

文章编号:1004-3918(2019)10-1620-07

盾构隧道壁后注浆窜浆分析

徐超^{1,2}, 朱伟³, 钱勇进^{1,2}, 王璐^{1,2}, 胡润楠^{1,2}

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 南京 210098;
2. 河海大学 土木与交通学院, 南京 210098; 3. 河海大学 环境学院, 南京 210098)

摘要: 以盾构施工中壁后注浆浆液顺着盾体与地层之间的空隙流至开挖面的现象为背景, 基于宾汉姆流变方程, 推导了该现象发生条件的理论公式, 并分析硬岩地层、软土地层以及盾构爬坡三种工况下窜浆现象的影响因素及发生条件以及浆液的固结排水过程和盾构机的掘进速度对窜浆的影响。结果表明, 浆液的黏度对窜浆的发生与否影响很小, 浆液的初始剪切强度越大、盾体空隙宽度越小、浆液的固结排水量越大、掘进速度越快, 则窜浆现象越不易发生。

关键词: 盾构隧道; 壁后注浆; 流变参数; 宾汉姆流体

中图分类号: U 455.43 **文献标识码:** A

Analysis of Grout Leakage in the Process of Backfill Grouting of Shield Tunnel

XU Chao^{1,2}, ZHU Wei^{1,2}, QIAN Yongjin^{1,2}, WANG Lu^{1,2}, HU Jiannan^{1,2}

(1. Key Laboratory of Geomechanics and Embankment Engineering, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
3. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: With the background of the phenomenon of grout leakage in the process of shield backfill grouting, based on Bingham rheological equation, the theoretical formula of the occurrence condition of the phenomenon is derived. The influencing factors and occurrence conditions of the grout leakage under the three conditions of rock, soil stratum and uphill driving are analyzed, the effect of grout consolidation and the speed of advance on grout leakage was also considered. The results show that the viscosity of the grout has little effect on the occurrence of the grout leakag. The larger the initial shear stress of the grout is, the smaller the gap width is, the larger the seepage discharge is and the faster the speed of advance is, the less likely the grout leakage phenomenon will occur.

Key words: shield tunnel; backfill grouting; rheological parameter; Bingham model

随着各大城市地铁建设力度的不断加大, 跨江越海隧道工程不断增加, 盾构法逐渐成为主流的城市隧道施工方法^[1]。在盾构机的设计中, 为了防止刀盘及盾体与地层之间产生过大的摩阻力, 会在刀盘上设置超挖刀, 使得开挖直径略大于刀盘直径; 而为了便于盾构机在推进过程中完成转弯与调整姿态, 刀盘的直径又要大于盾体直径, 这就在盾体与地层之间形成一个三维圆环形空隙, 以下简称为盾体空隙。由于管片与盾壳之间预留了一定的拼装空间, 这个拼装空间加上盾壳厚度与盾体空隙一起构成了盾尾空隙。在盾构推进过程中这些空隙一般通过即时注浆进行填充, 以防止过大的围岩应力释放和地基变形^[1-3]。正常情况下壁后注浆可以很好地充填盾尾空隙, 既起到防止变形过大也起到辅助防渗等作用^[4]。但在实际施工操作中, 由于浆液流动性、注浆压力、初凝时间等参数控制问题以及掘进遇到的一些特殊地层或特殊工况下, 浆液会顺着盾体空隙流入开挖面或者盾尾影响正常的掘进施工。这种壁后注浆浆液沿盾体空隙或盾尾空隙发生流失的现

收稿日期: 2019-05-07

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)(2015CB057803)

作者简介: 徐超(1995-), 男, 硕士研究生, 主要从事盾构隧道、岩土工程等研究工作

通信作者: 朱伟(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事盾构隧道、环境岩土工程等方面的研究与教学工作

