

文章编号: 1000-7598-(2013)06-1593-06

泥水盾构泥膜形成二维理论分析

刘成¹, 孙钧^{2,3}, 赵志峰¹, 赵联桢¹

(1.南京林业大学 土木工程学院, 南京 210037; 2.同济大学 岩土工程重点实验室, 上海 200092; 3.同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘要: 在各种复杂环境下采用泥水盾构法修建隧道工程, 需要解决在开挖面上如何及时形成安全有效的泥膜支护问题。采用修正的剑桥模型中正常固结黏土各向等压固结曲线规律, 建立泥膜固含率与有效应力之间的关系, 结合圆球形颗粒孔隙理想模型的渗透率以及泥膜固含率、渗透率和比阻三者之间的关系, 确立新的泥膜形成本构关系模型。将泥膜形成一维模型拓展为二维模型, 基于增量分析方法分析泥膜的增长规律, 给出泥膜滤失量和厚度分别与位置、时间、重度比和盾构直径等因素的关系。结果表明, 修正的剑桥模型能够较好地表征泥膜压缩固结特性; 对于高压泥浆, 泥浆重度对泥膜增长的影响较小, 但对超大直径的盾构其影响不可忽略。

关键词: 泥水盾构; 泥膜形成; 泥浆悬浮液; 固含率

中图分类号: U 455.43

文献标识码: A

Two-dimensional theoretical analysis of slurry membrane formation process in slurry shield

LIU Cheng¹, SUN Jun^{2,3}, ZHAO Zhi-feng¹, ZHAO Lian-zhen¹

(1. College of Civil Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China;

2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China;

3. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: To build the tunnel project by slurry shield method in a variety of complex environments needs to solve the problem that how to form safe and effective slurry membrane support timely on the excavation surface. The isotropic consolidation curves of the normal consolidation clay in the modified Cambridge model is used to establish the relationship between the membrane solid holdup and the effective stress of slurry membrane. Combining this with the permeability of ideal model of round sphere particle pore and the relationships among the membrane solid holdup, permeability and specific resistance of slurry membrane, a new constitutive model for the formation process of slurry membrane is established. The one-dimensional model is expanded to two-dimensional one, and the incremental analysis method of the formation process of slurry membrane is also given to study the increasing rules. Based on this, the relationship between slurry membrane filtration loss, and factors such as location, time, unit weight ratio and shield diameter are established. The results show that the modified Cambridge model could well characterize the compression consolidation properties of slurry membrane. Under high operating pressure, unit weight of slurry has little effect on membrane growth; but its influence cannot be ignored for super-large diameter shield.

Key words: slurry shield; slurry membrane formation; slurry suspension; solid holdup

1 引言

泥膜(泥饼)形成的研究起源于化学工业和矿产工业中过滤处理、废物处理等方面的研究。基本原理是使用过滤介质实现固-液分离, 随着过滤介质的堵塞, 过滤处理能力下降, 滤失量增加, 最终形成致密微透水的泥膜, 逐渐增长的泥膜中的颗粒结

构表现出一定程度的压缩性。泥膜与过滤介质中的压力分布不均匀, 影响了泥膜结构(固含率 ε 和渗透率 k 等), 并影响了过滤过程。

Ruth^[1]和 Carman^[2]首先提出了过滤方程的经典公式(Ruth-Carman 方程), 并被广泛采用, 然而经典的 Ruth-Carman 方程使用的假设使其无法考虑泥膜内部的流动机制。Tiller 等^[3]、Shirato 等^[4]、Stamatis

收稿日期: 2012-03-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 51278251); 江苏高校优势学科建设工程资助项目; 南京林业大学高学历人才基金项目(No. GXL201211)。
第一作者简介: 刘成, 男, 1982 生, 博士, 讲师, 主要从事地下渗流及动力分析方面的研究工作。E-mail: lcheng83@163.com

等^[5]、Tien 等^[6]将达西定律引入泥膜渗流分析。Vorobiev^[7]提出了一个简化的泥膜过滤模型,模型中考虑了泥膜-过滤介质界面的压力重分布的影响,得出的解析解对泥膜增长过程作了改进的预测。传统泥膜形成模型中参数较多,且物理意义不明确,需采用特定的压缩-渗透(C-P)试验装置,仪器和人为因素影响较大。泥水盾构泥膜形成过程是泥浆中细小颗粒在流体拖曳力作用下在开挖面上的堆积过程和压降作用下固结过程的组合。泥膜中微小单元体的固结过程与重塑土各向等压固结的相似性,为采用剑桥模型各向等压固结曲线规律形成泥膜固含率与有效应力之间的关系成为可能,且物理意义较为明显。

