



盾构隧道壁后注浆柱形孔压滤扩散模型

苟长飞¹, 叶飞², 纪明², 孙海东³

1. 温州市铁路与轨道交通投资集团有限公司 浙江 温州 325000;
2. 长安大学 陕西省公路桥梁与隧道重点实验室 陕西 西安 710064;
3. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司 陕西 西安 710064)

摘要: 假定同步注浆时盾尾脱离管片后,在盾构机尾部形成均匀柱形盾尾间隙,考虑浆液滤出水渗流和土体弹性变形的耦合作用,建立盾构隧道壁后注浆柱形孔压滤扩散模型。推导滤出水渗流半径、土体孔隙水压力、有效应力和浆液脱水系数的计算式。通过工程实例分析滤出水渗流半径、土体孔隙水压力、有效应力和浆液脱水系数的影响因素和变化规律。分析结果表明:滤出水渗流半径随着注浆时间的推移逐渐增大,随着土体有效应力比的增大而减小;土体孔隙水压力、径向有效应力和径向总应力均随着远离管片而逐渐减小;浆液脱水系数随着注浆时间的持续而增大,随着有效应力比的增大而减小。

关键词: 盾构隧道; 壁后注浆; 柱形孔; 压滤; 扩散模型

中图分类号: U45 文献标志码: A 文章编号: 1672-7029(2016)02-0325-07

Cylindrical cavity pressure – filter diffusion model for backfill grouting of shield tunnel

GOU Changfei¹, YE Fei², JI Ming², SUN Haidong³

1. Wenzhou Railway and Mass Transit Investment Group Co., Ltd, Wenzhou 32500, China;
2. Key Laboratory for Highway Bridge and Tunnel of Shaanxi Province, Chang'an University, Xi'an 710064, China;
3. CCCC First Highway Consultants Co., Ltd, Xi'an 710064, China)

Abstract: Assuming uniform cylindrical shield tail interspace is formed on the tail after the segments out from shield tail when synchronous grouting. Considering the coupling action of seepage radius of filtered water and elastic deformation, and the cylindrical cavity pressure – filter diffusion model for backfill grouting of shield tunnel was established. A formula for calculating the seepage radius of filtered water, soil pore water pressure, effective stress and grout dewaterability coefficient were derived. Then, the influence factors and variation rules of the seepage radii of filtered water, soil pore water pressure, effective stress and grout dewaterability coefficient were analyzed on the basis of a detail engineering example. Analysis result shows that the seepage radii of filtered water increase with the increase of grouting time, and decrease along with the increase of soil effective stress. Soil pore water pressure, radial effective stress and radial total stress all become smaller when it is father away from segment. Grout dewaterability coefficient increase with the increase of grouting time, but it increases with the increase of effective stress ratio.

Key words: Shield tunnel; grouting behind segment; cylindrical cavity; pressure – filter; diffusion model

盾构掘进时,由于盾壳外径大于管片外径和超挖等原因,盾尾脱离管片后,在管片和地层之间形成盾尾间隙。盾尾间隙若不及时处理,则会造成周围

土体应力释放,严重时导致地表变形过大、周围建筑物倾斜等问题。因此,一般通过壁后注浆的方法对盾尾间隙进行充填处理。注浆法虽然属于传统工

收稿日期: 2015-06-23

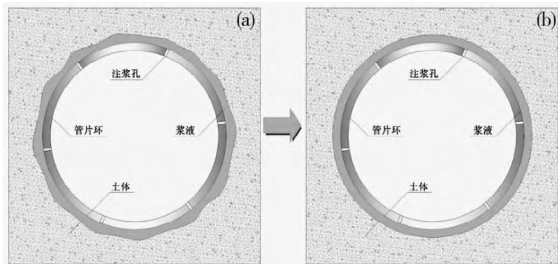
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51178052, 50808020); 国家重点基础研究发展规划(973计划)项目(2013CB036003)

