

小曲率半径盾构隧道壁后注浆荷载计算分析

陈 奥¹, 朱春洲², 饶兵兵³

(1. 南昌轨道交通集团有限公司地铁项目管理分公司, 江西 南昌 330038; 2. 中铁上海设计院集团有限公司, 上海市 200040; 3. 江西中昌工程咨询监理有限公司, 江西 南昌 330038)

摘 要: 为有效计算分析小曲率半径盾构隧道壁后注浆时的荷载及分布情况, 以减少注浆荷载对管片造成不利影响。依托南昌市轨道交通1号线东延工程中的麻丘站隧道工程, 通过浆液渗流分析, 以水灰比介于0.5~0.7的水泥浆为研究对象, 基于柱面扩散原理, 建立了考虑稠度时空效应的管片壁后注浆渗透扩散模型, 推导了管片壁后注浆产生的渗透扩散荷载的计算公式, 并给出了最大渗透扩散半径与注浆压力的关系式。研究表明: 水灰比为0.7的水泥浆可注性较好, 当注浆压力达到0.25 MPa及以上时, 扩散半径能够满足工程需求; 注浆对管片产生的荷载随浆液渗透扩散半径的增大而增大, 当浆液可注性较好时, 应控制注浆压力不宜过大。

关键词: 小曲率半径; 盾构隧道; 柱面扩散原理; 稠度时空效应; 管片壁后注浆渗透扩散模型; 注浆压力; 水灰比

中图分类号: U231

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)06-0275-06

Calculation and Analysis on Grouting Loads behind Wall of Shield Tunnel with Small Curvature Radius

CHEN Ao¹, ZHU Chunzhou², RAO Bingbing³

(1. Metro Project Management Branch of Nanchang Rail Transit Group Limited Corporation, Nanchang 330038, China; 2. China Railway Shanghai Design Institute Group Co., Ltd., Shanghai 200040, China; 3. Jiangxi Zhongchang Engineering Consulting&Supervision Co., Ltd, Nanchang 330038, China)

Abstract: In order to effectively calculate and analyze the load and distribution of grouting behind the wall of shield tunnel with small curvature radius, the adverse impact of grouting load on segments is expounded. Relying on the Machu Station Tunnel Project in the East Extension Project of Nanchang Metro Line 1, through the analysis of slurry seepage, taking the cement slurry with a water-cement ratio of 0.5 to 0.7 as the research object, and based on the principle of cylindrical diffusion, the permeation diffusion model of grouting behind the segment wall considering the time-space effect of consistency is established, and the calculation formula of permeation diffusion load caused by grouting behind the segment wall is derived. And the relationship between the maximum permeation and diffusion radius and the grouting pressure is given. The results show that the grouting performance of cement slurry with a water-cement ratio of 0.7 is good. When the grouting pressure reaches 0.25 MPa or above, the diffusion radius can meet the engineering requirements. The load exerted by grouting on the segments increases with the increase of the radius of grout permeation and diffusion. When the grouting performance is good, the grouting pressure should be controlled and should not be too large.

Keywords: small curvature radius; shield tunnel; cylindrical diffusion principle; time-space effect of consistency; permeation diffusion model of grouting behind segment wall; grouting pressure; water-cement ratio

0 引 言

近年来,我国城镇化取得了举世瞩目的成就,城市人口激增,给市内交通运输带来了巨大压力。随

着我国城镇化进程的不断加快,地铁建设面临的环境限制问题日益突出。在进行地铁线路设计时,通常以设置曲率半径较小的急曲线的方式最大限度地规避不良地质条件和周围既有建(构)筑物,以降低隧道施工的环境风险。现行的《盾构法隧道施工及验收规范》(GB 50446—2017)^[1]规定,地铁隧道中平曲线曲率半径小于350 m的区间被称为小半径曲线地段,属于特殊地段中的一种。当曲率半径接近盾

收稿日期: 2023-07-05

基金项目: 南昌轨道交通集团2020年度科研计划项目(2020HGKYB002)

