

# 饱水砂层渗透注浆加固理论探讨

卓越

(中铁隧道集团有限公司科研院所, 河南洛阳 471009)

**【摘要】** 以广州地铁一期工程杨一区间饱水砂层 MC-S 浆材渗透注浆加固地铁隧道为对象, 通过室内模拟试验和现场试验, 探讨了采用 MC-S 浆材对饱水砂层进行注浆加固的渗透理论, 提出了浆液扩散半径与注浆其他参数、地下水压力、砂的物理力学指标等之间的关系; 注浆压力对被注均质介质的渗透率和注浆时间的影响; 确定了注浆极限压力以及注浆压力场与地应力场的耦合关系。

**【关键词】** 地铁; 饱水砂层; 渗透理论; 均质介质

**【中图分类号】** TU 472.5

## the Theoretical Discussion on Consolidating Saturated Sand by penetrative Grouting

**【Abstract】** Taking a engineering of Guangzhou metro for example in which using penetrative grouting with MC-S material to consolidate saturated sand through the simulative experiment indoor and experiment in situ, discussing the penetrative theory of using MC-S material to consolidate saturated sand, putting forward some conclusions such as the relationship among the spread radius of liquor, the pressure of underground water and the physical and mechanical indexes of sand, the relationship among the grouting pressure, the penetrative rate of even medium and grouting time, and the coupling relationship of the grouting pressure field and the ground stress field.

**【Key Words】** metro; saturated sand; penetrative theory; homogeneious medium

### 0 引言

随着时代的发展, 沿海主要城市地下交通工程方兴未艾。由于沿海地区多处于第四纪海陆交互相冲积层, 在该地层中施工成败关键因素之一是要对饱水砂层进行注浆加固, 保证施工安全, 防止坍方事故的发生。在该地层中注浆加固就是要促使浆液在地层中均匀渗透。广州地铁一期工程杨一区间饱水砂层注浆就是重点探讨渗透注浆的各种参数影响因素, 并得出了结论。

### 1 工程概况

广州地铁一期工程杨一区间位于广州市中山一路东端南侧, 西起梅花路口, 向东横

穿杨箕涌, 与东风东路立交桥和广州大道立交桥斜交后进入天河居民区直到体育西路。区间起点里程 YDK13+969.1, 终点里程 YDK15+155.8, 全长 1 186.7 m。该区间隧道在 YDK13+969.1~14+030 段穿越饱水砂层, 左右线饱水砂层共 111.8 m。该段隧道左右两线中线间距 13 m, 上覆土层厚度 9 m, 结构为复合式衬砌。

### 2 工程地质与水文地质

广州地铁杨一区间饱水砂层为海陆交互相冲积层, 地层分布自上而下依次为: 墨色人工杂填土 0.5~3.3 m, 砂层 5.3~9.9 m。泥质砂岩下限为 6.9~13.3 m。砂层密度为

19~21 kN/m<sup>3</sup>, 孔隙率为 0.35~0.4。基本承载力 80~200 kPa, 含水量 19%~21%, 液化等级为中等, 围岩分级为 V 级。隧道主要穿越饱水砂层和风化的泥质砂岩。

该段地下水位于地表以下 2.03~2.84 m, 地下水流向自东向西, 并以杨箕涌为分水岭, 流速 0.3~0.4 m/d。地层渗透系数为  $2.5 \times 10^{-2}$  cm/s, 透水性较强。同时, 由于地下管线长年失修, 其地下水对工程危害较大。

### 3 洞内长、短管结合注浆方案

该方案是在隧道开挖接近饱水砂层时, 封闭工作面, 进行长管全断面注浆, 注浆段长 12.6 m, 加固范围是隧道开挖轮廓线外 3 m, 采用 MC-SX 硬质塑料单向阀管和双向密闭注浆芯管进行后退式注浆。长管注浆结束后, 在隧道开挖工作面周边布设  $\phi 42$  小导管进行短管 ( $L=4$  m) 补充注浆。