通讯作者: 叶飞(1977-),男,陕西石泉人,教授,从事隧道及地下工程方面的研究与教学工作; E-mail: 530777879@qq.com

艺,但将其引入盾构隧道施工措施后,由于盾尾间隙特殊形式,导致传统的岩土注浆模型很难直接用于盾构壁后注浆计算。因此,国内外学者针对盾构壁后注浆展开了大量研究工作。Bezuijen等^[1-4]对盾构隧道壁后注浆效果及浆液分布进行探测。Yukinori等^[5-6]通过模型试验方法对盾构壁后注浆浆液压力和土体受力进行了研究。Ezzeldine等^[7-10]等运用数值模拟方法,分析了壁后注浆对衬砌结构和周围土体受力、变形的影响规律。李志明等^[11-14]基于流体力学原理,建立了不同情况下的壁后注浆浆液充填模型,推导出了浆液压力沿管片环形、纵向的计算式。叶飞等^[15-23]根据土质条件、注浆方法的不同,分别建立了盾构隧道壁后注浆的充填注浆、渗透注浆、压密注浆理论模型。综上,目前对于盾构隧道壁后注浆模型的研究,基本基于充填、渗透和压密3种形式,并未考虑浆液和土体的压滤效应。本文在前人研究的基础上,将盾构隧道注浆层概化为柱形,考虑浆液滤出水向土体渗流和浆液对土体挤压的耦合作用,建立盾构隧道壁后注浆柱形孔压滤扩散模型。

1 压滤扩散模型

目前盾构隧道常用的注浆方法有2种:在盾构推进过程中通过盾尾注浆孔同步注浆和盾构推进一段距离后通过管片注浆孔即时注浆。通过盾尾注浆孔进行同步注浆时,盾尾间隙在形成的同时被注入浆液充填,形成较规则的盾尾注浆层,如图1所示。受环向压力分布及地层应力等复杂因素的影响,实际形成的注浆层厚度并不均匀(图1(a))。为计算方便,可将同步注浆形成的注浆层概化为均匀柱形(图1(b))。在饱和黏土地层中同步注浆时,盾尾间隙在形成的同时被注入浆液充填成柱形注浆层;持续注入时,柱形浆液对周围土体产生挤压的同时,浆液中的水分滤出向土体中渗流,即发生压滤效应。

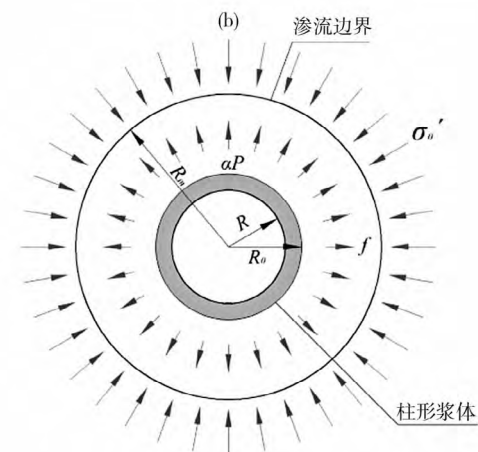
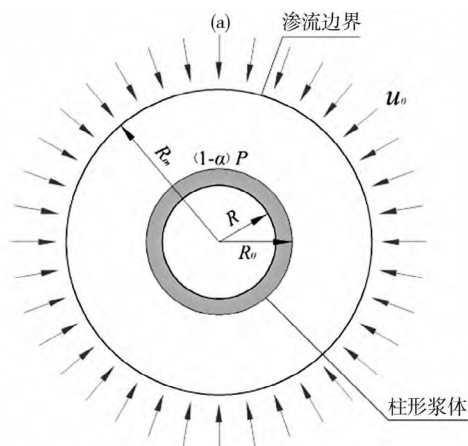


