

DOI: 10.11779/CJGE20230324

# 考慮刀盤推力的泥水盾構隧道開挖面平衡機理研究及應用

段麗敏<sup>1</sup>, 王 建<sup>\*1</sup>, 侯麗平<sup>2</sup>, 魯 洋<sup>1</sup>, 閔凡路<sup>3</sup>, 毛子銘<sup>1</sup>

(1. 河海大學水利水电學院, 江蘇 南京 210024; 2. 河南省西霞院水利樞紐輸水及灌區工程建設管理局, 河南 鄭州 450000;  
3. 河海大學土木與交通學院, 江蘇 南京 210024)

**摘要:** 現有泥水盾構隧道開挖面平衡機理中, 開挖面的支護多認為全部由泥漿壓力提供, 刀盤推力在支護中的作用少有提及。針對穿沁泥水盾構隧洞工程存在的開挖面支護具體問題, 結合開挖面支護主控參數分析, 揭示了考慮刀盤推力的泥水盾構隧道開挖面平衡機理, 給出了刀盤推力具體表達式。運用所揭示的平衡機理, 結合提出的一種盾殼外側摩阻力估計方法, 對該工程的3個重點穿越段進行了開挖面支護力計算和穩定分析。研究表明: 3個重點穿越段的掘進中, 刀盤推力分別占開挖面支護力的21%, 24%, 11%; 同時考慮泥漿壓力和刀盤推力的開挖面支護力, 與僅考慮泥漿壓力相比, 在開挖面前方的軸向水土合力存在區間內占比分別由0, 0和78%分別提高至78%, 32%和88%, 表明刀盤推力在開挖面支護中發揮了重要作用。

**關鍵詞:** 泥水盾構; 開挖面; 支護; 穩穩; 刀盤推力; 總推力; 泥漿壓力

**中圖分類號:** TU43; U455.43    **文獻標識碼:** A    **文章編號:** 1000-4548(2024)07-1556-07

**作者簡介:** 段麗敏(1994—), 女, 博士研究生, 从事水工结构数模及盾构隧道工程研究。E-mail:duanlm1994@outlook.com。

## Research and application of balance mechanism of excavation surface of slurry shield tunnels considering cutterhead thrust

DUAN Limin<sup>1</sup>, WANG Jian<sup>1</sup>, HOU Liping<sup>2</sup>, LU Yang<sup>1</sup>, MIN Fanlu<sup>3</sup>, MAO Ziming<sup>1</sup>

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China; 2. Water Conservancy and Irrigation District Engineering Construction Administration of Xixiayuan Water Conservancy Project, Zhengzhou 450000, China;  
3. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China)

**Abstract:** In the existing balance mechanism of the excavation surface of slurry shield tunnels, the support of the excavation surface is mostly considered to be provided by mud pressure, and the role of cutterhead thrust in the support is rarely mentioned. In response to the specific problem of excavation surface support in the Chuanqin slurry shield tunnel project, based on the analysis of the main control parameters of excavation surface support, the balance mechanism of the excavation surface of the slurry shield tunnel considering the cutterhead thrust is revealed, and a specific expression for the cutterhead thrust is proposed. Using the revealed equilibrium mechanism and the proposed method for estimating the external frictional resistance of the shield shell, the calculation of excavation support force and the stability analysis are conducted for the three key crossing sections of the project. The research shows that in the excavation of the three key crossing sections, the cutterhead thrust accounts for 21%, 24% and 11% of the excavation face support force, respectively. Considering both the mud pressure and the cutterhead thrust, the proportion of the combined axial water and soil forces in the presence range in front of the excavation face increases from 0, 0 and 78% to 78%, 32% and 88%, respectively, compared to only considering the mud pressure. It is indicated that the cutterhead thrust plays an important role in the excavation face support.

**Key words:** slurry shield; excavation surface; support; stability; cutterhead thrust; total thrust; mud pressure

## 0 引言

開挖面平衡機理是研究泥水盾構隧道開挖面穩定問題的理論基礎。現有開挖面平衡機理中, 開挖面的支護由泥漿壓力提供<sup>[1-6]</sup>, 具體為

$$p_m = p_w + p_{as} \quad (1)$$

式中:  $p_m$  为泥漿壓力, 簡稱泥漿壓;  $p_w$  为軸向靜水

基金項目: 國家自然科學基金項目(52279099, 52078189)

收稿日期: 2023-04-14

\*通信作者(E-mail: wang\_jian@hhu.edu.cn)

