

山岭隧道注浆锚杆布置规律研究

赵立财^{1,2}

(1.台湾科技大学 营建工程系,台湾 台北 10607; 2.中铁十九局集团第三工程有限公司,辽宁 沈阳 110136)

摘要:在含水丰富的砂土地区,锚杆注浆可以解决隧道建设中围岩稳定差以及地下水侵蚀等问题。然而,注浆锚杆的不合理布置既会造成浆液的浪费,又不能达到预定的注浆效果。该文根据浆液扩散的微分方程,通过软件二次开发实现了隧道中锚杆注浆的数值模拟。结合数理统计,研究山岭隧道中注浆锚杆间距、隧道半径以及注浆时间对注浆圈形成的影响。结果表明:锚杆间距与注浆时间之间存在幂函数关系,而隧道半径与注浆时间之间存在指数函数关系。多心圆隧道中,不同半径段注浆锚杆之间布置的间距需要不同,锚杆间距之间的换算关系可由研究所得的公式完成。

关键词:隧道;注浆锚杆;数值模拟;锚杆间距;隧道半径

中图分类号:U455

文献标志码:A

在含水丰富的砂土地区建设隧道面临着严重的挑战,处理好地下水对隧道结构的影响至关重要^[1-3]。工程中常常通过注浆,既能增强围岩的稳定性,又能预防地下水对隧道的侵蚀。

已有诸多学者在隧道注浆方面做了研究,李慎举等^[4]通过数值模拟,研究了不同注浆压力 and 不同注浆锚杆布置方式对浆液流动扩散规律的影响;邱明明等^[5]应用流体力学与极限平衡法,探讨了盾构隧道壁后注浆压力的计算方法和浆液分布的流动特性;李鹏飞等^[6]基于地下水水力学理论,推导海底隧道渗水量和复合衬砌结构外水压力的计算方法,提出海底隧道复合衬砌合理注浆加固圈参数的确定方法;黄耀光等^[7]通过数值模型,研究了注浆时间、注浆压力以及注浆锚杆间距等锚注参数对浆液渗透扩散的影响;黄杰等^[8]通过数值模拟和理论分析的方法,研究了隧道注浆浆液扩散规律;郭吉平^[9]通过数值模拟,研究了不同锚杆支护参数下的结构承载及变形特征;魏义山等^[10]采用FLAC^{2D}软件,研究了袖阀管注浆预加固地层的力学响应,讨论了地层预加固范围及施工参数的合理性。然而,关于注浆锚杆控制布置方面还未涉及研究。众所周知,锚杆间距越大,形成闭合的注浆圈所需要的时间越长。现有研究发

现^[6-7],即使锚杆间距、锚杆长度相同,隧道半径对注浆圈的形成以及注浆圈厚度的发展也具有很大影响。此时,注浆相同的时间,不同半径区域内的注浆圈厚度不同,从而出现资源的不合理布置问题。

针对以上问题,该文从理论分析入手,通过数值模拟的方法,结合数理统计,研究注浆锚杆间距、隧道半径以及注浆时间对注浆圈形成的影响,提出锚杆布置间距、隧道半径以及注浆时间之间的关系表达式,为类似工程施工提供理论基础。

1 浆液扩散理论模型

研究区注浆锚杆浆液渗透扩散中,假设隧道围岩为均匀各向同性的连续介质。非稳态 Darcy 渗流的注浆压力是浆液运移扩散的主要推动力。在假设注浆浆液是不可压缩流体的前提下,在围岩中注浆浆液渗透扩散的基本微分方程为:

$$\frac{\partial^2(Kp)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2(Kp)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2(Kp)}{\partial z^2} = S \frac{\partial(p)}{\partial t} \quad (1)$$

式中: K 为围岩的浆液等效渗透系数(cm/s); p 为注浆压力(Pa); t 为注浆时间(s); $S=\rho(\alpha+n\beta)$ 为围岩的裂隙等效贮浆系数,表示每下降单位浆液压头时,

收稿日期:2020-10-20

基金项目:辽宁省“光辽英才计划”青年拔尖人才资助项目(编号:XLYC2007146);中铁十九局集团有限公司科技研究开发计划项目(编号:2021-B03)

作者简介:赵立财,男,博士研究生,教授级高工.E-mail:zhaolicai1314@foxmail.com

单位体积饱和围岩由于裂隙压缩和浆液膨胀所释放出的贮存浆液量(kg/m^3), α 和 β 分别为围岩和浆液的压缩系数, n 为围岩的空隙率, ρ 为浆液密度(kg/m^3)。