象一般称为窜浆。广州地铁二号线越秀公园站—广州火车站区间强风化岩层的掘进过程中, 出现了壁后注浆浆液顺着盾壳外壁漏进开挖面的现象^[5], 窜浆不但会引起盾尾空隙填充不实也会引起面板结饼、压力舱堵塞等问题。

窜浆的发生就是黏塑性浆液在盾体空隙中流动, 其流动范围超出充填范围而出现的现象。一般对于黏塑性浆液的流动性质可以用流变模型来表达。阮文军^[6]对不同水灰比的水泥浆液进行了流变参数的测定, 试验表明对于纯水泥浆液, 水灰比为0.5~0.7的水泥浆液其流型符合幂律流体, 水灰比为0.8~1.0的水泥浆液是宾汉姆流体, 水灰比为2.0~10.0的水泥浆液是牛顿流体, 而添加黏土的水泥黏土浆液也符合宾汉姆流体; 对于更加接近壁后注浆材料的水泥砂浆, Goaszewski等^[7]与刘沙沙^[8]分别采用Viskomat PC流变仪与旋转黏度计进行了流变参数测定, 均得出其流变特性符合宾汉姆流体模型。

关于浆液在空隙中的流动计算方面, 黄春华^[9]应用宾汉姆流体的流变方程, 推求水泥浆液在平面径向裂隙中流动的基本方程, 提出浆液流动距离理论计算公式。在壁后注浆方面, 韩月旺等^[10]基于宾汉姆流体, 推求了同步注浆浆液在盾尾空隙中的充填规律; 叶飞等^[11-12]基于广义达西定律并考虑浆液自重, 推求了壁后注浆体渗透扩散的计算公式, 并分别讨论了浆液黏度以及流型变化对计算结果的影响。汪磊与李涛^[13-14]以胶州湾海底隧道为背景研究了分别使用牛顿流体以及宾汉姆流体的情况下, 岩体裂隙中注浆体扩散半径的差异; Bezuijen等^[15-17]通过使用宾汉姆流体对盾尾同步注浆过程进行模拟, 讨论了盾构隧道注浆浆液压力分布模式及影响因子; 邱明明与姜安龙^[18]也使用了牛顿流体和宾汉姆流体两种流体模型进行了相似的计算和讨论。这些研究大多数注重于盾构环向盾尾空隙的充填规律的计算和讨论, 而对于隧道纵向上由浆液参数-注浆参数-空隙特征之间关系决定的浆液的纵向流动及压力传递规律涉及不多, 仍然缺乏能够直接判断窜浆是否发生的控制条件。

为了明确窜浆发生的条件, 本文基于宾汉姆流体, 对软土、硬岩以及盾构爬坡三种工况下建立壁后注浆体沿隧道纵向流动的计算公式并分析讨论了窜浆发生的条件, 同时考虑了浆液在流动过程中的固结排水过程以及掘进速度对窜浆的影响, 对得出窜浆的控制措施与方法有一定的参考意义。

1 浆液流动模型建立

1.1 宾汉姆流体

宾汉姆流体又称塑性流体, 其流变曲线为不通过原点的一条直线^[19]。当剪应力大于屈服值 τ_0 , 流体作层流运动, 否则不发生流动; 流动过程中其截面的速度分布图如图1所示, 可见其中心一对称区域内的流速最大, 且速度梯度为0, 这一区域称作流核。由于作层流运动, 壁面处的流速为0, 流核部分速度最大, 因此受到的剪切力最小, 从流核边缘至壁面处, 流体受到的剪切力逐渐增大, 流速越大, 则流核范围越大。其流变方程为:

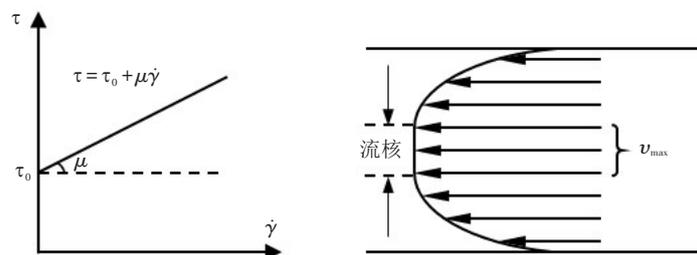


图1 宾汉姆流体流变曲线及流速分布图

Fig.1 Bingham fluid rheology curve and flow rate distribution

$$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma},$$

式中: τ 为剪切应力; τ_0 为浆液的初始剪切强度; μ 为浆液的黏度; $\dot{\gamma}$ 为浆液受到的剪切速率。

1.2 基本假设

浆液在盾体与地层之间的空隙中以注浆孔为中心径向流动, 受到地下水、地层、管片等诸多因素的影

响,为了能建立出相应的理论计算式,作出了如下假设:

- 1)浆液为不可压缩的均质各向同性流体.
- 2)盾体、地层与浆液的接触面光滑.
- 3)浆液流动属于恒定层流.
- 4)浆液的流型始终符合宾汉姆流体特性.
- 5)不考虑浆液向土体中的渗透以及水的稀释作用.

1.3 基于宾汉姆流体的浆液流动计算式

如果以四孔注浆为例,注浆孔布置方式为沿隧道竖向轴线顺时针转过角度分别为 $(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4)$,将 360° 的盾尾平面展开以同时表达浆液在环向与径向上的流动,那么盾尾空隙充满后浆液流入盾体空隙的运动状态示意图如图2所示^[20].随着盾构的推进和各注浆孔浆液的注入,浆体前锋面在环向连成整体并向径向推进.本次为了解析以注浆孔为中心的径向流动,只选取隧道顶部的纵向单元条,仅考虑沿隧道纵向壁后注浆体水平流动且注浆压力无衰减的作为窜浆的驱动压力这一最不利情况.计算单元受力简图如图3所示.

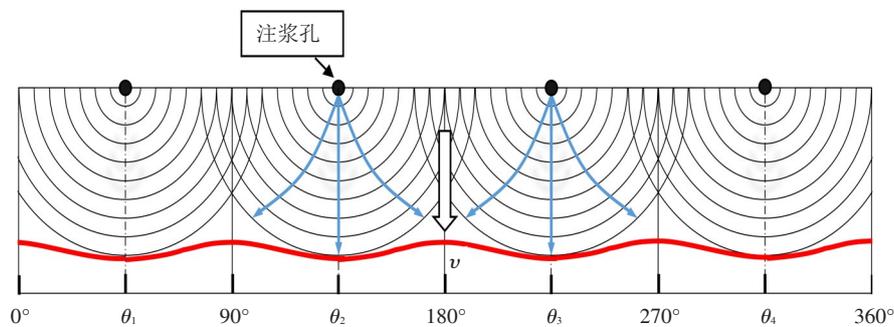


图2 浆液流动示意图
Fig.2 Grout flow diagram

首先对单元体进行受力分析:

$$2z \cdot dP = 2\tau \cdot dx, \quad (1)$$

式中: $2z$ 为单元体高度, τ 为剪切应力, dx 为单元体长度, dP 为单元体两侧压力差.

结合宾汉姆流体流变方程:

$$\tau = \tau_0 + \mu \frac{du}{dz}. \quad (2)$$

由(1)式,令剪切应力为初始剪切应力 τ_0 ,得流核范围 z_e 为:

$$z_e = \tau_0 \frac{dx}{dP}. \quad (3)$$

结合(2)(3)式,得浆液在 $[z_e, \frac{\delta}{2}]$ 上的速度梯度:

$$\frac{du}{dz} = \frac{1}{\mu} \frac{dP}{dx} (z - z_e). \quad (4)$$

对速度在 z 方向进行积分:

$$u = \frac{1}{2\mu} \frac{dP}{dx} \left(\frac{\delta^2}{4} - z_e \delta - z^2 + 2z_e z \right). \quad (5)$$