作者简介: 陈奥(1990—),男,学士,工程师,从事工程项目管理工作。

构机转弯性能的极限时,隧道施工难度和风险将显著提高,由此需要重点解决小曲率半径盾构隧道施工的关键课题,因为相比于直线区间,小半径盾构区间对施工前期的设备选型、管片选型,以及施工阶段的盾构姿态控制、回填注浆质量、管片拼装等方面要求高。尤其是在注浆阶段复杂的荷载作用下,小半径曲线段成型隧道管片极易出现水平轴线偏移和局部错台现象。过大的轴线偏移将增大轴线纠偏、盾构机姿态控制及管片拼装等操作增加困难,而过大的错台量则会造成螺栓受剪、管片渗漏水、管片破损等一系列问题^[2-4]。更为严重时,小半径盾构区间甚至会成为整条隧道病害的重灾区。由于国内外关于小曲率半径盾构隧道的建设项目较罕见,因此目前对小曲率半径盾构区间在注浆阶段荷载的相关研究相对较少,大多数研究集中在盾构注浆荷载计算分析及影响方面的试验和理论研究,陈少波^[5]对盾构同步注浆填充扩散压力分布模式,改进现有模型中未考虑纵环向流动关联性的影响,以注浆压力为控制参数,推导出整体填充扩散理论模型;韩鑫等^[6]考虑浆液的自重作用,根据浆液球形扩散的连续性方程,建立浆液驱替渗透扩散模型,并给出了顶部和底部注浆孔浆液扩散的解析解;王海刚等^[7]以注浆压力不确定性为切入点,探究了考虑注浆压力不确定性对盾构施工引起地表沉降的影响;王明年等^[8]将盾尾视为充满高压液体的密闭容器,盾构推进视为改变容器的边界条件,推导得到了盾尾体积应变与浆液压力的关系式。但纵观上述研究成果,其中对于小曲率半径盾构区间成型隧道关于注浆阶段荷载的相关理论及研究成果仍相对匮乏。

基于此,本文依托南昌市轨道交通1号线东延工程中的麻丘站隧道工程,考虑浆液稠度时空变化影响,假定浆液按幂律型流体柱形渗透并进行渗流分析,建立考虑稠度时空变化的盾构隧道壁后注浆渗透扩散模型,由此计算小曲率半径条件下盾构隧道壁后注浆荷载,确定合适的注浆压力,保证管片在注浆过程中的安全稳定,为类似工程的施工建设提供理论支持与参考。

1 考虑浆液稠度时空效应的渗透扩散模型建立

1.1 基本假定

针对小曲率半径盾构隧道壁后注浆的特点,在不影响扩散模型计算结果的基础上,为便于分析盾构施工过程中隧道管片注浆浆液的渗透扩散过程,

做出如下基本假定:

- (1) 注浆浆液和承载浆液的介质均为均质、各向同性材料;
- (2) 注浆过程中的浆液需满足流体连续性方程的条件,即浆液流型保持不变;
- (3) 浆液假定为幂律型流体,并按柱形渗透扩散;
- (4) 浆液在豆砾石间渗透扩散过程中不考虑重力的影响;
- (5) 浆液与盾尾、岩土体和管片接触表面假设为不透水边界,故不考虑地下水对浆液的稀释影响。

1.2 幂律型浆液渗流分析

幂律型流体的基本流变方程如下:

$$\tau = c(t)\gamma^n \quad (1)$$

$$\gamma = -\frac{du}{dr} \quad (2)$$

式中: $c(t)$ 为时间 t 作为自变量的流体稠度系数; γ 为幂律型流体的剪切速率; u 为浆液流速; n 为流变指数。

由图1可假定毛细管为半径等于 r_0 的圆柱体,如式(3)所示。

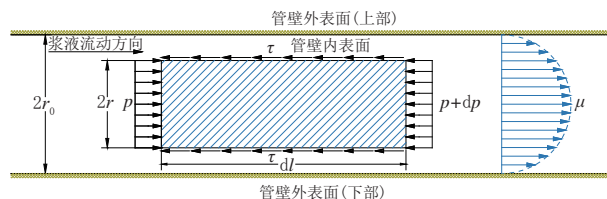


图1 幂律型浆液流柱体在毛细管中的受力及流动示意图

$$r_0 = \sqrt{\frac{8\beta}{k}} \quad (3)$$

式中: β 为水在岩土体中的渗透率,如式(4)所示。

$$\beta = \frac{\alpha\mu_w}{\rho_w g} \quad (4)$$

式中: α 为岩土体的渗透系数; μ_w 为水的黏度; ρ_w 为水的密度。

综上所述,以毛细管圆柱轴线为对称轴,在管内取半径为 r 、长度为 dl 的流柱微元体,忽略浆液自重的影响,对浆液中的柱形微元体进行受力分析可得:

$$p\pi r^2 = (p + dp)\pi r^2 + 2\pi r\tau dl \quad (5)$$

整理式(5)可得:

$$\tau = -\frac{r}{2} \frac{dp}{dl} \quad (6)$$

将式(6)代入幂律型流体基本流变方程,可得:

$$\gamma = -\frac{dv}{dr} = \left(-\frac{r}{2c(t)} \frac{dp}{dl} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (7)$$

根据图1及前述基本假定可知,边界条件应满足 $r=r_0$ 时 $u=0$,由此对式(7)积分可得:

$$u = \frac{n}{n+1} \left[-\frac{1}{2c(t)} \frac{dp}{dl} \right]^{\frac{1}{n}} \left(r_0^{\frac{n+1}{n}} - r^{\frac{n+1}{n}} \right) \quad (8)$$

由文献[9]可知,毛细管中流体的单位时间流量为:

$$q_0 = \int_0^{r_0} 2\pi r u dr \quad (9)$$

将式(8)代入式(9)并整理后,可得:

$$q_0 = \frac{n}{3n+1} \left(-\frac{r_0}{2c(t)} \frac{dp}{dl} \right)^{\frac{1}{n}} \pi r_0^3 \quad (10)$$

故由流量和流速的关系可得毛细管内流体实际质点速度平均值 $\bar{u}$ 为:

$$\bar{u} = \frac{q_0}{\pi r_0^2} = \frac{n}{3n+1} \left(-\frac{r_0}{2c(t)} \frac{dp}{dl} \right)^{\frac{1}{n}} r_0 \quad (11)$$

综上所述,由基本假定可将毛细管中的浆液流体中质点的平均速度视为浆液的渗流速度^[10],由此可得幂律型浆液流动过程中的平均渗流速度,如式(12)所示。

$$u = k \bar{u} = \frac{k r_0 n}{3n+1} \left[-\frac{r_0}{2c(t)} \frac{dp}{dl} \right]^{\frac{1}{n}} \quad (12)$$

式中: k 为承载浆液的被注介质孔隙率^[9,11],如式(13)所示。

$$k = \frac{\gamma_s(1+\omega) - \gamma}{\gamma_s(1+\omega)} \quad (13)$$

式中: ω 为岩土体的含水率; γ 为岩土体天然容重; γ_s 为岩土体的颗粒容重。

1.3 考虑浆液稠度时空效应的幂律型流体柱形渗透扩散模型建立

保证浆液的注浆速率 u_0 为恒定,并将注浆管半径设为 l_0 ,任意时刻的浆液扩散半径设为 l ,最大扩散半径设为 l_s ,则由前述流体流量与流速的关系可得:

$$q = S u = \pi u_0 l_0^2 \quad (14)$$

又由图2可知,浆液在柱形扩散模式下扩散的总表面积为:

$$S = 2\pi l b \quad (15)$$

综上所述,将式(12)、(15)代入(14)可得:

$$u = \frac{q}{S} = \frac{q}{2\pi l b} = \frac{k n}{1+3n} \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{1}{n}} r_0^{\frac{1+n}{n}} c \left(\frac{k \pi l^2 b}{q} \right)^{\frac{1}{n}} \left(-\frac{dp}{dl} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (16)$$

故对式(16)进行恒等变换,可得:

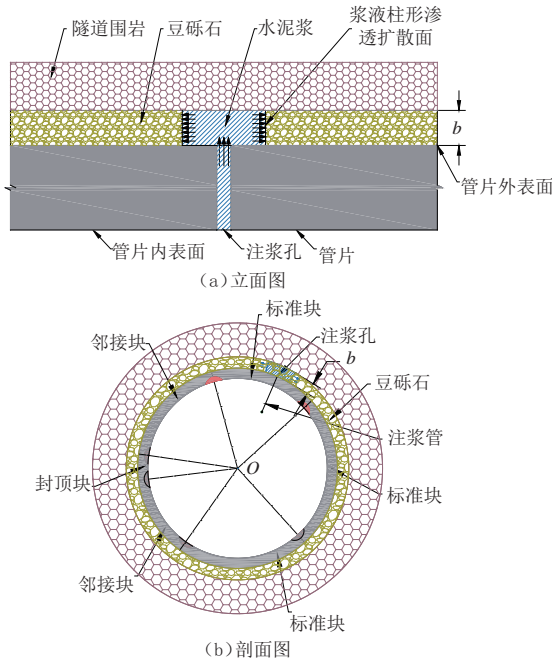


图2 柱面渗透扩散模型示意图

$$\frac{dp}{dl} = -2 \left(\frac{1}{r_0} \right)^{1+n} \left[\frac{q(1+3n)}{2k\pi b n} \right]^n \left(\frac{1}{l} \right)^n c \left(\frac{k\pi b l^2}{q} \right) \quad (17)$$

综上所述,由于注浆孔的大小相对于所处平面面积小很多,故可忽略注浆孔的大小,且采用豆砾石作为填充材料,则由文献[9,11-12]可假定浆液在以豆砾石为填充材料的介质中扩散量与注浆量始终保持相等的关系,则可将注浆量表示为:

$$q t = \pi k b l^2 \quad (18)$$

式中: b 为注浆体扩散高度,近似等于盾尾间隙。

综上所述,对式(17)等号两边同时积分可得

$$p = p_0 + \frac{2}{r_0^{n+1}} \left(\frac{3n+1}{n} \right)^n \left(\frac{q}{2\pi k b} \right)^n \int_{l_1}^{l_0} \frac{c(t)}{l^n} dl \quad (19)$$

为便于积分,采用二次函数拟合稠度系数时变方程 $c(t)=c_0 e^{\lambda t}$,并引入式(18),则稠度系数时变方程如式(20)所示。

$$c(t) = c_0 (\delta t^2 + \phi t + \eta) = c_0 \left[\delta \left(\frac{\pi k b l^2}{q} \right)^2 + \frac{\pi \phi k b l^2}{q} + \eta \right] \quad (20)$$

将式(20)代入式(19),积分可得:

$$p = p_0 + N \left[\frac{\delta}{5-n} \left(\frac{\pi k b}{q} \right)^2 (l_0^{5-n} - l^{5-n}) + \frac{\pi \phi k b}{(3-n)q} (l_0^{3-n} - l^{3-n}) + \frac{\eta}{1-n} (l_0^{1-n} - l^{1-n}) \right] \quad (21)$$

式中: N 、 δ 、 ϕ 、 η 均为系数,且 $N = \frac{2c_0}{r_0^{n+1}} \left(\frac{3n+1}{n} \right)^n \left(\frac{q}{2\pi k b} \right)^n$ 。

故注浆压力差 Δp 可表示为:

$$\Delta p = -N \left[\frac{\delta}{5-n} \left(\frac{\pi k b}{q} \right)^2 (l_0^{5-n} - l_{\max}^{5-n}) + \frac{\pi \phi k b}{(3-n)q} (l_0^{3-n} - l_{\max}^{3-n}) + \frac{\eta}{1-n} (l_0^{1-n} - l_{\max}^{1-n}) \right] \quad (22)$$

$$F_g = \int_0^{l_{\max}} 2\pi p dl = \pi p_0 l_{\max}^2 + \frac{2\pi c_0 l_{\max}^2}{r_0^{n+1}} \left(\frac{3n+1}{n} \right)^n \left(\frac{q}{2\pi k b} \right)^n \left[\frac{\delta l_0^{5-n}}{5-n} \left(\frac{\pi k b}{q} \right)^2 + \frac{\pi \phi k b l_0^{3-n}}{(3-n)q} + \frac{\eta l_0^{1-n}}{1-n} \right] - \frac{4\pi c_0 \delta l_{\max}^{7-n}}{(7-n)(5-n)r_0^{n+1}} \left(\frac{3n+1}{n} \right)^n \left(\frac{q}{2\pi k b} \right)^n \left(\frac{\pi k b}{q} \right)^2 - \frac{4\pi^2 c_0 \phi k b l_{\max}^{5-n}}{(5-n)(3-n)q r_0^{n+1}} \left(\frac{3n+1}{n} \right)^n \left(\frac{q}{2\pi k b} \right)^n - \frac{4\pi c_0 \eta l_{\max}^{3-n}}{(3-n)(1-n)r_0^{n+1}} \left(\frac{3n+1}{n} \right)^n \left(\frac{q}{2\pi k b} \right)^n \quad (23)$$