(a) 实际中分布不均的注浆层; (b) 概化后的均匀柱形注浆层

图1 柱形浆体压滤扩散示意图

Fig.1 Schematic diagram of cylindrical paste pressure - filter diffusion

根据有效应力原理,土体中的总应力 σ 由有效应力 σ' 和孔隙水压力 u 组成。饱和黏土的盾构隧道通过盾尾注浆孔进行同步注浆时,浆液呈柱形挤压周围土体,同时受到周围土体的孔隙水压力 u 和有效应力 σ' 作用。浆液在孔隙水压力 u 的作用下发生压滤效应,滤出水在土体中呈柱形渗透扩散,其理论模型见图2(a)。(u_0 为原状土孔隙水压力, R_0 为隧道开挖半径, R_m 为滤出水渗透半径)。而在有效应力 σ' 作用下,土体将产生压密;同时压滤水在土体中是渗流将对土体产生拖拽效应,即渗透力 f ,渗透力将导致土体有效应力增加,引起土体变形,进而改变土体渗透性,其理论模型见图2(b)。可见,压滤效应是土体压密和滤出水渗透的耦合作用,压密效应和渗透效应相互影响。根据压滤效应原理,注浆压力 P 对土体的作用分为挤压压力(有效应力) αP 和初始孔隙水压力 $(1-\alpha)P$ 。 α 为有效应力比,取决于浆液与土体的性质,浆液越稀,有效应力比越小,土体的孔隙越大,有效应力比越小。



(a) 渗透扩散理论模型; (b) 柱形孔扩张理论模型

图2 理论模型

Fig.2 Theoretical model

2 球孔压滤扩张理论

2.1 基本假定

1) 管片周围土体初始状态下土体为各向同性体,浆液和土颗粒不可压缩;土体仅发生弹性变形,且变形在注浆压力施加后立即发生。

2) 假定盾尾脱离管片后,在盾构机尾部形成均匀柱形盾尾间隙,见图1。

3) 假设注浆体在土体中呈柱形,压滤注浆过程就相当于一个半径为 R_0 的柱形浆体在无限土体中挤压渗透(图2),在管片四周形成了一个渗透区。

4) 并忽略重力对土体压缩的影响,注浆过程中土体有效应力比不发生改变。

2.2 理论推导

2.2.1 滤出水的渗流

根据达西定律有

$$v = -k \frac{dh}{dr}, \quad (1)$$

式中: v 为滤出水渗流速度; k 为渗透系数; h 为渗透压力水头高度; r 为渗流微元距离隧道中心的距离。

将 $dh = du/\rho g$ 代入上式可得

$$du = -\frac{\rho g v}{k} dr, \quad (2)$$

式中: ρ 为渗流水的密度; g 为重力加速度。

滤出水沿着柱面径向渗流时,渗流速度可用流量 q_1 和渗流面积 $2\pi r l$ 的比值来表示:

$$v = \frac{q_1}{2\pi r l}. \quad (3)$$

式中: l 为盾构推进距离。

将式(3)代入式(2),可得

$$du = -\frac{\rho g q_1}{2\pi k l r} dr. \quad (4)$$

$r = R_0$ 时,渗透压力 $u = (1 - \alpha)P$; 当渗透半径达到 r 时,渗透压力为 u , 对则式(4)积分,可得

$$q_1 = \frac{2\pi k l [(1 - \alpha)P - u]}{\rho g \ln \frac{r}{R_0}}. \quad (5)$$

经过时间 t 的渗透量为

$$Q_1 = q_1 t = \frac{2\pi k l [(1 - \alpha)P - u] t}{\rho g \ln \frac{r}{R_0}}. \quad (6)$$

土体孔隙率为 n 时,渗透量可表示为

$$Q_1 = \pi l (r^2 - R_0^2) n, \quad (7)$$

联立式(6)和式(7)可得孔隙水压力分布式:

$$u = (1 - \alpha)P - \frac{\rho g n (r^2 - R_0^2) \ln \frac{r}{R_0}}{2kt}. \quad (8)$$

在渗流水外边界处,孔隙水压力 u 与原位土孔隙水压力 u_0 相等,并记孔隙水压力差 $(1 - \alpha)P - u_0 = \Delta u$, 则由式(8)可得

$$R_m = \sqrt{\frac{2kt\Delta u}{\rho g n \ln \frac{R_m}{R_0}} + R_0^2}. \quad (9)$$