对于式(1), 若确定围岩的等效贮浆系数 S 和浆液等效渗透系数 K , 再结合适当的初始条件和边界条件即可求解该方程。工程实践表明: 隧道周边围岩的初始应力会因开挖扰动而改变, 从而影响围岩的渗透特性和浆液在围岩中的渗透扩散规律。同时, 注浆压力在浆液渗透扩散的过程中呈现出衰减趋势。Zhou等^[11]通过试验研究, 得到了围岩中注浆浆液的等效渗透系数 K 采用下式表示:

$$K = K_0 e^{-\lambda[(\sigma_m - \sigma_{m0}) - p]} \quad (2)$$

式中: σ_m 和 σ_{m0} 分别为开挖后、开挖前围岩的平均主应力(Pa); $\Delta\sigma_m = \sigma_m - \sigma_{m0}$, 为开挖前、后围岩的平均主应力差; K_0 为围岩的初始渗透系数(m/s); λ 为宏观试验参数, 一般取0.087 5。

式(2)即为注浆压力作用下围岩中注浆浆液渗透扩散的基本微分方程, 可通过COMSOL Multi-

physics中的稀物质传递模块进行求解。

2 模型建立及分析

2.1 有限元模型的建立

在数值计算模型中, 隧道周围取3~5倍洞径长度, 可以忽略边界效应的影响。隧道模型的宽、高均取30 m。为研究隧道尺寸对注浆圈的影响, 模型中隧道半径分别取1.11 m、1.25 m、1.43 m、1.67 m、2.50 m、3.00 m、4.00 m、5.00 m、6.00 m、7.00 m。土体以及浆液的物理力学参数见表1。为研究锚杆间距对注浆圈形成的影响, 在隧道一周设置的注浆锚杆分别从5根取到20根。例如, 图1(a)为隧道半径3 m、锚杆长度2 m、锚杆数量为11根时的模型示意图, 其中模型的顶部为自由边界, 底部为固定约束, 两边为滚动支承。模型采用COMSOL Multiphysics预置下的三角形网格划分, 采用特别细分网格, 有利于提高模型的计算精度, 图1(b)为模型网格划分示意图。

表1 土体以及浆液的物理力学参数

土体					浆液		
密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模 量/MPa	泊松比	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/(°)	重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	初始渗透系数 $K_0/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	贮浆系数 $S/$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
2 000	600	0.3	35	25.0	14.0	1.50×10^{-3}	0.30

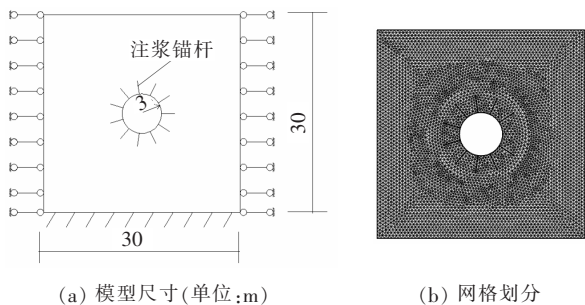


图1 模型示意图

2.2 注浆圈的形成过程

图2为隧道半径2.5 m、锚杆长度2 m、锚杆数量8根、注浆压力2 MPa时浆液扩散与时间的关系。从图2可知: 注浆开始阶段, 锚杆注入的浆液不断沿杆周扩散, 此时未形成注浆圈, 对隧道的防水没有保护效果; 当注浆时间达到176 s时, 隧道周围初步形成注浆圈; 随着注浆时间的进一步增加, 注浆圈厚度不断增厚, 对隧道的保护效果越好; 当注浆时间达到548 s

时, 注浆圈厚度达到锚杆的长度, 标志注浆完成。综上所述可知, 注浆圈的形成需要一定的时间, 注浆圈形成之前, 注浆对隧道的防水没有效果。

2.3 锚杆间距对注浆圈形成的影响

图3为隧道半径2.5 m、锚杆长度2 m、注浆压力2 MPa、注浆时间90 s、锚杆数量分别为7根、11根、15根以及19根的注浆结果图。

从图3可以看出: 在相同的注浆条件下, 锚杆间距2.24 m时未能形成注浆圈, 锚杆间距1.43 m时刚好形成闭合的注浆圈, 而锚杆间距1.05 m时注浆圈已达到一定厚度, 当锚杆间距为0.83 m时注浆圈厚度几乎达到注浆要求。由此表明, 锚杆间距对注浆效果存在重大影响, 锚杆间距越小, 注浆圈形成的厚度越大, 且注浆圈厚度的增量是超线性的。