令 $z = z_e$,得截面上的最大速度:

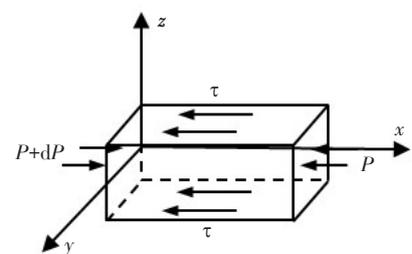


图3 计算单元体
Fig.3 Computation unit

$$u_{\max} = \frac{1}{2\mu} \frac{dP}{dx} \left(\frac{\delta}{2} - z_e \right)^2 \quad (6)$$

认为在注浆压力作用下,浆液的最大径向流动速度 u_{\max} 大于盾构机推进速度 v_d 时会发生窜浆现象. 即临界条件为:

$$u_{\max} = v_d; \quad (7)$$

$$\frac{\delta^2}{4} \frac{dP}{dx} + \tau_0^2 \frac{dx}{dP} - \delta\tau_0 = 2\mu v_d. \quad (8)$$

再对 x 从 0 到 L 积分得:

$$\Delta P = \frac{(2\mu v_d + \tau_0 \delta) + 2\sqrt{(\mu^2 v_d^2 + \mu v_d \tau_0 \delta)}}{\delta^2/2} \cdot L, \quad (9)$$

式中: ΔP 为盾尾注浆孔处与刀盘处的压力差, μ , τ_0 分别为壁后注浆浆液的黏度与初始剪切强度, δ 为盾体空隙的宽度, v_d 为盾构机的推进速度, L 为盾构机的机身长度.

2 窜浆的发生条件及影响因素分析

由上述计算式可知,影响窜浆的主要因素有盾体空隙宽度、浆液的性质以及压力差,盾构掘进地层可大致分为软土与硬岩两种,分别对这两种地层中窜浆的发生条件以及盾构爬坡这一工况进行了分析.

2.1 计算参数选取

1) 压力差 ΔP : 参照《盾构隧道施工手册》^[21]可知壁后注浆压力一般比注浆口处的地层压力大 0.1~0.2 MPa, 而土舱或泥水舱的压力要与地层压力平衡,故取压力差为 0.1~0.2 MPa.

2) 盾体空隙 δ : 刀盘直径与盾体直径的差值,参照常规地铁隧道盾构机外径与隧道外径的参数,选取为 20 mm; 盾体长度取 10 m.

3) 浆液流变参数: 可用旋转黏度计测得,壁后注浆硬性浆液流变参数^[22]一般为 $\mu = 1 \sim 4 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, $\tau_0 = 10 \sim 40 \text{ Pa}$.

2.2 地质因素对窜浆的影响

2.2.1 岩石地层中窜浆现象分析 在硬岩地层掘进时,围岩具有良好的自稳性,岩体的变形小,由于开挖直径大于盾体直径造成的空隙难以封闭,壁后注浆过程中浆液有沿着盾体空隙流动至土舱内的现象. 岩层自稳性好,因此计算过程中选定盾体空隙宽度为初始值 20 mm; 掘进速度取 30 mm/min, 分别计算 100、150 kPa 与 200 kPa 压力差下不发生窜浆所需要的浆液参数,计算结果如图 4 所示. 可以看出,浆液的黏度大小 μ 对于窜浆现象的发生与否影响很小,对于硬岩地层,掘进过程产生的盾体空隙因地层自稳性好而无法封闭,所能承受的不发生窜浆的极限压力差主要受浆液初始剪切强度的影响; 对于 20 mm 宽的盾体空隙,浆液初始剪切强度需要达到 93 Pa 才能承受 100 kPa 压力差而不发生窜浆,达到 190 Pa 才能承受 200 kPa 压力差而不发生窜浆. 由此可见,施工中采用的初始剪切强度在 10~40 Pa 的浆液在硬岩地层中易发生窜浆现象.

