

摘要：地铁隧道盾构施工同步注浆存在很多风险因素。同步注浆过程中通过对注浆材料、参数和施工过程的控制，可有效减小同步注浆的风险，更好地控制注浆效果。着重分析了在不同地层中注浆系数的控制，从而有效地控制注浆量，减少因注浆量过大而引起地面隆起，或因注浆量过少而引起地面沉降的现象发生。

关键词：盾构施工；同步注浆；风险控制；注浆参数

盾构施工同步注浆由于具有隐蔽性、复杂性和不确定性等特点，施工过程中会遇到很多困难和障碍。本文就引起盾构施工同步注浆风险变化的各种因素进行分析，并对盾构施工同步注浆风险进行控制。

### 1 工程概况

北京地铁9号线角门北路站-北京南站区间右线全长1382.858m，其中盾构区间长1231.434m；区间左线全长1321.687m，其中盾构区间长1161.488m；盾构区间隧道设计断面为圆形，外径6m，内径5.4m。隧道轨顶设计标高17.75~25.00m，隧道结构顶标高22.75~30.00m，隧道结构底标高16.75~24.00m，隧道埋深16.0~23.5m，覆土厚10.0~17.5m。

本区间线路地形较平坦，地面标高39.40~41.30m。属于古凉水河古河道及古河漫滩地貌，盾构穿越地层主要参数见表1。盾构区间采用盾尾同步注浆。

表1 盾构穿越地层主要参数

地层代号	岩性名称	一般粒径/mm	天然密度 $\rho$	粘聚力 $C$	内摩擦角 $\varphi$	渗透系数 $K$
⑤	圆砾	10-40	2.10	0	40	120
⑤ <sub>1</sub>	中粗砂		2.07	0	32	20
⑤ <sub>2</sub>	粉细砂		2.06	0	30	5.0
⑤ <sub>4</sub>	粉质粘土		1.90	28	15	
⑥	粉质粘土		1.92	43	11	
⑥ <sub>1</sub>	粘土		1.88			
⑥ <sub>2</sub>	粉土		1.97	22	26	0.5
⑦	卵石	20-60	2.15	0	43	180
⑦ <sub>1</sub>	中粗砂		2.10	0	35	
⑦ <sub>2</sub>	粉细砂		2.08	0	33	

### 2 同步注浆风险分析

(1) 注浆材料和浆液配方选取风险。主要表现在注浆材料的流动性、浆液的凝胶时间、浆液的固结体强度等特性的控制。注浆材料和浆液配方的选取直接关系到注浆施工效果的好坏，不同地层对注浆材料的选取要求不同。

(2) 注浆参数选取风险。主要表现在控制注浆压力、注浆量、注浆速率和注浆时间等方面。注浆参数的选取关系到注浆效果的好坏以及对周围环境的影响。



(3) 注浆施工风险。主要表现在注浆施工的准备是否完善、浆液的配置以及浆液的存储与运输等方面。注浆施工是注浆效果能否达到设计要求的關鍵。

(4) 注浆效果评价风险。主要表现在注浆监测手段是否合理、注浆量是否满足设计要求以及注浆检测等方面。注浆效果评价是检验注浆材料、注浆参数、注浆施工是否合理的重要环节，注浆效果评价的好坏直接关系到注浆的成功与否。

### 3 注浆材料风险控制

由于隧道盾构同步注浆材料的性能受岩体条件、施工方式、价格等多种因素的影响，所以在施工前针对该区间地层进行分析，通过大量的室内与现场对比试验，选择了适合本工程现场条件的同步注浆材料及配合比：水泥，100 kg / m<sup>3</sup>；粉煤灰，300 kg / m<sup>3</sup>；膨润土，56 kg / m<sup>3</sup>；砂，779 kg / m<sup>3</sup>；水，400 kg / m<sup>3</sup>；膨胀剂，45 kg / m<sup>3</sup>；外加剂，0.135 kg / m<sup>3</sup>；注浆材料密度，1.75 kg / m<sup>3</sup>。该配合比可用于软基地层、自稳能力较差的岩层，尤其适用于该区间粉细砂地层，且根据注浆需要可及时进行调整。

### 4 注浆参数风险控制

#### 4.1 注浆量控制

盾构机注浆量按冲程计，浆液泵每注一次为一冲程，每一冲程为 12L。注浆量的确定以盾尾间隙量为基础，结合地层、线路适当考虑注浆系数，以达到充填密实。注浆系数主要由土质系数、超挖系数决定。土质系数取决于地层性质，一般取值为 1.1~1.5；在完整性好、自稳能力强的硬质地层中，浆液不易渗透到衬砌周围的土体中去，可取较小土质系数甚至不用考虑；但在裂隙发育的岩质地层或以砂、砾石为主的大渗透系数地层，浆液极易渗透到周围土体中，因此此类地层应取较大的土质系数，可取 1.3~1.5；在以粘土、粉砂为主的小渗透系数地层，浆液在注入压力下也会对土体产生劈裂渗透，故也应取 1.1~1.3 的土质系数。超挖系数是正常情况下盾尾建筑空隙的修正系数，一般只在曲线施工中产生，直线段盾构机体与隧道设计轴线有较大夹角时也会产生，其值一般较小可不予考虑，具体数值可通过计算得出。