2.4 隧道半径对注浆圈形成的影响

图4为锚杆长度2 m、注浆压力2 MPa、锚杆间距1 m, 隧道半径分别为1.11 m、1.25 m、1.43 m以及

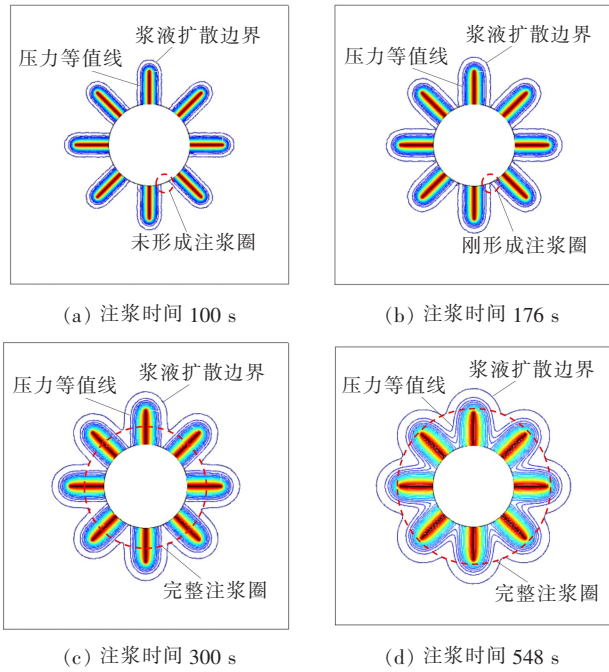


图2 注浆时间与浆液扩散之间的关系

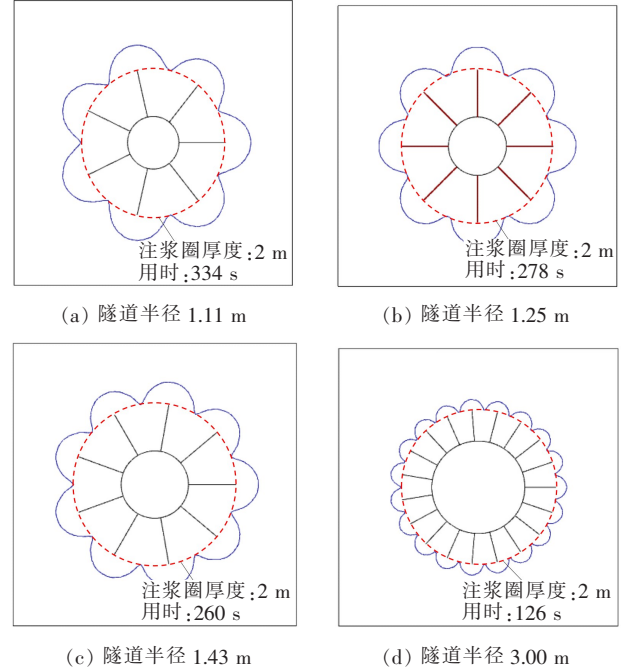


图4 隧道半径对浆液扩散的影响

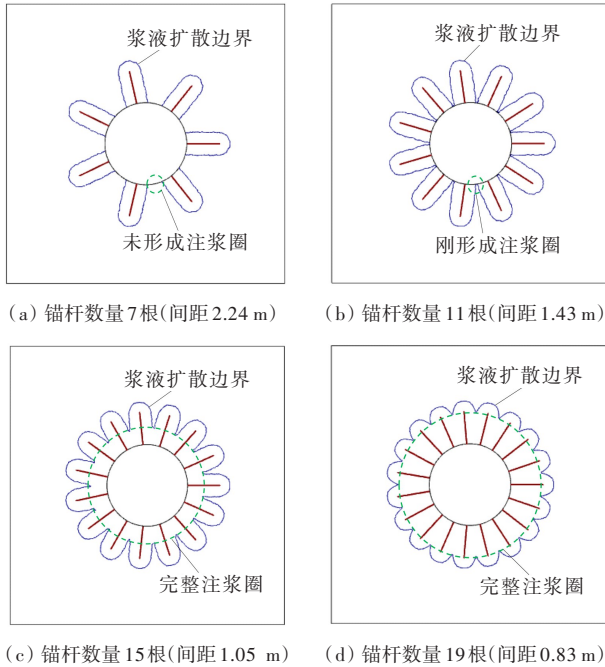


图3 不同锚杆间距下浆液扩散规律图

3.00 m的浆液扩散图。

由图4可知:当注浆圈厚度达到要求时,隧道半径为1.11 m、1.25 m、1.43 m以及3.00 m时所需要的注浆时间分别为334 s、278 s、260 s、126 s。表明隧道半径越大,达到注浆圈厚度要求所需要的注浆时间越短。

2.5 隧道半径、锚杆间距与注浆时间的关系

从前文分析可知,隧道半径与锚杆间距显著影响注浆圈的形成。为定量研究隧道半径、锚杆间距与注浆时间的关系,将不同隧道半径时锚杆间距与形成完整厚度注浆圈(注浆圈厚度等于锚杆长度)所需时间的关系表示在表2中。通过数理统计分析^[12],得到不同隧道半径下锚杆间距与注浆时间的关系式,将其表示在表3中。从表2、3可以看出:锚杆间距 s 与注浆时间 T 表达式的相关性很高,进而确定锚杆间距与注浆时间存在幂函数关系,其中,对于不同隧道半径,关系式中的系数变化大,而指数部分变动很小。通过数理统计,发现隧道半径 r 与幂函数的系数项存在以下关系:

$$\text{幂函数系数项} = 89.67 + 693.89 \times \exp\left(-\frac{r}{1.013}\right),$$

$$R^2 = 0.993 \quad (3)$$

式中:两者的相关性达到0.993,表明该关系式可靠。

对锚杆间距与注浆时间幂函数关系式的指数部分取平均值,得到隧道半径、锚杆间距与注浆时间之间的表达式:

$$T = \left[89.67 + 693.89 \times \exp\left(-\frac{r}{1.013}\right) \right] \times s^{1.891} \quad (4)$$

表 2 隧道半径、锚杆间距与形成完整注浆圈所需时间的关系

$r=1.11\text{ m}$		$r=1.25\text{ m}$		$r=1.43\text{ m}$		$r=1.67\text{ m}$		$r=2.50\text{ m}$	