上式进行迭代,可求解 R_m 。

2.2.2 土体变形

柱对称问题的平衡方程为

$$\frac{d\sigma_r'}{dr} + \frac{\sigma_r' - \sigma_t'}{r} + f = 0, \quad (10)$$

式中: σ_r' 为土体径向有效正应力, σ_t' 为土体切向有效正应力。

渗透力可表示为

$$f = -\frac{du}{dr} = \frac{\rho g q_1}{2\pi k l r}. \quad (11)$$

将式(11)代入式(10),令 $C = \frac{\rho g q_1}{2\pi k l}$, 则平衡方程可简化为

$$\frac{d\sigma_r'}{dr} + \frac{\sigma_r' - \sigma_t'}{r} + \frac{C}{r} = 0. \quad (12)$$

几何方程为

$$\begin{cases} \varepsilon_r = \frac{du_r}{dr}, \\ \varepsilon_t = \frac{u_r}{r}, \end{cases} \quad (13)$$

式中: u_r 为土体径向位移; ε_r 为土体径向应变; ε_t 为土体切向应变。

物理方程为

$$\begin{cases} \varepsilon_r = \frac{(1 - \nu^2)}{E} \left(\sigma_r' - \frac{\nu}{1 - \nu} \sigma_t' \right), \\ \varepsilon_t = \frac{(1 - \nu^2)}{E} \left(\sigma_t' - \frac{\nu}{1 - \nu} \sigma_r' \right). \end{cases} \quad (14)$$

式中: ν 为泊松比; E 为土体弹性模量。

边界条件为

$$\begin{cases} r = R_0, \sigma_r' = \alpha P, \\ r = R_m, \sigma_r' = \sigma_0', \end{cases} \quad (15)$$

式中: σ_0' 为原位土有效应力。

联立式(12)~(14)结合边界条件式(15),可解得径向正应力、切向正应力、径向位移的表达式:

$$\begin{cases} \sigma_r' = C_1 \ln r + \frac{C_2}{r_2} + C_3, \\ \sigma_i' = C_1 \ln r + \frac{C_2}{r_2} + C_3 + C_1 + C, \\ u_r = \frac{(1+\nu)}{E} \left[(1-2\nu) C_1 r \ln r - \frac{C_2}{r} + (1-2\nu) \left(\frac{C}{2} + C_3 \right) r \right], \end{cases} \quad (16)$$

式中:

$$\begin{cases} C_1 = -\frac{C}{2(1-\nu)}, \\ C_2 = \frac{\alpha P - \sigma_0' + C_1 \ln \frac{R_m}{R_0}}{\left(\frac{1}{R_0^2} - \frac{1}{R_m^2} \right)}, \\ C_3 = \alpha P - C_1 \ln R_0 - \frac{C_2}{R_0^2}, \end{cases} \quad (17)$$

将 $r = R_m$ 代入式(5)可得

$$q_1 = \frac{2\pi k l \Delta u}{\rho g \ln \frac{R_m}{R_0}}, \quad (18)$$

进而可得参数 C 的计算式:

$$C = \frac{\rho g q_1}{2\pi k l} = \frac{\Delta u}{\ln \frac{R_m}{R_0}}. \quad (19)$$

2.2.3 浆液脱水系数

盾尾间隙理论值为

$$Q_0 = \pi(R_0^2 - R^2)l, \quad (20)$$

式中: R 为管片外径。

实际上, 充填盾尾间隙后, 浆液发生压滤脱水, 将 $r = R_m$ 代入式(7), 可得脱水量:

$$Q_1 = \pi l (R_m^2 - R_0^2) n, \quad (21)$$

浆液脱水系数:

$$\lambda = \frac{Q_1}{Q_0} = \frac{(R_m^2 - R_0^2) n}{R_0^2 - R^2}. \quad (22)$$

2.3 模型适用性分析

本文认为, 在饱和黏土地层总采用盾尾注浆孔同步注浆时, 盾尾间隙在形成的同时被浆液充填, 形成规则的柱壳状注浆层; 随着注浆持续, 浆液中的水分滤出向土体渗流。因此, 本文模型适用与饱和黏土地层中采用盾尾注浆孔同步注浆时的管片周围土体应力分析。