不同的泥膜模型求解方法各异,以 Ruth^[1]为代表的传统过滤理论计算包含两个步骤:(1)联立质量守恒定律和动量守恒定律方程形成控制方程;(2)假设颗粒间为点接触,结合经验公式,减少方程中的相关变量数。Wakeman^[8]最早提出了逐层形成泥膜法分析泥膜过滤过程,选用固含率和滤失速度作为输入参数。Johansson 等^[9]的逐层形成泥膜法采用本构关系及固含率、渗透率等与有效应力的函数关系进行求解,将新泥膜层与已形成的层单独计算分析。Kocurek 等^[10]采用 Harlow 和 Weld 提出的位移网格法给出本构方程的求解,泥膜网格一端为泥膜-过滤介质界面节点,另一端为泥膜-悬浮液移动边界节点。Sorensen 等^[11]给出了泥膜网格划分求解方法,并按照过滤界面阻力大小将求解初始条件分为两种类型,结合对过滤介质流体初始流速的比较来选择求解方法。但 Kocurek 等^[10]通过试验证明,数值计算稳定不仅取决于过滤介质的比阻,同时也取决于泥膜的比阻,计算精确度取决于时间步长和空间步长。泥膜形成与增长常用动态方法分析,早期研究多采用半动态方法。Hou 等^[12]提出一个描述过滤介质上球体 2D 堆积的黏结模型。Tassopoulos 等^[13]提出了可考虑基质表面颗粒沉降的离散随机模型。Lu 等^[14]提出了可描述泥膜形成整个过程的运动学模型,模型中考虑了单个颗粒的受力平衡,包括重力和颗粒-流体作用。尽管这些模型揭露了泥膜形成的微观机制,但因其假设颗粒运动和平衡,不是完全的动力模型,因此,无法获得一些重要信息,如泥膜的压缩性能等。本文基于前人的求解方法,采用增量分析步骤分析泥膜形成过程,不仅考虑了泥膜的堆积过程,同时考虑了泥膜的压缩固结性能。

白云等^[15]研究了泥水盾构泥膜动态过滤模型,考虑了开挖地层力学性质的动态变化与泥膜的动态

形成过程之间的耦合关系。本文采用新的泥膜形成模型,将泥膜形成一维模型拓展为二维模型,基于增量分析方法分析泥膜的增长规律,给出泥膜增长和滤失量分别与位置、时间、重度比和盾构直径等因素的关系。

2 泥水盾构泥膜形成机制

2.1 泥水盾构泥膜形成原理

泥水盾构采用加压膨润土泥浆支护开挖面,泥浆悬浮液在操作压力作用下通过开挖面土体间隙流入地层,泥浆中细粒成分充填土体间隙,导致滤失量减小,地层中产生超孔隙水压力,超孔隙水压力增加到某一数值时开始消散,这个数值伴随着施工进度不断变化。未进入地层的泥浆颗粒吸附聚集在开挖面上,形成透水性小的致密泥膜。通过泥膜传递操作压力,平衡前方地层水土压力,起到临时支护的作用。随着盾构掘进的进行,形成的泥膜不断地被盾构刀盘切削并被携带走。在泥膜重新形成时,泥浆不断侵入前方地层,使前方土体产生超孔隙水压力,从而影响开挖面的平衡。

泥浆滤失和泥膜形成规律受到操作压力、远场边界条件、土层特性、泥浆特性等因素的影响,这里考虑泥浆重力在开挖面上的压力梯度的影响,分析不同盾构直径下在盾构开挖面上泥膜厚度的竖向增长规律及滤失量变化规律。泥水盾构泥膜形成模型示意图如图 1 所示,泥膜厚度坐标 x 原点在开挖面位置处,泥膜增长方向为正向,即图中向右方向,泥膜位置坐标 z 原点在盾构顶面处,竖直向下为正。