压力, 简称轴向水压;  $p_{as}$  为轴向土体有效应力, 简称轴向有效土压。为方便叙述, 本文将轴向水压与轴向有效土压之和简称为轴向地应力( $p_w + p_{as}$ )。

也有研究<sup>[2, 7]</sup>提到泥水盾构隧道施工时泥浆压  $p_m$  可按轴向水压  $p_w$  再加 20 kPa 的经验设定, 即

$$p_m = p_w + 20 \quad (2)$$

然而, 按式(2)设定的泥浆压  $p_m$  一般不满足式(1), 反映了现有平衡机理与实践存在一定程度的矛盾。

在泥水盾构工程中, 与开挖面相接的除泥浆外, 还有刀盘。袁大军等<sup>[3, 8]</sup>指出, 刀盘推力是维护开挖面稳定的重要因素之一, 但所起作用少有提及, 仅作安全储备。可见, 明确刀盘推力对开挖面支护的作用, 对完善泥水盾构隧道开挖面平衡机理具有重要意义。

本文首先通过实例分析, 推断除泥浆压外, 泥水盾构隧道开挖面支护力包含其它组成要素; 结合支护主控参数分析, 揭示考虑刀盘推力的开挖面平衡机理; 最后将机理应用于实例工程支护力计算与分析。

## 1 实例分析及问题的提出

2022 年 4 月, 穿沁隧洞泥水盾构工程顺利完工, 历时 14 个月。进行开挖面分析时发现, 仅以泥浆压为支护力, 部分掘进段中无法平衡前方轴向地应力。

### 1.1 实例背景

穿沁隧洞是西霞院水利枢纽输水及灌区工程重要节点工程, 位于焦作市武陟县。隧道盾构掘进段长 2646 m, 采用刀盘开口率为 40% 的  $\Phi 6.88$  m 泥水平衡盾构机施工, 设计外径 6.6 m, C50 预制混凝土管片环宽 1.5 m, 厚 35 cm。隧洞所处地貌单元为黄河 I 级阶地, 所穿越的沁河常年有水, 为地上悬河, 两岸筑有防洪堤<sup>[9]</sup>。穿沁隧洞穿越的地层类型见表 1。

表 1 隧洞穿越地层类型及相关物理力学参数

Table 1 Stratum types and related physical and mechanical parameters crossed by tunnel

编号	名称	干密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	黏聚 力/ kPa	内摩 擦角/ ( $^{\circ}$ )	轴向压 力系数 $K'_0$
1	重粉质壤土	1540	27	21	0.33
2	粉砂	1510	0	22	0.25
3	细砂	1550	0	24	0.28
4	粉质黏土	1510	30	11	0.43
5	重粉质壤土	1560	25	18	0.33
6	轻粉质壤土	1470	16	21	0.30
7	重粉质壤土	1520	20	20	0.33
8	粉质黏土	1530	27	18	0.43
9/10	重粉质壤土	1650	21	19	0.33
11/12	中细砂	1700	0	27	0.28
13	人工填土	1540	27	21	0.33
14	防渗心墙	2400	—	—	—

根据地表建筑物重要性, 选取实例工程穿越的 3 个重点段, 即隧洞穿越右岸大堤段 (r446—532, 共 87 环)、沁河河槽段 (r799—931, 共 133 环) 和左岸大堤段 (r1391—1600, 共 210 环), 作为分析对象。3 段隧洞的埋深随环号逐渐增大, 隧洞下降坡度均为 1:500, 均穿越编号为 11/12 的中细砂层。以隧洞穿越右岸大堤段为例, 地层结构如图 1 所示。

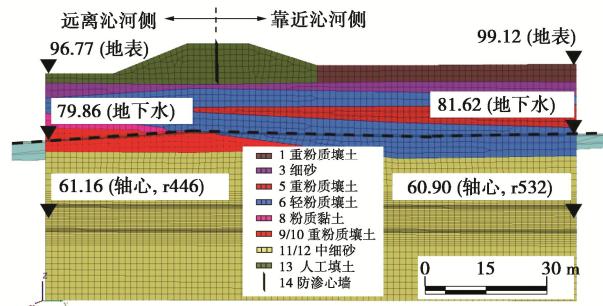


图 1 隧洞穿越右岸大堤段地层结构图

Fig. 1 Stratigraphic structure of tunnel crossing right bank embankment section

### 1.2 开挖面支护分析与存在问题

本文通过将泥浆压  $p_m$  与开挖面前方轴向地应力 ( $p_w + p_{as}$ ) 对比, 进行开挖面支护实例分析。

实例工程的泥浆压  $p_m$  数据来源为开挖舱轴部位置处的测压装置逐分钟实测资料。轴向地应力较难实测, 一般通过估计确定<sup>[1]</sup>。本文的估算方式为, 结合有限元数值计算软件, 采用地层结构及对应干密度、地下水位和轴向压力系数  $K'_0$  进行估计。其中, 地层物理力学参数见表 1, 结构、类型见图 1; 地下水位来自地质勘察期钻孔水位观测资料, 如图 1 中虚线所示; 轴向压力系数  $K'_0$  根据工程资料和经验选取, 该值与侧压力系数  $K_0$  类似, 但其方向为隧道轴线方向。