3 实例分析

假定土体的弹性模量 $E = 4.56 \text{ MPa}$, 空隙率 n

$= 20\%$, 土体的渗透系数 $k = 5 \times 10^{-4} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, 泊松比 $\nu = 0.3$; 注浆点处的孔隙水压力 $u_0 = 0.05 \text{ MPa}$, 有效应力 $\sigma_0' = 0.15 \text{ MPa}$, 总应力 $\sigma_0 = u_0 + \sigma_0' = 0.20 \text{ MPa}$; 注浆压力 $P = 0.25 \text{ MPa}$ 。盾构理论掘削外径 $R_0 = 3.2 \text{ m}$, 管片外径 $R = 3.1 \text{ m}$, 管片宽度 $B = 0.9 \text{ m}$ 。即时注入时, 推进距离 l 与管片宽度 B 相等 $l = B = 0.9 \text{ m}$ 。

3.1 渗流范围

由式(9)可知, 注浆时滤出水的渗流半径与孔隙水压力差 Δu , 渗透系数 k , 渗流时间 t 等因素有关。而孔隙水压力差 Δu 与有效应力比 α 相关, 因此滤出水的渗流半径也受有效应力影响。一般而言, 渗流范围随着渗透时间推移而变化, 渗透时间与注浆时间关系密切, 在同步注浆过程中, 可认为注浆时间与渗透时间相同。取注浆时间 $t = 0 - 90 \text{ min}$, 有效应力比 α 为 $0.7, 0.72, 0.74, 0.76$ 和 0.78 时, 根据式(9)计算滤出水渗流半径, 如图3所示。

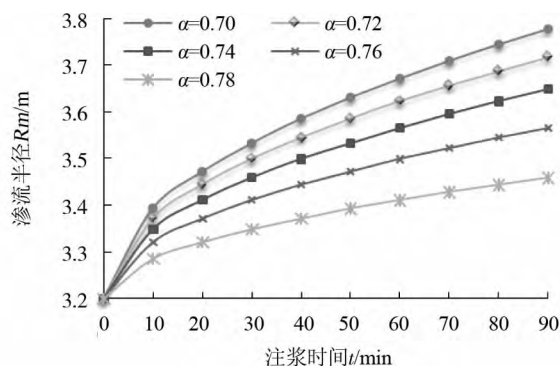


图3 渗流半径与渗透时间

Fig. 3 Relationship between seepage radius and penetration time

从图3可以看出, 滤出水渗流半径 R_m 随着注浆时间的推移逐渐增大, 增大速度逐渐减小。对比不同有效应力比时的渗流半径曲线可以发现, 滤出水渗流半径 R_m 随着土体有效应力比 α 的增大而减小。这主要是由于土体有效应力比 α 增大时, 土体孔隙水压力差减小, 进而导致渗流半径 R_m 减小。

3.2 应力分布

注浆时间 $t = 30 \text{ min}$ 时, 有效应力比 α 分别取 $0.7, 0.72, 0.74, 0.76$ 和 0.78 。根据式(10)可计算出距离隧道中心不同距离的孔隙水压力, 如图4所示; 根据式(16)可计算出距离隧道中心不同距离处的径向有效应力, 如图5所示; 根据有效应力原理可求得径向总应力分布, 如图6所示。