时间/ s	锚杆间 距/m	时间/ s	锚杆间 距/m	时间/ s	锚杆间 距/m	时间/ s	锚杆间 距/m	时间/ s	锚杆间 距/m
600	1.39	646	1.57	534	1.50	456	1.50	1 252	3.14
432	1.16	470	1.31	406	1.28	356	1.31	914	2.62
334	1.00	356	1.12	320	1.12	286	1.17	696	2.24
256	0.87	278	0.98	260	1.00	244	1.05	548	1.96
204	0.77	232	0.87	204	0.90	196	0.95	442	1.75
178	0.70	182	0.79	178	0.82	174	0.87	296	1.43
138	0.63	162	0.71	142	0.75	142	0.81	214	1.21
128	0.58	128	0.65	122	0.69	122	0.75	170	1.05
110	0.54	120	0.60	116	0.64	102	0.66	126	0.92
85	0.50	102	0.56	80	0.56	73	0.58	110	0.83
$r=3.00\text{ m}$		$r=4.00\text{ m}$		$r=5.00\text{ m}$		$r=6.00\text{ m}$		$r=7.00\text{ m}$	
时间/ s	锚杆间 距/m	时间/ s	锚杆间 距/m	时间/ s	锚杆间 距/m	时间/ s	锚杆间 距/m	时间/ s	锚杆间 距/m
1 564	3.77	1 640	4.19	1 686	4.49	1 720	4.71	766	3.14
1 130	3.14	1 230	3.59	1 318	3.93	1 380	4.19	662	2.93
850	2.69	970	3.14	1 054	3.49	1 132	3.77	600	2.75
672	2.36	776	2.79	728	2.86	960	3.43	518	2.59
544	2.09	530	2.28	526	2.42	686	2.90	462	2.44
364	1.71	386	1.93	400	2.09	520	2.51	392	2.20
274	1.45	292	1.68	282	1.75	382	2.09	282	1.83
200	1.26	228	1.48	196	1.43	290	1.80	178	1.52
166	1.11	192	1.32	134	1.16	204	1.57	140	1.29
126	0.99	138	1.14	79	0.92	152	1.30	92	1.10