### 4 渗透注浆浆液扩散形式

注浆理论是在对浆液的流动形式和固结方式进行分析, 建立扩散半径、压力、流量、注浆胶凝时间等之间的关系。实际上浆液在地层中的流动是复杂多变的, 它不仅受地质条件的影响, 而且受注浆材料、注浆参数等因素的影响, 对同一种砂层, 注浆加固过程中浆液在上述因素作用下, 伴随有渗透、劈裂等流动形式, 但在一定条件下, 总是以某种单一形式流动为主。只要正确运用注浆理论, 合理控制注浆参数, 在砂层中浆液以渗透形式进行扩散, 才能达到注浆加固的目的。

渗透注浆是在不足以破坏地层构造的压力下, 把浆液注入到均质粒状砂层孔隙中, 从而取代、排出其孔隙中的水。一般渗透注浆必要条件是满足可注性。渗透注浆浆液是均匀地扩散到砂粒间的孔隙内, 将砂粒胶结起来, 提高其抗渗能力和强度指标(见图 1 和图 2)。

浆液扩散形式取决于注浆管花孔的形状。采取端头注浆, 则产生球形扩散, 而采取花管

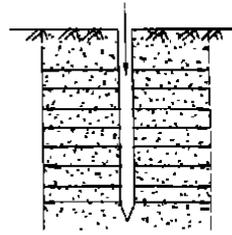


图 1 花管式渗透注浆示意图

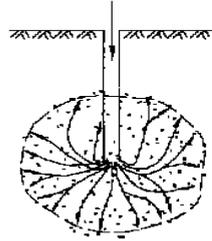


图 2 端孔渗透注浆示意图

式分段注浆, 则产生柱面扩散。广州地铁一期工程杨一体区间均采用花管式分段注浆, 因此其渗透形式为柱面扩散。以下探讨柱面扩散的渗透注浆加固理论。

## 5 渗透注浆理论探讨

### 5.1 牛顿流体在砂层中的渗透理论

#### 5.1.1 浆液的粘滞系数

有些浆液具有易流动性, 静止时不能承受切力抵抗剪切变形, 但在运动状态下, 浆液就具有抵抗剪切变形的能力即粘滞性。在剪切变形过程中, 浆体质点之间存在着相对运动, 使浆体内部出现成对的切力, 其作用是抗拒浆体内部的相对运动, 从而影响着浆体的运动状态。由于这种粘滞性的存在, 浆液在运动中要克服内摩擦力而做功。牛顿于 1686 年提出并验证了此规律, 称为牛顿流体。牛顿流体的本质即是在温度不变的条件下, 流体的动力粘滞系数  $\mu$  值不变, 为一固定斜率的直线。

#### 5.1.2 牛顿流体在砂层中的渗透扩散公式

把具有一定粘度的浆液运动状态看作与地下水运动状态一致的匀速运动, 砂层为均质各相同性, 根据达西定律, 渗流水头损失与渗流流速、流量之间的基本公式为:

$$Q = \frac{V}{t}$$

在均质砂层中进行注浆加固地层, 假设  $A$  为柱体的横断面积, 水力梯度为  $J$ ,  $h_1$  为注浆压力水头,  $n$  为砂层的孔隙率,  $r, r_1$  为浆液扩散半径, 则:

$$Q = KA \frac{h_1}{H} KAJ$$

渗流的平均流速为:  $u = KJ$

式中:  $K$  为渗透系数;  $J$  为水力坡度。

当  $r = r_0$  时,  $h = H$ ;  $r = r_1$  时,  $h = h_0$ ,

$$H - h_0 = h_1 = \frac{\beta q}{2\pi ak} \ln \frac{r_1}{r_0}$$

$$q = \frac{2\pi akh_1}{\beta \ln \frac{r_1}{r_0}}$$

已知:  $Q = \pi r_1^2 an$ ,  $Q = qt$

$$\pi r_1^2 an = qt \quad \pi r_1^2 an = \frac{2\pi akh_1}{\beta \ln \frac{r_1}{r_0}} \cdot t$$

$$\text{于是: } r_1 = \sqrt{\frac{2kh_1 t}{n\beta \ln(r_1/r_0)}} \\ t = \frac{n\beta r_1^2 \ln(r_1/r_0)}{2kh_1}$$