2 工程应用

2.1 工程概况

本文依托南昌市轨道交通1号线东延工程中的麻丘站隧道工程,如图3所示,该隧道右线全长2 631.71 m,左线全长2 679.79 m。其中盾构区间单线长1 652.2m,双线总长3 305 m。隧道沿线地貌为丘陵地貌,地势起伏较大,现状植被茂密,地形地貌条件复杂,地面高程92.00~330.00 m,最大埋深248 m,最小埋深3 m。沿线地下水多为第四系松散地层孔隙潜水及基岩裂隙水,且基岩裂隙水在构造碎裂带中非常发育,水量较丰富,连通性较好。盾构区间存在2处平面小半径曲线,其中始发端小半径区间曲率半径 $R=260$ m,曲线长度558 m;另一处小半径区间曲率半径 $R=300$ m,曲线长度720 m。



图3 南昌市轨道交通1号线东延工程线路方案示意图

选取里程为YDK43+122~YDK42+858的掘进区间作为研究对象,该区间位于曲率半径 $R=300$ m的圆曲线上,区间平均埋深89 m,最小埋深57 m。根据地质勘查报告,可知该区间的地质情况如表1所示,且根据地勘报告结果,设计建议采用单护盾模式开挖。衬砌结构采用“3+2+1”预制钢筋混凝土管片,管

当浆液压力差已知的情況下,可由式(22)解出浆液最大扩散半径 $l_{\max}$ 。基于柱面扩散理论推导出的幂律型流体扩散半径内浆液对管片产生的作用力为

片外径为6 200 mm,厚度为400 mm,曲线段环宽1.2 m。

表1 土体物理力学参数取值

岩土层名称	层号	天然重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	压缩模量 E_s/MPa	泊松比 ν
素填土层	① ₁	18.6	3	20	—	—
粉质黏土层	② ₁	19.6	36	28	32	0.36
中砂层	③ ₂	20.2	0	38	45	0.26
砾砂层	④ ₄	23.2	0	44	58	0.21

2.2 注浆荷载的计算分析

本文中的依托工程选择豆砾石作为回填材料,且豆砾石的粒径控制在5~10 mm的范围内,同时通过室内测定豆砾石的孔隙率 k 和渗透系数 α 依次为45%、0.078 6 m/s。基于此,将P·O42.5普通硅酸盐水泥作为浆液材料,则此时浆液的水灰比将控制在0.5~1.0范围内,可有效保障浆液的稳定性、流动性和适当的初凝时间。注浆过程中,将注浆孔半径 l_0 、盾尾间隙 b 和单位时间注浆量分别设定并控制为1.36 cm、150 mm和10 L/min。由此,根据文献[13-14],将不同水灰比条件下幂律型流体稠度系数时变方程的拟合结果统计于表2。

2.2.1 浆液最大扩散半径

将上述参数及浆液稠度系数时变方程均代入式(22),可计算得到浆液稠度系数时空及注浆压力变化条件下幂律型浆液的最大扩散半径。注浆压力差 Δp 为0.1~0.55 MPa时,不同水灰比的水泥浆的最大扩散半径的计算结果如表3和图4所示。

由表3和图4可知,在相同注浆压力差条件下,随着水灰比的增长,浆液的稠度降低、流动性增加,浆液的最大扩散半径不断增大。随着注浆压力差的增长,不同水灰比的水泥浆的最大扩散半径逐渐增