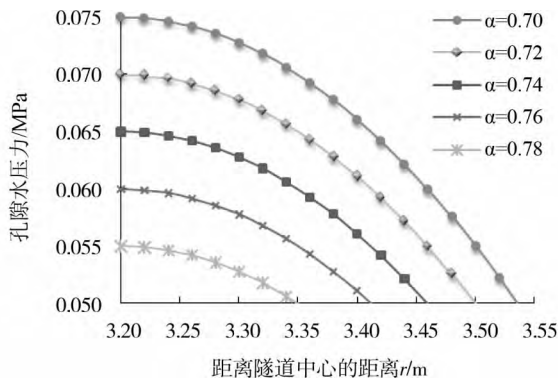


图 4 孔隙水压力分布

Fig. 4 Distribution of pore water pressure

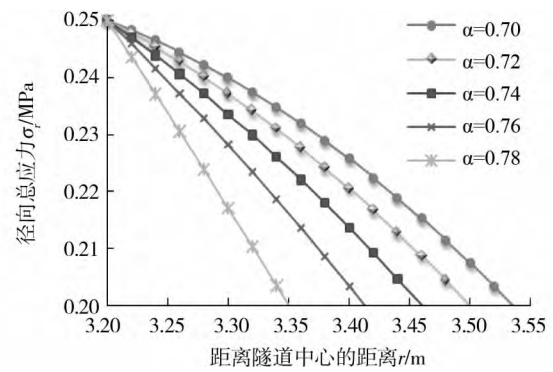


图 6 径向总应力分布

Fig. 6 Distribution of radial total stress

从图 4 可以看出, 孔隙水压力随着远离管片而逐渐消散, 消散速率(压力梯度)逐渐增大, 最终与原位土孔隙水压力相等, 达到渗流边界。孔隙水压力分布曲线与水平线 $u = u_0$ 的交点对应的 r 值, 是 t 时刻渗流半径 R_m 。对比不同有效应力比下的渗流半径值可知, 有效应力比越大, 注浆引起的超孔隙水压力值越小, 对应的渗流半径越小。

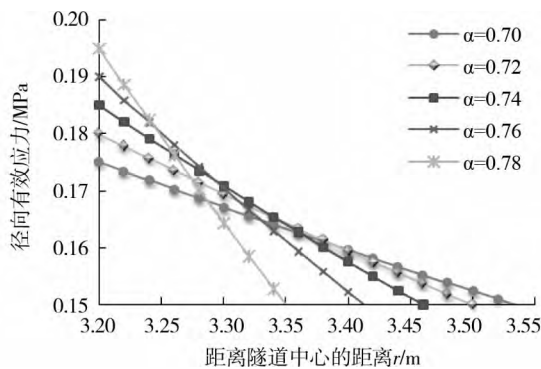


图 5 径向有效应力分布

Fig. 5 Distribution of radial effective stress

由图 5 可以看出, 随着远离管片, 土体径向有效应力逐渐减小, 近似呈线性, 最终在渗流边界处与原位土有效应力相等。对比不同有效应力比曲线可以发现, 有效应力比越大, 土体径向有效应力减小的速度越快。

从图 6 可以看出, 土体径向总应力随着远离隧道中心逐渐减小, 在渗流边界处与原位土体总应力相等; 受孔隙水压力减小速度的影响, 径向应力减小的速度随着远离隧道中心而略有增快。为计算简便, 可用直线对径向总应力分布曲线进行拟合, 拟合公式为:

$$\sigma_r = P - \frac{(r - R_0)(P - \sigma_0)}{R_m - R_0}, \quad (23)$$

上式可用于土体径向总应力的估算。

3.3 浆液脱水系数

取注浆时间 $t = 0 - 90 \text{ min}$, 有效应力比 α 为 0.7, 0.72, 0.74, 0.76 和 0.78 时, 根据式(22) 计算浆液脱水系数 λ , 如图 7 所示。

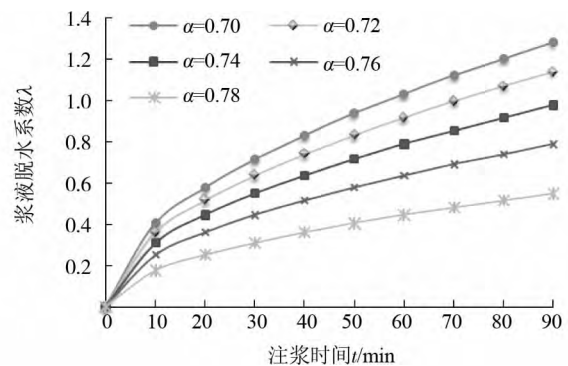


图 7 浆液脱水系数变化曲线

Fig. 7 Change curves of grout dewaterability coefficient

从图 7 可以看出, 浆液脱水系数 λ 随着注浆时间的持续而增大, 增大速度逐渐减小; 随着有效应力比 α 的增大而减小。浆液脱水系数是注浆量计算的基础参数, 脱水系数越大, 充填相同体积盾尾间隙所需的注浆量越大。在注浆过程中, 可通过调整有效应力比和控制注浆时间来控制浆液脱水程度, 进而控制注浆量。

