隙度与孔隙率的关系式可得

$$\phi = \frac{\eta'}{1-\eta'} \quad (24)$$

将上述参数代入砂性地层渗透率计算公式,计算可得 K ,通过式(24)及公式 $K = \phi r_0^2 / 8$ 计算 r_0 。

3.2 C-S 双液浆黏度表达式

由文献[10]、[13]可知,对于 C-S 双液浆黏度变化符合幂律型函数,如式(2)所示,本文通过对文献[10]、[13]的研究结果拟合得出,当水灰比为 1.0 、水泥浆与水玻璃体积比为 1.0 时,黏度随时间变化的函数如图 7 所示(R 为相关系数)。

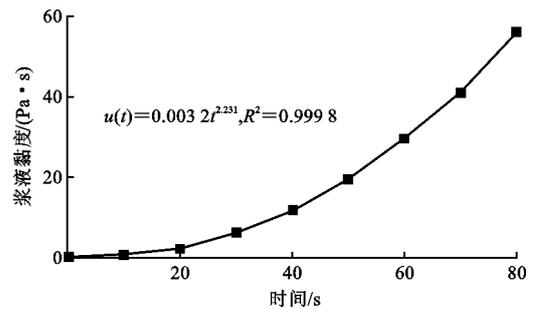


图 7 C-S 双液浆黏度特性曲线

Fig. 7 Viscosity Characteristic Curve of C-S Mixed Grout

3.3 注浆压力的影响

3.3.1 注浆压力对浆液扩散半径的影响

当 C-S 双液浆黏度参数 $A = 0.0032$,参数 $Y = 2.231$,其他注浆参数如案例背景所示时,为分析不同注浆压力对 C-S 双液浆扩散半径的影响,选取注浆压力分别为 $0.05, 0.1, 0.15, \dots, 0.65 \text{ MPa}$,计算所对应的浆液扩散半径,绘制注浆压力与浆液扩散半径的关系,如图 8 所示。

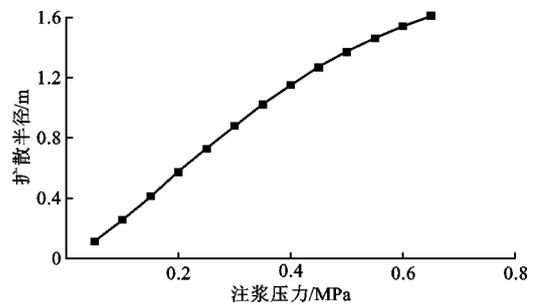


图 8 C-S 注浆压力与扩散半径关系

Fig. 8 Relationship Between C-S Grouting Pressure and Diffusion Radius

由图 8 可知:当注浆压力 P 小于 0.35 MPa 时,浆液扩散半径随注浆压力增大而增大,两者之间呈线性变化,线性比例系数在 3 左右;当注浆压力 P 大于 0.35 MPa 时,浆液扩散半径随注浆压力增大而增大,但是增加幅度不断减小,当注浆压力继续增

加时,将进入压密注浆阶段,甚至发生劈裂注浆,此时管片将承受较大的注浆压力,因此不能简单地通过增加注浆压力来提高注浆效果。

3.3.2 注浆压力对管片受力的影响

在与3.3.1节相同的注浆条件下,计算不同注浆压力下管片受力大小以及管片单位面积受力大小,绘制注浆压力与管片受力关系,结果见图9。

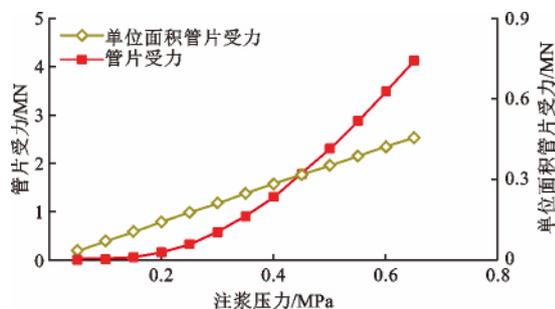


图9 注浆压力与管片受力关系

Fig. 9 Relationship Between Grouting Pressure and Pressure on Segments

由图9可知:当注浆压力从0.1 MPa到0.4 MPa变化时,增加了0.3 MPa,管片受力增加1.3 MN,增长比约为4.33,管片受力随注浆压力增大而增大,管片受力总体较小,但是增长幅度不断增加;当注浆压力大于0.4 MPa时,注浆压力从0.4 MPa到0.65 MPa,增加了0.25 MPa,管片受力增加2.8 MN,增长比为11.2,此时管片受力增加与注浆压力增加呈线性变化,增幅较快。