表 2 各类幂律型水泥浆的稠度系数时变方程

水灰比	流变方程 (初始)	稠度系数 时变方程	本文采用的稠度系数 时变方程的二次拟合方程	R^2
0.5	$\tau=10.450\ 7\gamma^{0.002\ 7}$	$c(t)=10.450\ 7e^{0.065\ 2t}$	$c(t)=10.450\ 7\cdot(0.006\ 07t^2+0.009\ 47t+1.140\ 26)$	0.998\ 29
0.6	$\tau=4.419\ 5\gamma^{0.002\ 6}$	$c(t)=4.419\ 5e^{0.058\ 7t}$	$c(t)=4.419\ 5\cdot(0.004\ 41t^2+0.021\ 45t+1.092\ 93)$	0.998\ 85
0.7	$\tau=1.865\ 6\gamma^{0.002\ 2}$	$c(t)=1.865\ 6e^{0.055\ 4t}$	$c(t)=1.865\ 6\cdot(0.003\ 71t^2+0.025\ 44t+1.074\ 42)$	0.999\ 08
0.8	$\tau=0.788\ 2\gamma^{0.002\ 1}$	$c(t)=0.788\ 2e^{0.053\ 9t}$	$c(t)=1.865\ 6\cdot(0.003\ 41t^2+0.026\ 77t+1.067\ 18)$	0.999\ 53
0.9	$\tau=0.333\ 0\gamma^{0.002\ 0}$	$c(t)=0.333\ 0e^{0.053\ 2t}$	$c(t)=1.865\ 6\cdot(0.003\ 29t^2+0.027\ 21t+1.064\ 35)$	0.999\ 93
1.0	$\tau=0.140\ 7\gamma^{0.002\ 0}$	$c(t)=0.140\ 7e^{0.052\ 8t}$	$c(t)=1.865\ 6\cdot(0.003\ 24t^2+0.027\ 36t+1.063\ 24)$	0.999\ 14

表 3 不同注浆压力差下各配合比水泥浆的最大扩散半径

注浆压 力差/ MPa	水灰比					
	W/C=0.5	W/C=0.6	W/C=0.7	W/C=0.8	W/C=0.9	W/C=1.0
0.1	0.08	0.177	0.397	0.535	0.694	0.852
0.15	0.113	0.257	0.561	0.758	0.982	1.206
0.2	0.146	0.335	0.696	0.942	1.217	1.492
0.25	0.179	0.41	0.804	1.089	1.402	1.714
0.3	0.212	0.48	0.892	1.208	1.548	1.888
0.35	0.245	0.546	0.966	1.307	1.667	2.028
0.4	0.277	0.607	1.028	1.388	1.764	2.139
0.45	0.309	0.662	1.082	1.457	1.844	2.230
0.5	0.341	0.712	1.13	1.517	1.911	2.306
0.55	0.372	0.757	1.173	1.568	1.969	2.369

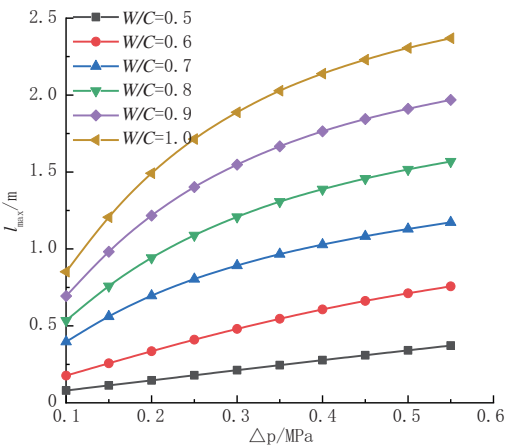


图 4 不同水灰比条件下浆液的最大扩散半径随注浆压力差的变化曲线

长,且增长速率随水灰比的增加而增加。由于前述已假设注浆过程中浆液流型不变,且按照文献[15]的试验结果可知,水灰比为 0.5~1.0 区间的水泥浆是幂律流体,因此根据稠度时空变化的幂律型流体柱形渗透扩散机制(式(22))可知,在水灰比为 0.5 的情况下,浆液最大扩散半径与注浆压力差呈正相关;当水灰比为 0.6 时,在注浆压力差由 0.1 MPa 增加至 0.55 MPa 的过程中,浆液最大扩散半径的增长速率逐渐减小,浆液最大扩散半径由 0.177 m 增加至 0.757 m,增长 3.28 倍。当水灰比为 0.7 时,在注浆压力差由 0.1 MPa 增加至 0.55 MPa 的过程中,浆液最大