由于地层分布及土体参数的随机性, 轴向压力系数  $K'_0$  的估算可能偏差。为降低影响, 取  $K'_0$  为 0.25 和 0.5 作为上、下限计算极限轴向地应力, 形成开挖面前方轴向水土合力存在区间, 可称轴向地应力区间。若支护压落在区间内, 认为开挖面得到了有效支护。

通过剔除掘进速度  $v$  为 0 的情况, 选取泥浆压  $p_m$  环均值, 结合轴向地应力( $p_w + p_{as}$ )及其区间、轴处水压  $p_w$ , 绘制重点穿越段泥浆压与轴向地应力曲线见图 2, 同时统计泥浆压与轴向地应力及其区间之比见表 2。由图 2 及表 2 知: ①穿越右岸大堤段时, 泥浆压与轴向地应力的变化一致性较小, 两者之比为 0.83, 区间限内占比为 0, 不足以平衡轴向地应力; ②穿越沁河河槽段时, 泥浆压与轴向地应力的变化几乎没有一致性, 两者之比为 0.76, 区间限内占比为 0, 不足以平衡轴向地应力; ③穿越左岸大堤段时, 泥浆压与轴

向地应力的变化一致性较大,两者之比为1.04,区间限内占比为78%,基本可平衡轴向地应力。

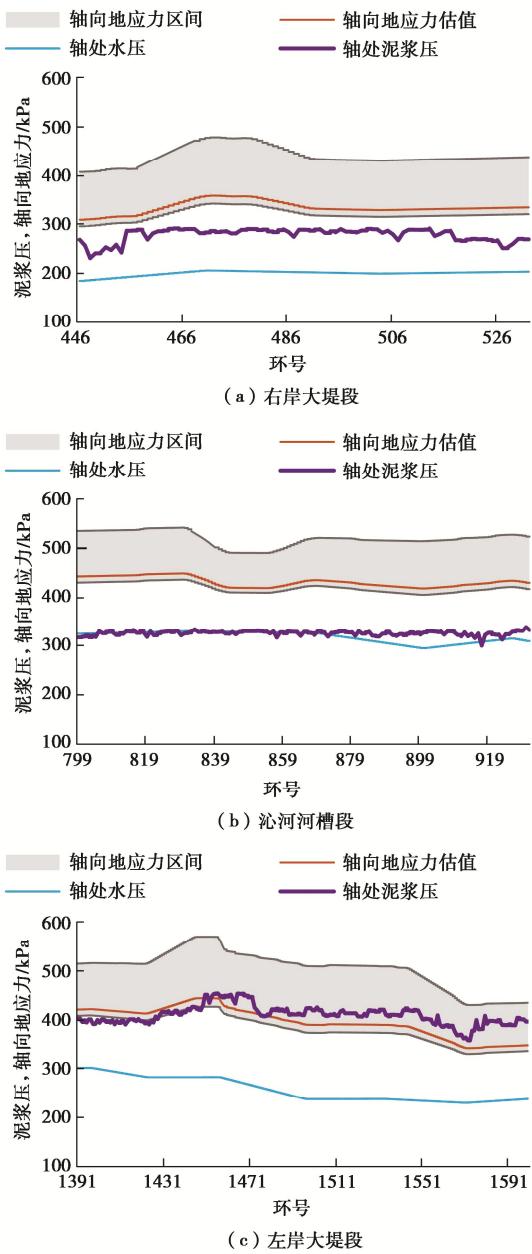


图2 隧洞穿越重点段泥浆压与轴向地应力曲线

Fig. 2 Curves of mud pressure and axial geostress in key crossing sections of tunnel

表2 隧洞穿越重点段泥浆压与轴向地应力及其区间之比  
Table 2 Ratios of mud pressure to axial geostress and intervals in key crossing sections of tunnel

编号	地段	$\frac{p_m}{p_w + p_{as}}$	$\frac{p_m}{(p_w + p_{as})_{\text{区间}}}$
1	右岸大堤段	0.83	0
2	沁河河槽段	0.76	0
3	左岸大堤段	1.04	0.78