4 结论

1) 盾构隧道柱形孔压滤扩散模型适用于饱和和软黏土地层中从盾尾注浆孔进行同步注浆的情况, 用来计算壁后注浆时浆液滤出水渗流范围, 隧道周围土体有效应力、孔隙水压力分布, 以及浆液脱水系数。

2) 注浆时滤出水的渗流半径与孔隙水压力差、渗透系数、土体有效应力比、渗流时间等因素有关。滤出水渗流半径随着注浆时间的推移逐渐增大,增大速度逐渐减小;随着土体有效应力比的增大而减小。

3) 土体孔隙水压力、径向有效应力、径向总应力均随着远离管片而逐渐减小,最终在滤出水渗流边界处与原位土相同。孔隙水压力消散速率随着远离管片逐渐增大,径向有效应力随着远离管片呈线性减小,土体径向总应力减小速率随着远离管片而略有增快。

4) 浆液脱水系数随着注浆时间的持续而增大,增大速度逐渐减小;随着有效应力比的增大而减小。在注浆过程中,可通过调整有效应力比和控制注浆时间来控制浆液脱水程度,进而控制注浆量。

参考文献:

- [1] Bezuijen A, Talmon A M, Kaalberg F J, et al. Field measurement of grout pressure during tunneling of the Sophia rail tunnel [J]. *Soil and Foundations*, 2004, 44 (1): 39 - 48.
- [2] Hashimoto T, Brinkman J, Konda T, et al. Simultaneous backfill grouting pressure development in construction phase and in the long - term [C]// *Proceeding of 30th ITA - AITES World Tunnel Congress*, Singapore, 2004: 52 - 59.
- [3] 黄宏伟,刘通剑,谢雄耀. 盾构隧道壁后注浆效果的雷达探测研究[J]. *岩土力学*, 2003, 24(增1): 353 - 356.
HUANG Hongwei, LIU Jujian, XIE Xiongyao. Application of GPR to grouting distribution behind segment in shield tunnel [J]. *Rock and Mechanical*, 2003, 24 (Supp1): 353 - 356.
- [4] 黄宏伟,杜军,谢雄耀. 盾构隧道壁后注浆的探地雷达探测模拟试验[J]. *岩土工程学报*, 2007, 29(2): 243 - 248.
HUANG Hongwei, DU Jun, XIE Xiongyao. Simulation of GPR detecting of grouting materials behind shield tunnel segments [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, 29(2): 243 - 248.
- [5] Yukinori K, Yutaka S, Noriyuki O, et al. Back - fill grouting model test for shield tunnel [J]. *PTRI QR*, 1998, 39(1): 35 - 39.
- [6] Talmon AM, Aanen L, Bezuijen A, et al. Grout pressures around atunnellining [C]// *Proc Int Symp On Mod-ern Tunneling Science and Tech*, Kyoto, 2001.
- [7] Ezzeldine O Y. Estimation of the surface displacement field due to construction of Cairo Metro Line El Khalafawy - St. Therese [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 1999, 14(3): 267 - 279.
- [8] 丁文其,杨林德,朱合华. 盾构隧道施工中材料性态的模拟[J]. *同济大学学报*, 1999, 27(4): 468 - 473.
DING Wenqi, YANG Linde, ZHU Hehua. Simulation of the material behavior in shield tunnel construction [J]. *Journal of Tongji University*, 1999, 27(4): 468 - 473.
- [9] Ding WQ, Yue ZQ, Tham LG, et al. Analysis of shield-tunnel [J]. *International Journal for Numerical & Analytical Methods in Geomechanics* 2004 28(1): 57 - 91.
- [10] 邓宗伟,冷伍明,陈建平. 盾构隧道壁后注浆作用机理的计算研究[J]. *塑性工程学报*, 2005, 12(6): 114 - 117.
DENG Zongwei, LENG Wuming, CHEN Jianping. The calculating research on the mechanism of shield tunnel back - filled grouting [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2005, 12(6): 114 - 117.
- [11] 李志明,廖少明,戴志仁. 盾构同步注浆填充机理及压力分布研究[J]. *岩土工程学报*, 2010, 32(11): 1752 - 1757.
LI Zhiming, LIAO Shaoming, DAI Zhiren. Theoretical study on synchronous grouting filling patterns and pressure distribution of EPB shield tunnels [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, 32(11): 1752 - 1757.
- [12] 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 - 25.
YUAN Xiaohui, HAN Yuewang, ZHONG Xiaochun. Pressure distribution model of simultaneous backfill grouting of Shield Tunnel [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2011, 46(1): 18 - 25.
- [13] 范昭平,韩月旺,方志强. 盾构壁后注浆压力分布计算模型[J]. *公路交通科技*, 2011(3): 95 - 100.
FAN Zhaoping, HAN Yuewang, FANG Zhongqiang. Calculating model of backfill grouting pressure distribution for shield tunnel [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development* 2011(3): 95 - 100.
- [14] 白云,戴志仁,张莎莎,等. 盾构隧道同步注浆浆液压力扩散模式研究[J]. *中国铁道科学*, 2011, 32(4): 38 - 45.
BAI Yun, DAI Zhiren, ZHANG Shasha, et al. Study on the grout pressure dissipation mode in simultaneous backfill grouting during shield tunneling [J]. *China Railway Science*, 2011, 32(4): 38 - 45.