上述式中:  $q$  为单位时间的注浆量,  $\text{cm}^3/\text{s}$ ;  $r$  为浆液扩散半径,  $\text{cm}$ ;  $t$  为注浆时间,  $\text{s}$ ;  $a$  为注浆段长度,  $\text{cm}$ ;  $h_0$  为注浆点地下压力水头,  $\text{cm}$ ;  $H$  为地下水水头和注浆压力水头之和,  $\text{cm}$ ;  $h_1$  为注浆压力水头,  $\text{cm}$ 。

### 5.1.3 非溶性浆液的渗透注浆扩散

在饱水砂层中超细水泥-水玻璃双液注浆是一种驱水注浆, 浆液注入后即把砂层中的孔隙水驱走, 其渗透运动实际上是一种减速运动。设浆液呈柱形扩散, 渗透介质均质各同性。在浆流区, 由浆液和残留水组成, 设浆液的饱和度  $s_g$  在扩散过程中保持不变, 则浆液向前推进方程为:

$$t = \frac{ns_g}{p_0 - p_e - p_c} \left\{ \left[ \frac{r^2}{2} \ln \left( \frac{r}{r_0} \right) - \frac{r^2 - r_0^2}{4} \right] \frac{\mu_g}{k_g} + \left[ \frac{r_0^2}{2} \ln \left( \frac{r_0}{r} \right) - \frac{r_0^2}{2} \ln \left( \frac{r_e}{r_0} \right) + \frac{r^2 - r_0^2}{4} \right] \frac{\mu_w}{k_w} \right\}$$

$$2\pi ras_g \frac{dr}{dt} - q_g = 0 \quad (1)$$

在浆流区应用达西定律:

$$q_g = -2\pi a \xi \frac{k_g}{\mu_g} \cdot \frac{dp_g}{d\xi} \quad (r_0 \leq \xi \leq r) \quad (2)$$

在水流区, 水的饱和度为 1, 故为饱和渗流, 应用达西定律:

$$q_w = -2\pi \xi a \frac{k_w}{\mu_w} \cdot \frac{dp_w}{d\xi} \quad (r \leq \xi \leq r_e) \quad (3)$$

对式(2)、式(3)微分得:

$$\frac{d}{d\xi} \left\{ \xi \frac{dp_g}{d\xi} \right\} = 0 \quad (r_0 \leq \xi \leq r) \quad (4)$$

$$\frac{d}{d\xi} \left\{ \xi \frac{dp_w}{d\xi} \right\} = 0 \quad (r \leq \xi \leq r_e) \quad (5)$$

式中:  $p_g$  为注浆压力,  $\text{MPa}$ ;

$p_w$  为地下水的压力,  $\text{MPa}$ ;

$r_0$  为注浆孔半径,  $\text{cm}$ ;

$r_e$  为地下水影响半径,  $\text{cm}$ ;

$\xi$  为浆流区或水流区任意点半径,  $\text{cm}$ ;

$k_g$  为饱和度为  $s_g$  时, 浆液的渗透率;

$k_w$  为饱和度为  $s_w$  时, 水的渗透率。

浆液和交界面处两侧压力之差为毛细力:

$$p_w - p_g = p_c \quad (6)$$

其他边界条件:  $\xi = r_0, p_g = p_0$

$$\xi = r_e, p_w = p_e$$

连续性条件:  $q_g = q_w$

代入式(4)、式(5)得:

$$q_g = \frac{2\pi ak_g k_w (p_0 - p_e + p_c)}{k_w \mu_g \ln(r/r_0) + k_g \mu_w \ln(r_e/r)} \quad (7)$$

代入式(1)得:

$$ns_g \frac{dr}{dt} = \frac{p_0 - p_e + p_c}{r \left[ \frac{\mu_g}{k_g} \ln \left( \frac{r}{r_0} \right) + \frac{\mu_w}{k_w} \ln \left( \frac{r_e}{r} \right) \right]} \quad (8)$$

对式(8)进行积分, 并使  $t = 0, r = r_0$ , 可得柱形扩散的时间关系式:

对上式进行化简:

$$t = \frac{ns_g}{p_0 - p_e - p_c} \left\{ \left[ \frac{r^2}{2} \ln \left( \frac{r}{r_0} \right) - \frac{r^2}{4} \frac{\mu_g}{k_g} + \left[ \frac{r_c^2}{2} \ln \left( \frac{r_c}{r} \right) + \frac{r_c^2}{4} \right] \frac{\mu_w}{k_w} \right\} \quad (9)$$

式(9)即为渗透注浆非溶性浆液扩散与注浆压力等之间的关系式。

## 5.2 宾汉姆流体在饱水砂层中的渗透理论

一般情况下, 饱水砂层在注浆过程中, 虽然温度不变, 但实际上当切应力达到某一值时, 开始发生剪切变形, 但变形率也是常数, 这种情况属于宾汉姆流体。下面推导宾汉姆流体的柱面扩散公式。

根据渗流微分方程:

$$dp = - \frac{Q}{2\pi ak_g} \cdot \frac{dr}{r} \quad (10)$$

宾汉姆流体在砂层中渗透系数:

$$k_g = \frac{E}{A\mu \left[ 1 + B \cdot C \left( \frac{1}{\omega} \right) \right]} \quad (11)$$

$$E = \frac{m^{0.1} \cdot d_0^4}{1.2 D_0^2} \quad (12)$$

式中:  $d_0$  为孔隙直径, cm;  $n$  为体积孔隙率;  $D_0$  为砂粒直径, cm;  $A$  为试验决定的常数;  $B$  为决定渗流流变性的常数,  $B = \tau_0 / \mu$ ,  $\tau_0$  为极限剪切力,  $\mu$  为塑性粘度;  $C$  为介质几何参数决定的常数:

$$C = d_0^3 / 3.2 n^{0.3} D_0^2$$

$\omega$  为渗透速度, 线源的  $\omega = Q / 2\pi ar$ ,  $a$  为线源长度, cm;  $r$  为浆液扩散半径, cm。

$$k_g = \frac{E}{A\mu \left[ 1 + BC(2\pi ar / Q) \right]} \quad (13)$$

将式(4)代入式(1), 得:

$$p_r = p_0 - \frac{A\mu}{E} \left[ \frac{Q}{2\pi a} \ln(r/r_0) + B C(r - r_0) \right] \quad (14)$$

浆液随时间而变化的规律是:

$$t = \frac{\pi an}{Q} (r^2 - r_0^2) \quad (15)$$

当  $r \geq r_0$  时,  $r_0^2$  忽略不计。取  $r = R$ ,  $t = T$ , 可计算出已知注浆时间和注浆量条件下的渗透注浆扩散半径  $R$ ;

因为  $R = \sqrt{\frac{Q}{\pi an} \cdot T}$

$$Q = \frac{\left[ \frac{E(p_0 - p_R)}{A\mu} - BCR \right] 2\pi a}{\ln(R/r_0)}$$

所以  $R = \sqrt{\frac{\left[ \frac{E(p_0 - p_R)}{A\mu} - BCR \right] 2T}{n \ln \left( \frac{R}{r_0} \right)}}$

$$\frac{2 \cdot 66 n^{0.4}}{A} d_0 \left[ \frac{p_0 - p_R}{\tau_0} \right] \quad (16)$$

从式(5)和式(7)可解决饱水砂层渗透注浆施工时以下问题:

①在  $Q$ 、 $T$  一定条件下, 可计算出扩散半径;

②在压差和注浆时间  $T$  一定条件下, 可计算出渗透注浆扩散半径;

③在  $Q$  和  $R$  已知条件下, 可计算出孔底压力  $p_0$  和注浆时间  $T$ ;

④在向孔隙介质注入分散性浆液时, 随着时间的变化, 半径的增大, 出现介质的渗透率下降。

## 5.3 饱水砂层渗透注浆的极限压力确定

现场试验表明, 在圆柱体内进行饱水砂层渗透注浆, 如果注浆压力在一定条件下, 浆液就会均匀渗透, 超过某一极限注浆压力 ( $p_{\max}$ ), 浆液将由渗透转化为劈裂。只有当注浆压力小于  $p_{\max}$  时, 才能保证浆液在砂层中均匀渗透。试验证实, 饱水砂层渗透注浆的极限压力为:

$$p_{\max} = \frac{2(1-\mu)(\sigma_c + 2k_0\gamma H)}{2 + (1-2\mu)} \frac{1}{\ln r_1 - \ln r_0}$$