C-S双液浆注浆时,管片单位面积受力随注浆压力呈线性变化,两者之间的比例系数在0.75左右,注浆压力对管片单位面积受力的影响较为明显。

一般而言,为了获得较好的注浆效果,往往需要较大的浆液加固半径、较小的管片受力以及对地层影响较小,由图8与图9可知,较理想的注浆压力为0.3~0.4 MPa。

3.4 注浆管内浆液流速的影响

注浆压力为0.3 MPa,其他注浆参数如案例背景所示。取注浆管浆液流速为1, 1.2, ..., 3.4 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,计算此时C-S双液浆扩散半径与管片受力,绘制注浆流速与扩散半径关系,结果如图10(a)所示;注浆流速与管片受力关系如图10(b)所示。

由图10可知:当注浆压力为0.3 MPa时,注浆管内不同的流速无论是对浆液扩散半径,还是对管片受力的影响都较小。浆液扩散半径与管片受力随流速的增加而增加,但增加幅度不断减小;单位面积管片受力随流速的增加几乎不发生变化。

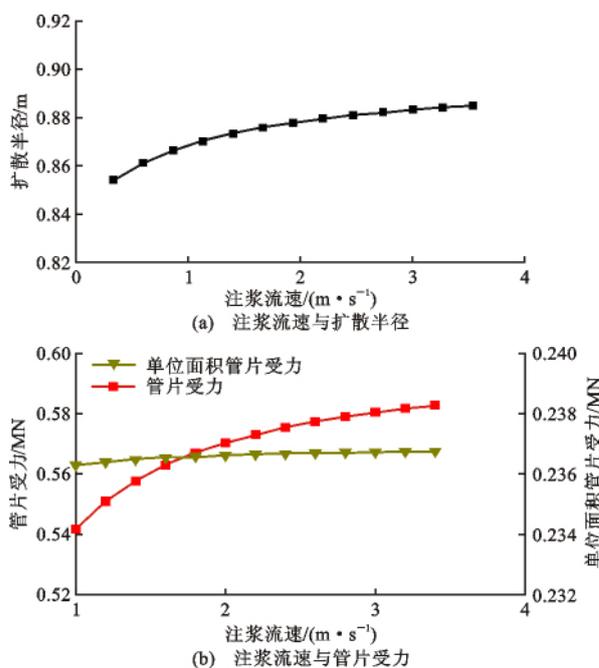


图10 注浆流速与扩散半径及管片受力的关系

Fig. 10 Relationship of Grouting Flow Velocity on Diffusion Radius and Pressure on Segments

3.5 双液浆黏度参数的影响

3.5.1 双液浆黏度参数A

当注浆压力 $P=0.3$ MPa,注浆管流速 $v=2.42$ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,双液浆黏度参数 $Y=2.231$,其他注浆条件如案例背景所示。选取双液浆黏度参数 A 为0.000 1, 0.000 2, 0.000 4, 0.000 8, 0.001, 0.002, ..., 0.009,计算浆液扩散半径,绘制参数 A 与扩散半径关系,如图11(a)所示;参数 A 与管片受力关系如图11(b)所示。

由图11(a)可知:注浆压力一定的条件下,浆液扩散半径随浆液参数 A 增大而减小,呈负相关。当参数 A 从0.001增加到0.009时,浆液扩散半径从0.890 m变化到0.856 m,减小了4%,变化幅度较小,浆液参数 A 对浆液扩散半径的影响程度较小。

3.5.2 双液浆黏度参数Y

当注浆压力 $P=0.3$ MPa,注浆管流速 $v=2.42$ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,双液浆黏度参数 $A=0.003 2$,其他注浆条件如案例背景所示。选取双液浆黏度参数 Y 为1.6, 1.7, ..., 2.8,计算浆液扩散半径,绘制参数 Y 与浆液扩散半径关系,如图12(a)所示;参数 Y 与管片受力关系如图12(b)所示。

由图12可知,当浆液参数 Y 小于2.0时,浆液扩散半径随参数 Y 增加属于缓慢减小阶段;当浆液参数在2.0~2.5时,浆液扩散半径随浆液参数 Y 增加属于加速减小阶段;当浆液参数大于2.5时,浆