- [15] 叶飞. 软土盾构隧道施工期上浮机理分析及控制研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.
YE Fei. Analysis and control for upward movement of shield tunnel during construction [D]. Shanghai: Tongji University, 2007.
- [16] 叶飞, 朱合华, 何川. 盾构隧道壁后注浆扩散模式及对管片的压力分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(5): 1307-1312.
YE Fei, ZHU Hehua, HE Chuan. Back-filled grouts diffusion model and its pressure to segments of shield tunnel [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(5): 1307-1312.
- [17] 叶飞, 苟长飞, 陈治, 等. 盾构隧道同步注浆引起的地表变形分析[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(4): 618-624.
YE Fei, GOU Changfei, CHEN Zhi, et al. Ground surface deformation caused by synchronous grouting of shield tunnels [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(4): 618-624.
- [18] 苟长飞, 叶飞, 张金龙, 等. 盾构隧道同步注浆充填压力环向分布模型[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(3): 590-598.
GOU Changfei, YE Fei, ZHANG Jinlong, et al. Ring distribution model of filling pressure for shield tunnels undersynchronous grouting [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(3): 590-598.
- [19] 叶飞, 苟长飞, 刘燕鹏, 等. 盾构隧道壁后注浆浆液时变半球面扩散模型[J]. 同济大学学报, 2012, 40(12): 1789-1794.
YE Fei, GOU Changfei, LIU Yanpeng, et al. Half-spherical surface diffusion model of shield tunnel back-filled grouts [J]. Journal of Tongji University (Natural-science), 2012, 40(12): 1789-1794.
- [20] 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.
YE Fei, GOU Changfei, CHEN Zhi, et al. Back-filled grouts diffusion model of shield tunnel considering its viscosity degeneration [J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(1): 127-134.
- [21] 叶飞, 陈治, 苟长飞, 等. 基于球孔扩张的盾构隧道壁后注浆压密模型[J]. 交通运输工程学报, 2014, 14(1): 35-42.
YE Fei, CHEN Zhi, GOU Changfei, et al. Back-filled grouting compaction model of shield tunnel based on spherical cavity expansion [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2014, 14(1): 35-42.
- [22] 苟长飞. 盾构隧道壁后注浆浆液扩散机理研究[D]. 西安: 长安大学, 2013.
GOU Changfei. Study on the grouts diffusion mechanism of shield tunnel back-filled grouts [D]. Xi'an: Chang'an University, 2013.
- [23] 叶飞, 刘燕鹏, 苟长飞, 等. 盾构隧道壁后注浆浆液毛细管渗透扩散模型[J]. 西南交通大学学报, 2013, 48(3): 428-434.
YE Fei, LIU Yanpeng, GOU Changfei, et al. Capillary penetration diffusion model for backfill grouting of shield tunnel [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2013, 48(3): 428-434.

(编辑 阳丽霞)