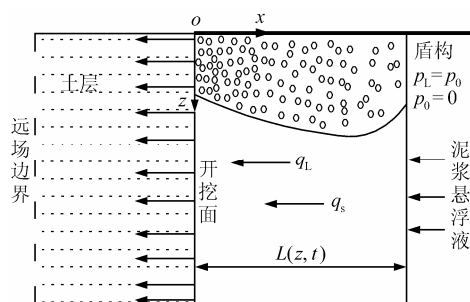


图 1 泥水盾构开挖面泥膜形成示意图

Fig.1 Schematic diagram of slurry membrane formation on cutting face before slurry shield excavation

2.2 泥水盾构泥膜形成控制方程

在开挖面上某一深度位置 z 处泥膜形成规律可以简化为一维情形,根据传统泥膜过滤理论,泥膜内部的连续性方程为

$$\frac{\partial q_L}{\partial x} = -\frac{\partial q_s}{\partial x} = \frac{\partial \varepsilon_L}{\partial t} = -\frac{\partial \varepsilon_s}{\partial t}, \quad 0 \leq x \leq L(t) \quad (1)$$

式中: q_L 和 q_s 为泥膜内部流体和颗粒的表观流速, 与流体和颗粒的表观流速的真实速度 u_L 和 u_s 关系为 $q_L = \varepsilon_L u_L$ 和 $q_s = \varepsilon_s u_s$; ε_s 为泥膜的固含率 (泥膜中固体颗粒体积百分比), ε_s 与泥膜的孔隙率 ε_L 关系为 $\varepsilon_s = 1 - \varepsilon_L$ 。

Ruth^[1]根据假设对动量平衡方程进行简化, 提出了压力平衡方程:

$$p_s + p_L = p_0 \quad (2)$$

式中: p_0 为操作压力; p_L 为孔隙水压力; p_s 为颗粒间压缩应力即有效应力。式 (2) 的微分形式为 $dp_L + dp_s = 0$, 这种假设仅代表某一种特定情况^[16]。

Tiller 等^[3]将达西定律引入不可压缩泥膜渗流分析, 得到

$$q_L = \frac{k}{\mu} \frac{\partial p_L}{\partial x} = \frac{1}{\mu \alpha} \frac{\partial p_L}{\partial \omega} \quad (3)$$

式中: k 为泥膜渗透率; μ 为黏度; α 为泥膜比阻; ω 为距离土层开挖面 x 范围内泥膜颗粒体积。

Shirato 等^[4]在达西定律中引入相对速度项, 提出了 Darcy-Shirato 模型

$$q_R = \varepsilon_L (u_L - u_s) = \frac{k}{\mu} \frac{\partial p_L}{\partial x} \quad (4)$$

Stamatis 等^[5]、Tien 等^[6]根据多相流求解分析, 给出了考虑泥膜内部颗粒运动的达西定律

$$\frac{q_L}{\varepsilon_L} - \frac{q_s}{\varepsilon_s} = \frac{1}{\varepsilon_L} \frac{k}{\mu} \frac{\partial p_L}{\partial x} \quad (5)$$

假设泥膜内部颗粒运动速度远小于流体速度, 可以忽略, 即 $q_s \ll q_L$, $q_s \cong 0$, 此时式 (5) 可以简化为 (3)。

泥膜颗粒体积 ω 的空间分布可用增量形式表示为

$$d\omega = \varepsilon_s dx \quad (6)$$

因为 $\omega_L = \int_0^L \varepsilon_s dx = \bar{\varepsilon}_s L$, 所以

$$\bar{\varepsilon}_s = \frac{1}{L} \int_0^L \varepsilon_s dx \quad (7)$$

式中: $\bar{\varepsilon}_s$ 为泥膜的平均固含率。

联合式 (3) 和式 (6) 可得

$$\alpha k \varepsilon_s = 1 \quad (8)$$

将式 (8) 代入式 (3), 并进行积分和简化可以

得到在泥膜整个厚度 L 范围内的达西定律表达式, 即

$$\frac{\Delta p_c}{L} = \mu \alpha_{av} \bar{\varepsilon}_s q_L \quad (9)$$

泥膜的形成过程是泥浆中细小颗粒在流体拖曳力作用下在开挖面上的堆积过程和压降作用下固结过程的组合。颗粒尺寸较小, 堆积后以范德华力和静电引力作用为主, 颗粒间无胶结力作用, 泥膜结构与重塑土相似。泥膜中任一微小单元体受到各向同性的有效应力 p_s 作用发生各向等压固结。可以假设泥膜的形成过程中, 其应力状态与土的体积状态的关系与饱和重塑正常固结黏土类似, 满足惟一性关系。在各向等压固结条件下, 体积沿正常固结曲线变化, 固含率 ε_s 与有效应力 p_s 的关系表示为