表 3 锚杆间距与注浆时间的关系表达式

隧道半径 r / m	锚杆间距 s 与 注浆时间 T 的关系	相关系数 R^2
1.11	$T=330.78 \times s^{1.863\ 3}$	0.996
1.25	$T=288.09 \times s^{1.832\ 5}$	0.998
1.43	$T=253.61 \times s^{1.868\ 0}$	0.996
1.67	$T=215.32 \times s^{1.899\ 1}$	0.997
2.50	$T=152.34 \times s^{1.865\ 3}$	0.999
3.00	$T=131.92 \times s^{1.884\ 3}$	0.999
4.00	$T=109.50 \times s^{1.899\ 4}$	1.000
5.00	$T=95.314 \times s^{1.929\ 4}$	1.000
6.00	$T=91.808 \times s^{1.894\ 6}$	0.999
7.00	$T=80.291 \times s^{1.978\ 5}$	0.998

从式(4)可以看出:

(1) 锚杆间距与注浆时间存在幂函数关系,锚杆间距越大,所需的注浆时间越长,与 2.3 节中的结论一致。

(2) 隧道半径与注浆时间存在指数函数关系,隧道半径越大,所需注浆时间越短,与 2.4 节中的结论一致。

(3) 固定注浆时间,即可得到隧道半径与锚杆间距之间的关系。该结论可以用于山岭隧道多心圆隧道中锚杆的布置,即确定隧道中一个半径上锚杆的布置间距,通过式(4)可确定隧道中其他半径上锚杆的布置间距。

3 结论

通过数值模拟,结合数理统计,研究了山岭隧道中注浆锚杆间距、隧道半径以及注浆时间对注浆圈形成的影响,得到以下结论:

(1) 注浆圈的形成需要一定的时间,注浆圈形成之前,注浆对隧道的防水没有效果;注浆时间越长,注浆圈厚度越大,对隧道的防水效果越好。

(2) 锚杆间距对注浆的形成有较大影响,锚杆间距与完成注浆所需要的时间之间存在幂函数关系,锚杆间距越小,完成注浆所需要的时间越短。

(3) 隧道半径对注浆也存在明显影响,隧道半径与完成注浆所需要的时间之间存在指数函数关系,隧道半径越大,所需注浆时间越短。

(4) 为达到最好的注浆效果,多心圆隧道中不同半径段注浆锚杆之间的间距不同,锚杆间距之间的转化可由式(4)完成。

参考文献:

- [1] 路平.考虑流固耦合的富水软岩隧道力学特性及合理注浆参数研究[D].长沙:中南大学,2012.
- [2] 张伟杰.隧道工程富水断层破碎带注浆加固机理及应用研究[D].济南:山东大学,2014.
- [3] 张龙生,翁贤杰.富水软弱围岩隧道塌方机理及治理技术研究[J].中外公路,2017,37(1):173-179.
- [4] 李慎举,王连国,陆银龙,等.破碎围岩锚注加固浆液扩散规律研究[J].中国矿业大学学报,2011,40(6):874-880.
- [5] 邱明明,姜安龙.地铁盾构隧道壁后注浆浆液压力分布模型[J].现代隧道技术,2013,50(4):115-121.
- [6] 李鹏飞,张顶立,赵勇,等.海底隧道复合衬砌水压力分布规律及合理注浆加固圈参数研究[J].岩石力学与工程学报,2013,31(2):280-288.
- [7] 黄耀光,王连国,陆银龙.巷道围岩全断面锚注浆液渗透扩散规律研究[J].采矿与安全工程学报,2015,32(2):240-246.
- [8] 黄杰,刘阳.公路隧道防渗水注浆圈形成特性研究[J].四川建筑,2018,38(6):102-105.
- [9] 郭吉平.软弱碎裂岩体中隧道锚杆支护优化分析[J].中外公路,2016,36(6):188-192.
- [10] 魏义山,江红,陈剑,等.地铁斜井通道袖阀管注浆预加固技术应用研究[J].中外公路,2017,37(2):213-217.
- [11] ZHOU Y, WANG P, SHI L, et al. Analytical solution on vacuum consolidation of dredged slurry considering clogging effects[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2021, 49(3):842-851.
- [12] GÜLLÜ H. A new prediction method for the rheological behavior of grout with bottom ash for jet grouting columns [J]. Soils and Foundations, 2017, 57(3):384-396.