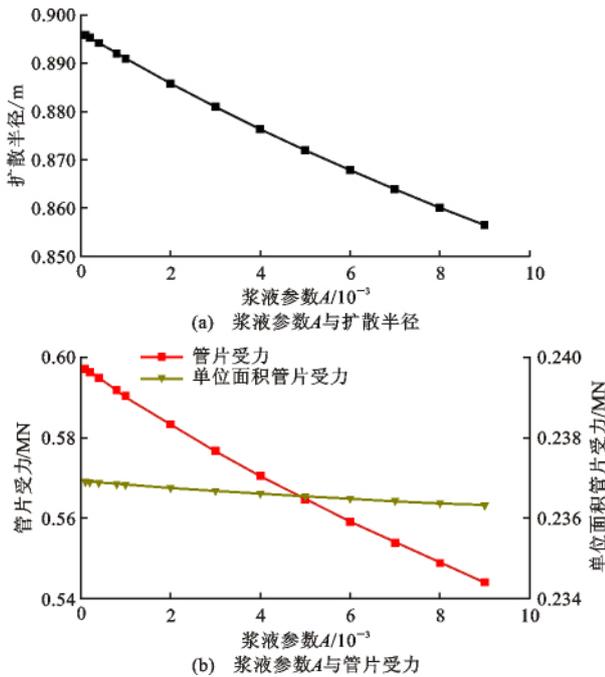


图 11 浆液参数 A 与扩散半径及管片受力关系

Fig. 11 Relationships of Grout Parameter of Cement and Sodium A on Diffusion Radius and Segment Stress

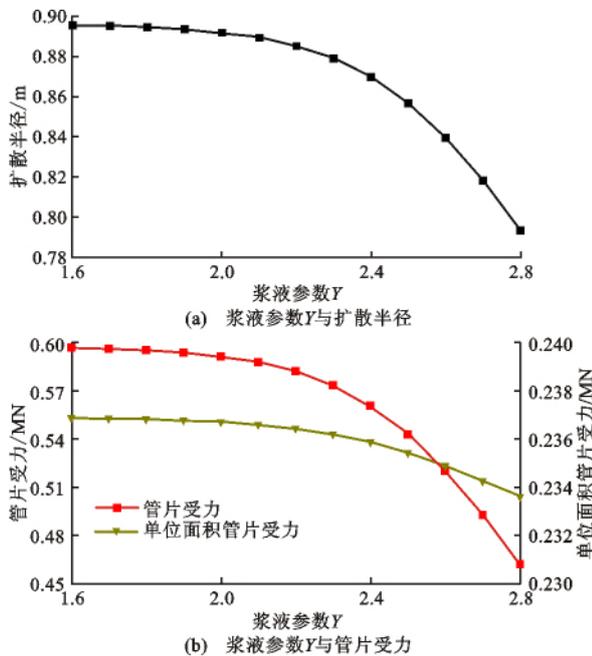


图 12 浆液参数 Y 与浆液扩散半径及管片受力关系

Fig. 12 Relationships of Grout Parameter Y on Diffusion Radius and Pressure on Segments

液扩散半径随浆液参数 Y 增加属于快速减小阶段;当浆液参数 Y 从 2.0 增加到 2.8(增加了 40%)时,浆液扩散半径减小了 11%,为了提高注浆加固范围,可以适当减小浆液参数 Y,例如在双液浆中添加适量缓凝剂。通过与图 11(a)对照分析可知,浆液

参数 Y 对浆液扩散半径影响程度大于浆液参数 A。

由图 12 可知:管片受力随浆液参数 Y 增加同样呈现三段式变化,当参数 Y 小于 2.0 时,管片受力属于缓慢减小阶段;当浆液参数在 2.0~2.5 时,浆液扩散半径随浆液参数 Y 增加属于加速减小阶段;当浆液参数大于 2.5 时,浆液扩散半径随浆液参数 Y 增加属于快速减小阶段。当浆液参数 Y 从 2.0 增加到 2.8(增加了 40%)时,管片受力大小减小了 22%,单位面积管片受力大小减小了 1%,参数 Y 对管片受力影响较大,对单位面积管片受力影响较弱。通过与图 11(b)对比分析可知,浆液参数 Y 对管片受力影响程度大于浆液参数 A。

随着浆液参数 Y 的增加,此时管片受力减小的主要原因是由于浆液黏度增大、浆液作用半径减小,不能简单地认为较大的浆液参数 Y 可以减小管片受力,从而可以提高注浆效果。