式中:  $\sigma_c$  为饱和砂土的抗压强度  $\text{kg/cm}^2$ ;  $\gamma$  为饱和砂土的容重,  $\text{g/cm}^3$ ;  $H$  为注浆孔长度, cm;  $\mu$  为泊松比;  $K_0$  为静止侧压力系数;  $r_1$  为浆液扩散半径, cm;  $r_0$  为注浆孔半径, cm。

## 6 注浆压力场与地应力场的耦合

饱水砂层注浆过程中必然会影响到地应力场的变化,并形成耦合场。下面探讨耦合场的力学指标变化情况。

假设注浆过程中注浆压力定值,不随注浆时间而变化,围岩不能抵抗拉应力,并设

1)当  $\sigma = 0.15 \text{ MPa}$ , 注浆压力为  $p = 0.6 \text{ MPa}$  时, 注浆压力与围岩应力变化见表 1。

表 1 注浆压力与围岩应力变化表

应力 $R$	$1.0r_0$	$1.5r_0$	$1.7r_0$	$2.0r_0$	$2.6r_0$	$3.0r_0$	$4.5r_0$
径向 $\sigma_r/\text{MPa}$	0.6	0.35	0.305	0.263	0.217	0.20	0.2
切向 $\sigma_\theta/\text{MPa}$	-0.3	-0.05	-0.005				

2)当  $\sigma = 0.15 \text{ MPa}$ , 注浆压力为  $p = 0.75 \text{ MPa}$  时, 注浆压力与围岩应力变化见表 2。

表 2 注浆压力与围岩应力变化表

应力 $R$	$1.0r_0$	$1.5r_0$	$1.7r_0$	$2.0r_0$	$2.6r_0$	$3.0r_0$	$4.5r_0$
径向 $\sigma_r/\text{MPa}$	0.75	0.417	0.358	0.30	0.239	0.217	0.180
切向 $\sigma_\theta/\text{MPa}$	-0.45	-0.117	-0.057	0.00			

3)当  $\sigma = 0.15 \text{ MPa}$ , 注浆压力为  $p = 1.20 \text{ MPa}$  时, 注浆压力与围岩应力变化见表 3。

表 3 注浆压力与围岩应力变化表

应力 $R$	$1.0r_0$	$1.5r_0$	$1.7r_0$	$2.0r_0$	$2.6r_0$	$3.0r_0$	$4.5r_0$
径向 $\sigma_r/\text{MPa}$	1.20	0.617	0.513	0.413	0.305	0.267	0.202
切向 $\sigma_\theta/\text{MPa}$	-0.90	-0.317	-0.213	-0.113	-0.005		

4)当  $\sigma = 0.15 \text{ MPa}$ , 注浆压力为  $p = 1.50 \text{ MPa}$  时, 注浆压力与围岩应力变化见表 4。

表 4 注浆压力与围岩应力变化表

应力 $R$	$1.0r_0$	$1.5r_0$	$1.7r_0$	$2.0r_0$	$2.6r_0$	$3.0r_0$	$4.5r_0$
径向 $\sigma_r/\text{MPa}$	1.50	0.75	0.617	0.488	0.350	0.30	0.22
切向 $\sigma_\theta/\text{MPa}$	-1.20	-0.45	-0.317	-0.188	-0.05	0.0	

5)当  $\sigma = 0.15 \text{ MPa}$ , 注浆压力为  $p = 3.0 \text{ MPa}$  时, 注浆压力与围岩应力变化见表 5。

表 5 注浆压力与围岩应力变化表

应力 $R$	$1.0r_0$	$1.5r_0$	$1.7r_0$	$2.0r_0$	$2.6r_0$	$3.0r_0$	$4.5r_0$
径向 $\sigma_r/\text{MPa}$	3.00	1.417	1.136	0.863	0.572	0.467	0.291
切向 $\sigma_\theta/\text{MPa}$	-2.70	-1.117	-0.836	-0.563	-0.272	-0.167	