2.2.2 软土地层中窜浆现象分析 由图 4 可知,对于窜浆的发生,浆液黏度的影响较小,而软土地层较容易发生土体的塌陷与回弹,因此本部分计算选定浆液的黏度 $\mu = 1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$; 掘进速度 30 mm/min, 分别计算 $\tau_0 = 10, 20, 30, 40, 50 \text{ Pa}$ 时,盾体空隙宽度与其可承受不发生窜浆的最大压力差之间的关系,计算结果如图 5 所示. 可以看出,由于软土地层中掘进产生的盾体空隙宽度会由于地层的塌陷回弹而减小,不发生窜浆所能承受的极限压力差由浆液的初始剪切强度 τ_0

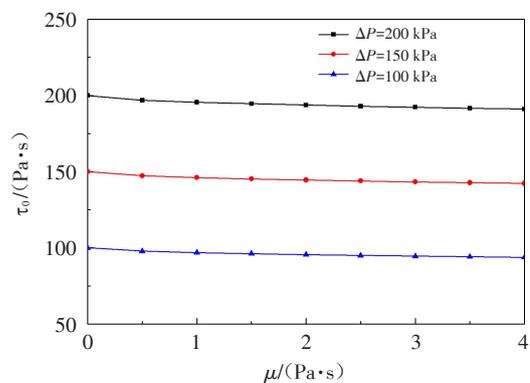


图 4 硬岩地层中压力差与浆液参数关系曲线

Fig.4 Relation curves of pressure difference and grout parameter in rock stratum

与盾体宽度 δ 共同决定。盾体空隙宽度越小,浆液的初始剪切强度越大,所能承受的压力差就越大,以浆液初始剪切强度 $\tau_0=30$ Pa 为例,盾体空隙宽度小于 7 mm 可承受 100 kPa 压力差而不发生窜浆,小于 4 mm 时可承受 200 kPa 压力差而不发生窜浆。由此可见,软土地层中窜浆现象鲜有发生是因为盾体空隙由于地层的塌陷回弹而减小了。

2.3 盾构爬坡时窜浆现象分析

在城市轨道交通线路的纵断面设计的过程中,为了减少后续列车运行的能耗,一般将线路设计成 V 型坡或 W 型坡^[23],因此盾构机的掘进过程多为下坡进洞再上坡出洞的情况,由于盾构机机身处于倾斜状态,盾尾与刀盘的埋深不同,会在盾尾注浆口处与开挖面之间产生压力差。当盾构机处于爬坡状态时,刀盘处的埋深小于盾尾处的埋深,产生的压力差为正值,加上由注浆压力导致的压力差,致使总压力差增大,更易发生窜浆现象;而盾构机下坡时,产生的压力差为负值,对于窜浆的发生有一定的抑制作用。因此本节主要考虑盾构机上坡的情况,不同坡度下所需的浆液初始剪切强度的计算结果如图 6 所示。

由计算结果可知,随着盾构机的爬坡坡度增加,克服相同由注浆压力产生的压力差而不发生窜浆,需要的浆液初始剪切强度也在不断增加,坡度在从 0%~10% 增加的过程中,所需的浆液初始剪切强度增加了 20 Pa。因此,在盾构机爬坡的过程中,窜浆现象由于总压力差的增加更易发生,施工中应当注意。

2.4 掘进速度对窜浆的影响

理论计算中,以浆液的流速等于盾构机的推进速度作为临界条件,掘进速度为判断窜浆是否发生的关键因素。实际施工中,盾构机的掘进速度与盾构机的种类、地层状况以及出土速度等息息相关,一般的掘进速度为 30~100 mm/min。为了研究掘进速度对于窜浆现象发生的影响,选定浆液参数为($\mu=1$ Pa·s, $\tau_0=30$ 、50 Pa);盾体空隙宽度为 20 mm,计算掘进速度与其可承受不发生窜浆的最大压力差之间的关系,计算结果如图 7 所示。