$$1/\varepsilon_s = N - \lambda \ln p_s \quad (10)$$

式中: N 为 NCL 线在 $p_s = 1 \text{ kPa}$ 时对应的比体积, λ 为该直线斜率, 参数 N 和 λ 可以通过常规三轴试验测定。 v 为比体积, 泥膜固含率可以表示为

$$\varepsilon_s = \frac{1}{v} = \frac{1}{N - \lambda \ln p_s} \quad (11)$$

泥浆通过泥膜产生压降, 与开挖面处泥膜的有效应力相等, 即

$$p_s(x=0) = \Delta p_c = p_0 - p_{cav} \quad (12)$$

式中: p_0 为泥浆压力; p_{cav} 为土层与泥膜界面的孔隙水压力。

可以将泥浆悬浮液中固体颗粒近似认为圆球形, 则该孔隙理想模型下的渗透率计算公式为^[17]

$$k = \frac{(1 - \varepsilon_s)^2}{18 \varepsilon_s} d_p^2 \quad (13)$$

将式 (11) 和式 (13) 代入式 (8) 可得泥膜比阻 α 为

$$\alpha = \frac{18}{(1 - \varepsilon_s)^2 d_p^2} \quad (14)$$

在泥膜内部, 从悬浮液与泥膜的界面开始, 有效应力 p_s 逐渐增加, p_s 是时间 t 与 x 的函数。而 k 、 α 和 ε_s 又是 p_s 的函数, 因此, 也是时间 t 与 x 的函数。

对式 (3) 中 k 和 α 进行积分, 可得

$$k_{av} = \frac{-1}{\Delta p_c} \int_{\Delta p_c}^0 k dp_s \quad (15)$$

$$\alpha_{av} = \frac{\Delta p_c}{-\int_{\Delta p_c}^0 \frac{1}{\alpha} dp_s} \quad (16)$$

将式(15)和式(16)代入式(8)可得平均固含率 $\bar{\varepsilon}_s$ 的近似值为

$$\bar{\varepsilon}_s = \frac{1}{k_{av} \alpha_{av}} \quad (17)$$

2.3 泥水盾构泥膜形成增量分析

泥膜的形成过程是新泥膜层的形成和已形成泥膜的压缩固结的结合,伴随着开挖地层中超孔隙水压力的增长与消散,可以采用增量分析的方式求解,主要分析计算步骤如下:

(1) 设定初始固含率 ε_{s0} 、时间 t_0 , 计算初始泥膜厚度 L_0 和滤失量 V_0 ;

(2) 计算经过 Δt 时间增量后, 初始泥膜的压缩固结变形 $L_{0,1}$ 和新泥膜的增长 $L_{1,new}$, 计算新泥膜总厚度 $L_1 = L_{0,1} + L_{1,new}$;

(3) 对步骤(2)进行迭代计算, 可以获得距离盾构顶部 z 处的泥膜厚度或滤失量增长与时间的关系曲线。

在盾构断面范围内, 由于重力作用开挖面上泥水压力不是均匀分布的, 需叠加斜率为 $\gamma_F z$ 的附加压力, 因此, 泥膜厚度与时间和位置的关系曲线为空间分布曲线, 并随泥浆重度 γ_F 的变化而表现出一定的差异, 如图 5、6 所示。

恒压工况下, 盾构开挖面上的总滤失量 V_{shield} 为

$$V_{shield} = \int_0^D 2V \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{D}{2} - z\right)^2} dz \quad (18)$$

式中: D 为盾构直径; z 为计算点与盾构顶部的距离; V 为位置 z 处在 t 时刻的滤失量。

3 泥水盾构泥膜增长规律研究

3.1 模型参数选取

泥膜动态形成过程中影响因素较多, 这里仅从泥浆悬浮液重度 γ_F 、盾构直径 D 和位置 z 3 个参数对泥膜厚度-时间 ($L-t$) 和滤失量-时间 ($V-t$) 的影响进行比较分析。模型具体参数取值见表 1。

