

土压式盾构施工中地下水出渗机理研究

秦建设, 朱伟

(河海大学 岩土工程研究所, 江苏 南京 210098)

摘 要: 针对土压平衡式盾构机在高水头强透水地层掘进工程中, 排土器出口易出现地下水渗出的现象进行了理论研究。通过建立地下水在盾构机内的渗流计算模型, 提出了判别地下水渗出发生与否及其出渗量大小的方法, 阐明了盾构施工中发生地下水出渗的机理。利用这一模型计算了出渗发生时地下水流失情况, 对影响出渗发生的各相关参数进行了分析, 为施工中克服和避免这一现象提供了理论依据。

关 键 词: 土压平衡式 EPB 盾构; 排土器出口地下水出渗; 渗流计算

中图分类号: O357.3 **文献标识码:** A

Study on flowing through screw conveyor during excavation with EPB shield

QIN Jian-she, ZHU Wei

(Research Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: When earth-pressure balance (EPB) shield is used in high permeability ground as well as high groundwater pressure, groundwater will flows through screw conveyor (Flowwing), this will lead the loss of great quantity of groundwater and even the halt of excavation. Based on the steady-flow seepage theory and shield driving principle, a method for judge Flowing is provided, and a model for study the seepage of groundwater in chamber and screw conveyor is built to explain the mechanism of Flowing. With the model, the parameters such as soil condition, shield geometry, excavation instruction which relate with Flowing are analyzed and the results give some useful conclusions and suggestions to predict and avoid flowing. The model can also be used to calculate the discharge of groundwater.

Key words: earth-pressure balance (FPB) shield; flowing through screw conveyor; seepage calculation

1 引言

随着地下空间的不断开发, 盾构施工技术得到越来越广泛地应用, 其中土压平衡式盾构掘进技术以其快速、环保及对周围环境影响较小等优点而被广泛应用于隧道工程。但是, 当盾构机在砂砾层等透水性较大的地层中掘进时, 若开挖面处于高水头情况下, 往往可能造成地下水从盾构机排土器出口渗出。当出渗水量超过一定程度时, 会引起压力舱压力控制困难, 造成渣土运送障碍, 影响坑内施工环境; 有时大量的地下水流失也会导致周围地层发生过大沉降。另一方面当开挖土层土体颗粒级配较差、在高水头差下渣土渗透系数大到一定程度时, 大量、高压的地下水出渗会带动开挖面及压力舱内土体一起从压力舱内涌出, 发生所谓的喷涌现象^[1], 这一现象的发生往往会造成开挖面支护压力失控, 使盾构机无法掘进。

2 地下水出渗机理研究

2.1 土压平衡式盾构法施工原理^[2,3]

土压平衡式盾构法施工是盾构机通过一定开口率的前方刀盘的切削, 使开挖面土体进入压力舱, 搅拌后形成渣土, 利用千斤顶的推进及压力舱内隔板的作用, 使切削下来的渣土对开挖面产生支护力, 同时通过螺旋排土器不断排出渣土, 达到开挖隧道的目的 (图 1)。

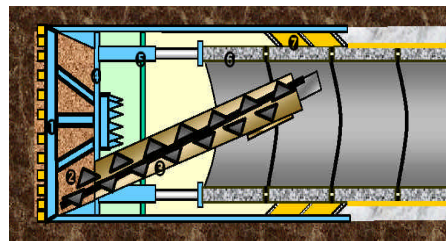


图 1 土压平衡式盾构机掘进示意图

Fig.1 Schematic plane of EPB shield driving

2.2 地下水出渗

地下水从排土器出口出渗现象是指在土压平衡式盾构法掘进工程中，排土出口在输送渣土的同时，出现大量的地下水涌出。产生这一现象的原因是盾构机在砂砾层等强透水性地层掘进中，压力舱与排土器内渣土具有较大的渗透性，当开挖面存在一定的压力水头时，开挖面与排土器出口的水头差导致地下水在盾构机内发生运动，并从排土器出口涌出。