由计算结果可知,浆液配比与空隙宽度一定的情况下,随着掘进速度的增加,不发生窜浆所能承受的最大压力差增大;硬岩地层中,由于围岩坚硬,盾构推进速度较慢,因此硬岩地层中可承受不发生窜浆的极限压差较小,更易发生窜浆;而对于软土地层,土质较软,出土顺畅,推进速度也相应加快,再加之地层的塌陷回弹,盾体空隙减小,窜浆现象少有发生。

2.5 固结排水作用对窜浆现象的影响

浆液在从注浆孔被注入盾尾空隙后,不论是在盾尾空隙还是盾体空隙中流动时,均受到来自注浆压力、地层应力以及水压力的多重作用,处于多应力作用下的固结状态。短时间内浆液的固结可以看作是浆液体

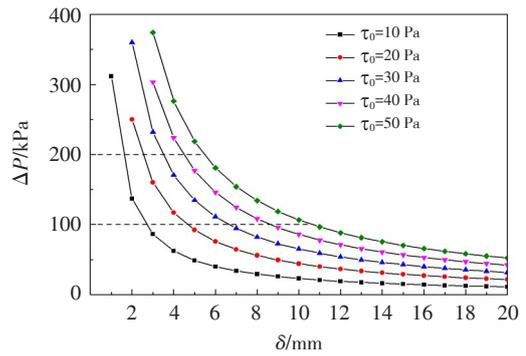


图5 软土地层中压力差与盾体空隙宽度关系曲线
Fig.5 Relation curves of pressure difference and gap width in soil stratum

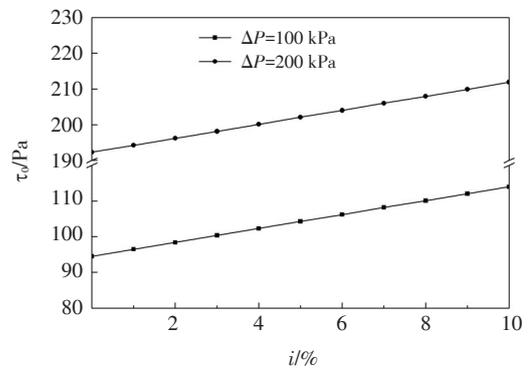


图6 不同压力差下坡度与浆液初始剪切强度关系曲线
Fig.6 Relation curves of slope and initial shear stress under different pressure difference

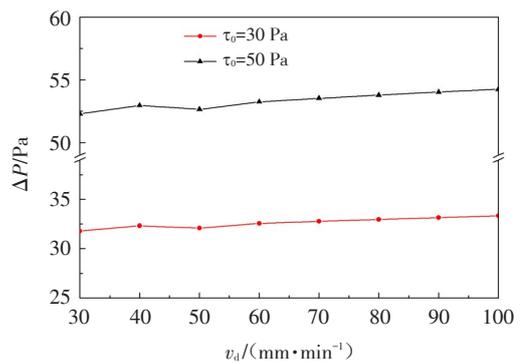


图7 掘进速度-可承受最大压差关系曲线
Fig.7 Relation curves of pressure difference and speed of advance

积压缩向外排水的过程,不考虑胶结作用的影响,随着浆液中水的排出,浆液的流变特性也会发生变化.

为了研究这一过程对窜浆的影响,对南京纬三路过江隧道所使用的壁后注浆浆液^[24](配比见表1)采用成都仪器厂生产的NXS-11B型旋转黏度计(如图8)进行流变参数的测定.通过减少配置浆液过程中水的参加量来模拟浆液的固结排水的过程,试验中浆液1配比采用原配比,浆液2中水的参加量减少了20%,浆液3中减少了35%,试验结果如图9.