3.2 泥膜形成规律分析

图 2 为泥膜滤失量与时间的关系曲线, 考虑了泥浆与水的重度比 γ_F/γ 、盾构直径 D 两个影响因素, 结果表明: 在泥水压力、远场水位恒定时, 泥膜滤失量随时间、重度比 γ_F/γ 、盾构直径 D 的增加而呈非线性增加, 最终趋向一个定值, 盾构直径对滤失量的增加影响较大, 重度比 γ_F/γ 影响较小。当 $t=1800$ s 时, 滤失量随重度比增加其增长率降低, 而随盾构直径增加其增长率增加, 如图 3 所示。图 4 给出了二维模型退化为一维时滤失量的解答, 当 $t=1800$ s 时, 滤失量约为 $45 \text{ cm}^3/\text{m}^2$, 略小于 Tien 等^[6]给出的修正的经典解法, 因为 Tien 等定义的初始固含率有效应力值小于 1 kPa , 初始斜率相对较大。

表 1 泥水盾构泥膜形成计算参数

Table 1 Parameters of slurry membrane formation for slurry shield

N	λ	c_0	d_s / mm	μ / (Pa·s)	ρ_s / (g/cm ³)	γ_F / (kN/m ³)	D / m	p_0 / MPa	p_{far} / MPa	R_{soil} / (m ⁻¹)
2	0.02	0.15	0.005	0.001	1.5	0/10/15	6/9/12/15	0.6	0.2	7×10^{-9}

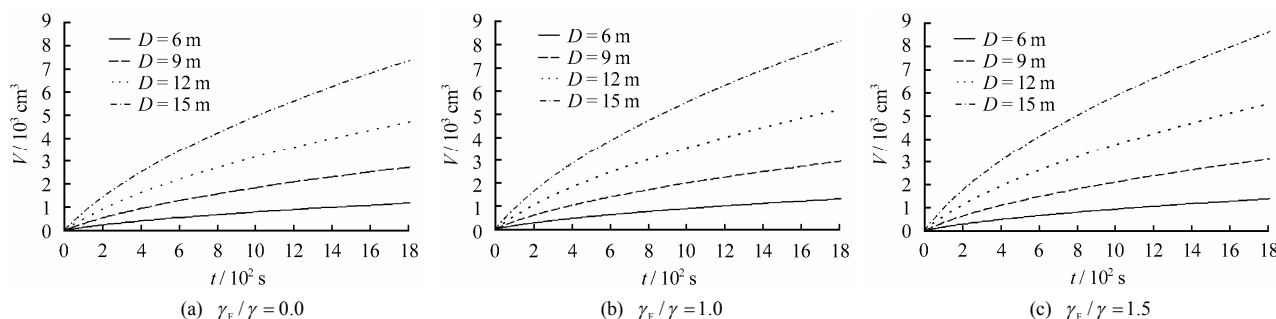


图 2 泥膜滤失量与时间的关系曲线

Fig.2 Relationships between slurry membrane filtration loss and time

图 5、6 给出了泥膜厚度与时间和位置的关系曲线。分析表明, 当 $\gamma_F/\gamma=1.0$ 时, 泥膜厚度随 z 的增加几乎不变, 当 $\gamma_F/\gamma<1.0$ 时, 泥膜厚度随 z 的

增加而减小, 当 $\gamma_F/\gamma>1.0$ 时, 泥膜厚度随 z 的增加而增加, 但盾构顶部和底部泥膜厚度差值与泥膜平均厚度的比值较小, 如 $\gamma_F/\gamma=1.5$ 、 $t=1800$ s 时,

泥膜厚度差值与泥膜平均厚度的比值为4.3%,说明泥浆重度对泥膜厚度的贡献与泥浆压力相比可以忽略,但这里面没有考虑泥浆配比和泥浆黏度等因素对泥膜形成的影响。另外,盾构直径的增大,泥浆重度的贡献随之增大,对于超大直径盾构隧道,这种贡献可能起到控制性作用。图7给出了二维模型退化为一维时泥膜厚度的解答,与滤失量相似,略小于Tien等给出的修正的经典解法。

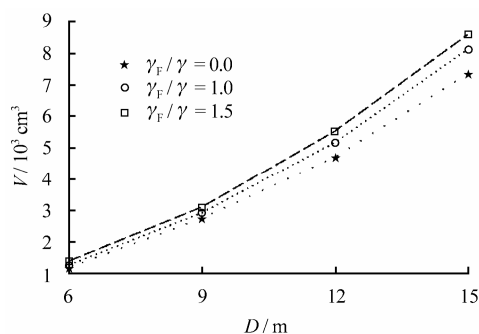


图3 泥膜滤失量与重度比、盾构直径的关系曲线
($t = 1800 \text{ s}$)