注浆孔半径为  $r_0$ , 计算为静态的。根据饱水砂层钻探资料并结合有关规范, 饱水砂层围岩为 VI 级,  $\gamma = 15 \sim 17 \text{ kN/m}^3$ ,  $\mu_{\max} = 0.5$ , 则  $\lambda = 1.0$ 。根据弹性理论进行有限元计算, 耦合场的力学指标、注浆扩散半径如下:

上述计算表明:

①在  $\sigma$  一定条件下, 注浆引起围岩应力变化为: 围岩径向应力为压应力, 切向应力开始时为拉应力;

②在  $\sigma$  和注浆压力一定条件下, 随着扩散半径的增大, 围岩径向压应力和切向拉应力逐渐减小, 并最终消失;

③在  $\sigma$  一定条件下, 随着注浆压力的增大, 围岩所受的径向应力和切向应力不断增大;

④注浆压力的变化对耦合场的影响极大, 必须合理确定注浆压力, 以免引起支护的较大变形和地表超量隆起;

⑤当  $\sigma$  一定条件下, 浆液沿切向扩散较沿径向扩散要容易得多。因此, 注浆施工要合理布设注浆段, 进行后退式注浆, 其效果要明显好于其他注浆方式。

## 7 结论

在饱水砂层中进行渗透注浆, 浆液在充满多孔介质过程中, 在固结之前都是符合上述渗

透理论的。但是, 液材的性质决定着所选理论, 不同的液材应按照牛顿流体或宾汉姆流体理论区别应用, 才能使注浆设计参数合理, 工程施工安全、可靠。注浆压力场对地应力场的影响极大, 在注浆施工中, 必须合理确定注浆压力, 以有效地控制地表沉降和支护结构的变形。同时, 应该指出, 本文只是结合工程实际总结出来的初步理论, 仅仅是使渗透注浆设计由经验型初步上升为经验理论型, 还需要以后进一步在工程实践中验证和深化。

## 参 考 文 献

- 1 梁钟琪. 土力学及路基. 北京: 中国铁道出版社. 1984. 36~42
- 2 考蒂斯. 计算水力学基础. 北京: 水利电力出版社. 1987. 107~109
- 3 李家星, 陈立德. 水力学. 南京: 河海大学出版社. 1996. 44~46
- 4 李秉生, 赵翊明. 水文地质学(中册). 成都: 西南交通大学出版社. 1987. 25~29

收稿日期: 2002-06-27

高学术水平高知名度的双高期刊 “首届国家期刊奖”获奖期刊  
中国建筑科学类核心期刊、国际建筑数据库(ICONDA)收录期刊

# 《工业建筑》(月刊)

邮发代号: 2-825 单价: 6元 全年价: 72元

《工业建筑》由中国钢铁工业协会主管, 冶金部建筑研究总院主办, 1964年创刊。多年来一直本着指导性、针对性、实用性、创新性的办刊宗旨, 重点报道建筑设计、建筑结构、地基和基础、建筑材料、施工技术等方面的应用研究成果及开发技术, 突出工业建筑、钢结构、鉴定加固技术等特点; 优先报道国家级或者省部级科学基金资助项目和重大工程建设; 内容丰富翔实, 理论结合实际。适于土木工程界广大科研、设计、教学、施工等专业技术人员及大、中专学生阅读。

《工业建筑》为大16开本, 彩色胶版印刷, 每月20日出版, 国内外公开发行。全国各地邮局均可订阅, 也可直接汇款到本编辑部订阅。

本刊兼营广告, 收费合理, 具有一定规模, 是展示企业形象的最好舞台。

本刊地址: 北京海淀区西土城路33号; 邮编: 100088; E-mail: [gyjz@public.sti.ac.cn](mailto:gyjz@public.sti.ac.cn)

联系电话: (010)62266694(兼传真)

(010)62225599-3511(发行)3512(编辑)3490(广告);