4 结 语

(1)在 C-S 双液浆注浆过程中,浆液扩散半径和管片受力随注浆压力增大而增大,半径增长速率不断减小而后趋缓,管片受力增长速率不断变大,因此不能单纯通过增加注浆压力来提高注浆效果;浆液扩散半径和管片受力随注浆管内流速 v_0 增大而增大,两者增长速率均是先不断减小而后趋于平缓,但注浆管内流速 v_0 对注浆效果影响较小;浆液扩散半径和管片受力随双液浆参数 A 的增大而减小,呈负线性变化,但参数 A 对浆液扩散半径及管片受力影响较小;浆液扩散半径和管片受力随双液浆参数 Y 的增大而减小,此时由于浆液扩散半径的减小导致管片受力面积减小,进而使得管片受力减小,因此不能单纯认为较大的浆液参数 Y 有利于提高注浆效果。

(2)在 C-S 双液浆注浆过程中,可以采用适当的注浆压力(0.3~0.4 MPa)提高 C-S 双液浆注浆效果,不能单纯通过提高注浆压力来增加浆液扩散半径;可以通过试验研究,选取适当的添加剂(例如减水剂与缓凝剂)以此优化浆液参数 A 与 Y,从而获得更好的 C-S 双液浆注浆效果。

参考文献:

References:

[1] 张凤祥,朱合华,傅德明.盾构隧道[M].北京:人民交通出版社,2004.
ZHANG Feng-xiang, ZHU He-hua, FU De-ming.

- Shield Tunnelling Method[M]. Beijing: China Communications Press, 2004.
- [2] 简文彬, 张登, 黄春香. 水泥-水玻璃固化软土的微观机理研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增2): 632-637.
JIAN Wen-bin, ZHANG Deng, HUANG Chun-xiang. Micromechanism of Cement-sodium Silicate-stabilized Soft Soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S2): 632-637.
- [3] 叶飞. 软土盾构隧道施工期上浮机理分析及控制研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.
YE Fei. Analysis and Control for Upward Movement of Shield Tunnel during Construction[D]. Shanghai: Tongji University, 2007.
- [4] 叶飞, 朱合华, 何川. 盾构隧道壁后注浆扩散模式及对管片的压力分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(5): 1307-1312.
YE Fei, ZHU He-hua, HE Chuan. Back-filled Grouts Diffusion Model and Its Pressure to Segments of Shield Tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(5): 1307-1312.
- [5] 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.
- [6] 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. Back-filled 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.
- [7] 杨志全, 牛向东, 侯克鹏, 等. 流变参数时变性幂律型水泥浆液的柱形渗透注浆机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(7): 1415-1425.
YANG Zhi-quan, NIU Xiang-dong, HOU Ke-peng, et al. Columnar Diffusion of Cement Grout with Time Dependent Rheological Parameters[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(7): 1415-1425.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 刘人太. 水泥基速凝浆液地下工程动水注浆扩散封堵机理及应用研究[D]. 济南: 山东大学, 2012.
LIU Ren-tai. Study on Diffusion and Plugging Mechanism of Quick Setting Cement Based Slurry in Underground Dynamic Water Grouting and Its Application[D]. Jinan: Shandong University, 2012.
- [11] 梁禹, 阳军生, 王树英, 等. 考虑时变性影响的盾构壁后注浆浆液固结及消散机制研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(12): 3373-3380.
LIANG Yu, YANG Jun-sheng, WANG Shu-ying, et al. A Study on Grout Consolidation and Dissipation Mechanism During Shield Backfilled Grouting with Considering Time Effect[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(12): 3373-3380.
- [12] 李术才, 孙子正, 刘人太, 等. 基于裂隙动水注浆的水泥-水玻璃浆液相界面特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(8): 1640-1646.
LI Shu-cai, SUN Zi-zheng, LIU Ren-tai, et al. Research on Phase Interface Characteristics of Cement-silicate Grout Based on Crack Grouting with Dynamic Water[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(8): 1640-1646.
- [13] 刘强, 张可能, 陈宾, 等. 不同土体中水泥-水玻璃浆液的扩散规律[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2015, 46(1): 255-260.
LIU Qiang, ZHANG Ke-neng, CHEN Bin, et al. Diffusion Law of Cement-sodium Silicate Grout in Different Soils[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2015, 46(1): 255-260.
- [14] 程鉴基. 水泥-水玻璃化学灌浆在工程地基中的应用[J]. 建筑结构, 1996(10): 33-35.
CHENG Jian-ji. The Application of Cement-water Glass Chemical Grouting in Engineering Foundation[J]. Architecture Structure, 1996(10): 33-35.
- [15] 孔祥言. 高等渗流力学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1999.
KONG Xiang-yan. Advanced Mechanics of Fluids in Porous Media[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 1999.