同步注浆量经验计算公式为：

$$V = \frac{\pi \lambda L}{4} (D_1^2 - D_2^2)$$

式中 V——理论注浆量 (m<sup>3</sup>)；

L——管片长度 (m)；

D1——刀盘外径 (m)；

D2——管片外径 (m)；

λ——注浆系数，取 1.5~1.8，在掘进过程中适当调整。

为防止管片整体上浮、下沉及椭圆，一般 1 号、2 号注浆孔注浆量是 3 号、4 号注浆孔的一半。

注浆量须经计算确定，但由于盾构纠偏、浆液收缩、浆液流入地层裂隙等情况，实际注浆量一般比理论计算量要多，超注量要根据具体地层情况确定。

#### 4.2 注浆压力控制

注浆压力最佳值应在综合考虑地基条件、管片强度、设备性能、浆液特性和土仓压力的基础上确定，理论上注浆压力（压入口处）应略大于地层土压和水压之和，以达到对环向空隙有效充填而非劈裂注浆，以免扰动管片周围的原状土而引起地面甚至隧道的沉降。一般注浆压力控制在 0.25~0.4MPa。在遇到管道深度变化大，地层也变化大，故注浆压力一直处于变化状态的情况，要根据深度与地层的变化及时调整压力参数。

#### 4.3 注浆时间控制

注浆要在衬砌脱出盾尾，即盾构推进时同步进行，当衬砌脱出盾尾，盾构推进到位后，定量的浆也应全部压完，以及时填充衬砌外的空隙，减少地面沉降。

#### 4.4 注浆速度控制



注浆速度由掘进速度决定,地层好时掘进速度较快,一般掘进一环仅需 20~25min,为了及时填充,采用手动注浆。地层较硬时,掘进速度较慢,掘进一环超过 45 min,也采用手动注浆,防止注浆量过大;掘进一环速度在 25~45min 时,采用自动注浆。

## 5 注浆施工风险控制

### 5.1 施工准备

- (1) 准备好注浆原材料,包括砂的筛分和抗分散剂的称量等。
- (2) 检查调试搅拌设备。
- (3) 检查注浆管路,确保管路畅通。
- (4) 检查压力显示系统,确保其准确无误。

### 5.2 浆液的拌制

- (1) 按配合比采用自动计量拌和楼搅拌配制,严格控制用水量,当砂含水量较大时,要勤测含水量,调整配合比。
- (2) 水泥、粉煤灰不能有结块现象。严格控制砂颗粒的粒径,一般要求不大于 5mm,细度模数 1.6~2.3。所以,砂均须经过孔径为 4.75mm 方孔筛筛分。
- (3) 原材料计量误差要控制在规范要求范围内。
- (4) 各成分材料要按合理的投放顺序进行搅拌。
- (5) 浆液搅拌要充分、均匀、连续,搅拌时间在 2min 左右,浆液不可有凝结现象。
- (6) 根据第一罐拌制浆液的性能指标,合理调整各原材料和水的用量,保证浆液性能。
- (7) 最好将膨润土以溶液的方式加入,溶液中的水从浆液配合比中扣除。
- (8) 缩短供货周期,尽量减少原料在施工现场的存放时间,避免材料板结。

### 5.3 浆液的运输与储存

- (1) 若浆液运距过长,直接泵送至盾构机浆液罐内易发生堵管现象,应采用浆液罐车运输,缩短泵送距离,避免堵管。
- (2) 保证浆液在罐车内处于连续搅拌状态,防止浆液离析;浆液运送到后配套台车后,应及时泵送到储浆罐中继续搅拌。
- (3) 特殊情况下需较长时间运输、储存时应考虑使用缓凝剂。
- (4) 若浆液出现沉淀、离析,应进行二次搅拌。
- (5) 按规定对设备进行日常维护保养,使设备处于良好的工作状态。冬期施工要对搅拌站的关键部位采取保温措施。

## 参考文献

- [1] 邹种.盾构隧道同步注浆技术 [J].西部探矿工程, 2003 (4):75-81.
- [2] 朱科峰.盾构法隧道施工背后注浆技术 [J].广东土木与建筑, 2003 (7):10-16.
- [3] 梁乃兴,陈忠明.注浆用水泥浆体性能研究 [J].建筑材料学报, 2000 (9):275-278.
- [4] 王晖,李大勇,夏广红.盾构机盾尾注浆施工中存在的问题及其对策分析 [J].苏州科技学院学报(工程技术版), 2004 (1):55-62.
- [5] 朱建春,李乐,杜文库.北京地铁盾构同步注浆及其材料研究 [J].建筑机械化, 2004 (11):27-30.