表1 南京纬三路过江隧道壁后注浆浆液配比

Tab.1 Mix ratio of backfill grout materials in the Nanjing Weisan Road River-Crossing Tunnel 单位:g

组分	水泥	粉煤灰	砂	水	膨润土	减水剂
配比	60	300	1000	405	120	3



图8 NX S-11B型旋转黏度计
Fig.8 NX S-11B rotatory viscometer

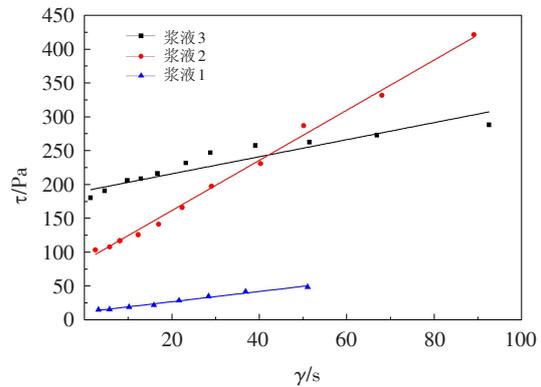


图9 浆液的流变曲线
Fig.9 Rheological curve of grout

由试验结果可知,浆液1和2的流型均符合宾汉姆流体特性,浆液3含水量最少,随着剪切速率的增大,出现了剪切稀释的情况;但是随着浆液中水的添加量的减少,浆液的初始剪切强度 τ_0 均不断增大.对于浆液1,浆液的初始剪切强度 τ_0 只有14 Pa,而浆液2的初始剪切强度 τ_0 有90 Pa,浆液3的初始剪切强度 τ_0 更是达到了180 Pa,由此可见,随着浆液流动过程中的排水固结,浆液的初始剪切强度不断增大,根据图1可知,浆液的初始剪切强度越大,那么可以承受的不发生窜浆的极限压力差就越大,因此浆液的排水过程对于抑制窜浆现象的发生是具有积极作用,并且地层的渗透系数越大,抑制作用越明显.

3 结论

针对盾构施工过程中发生的窜浆问题,本研究通过基于宾汉姆流体的理论公式对软土地层、硬岩地层以及盾构爬坡三个工况下的窜浆条件进行了分析,并考虑了盾构机掘进速度与浆液在流动填充过程中的固结排水对窜浆的影响.主要得出了以下结论:

1)基于宾汉姆流变方程,推导得到考虑浆液流变参数、盾体空隙宽度、盾尾与刀盘处压力差以及盾构推进速度的窜浆条件计算式

$$\Delta P = \frac{(2\mu v_d + \tau_0 \delta) + 2\sqrt{(\mu^2 v_d^2 + \mu v_d \tau_0 \delta)}}{\delta^2/2} \cdot L,$$

利用这个公式可以判别施工中窜浆现象的发生与否.

2)对于硬岩地层中的掘进,盾体空隙由于地层的稳定性好而难以封闭,掘进速度慢,施工中易发生窜浆现象.盾尾与刀盘处压力差为100 kPa时,所使用的浆液初始剪切强度要大于93 Pa;压力差为200 kPa时,浆液的初始剪切强度要大于190 Pa可以抑制窜浆现象的发生.因此,硬岩地层施工时应加大浆液的初

始剪切强度。

3)对于软土地层中的掘进,由于地层易发生塌陷回弹,掘进速度快,窜浆现象的发生与否主要受到盾体空隙宽度的影响。盾体空隙宽度小于8 mm可承受100 kPa的压力差;小于4 mm可承受200 kPa压力差而不发生窜浆。盾构爬坡时,会导致盾尾与刀盘处的压力差增大,坡度越大,窜浆现象越易发生。