2.3 模型的建立

水在土中流动时，由于土的孔隙通道很小、曲折且渗流过程中粘滞阻力很大，所以多数情况下水在土中流动满足层流中的达西渗流定律^[4]。本文假定水流满足达西定律，结合土压平衡式盾构施工原理研究地下水在盾构机内的运动。建立从开挖面到排土器出口段地下水在盾构机内的流动模型如图 2 所示，图中， L_1 为压力舱的长度； L_2 为螺旋排土器的长度； D 为压力舱的直径； d 为螺旋排土器的直径； H_1 为压力舱前端开挖面的水头高度（相对于压力舱中心）； H_2 为排土器出口位置水头高度（相对于排土器中心），当出口没有特殊装置时，为大气压状态，取为 0； q 为螺旋排土器的倾角； k 为盾构机内渣土的渗透系数。

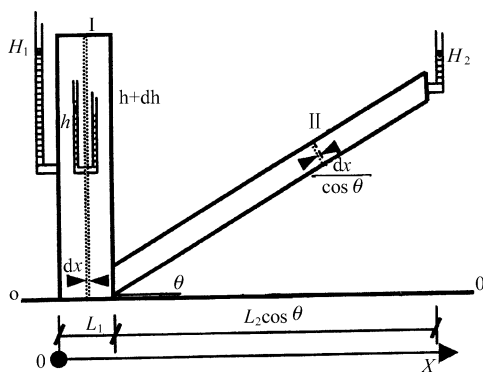


图 2 盾构机内地下水流动计算模型
Fig.2 The model of groundwater seepage flow inside shield machine

依据图 2 模型，建立如下地下水渗流方程：

压力舱内通过断面的流量为

$$Q_I = \left(-\frac{dh_I}{dx}\right)k p \left(\frac{D}{2}\right)^2 \quad (1)$$

螺旋排土器内通过断面的流量为

$$Q_{II} = \left(-\frac{dh_{II}}{dx}\right)k p \left(\frac{d}{2}\right)^2 \cos q \quad (2)$$

式中 h_I, h 分别为压力舱段、排土器段水头。

以压力舱底部作为基准面，建立水头边界条件：

$$\text{开挖面位置：} x=0, \quad h_I = H_1 + \frac{D}{2} \quad (3)$$

排土器出口（无特殊装置）位置：

$$x = L_1 + L_2 \cos q; \quad h = L_2 \sin q + \frac{d}{2} \quad (4)$$

压力舱与螺旋排土器的交界处，水头相同：

$$x = L_1, \quad h_I = h_{II} \quad (5)$$

根据流量守恒原则：

$$Q_I = Q_{II} = Q \quad (6)$$

通过上述建立的方程，得到盾构掘进工程中的排土器出口压力水头引起的地下水涌出流量：

$$Q = \frac{pk \left(H_1 + \frac{D}{2} - \frac{d}{2} - L_2 \cos q\right)}{4 \left(\frac{L_1}{D^2} + \frac{L_2}{d^2}\right)} \quad (7)$$

盾构机内水头梯度关系如下：

$$h = \begin{cases} H_1 + \frac{D}{2} - \frac{H_1 + \frac{D-d}{2} - L_2 \cos q}{L_1 + \left(\frac{D}{d}\right)^2 L_2} x, & 0 \leq x \leq L_1 \\ L_2 \sin q + \frac{d}{2} + \frac{H_1 + \frac{D-d}{2} - L_2 \cos q}{\left(\frac{d}{D}\right)^2 L_1 \cos q + L_2 \cos q} (L_1 + L_2 \cos q - x), & L_1 < x \leq L_1 + L_2 \cos q \end{cases} \quad (8)$$