扩散半径的增速呈逐渐减小并趋于稳定的特点,浆液最大扩散半径由 0.397 m 增加至 1.173 m,增长 1.95 倍;当水灰比大于 0.7 时,浆液最大扩散半径随注浆压力差的增大也逐渐增大,且增长幅度也相对于水灰比小于 0.7 时的情况有明显提升,但随着注浆压力差的增大,浆液最大扩散半径的增长速率在逐渐减小。

在施工过程中,为确保注浆质量和成本以及减小注浆过程对周围环境及管片的影响,需要将注浆压力和浆液扩散半径分别设定在 0.5 MPa 以内和 1/2 管片环宽以上。基于此,通过上述对比分析发现,水灰比为 0.5 的水泥浆不适用于盾构隧道管片壁后注浆。水灰比为 0.6 的水泥浆可用于曲线段管片(环宽 1.2 m)壁后注浆,且注浆压力应控制在 0.4 MPa 以上。对于水灰比大于 0.7 的水泥浆,在曲线段上注浆压力不应小于 0.2 MPa,在直线段上则不应小于 0.25 MPa。因此,相比于水灰比为 0.5 的情况,当注浆压力不小于 0.2 MPa 时,可在隧道曲线段选用水灰比为 0.7 的水泥浆进行注浆,当注浆压力不小于 0.25 MPa 时,方可用水灰比为 0.7 的水泥浆在隧道直线段注浆;当注浆压力不小于 0.4 MPa 时,可在隧道曲线段选用水灰比为 0.6 的水泥浆进行注浆。综上所述,根据工程中的实际注浆压力情况,可选用水灰比在 0.6~1.0 区间以内的水泥浆,但考虑成本因素的影响,通常选用水灰比为 0.6 或 0.7 的水泥浆进行小曲率盾构隧道的管片壁后注浆。

2.2.2 管片受壁后浆液力学作用分析

将注浆压力 p_0 及对应的最大扩散半径 l_i 带入式(23)计算,可得到壁后注浆对管片产生的渗透扩散作用力。当注浆压力 p_0 介于 0.10~0.55 MPa 时,水灰比为 0.5~1.0 的水泥浆对管片的作用力计算结果如表 4 和图 5 所示。

由表 4 和图 5 的计算结果可知,当浆液水灰比不变时,随着注浆压力增大,浆液对管片的作用力逐步增大。以水灰比为 0.8 时为例,当注浆压力由 0.1 MPa 提高至 0.55 MPa 时,水泥浆渗透扩散过程中对管片

表4 不同注浆压力下浆液渗透扩散对管片的作用力

注浆压力/MPa	水灰比					
	W/C=0.5	W/C=0.6	W/C=0.7	W/C=0.8	W/C=0.9	W/C=1.0
0.1	0.80	3.55	17.55	24.05	32.43	40.8
0.15	2.28	11.02	54.24	74.47	100.45	126.43
0.2	4.93	24.87	116.92	160.9	216.89	272.89
0.25	9.10	46.76	205.84	283.97	382.34	480.71
0.3	15.12	78.00	319.33	441.69	593.80	745.9
0.35	23.33	119.51	455.28	631.32	847.30	1 063.27
0.4	34.05	171.82	611.67	850.13	1 138.94	1 427.75
0.45	47.58	235.11	786.78	1 095.69	1 465.29	1 834.89
0.5	64.22	309.30	979.14	1 365.81	1 823.27	2 280.73
0.55	84.24	394.16	1 187.49	1 658.55	2 210.17	2 761.80

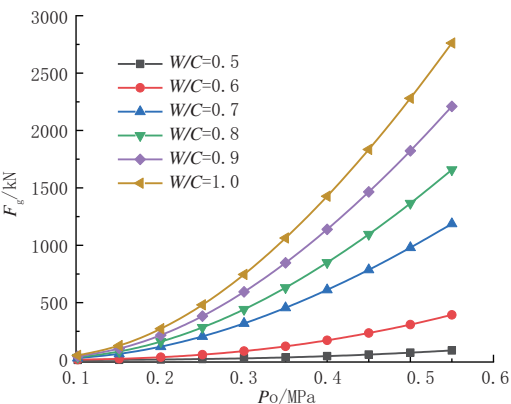


图5 不同水灰比下壁后注浆荷载随注浆压力的变化曲线

产生的荷载由 24.05 kN 增加至 1 658.55 kN,且增长速率随着注浆压力的提高而增大。在相同的注浆压力下,浆液的水灰比越大,其稠度越小、流动性越强、扩散半径越大,故浆液对管片的作用力越大。