4)考虑到浆液在盾体空隙中的流动过程也伴随着固结排水的过程,对不同含水率的浆液进行了流变参数测定。浆液的排水量越大,初始剪切强度越大,排水量达到20%,浆液的初始剪切强度有90 Pa;排水量达到35%,浆液初始剪切强度有180 Pa。地层的渗透系数越大,浆液的排水量越多,则抑制窜浆发生的作用越明显。

参考文献:

- [1] 王梦恕. 中国盾构和掘进机隧道技术现状、存在的问题及发展思路[J]. 隧道建设, 2014, 34(3): 179-187.
- [2] 朱伟, 陈仁俊. 盾构隧道施工技术现状及展望[J]. 岩土工程界, 2001(11): 19-21.
- [3] 叶飞, 毛家骅, 纪明. 盾构隧道壁后注浆研究现状及发展趋势[J]. 隧道建设, 2015, 35(8): 739-752.
- [4] 邹翀. 盾构隧道同步注浆技术[J]. 现代隧道技术, 2003(1): 26-30.
- [5] 邹翀. 广州地铁二号线盾构隧道同步注浆技术[J]. 隧道建设, 2002(3): 15-21.
- [6] 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(1): 69-73.
- [7] GOASZEWSKI J, SZWABOWSKI J. Influence of superplasticizers on rheological behavior of fresh cement mortars[J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(2): 235-248.
- [8] 刘沙沙. 水泥砂浆流变性能测试方法及外加剂对流变性能影响的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
- [9] 黄春华. 裂隙灌浆宾汉流体扩散能力研究[J]. 广东水利水电, 1997(2): 13-17.
- [10] 韩月旺, 曾彦, 钟小春. 盾构隧道壁后注浆充填模型[J]. 北京工业大学学报, 2012, 38(6): 854-858.
- [11] 叶飞, 陈治, 孙昌海, 等. 考虑浆液自重的盾构隧道管片注浆浆液渗透扩散模型[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(12): 2175-2183.
- [12] 叶飞, 苟长飞, 陈治, 等. 盾构隧道粘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.
- [13] 汪磊, 李涛. 基于牛顿流体的海底隧道穿越裂隙岩体注浆扩散半径计算[J]. 土工基础, 2012, 26(5): 51-53.
- [14] 汪磊, 李涛. 基于宾汉姆流体的海底隧道穿越裂隙岩体注浆扩散半径计算[J]. 铁道标准设计, 2013(6): 96-100.
- [15] BEZUIJEN A, TALMON A M, BEZUIJEN A, et al. Grout pressures around a tunnel lining, influence of grout consolidation and loading on lining[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2004, 19(4-5): 443-444.
- [16] BEZUIJEN A, TALMON A, KAALBERG F, et al. Field measurements of grout pressures during tunneling of the sophia rail tunnel[J]. Journal of the Japanese Geotechnical Society Soils and Foundation, 2004, 44(1): 39-48.
- [17] BEZUIJEN A, TALMON A. Grout the foundation of a bored tunnel[M]//Tunnelling a decade of progress GeoDelft 1995—2005, London: Taylor and Francis Group, 2005: 95-100.
- [18] 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.
- [19] 曾祥熹. 钻孔护壁堵漏原理[M]. 北京: 地质出版社, 1986: 177-197.
- [20] 韩月旺. 盾构壁后注浆体固结-胶结特性对地层变形影响机理[D]. 南京: 河海大学, 2009.
- [21] 张凤祥, 傅德明, 杨国祥, 等. 盾构隧道施工手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005: 306-313.
- [22] 袁小会, 韩月旺, 钟小春. 盾构隧道壁后注浆压力分布模型[J]. 西南交通大学学报, 2011, 46(1): 18-23.
- [23] 白骁. 城市轨道交通线路纵断面节能优化[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
- [24] 王睿, 姚占虎, 朱伟, 等. 南京纬三路过江通道盾构壁后注浆固结不排水剪切力学特性研究[J]. 现代隧道技术, 2015, 52: 95-100.

(编辑 张松林)