压力舱内和螺旋排土器的地下水渗流流速：

$$\left. \begin{aligned} V_1 &= k \frac{H_1 + \frac{D-d}{2} - L_2 \cos q}{L_1 + \left(\frac{D}{d}\right)^2 L_2}, \text{压力舱内;} \\ V_2 &= k \frac{H_1 + \frac{D-d}{2} - L_2 \cos q}{\left(\frac{d}{D}\right)^2 L_1 \cos q} \frac{1}{\cos q}, \text{排土器内} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式(9)计算的渗流速度并非土体隙中水的实际平均流速，因为公式推导中采用的是土样的整个断面面积，其中包括了土粒骨架所占的部分面积在内，故真实的过水面积应该小于其整个断面，结合土体的孔隙率 n ，按照水流连续原理，可得压力舱及排土器内渗流水的实际流速为

$$\left. \begin{aligned} V_1' &= \frac{V_1}{n} = V_1 \left(\frac{e}{1+e}\right), \text{压力舱内;} \\ V_2' &= \frac{V_2}{n} = V_2 \left(\frac{e}{1+e}\right), \text{排土器内} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

2.4 地下水出渗的判断

盾构掘进中发生地下水渗流的土体也在运动,所以,判断排土器出口是否出现地下水出渗,可以通过比较盾构机内渣土的运动速度与渗流水的实际流速来进行。判断方法如下:

(1) 假定盾构掘进速度 V 。根据盾构机进出土量平衡原理,可得渣土在盾构机排土器出口排出时的运动速度为

$$V_2'' = V \left(\frac{D}{d}\right)^2 \quad (11)$$

(2) 根据式(9)计算渗流水在盾构机排土器出口实际流动速度 V_2' 。

(3) 比较 V_2'' 与 V_2' , 判断排土器出口是否发生地下水出渗:

$$\left. \begin{aligned} V_2'' < V_2', & \text{发生} \\ V_2'' = V_2', & \text{临界状态} \\ V_2'' > V_2', & \text{不发生} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

3 地下水出渗影响参数分析

土体的渗透性、开挖面水头的高低、盾构机尺寸及掘进参数等都对地下水出渗发生与否及其严重程度有着影响。依据上述建立的渗流计算模型,结合目前土压力平衡式盾构机在隧道掘进工程中一些基本常用参数,对出渗发生的条件及其引起地下水流失情况进行分析。

本文分析中取土压平衡式盾构机的机械参数为:压力舱长度 $L_1=1$ m;螺旋排土器长度 $L_2=5$ m;压力舱的直径 $D=6$ m;螺旋排土器的直径 $d=1$ m,螺旋排土器的倾角 $q=60^\circ$ 。

3.1 土层渗透性影响

设盾构机埋深 20 m, 地下水位 - 3 m, 则不同渗透系数土层中^[5]渗透系数及孔隙率取值参见表 1。

表 1 不同土的渗透系数及孔隙率取值
Table 1 Permeability coefficient and porosity of different soil type

土的类型	渗透系数 $k / \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	孔隙率 n
砾石、粗砂	$1.0 \times 10^1 \sim 1.0 \times 10^0$	0.20
中砂	$1.0 \times 10^0 \sim 1.0 \times 10^{-1}$	0.30
细砂、粉砂	$1.0 \times 10^{-1} \sim 1.0 \times 10^{-2}$	0.35
粉土	$1.0 \times 10^{-2} \sim 1.0 \times 10^{-4}$	0.58
粉质粘土	$1.0 \times 10^{-4} \sim 1.0 \times 10^{-5}$	0.65

以 $V=2$ cm/min 掘进时盾构机内渣土与地下水渗流实际速度见图 3, 掘进过程中排土器口地下水出渗流量见图 4。

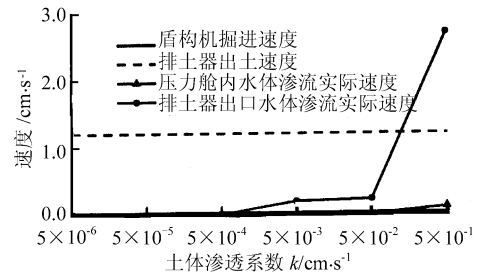


图 3 盾构机在不同土层中掘进时土、水速度
Fig.3 The translational velocity of soil and groundwater inside shield machine with different soil conditions