Fig.3 Relationships between slurry membrane filtration loss and unit weight ratio, shield diameter ($t = 1800 \text{ s}$)

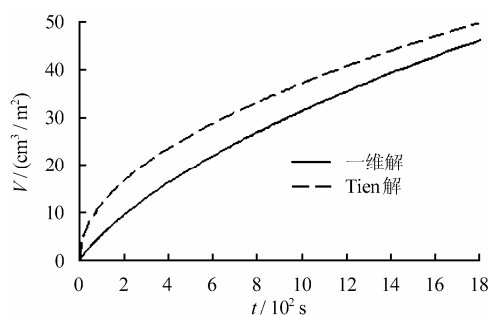


图4 泥膜滤失量与时间的关系曲线(一维解)

Fig.4 Relationships between slurry membrane filtration loss and time (one dimensional analytical solution)

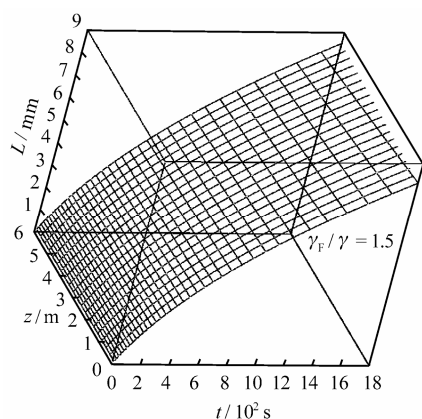


图5 泥膜厚度与时间和位置的关系曲线
($\gamma_F/\gamma = 1.5$, $D = 6 \text{ m}$)

Fig.5 Relationships between slurry membrane thickness and time or location ($\gamma_F/\gamma = 1.5$, $D = 6 \text{ m}$)

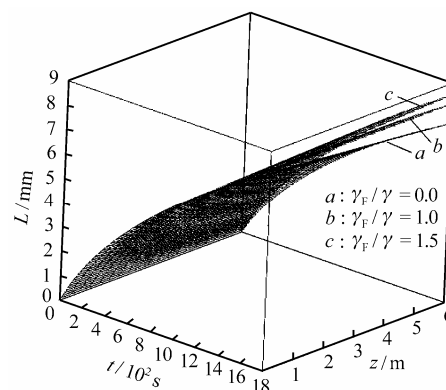


图6 泥膜厚度与时间和位置的关系曲线($D = 6 \text{ m}$)

Fig.6 Relationships between slurry membrane thickness and time or location ($D = 6 \text{ m}$)

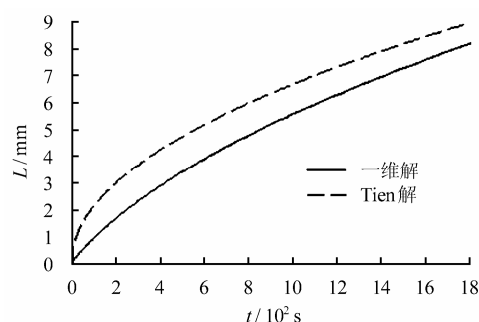


图7 泥膜厚度与时间的关系曲线(一维解)

Fig.7 Relationships between slurry membrane thickness and time (one dimensional analytical solution)

4 结 论

(1) 泥膜的增长规律受到多种因素的影响,其中因重力形成的泥浆附加压力随深度呈线性增长,远场边界水压力随深度也呈线性增长。对于高压泥浆,泥浆重度对泥膜增长的影响较小,但随着盾构直径的增大而增大,对超大直径的盾构其影响不可忽略。

(2) 泥膜滤失量随重度比 γ_F/γ 增加其增长率降低,而随盾构直径增加其增长率增加;滤失量随着时间增加而呈非线性增加,最终趋向一个定值;盾构直径是影响滤失量的重要因素,超大直径盾构尚应考虑滤失量变化对地层超孔隙水压力增长的影响。

参 考 文 献

- [1] RUTH B F. Studies in filtration III. Derivation of general filtration equations[J]. *Industrial and Engineering Chemistry*, 1935, 27(6): 708—723.
- [2] CARMAN P C. Fundamental principles of industrial filtration—A critical review of present knowledge[J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 1938, 16(a): 168—188.