综上所述,提高浆液水灰比能够有效增加浆液的扩散半径,提高浆液的可注性。但由于浆液渗透扩散半径的增大,相同注浆压力下其对管片产生的作用力显著增长,可能引起局部错台过大甚至管片破损等现象。因此,当提高浆液水灰比后,在满足浆液渗透扩散半径要求的前提下,应合理控制注浆压力的大小,避免对管片受力及变形产生不利影响。

3 结 论

本文对壁后注浆压力的计算方法及理论进行了介绍,并以柱面扩散理论为基础,建立了考虑稠度系数时空关系的渗透扩散模型,得到了浆液压力差、管片壁后浆液压力分布与浆液扩散半径的表达式。在此基础上,以南昌市轨道交通 1 号线东延工程中的麻丘站隧道工程为依托,结合小曲率半径盾构隧道

工程的特点,对 YDK43+122 ~ YDK42+858 区间的壁后注浆压力进行计算,并对主要影响因素进行了分析,得到如下结论:

- (1)水灰比为 0.5 的水泥浆渗透扩散半径偏小、可注性较差,在施工中不宜选用。
- (2)当注浆压力大于 0.5 MPa 时,水灰比为 0.6 的水泥浆可用于曲线段注浆。
- (3)考虑到注浆的经济成本及可注性因素的影响,水灰比为 0.7 的水泥浆可注性较好,但当应用于曲线段注浆时,注浆压力不应小于 0.2 MPa;而当应用于直线段注浆时,注浆压力不应小于 0.25 MPa。
- (4)壁后浆液压力的空间分布形态近似呈圆锥状,压力梯度随渗透扩散半径的增大而增大。注浆对管片产生的荷载随浆液渗透扩散半径的增大而增大,当浆液可注性较好时,应控制注浆压力不宜过大。

参考文献:

[1] GB 50446—2017 盾构法隧道施工及验收规范[S].
[2] 刘俊生.双护盾TBM小半径曲线地铁隧道施工技术[J].中国新技术新产品,2016(18):103-105.
[3] 张爱军.双护盾TBM小半径曲线地铁隧道施工技术[J].工程建设与设计,2019(5):183-184;187.
[4] 李翔.小半径曲线盾构掘进时管片破损分析[J].现代城市轨道交通,2006(6):47-48;51.
[5] 陈少波.盾构同步注浆填充扩散压力分布模式的计算分析[J].中国市政工程,2020(4):22-25;99-100.
[6] 韩鑫,叶飞,应凯臣,等.考虑自重的盾构壁后注浆浆液驱替渗透扩散[J].华中科技大学学报(自然科学版),2020,48(4):37-42.
[7] 王海刚,于同生.考虑注浆压力不确定性对盾构施工引起地表沉降的影响[J].土木工程与管理学报,2019,36(4):102-107.
[8] 王明年,黄海斌,汤渊,等.盾构施工对盾尾浆液压力波动变化的影响[J].西南交通大学学报,2019,54(3):461-467;586.
[9] 周佳媚,刘欢,张迁,等.考虑浆液稠度变化的盾构壁后注浆扩散模型[J].铁道科学与工程学报,2018,15(3):710-717.
[10] 孔祥言.高等渗流力学[M].合肥:中国科学技术大学出版社,2010.
[11] 叶飞,陈治,贾涛,等.盾构隧道管片注浆幂律流型浆液渗透扩散模型[J].岩土工程学报,2016,38(5):890-897.
[12] 王守慧,杨星,江玉生,等.双护盾TBM管片壁后豆砾石与底部灌浆同步回填技术研究—以青岛地铁6号线某工程为例[J/OL].隧道建设(中英文):1-9[2023-09-05].http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1745.U.20230831.1930.002.html.
[13] 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.
[14] 赵军,方越,闫思泉,等.不同水灰比注浆锯齿结构面剪切力学特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2021,40(增刊1):2673-2680.
[15] 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.