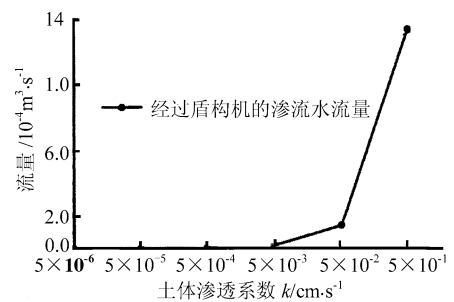


图 4 盾构机掘进过程中地下水渗流流量
Fig.4 Discharges of groundwater during EPB driving

由图 3 分析可得,若开挖面水头为 17 m,在渗透系数约为 0.2 cm/s 的砂土中掘进时,排土器出口渗流水体移动速度大于渣土排出速度,排土器出口开始发生地下水出渗。由图 4 可知,地下水渗流流量随着土层渗透系数的增大而增加,在渗透系数约为 0.005 cm/s 的砂土中掘进时,地下水开始出现较为明显的渗流流量;在渗透系数为 0.005 ~ 0.05 cm/s 的土层中掘进时,流量成线性增加;当土体渗透系数大于 0.05 cm/s 时,流量急剧增大,推进一环(以 1.5 m 计)的失水量大于 1 m³;当土体渗透系数接近 0.5 cm/s 时,推进一环的地下水流失量高达 6 m³。同时,由上述计算可知,只要开挖面与排土器出口有水头差,就会在盾构机内存在渗流流量,但不一定有地下水在排土器出口发生出渗现象。施工中当发生地下水出渗时,盾构机操作人员有时会通过加快掘进速度或减小排土器闸门口开口度来限制其发生。由本文建立的模型分析可知,尽管上述方法由于加快了渣土的流动速度而使得地下水渗流速度相对减小,地下水出渗现象有所缓解,但实际的地下水渗流流量并不能减小。解决问题的方法是通过添加气泡或泥浆来降低土体的渗透系数。

3.2 开挖面水头的影响

设盾构机在渗透系数为 0.005 cm/s, 孔隙率为 0.55 的粉土层中以 2 cm/min 速度掘进,根据本文模

型可以得到不同开挖面水头下盾构机内渣土与地下水渗流实际速度关系 (图 5); 同理, 若掘进土层为渗透系数为 0.05 cm/s, 孔隙率为 0.4 的砂层, 则不同开挖面水头下盾构机内渣土与地下水渗流实际速度关系见图 6。

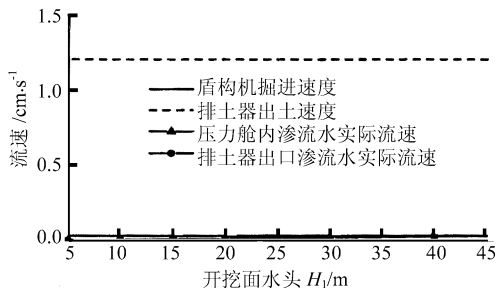


图 5 渗透系数 $k=0.005 \text{ cm/s}$ 地层中掘进时不同开挖面水头下盾构机内土、水运动速度
Fig.5 Velocity of soil and groundwater inside shield machine with $k=0.005 \text{ cm/s}$ and different water heads

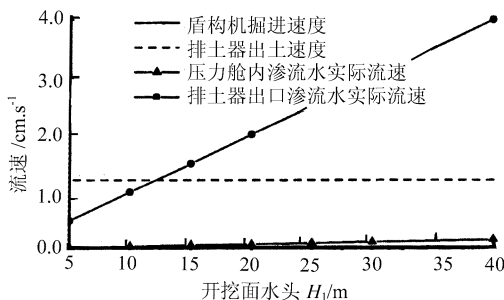


图 6 渗透系数 $k=0.05 \text{ cm/s}$ 地层中掘进时不同开挖面水头下盾构机内土、水运动速度
Fig.6 Velocity of soil and groundwater inside shield machine with $k=0.05 \text{ cm/s}$ and different water heads

由图 5 可以发现, 当开挖的渣土渗透性不是较大时, 在开挖面高水头作用下也不会发生排土器出口地下水出渗现象。由图 6 计算可知, 当切削下来的渣土具有较强的渗透性时, 排土器出口发生地下水出渗的可能性随着开挖面水头的增大而线性增大, 并且出渗量增大。

3.3 其它参数的影响

结合式 (7), 式(9)~(12)对其它参数的影响进行分析可知, 排土器长度及倾角越大越不利于地下水出渗的发生, 但其作用不够明显; 推进速度越慢地下水的出渗量越大, 对施工的影响会变得明显。

4 模型应用的补充

上述出渗机理研究中, 假定地下水在盾构机内的流动服从达西渗透定律, 所以, 需要对其是否满足达西渗流进行分析判断^[6]。

采用雷诺系数^[7, 8]进行验证。雷诺系数求解

如下:

$$Re = \frac{vd}{n} \tag{13}$$

式中 d 为含水层颗粒的平均粒径; v 为地下水的流速; n 为地下水的运动粘滞系数。

当雷诺系数 $Re < 10$ 时, 水体渗流服从达西渗透定律。以 $Re = 10$ 为控制条件, 计算各种土层中达西定律适用的最大流速 $\bar{v} = 10v/d$ 见表 2。

表 2 不同土层 $Re = 10$ 对应渗流流速
Table 2 Groundwater seepage velocity in different soils with $Re=10$

土层	平均粒径 /mm	\bar{v} /cm·s ⁻¹	备注
粗砾	10 ~ 100	0.010 03 ~ 0.100 3	
细砾	1 ~ 10	0.100 3 ~ 1.003 0	地下水动粘滞系数 η 以 20 ° 水温计 $1.003 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
粗砂	1 ~ 0.5	1.003 0 ~ 2.006 0	
中砂	0.5 ~ 0.25	2.00 6 ~ 4.012	
细砂	0.25 ~ 0.1	4.012 ~ 10.03	
粗粉砂	0.1 ~ 0.05	10.03 ~ 20.06	
细粉砂	0.05 ~ 0.01	20.06 ~ 100.3	

结合表 1~2 和式(9), 对不同开挖面水头下盾构掘进过程中地下水渗流是否满足达西流计算见图 7。由图可知, 在正常埋深隧道施工中, 对于渗透系数小于 0.5 ~ 1 cm/s 的地层, 地下水在盾构机内的渗流服从达西定律, 本文的出渗分析模型有效。同时由图可知, 达西定律随着开挖面水头的降低而适用土层范围越广。

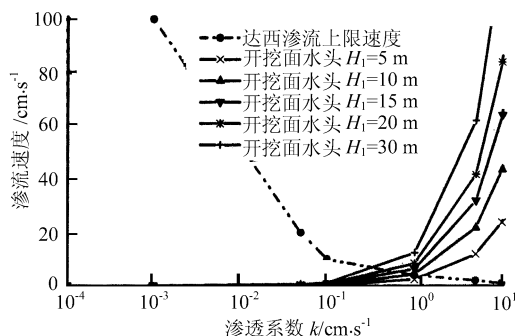


图 7 不同开挖面水头下, 盾构机在不同土层掘进过程中地下水渗流速度
Fig.7 Groundwater seepage velocity inside shield machine with different water heads

对于粗砂、砾石等透水性更大的地层, 在开挖面高水头作用下, 地下水在盾构机内的运动速度较快, 达西定律已经不能适用。此时, 根据雷诺系数 Re 的大小, 在计算中建议考虑修改为非线性层流渗透定律为

$$Q = K_m A J^m, \quad 10 < Re < 100 \tag{14}$$

式中 K_m 为非线性层流时含水层的渗透系数, $m=1.75 \sim 2$, 或采用 A.Chezy 提出的地下水紊流状态时的计算公式:

$$Q = K_c A J \frac{1}{2}, \quad Re > 100 \quad (15)$$

式中 K_c 为紊流时含水层的渗透系数。

5 结 语

本文通过建立土压平衡式盾构掘进过程中地下水在盾构机内的流动模型, 对强透水地层中盾构掘进中的排土器出口地下水出渗现象进行了研究与分析, 得出以下主要结论:

(1) 开挖面存在高水头, 导致盾构机内渣土存在压力水头, 是出渗发生的前提条件;

(2) 开挖后渣土的渗透系数大小, 是诱发出渗发生的主要影响因素。当施工中遇到可能发生出渗的地层时, 通过向开挖土层中添加膨润土泥浆、气泡等调整压力舱内土体的渗透性, 可以达到防治出渗的目的。

(3) 盾构机的尺寸对出渗的发生也有一定的影响, 但不是特别明显;

(4) 调整盾构掘进参数中, 如采取加快推进速度或减小排土器闸门口度等措施, 只能缓解出渗发生, 不能从根本上解决出渗问题。

本文的理论计算模型, 为施工前对出渗的防止及预防提供了计算依据, 并且通过文中提出的计算模型, 可以计算盾构掘进中地下水的流失量, 为后续注浆及地基变形量的估计及预防提供参考依据。本文对地下水出渗的研究是建立在盾构机内地下水渗流满足达西定律的基础上进行的, 当通过雷诺系

数验证渗流不服从达西流时, 应该参照文中建议修改计算模型。

参 考 文 献

- [1] 朱伟, 秦建设, 魏康林. 土压平衡盾构喷涌发生机理的研究[J]. 岩土工程学报, (待刊).
- [2] 尹旅超, 朱振宏, 李玉珍, 等. 日本隧道盾构新技术[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1999.
- [3] Bernhard Maidl, Martin Herrenknecht, Lothar Anheuser. Mechanised Shield Tunnelling[M]. Berlin: Ernst & Sohn Verlag for Architektur und technische. Wissenschaften GmbH, 1996.
- [4] 陆培炎. 评定渗流管涌公式[J]. 岩土力学, 2001, 22(4): 389—394.
LU Pei-yan. Assessing the formula for seepage piping [J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2001, 22 (4):389—394.
- [5] 陈仲颐, 周景星, 王洪瑾. 土力学[M]. 北京:清华大学出版社, 1994.
- [6] 柴军瑞. 岩土体水力学非线性问题[J]. 岩土力学, 2003, (24): 159—162.
CHAI Jun-rui. Nonlinear problems in rock and soil mass hydraulics[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(1): 159—162.
- [7] 白玉华, 张钟声, 贺大印. 岩土工程地下水[M]. 南京: 河海大学出版社, 1997.
- [8] 薛禹群. 地下水动力学[M]. 北京:地质出版社, 1997.

新书介绍

《复合地基设计和施工指南》复合地基技术是一门正在发展的技术, 已在我国土木工程建设中得到广泛的应用, 产生了良好的社会效益和经济效益。为了总结、推广复合地基技术, 促进其在工程中的应用, 由浙江大学龚晓南教授组织专家编写。全书共分十五章, 包括: 总论、复合地基承载力和沉降计算概论、复合地基设计若干问题、水泥搅拌桩复合地基、夯实水泥土桩复合地基、振冲碎石桩复合地基、振动挤密砂石桩复合地基、夯扩挤密桩复合地基、强夯置换碎石墩复合地基、灰土桩复合地基、低强度桩复合地基、以沉降量为控制指标的复合桩基设计、长短桩复合地基、加筋土地基、复合地基技术发展展望。本书可供土建、交通、市政和水利等部门的设计、施工技术人员使用, 也可供上述领域的科研、教学和管理人员参考。