可见,穿越右岸大堤段以及河槽段仅以泥浆压无法平衡轴向地应力,而地表未发现明显沉陷<sup>[9]</sup>。由此推断,除泥浆压外开挖面支护力包含其他组成要素。

## 2 开挖面支护主控参数

为获得开挖面支护力其他组成要素,通过泥水盾构工作模式分析推得开挖面支护主控参数,并明确其在开挖面支护中所起具体作用。

### 2.1 泥水盾构模式分析

根据实例资料和研究需要,将泥水盾构工作模式划分为两种模式:①掘进模式,即盾构机处于向前掘进状态;当主驱动和推进系统开始运转时进入该模式,刀盘扭矩和总推力 $F_T$ 在1~2 min由0快速升至指定值并保持相对稳定,盾构机开始向前掘进。②待机模式,即盾构机处于原地静止状态;当主驱动和推进系统停止运转时进入该模式,刀盘扭矩和总推力 $F_T$ 在1~2 min由指定值快速降为0,盾构机开始停止掘进。

根据上述模式分析知,刀盘扭矩和总推力 $F_T$ 均为盾构掘进服务。其中,刀盘扭矩由主驱动产生,使刀盘产生切削力,该力位于开挖面上,不属于开挖面支护主控参数;总推力 $F_T$ 由推进系统产生,方向与盾构机掘进方向一致,且掘进时盾构机通过刀盘与开挖面相接,属于开挖面支护主控参数。

另外,在整个泥水盾构隧道施工过程中,开挖舱泥浆压 $p_m$ 通常稳定在指定值且始终与开挖面相接,因此泥浆压 $p_m$ 也属于开挖面支护主控参数。

综上,本文推得总推力 $F_T$ 和泥浆压 $p_m$ 为泥水盾构隧道施工中开挖面支护主控参数。

### 2.2 开挖面支护主控参数分析

#### (1) 总推力及其组成

盾构机总推力 $F_T$ 是表征盾构机工作能力的主要指标,由推进系统提供,后端作用于衬砌管片的厚度所在面上。总推力 $F_T$ 用于克服盾构掘进过程中的正面阻力 $F_1$ (或称 $F_{fr}$ )、刀具贯入阻力 $F_2$ 、盾壳外侧摩阻力 $F_3$ (或称 $F_{fs}$ )、盾尾刷摩阻力 $F_4$ 、调向阻力 $F_5$ 以及后配套设备牵引阻力 $F_6$ <sup>[10]</sup>。

本文将掘进过程中与开挖面阻力相关的 $F_1$ 和 $F_2$ 统称为机前阻力 $F_{fr}$ ;与摩阻力相关的 $F_3$ 、 $F_4$ 、 $F_5$ 和 $F_6$ 统称为摩阻力 $F_f$ 。其中,盾尾刷摩阻力 $F_4$ 、调向阻力 $F_5$ 及后配套设备牵引阻力 $F_6$ 在总推力 $F_T$ 中占比较小,刀具贯入阻力 $F_2$ 较难估计,暂不考虑,有

$$F_T = F_{fr} + F_f \approx F_{fr} + F_{fs} \quad (3)$$

#### (2) 泥浆压与泥膜的形成

泥浆压 $p_m$ 在泥水盾构机开挖舱内形成,由进、排浆量和压缩空气(若有)综合控制。当泥浆压 $p_m$ 大于地下水压 $p_w$ ,且压差稳定,泥浆将按达西定律渗入前方土体形成悬浮颗粒并积聚于土壤与泥浆的接触面形成泥膜<sup>[2]</sup>。

### 3 考虑刀盘推力的开挖面平衡机理

引入第2节分析得到的支护主控参数总推力 $F_T$ 和泥浆压 $p_m$ , 在基本假定下, 对开挖面相接状态及开挖面和盾构机轴向平衡进行分析, 推得开挖面平衡系列式, 揭示考虑刀盘推力的开挖面平衡机理, 可解决现有平衡机理与实践存在一定程度矛盾的问题。

#### 3.1 基本假定

作以下3点基本假定: ①泥水盾构工程处于地下水位以下; ②开挖面定义为泥膜表面, 且开挖面处于流体饱和连通状态; ③盾构机刀盘与开挖面保持相接状态。

#### 3.2 开挖面相接状态分析

假设泥水盾构隧道开挖面一侧为泥水盾构系统, 另一侧为地层系统。泥水盾构系统主要由刀盘、盾壳、开挖舱及其内的膨润土泥浆、推进系统等组成; 地层系统由地层水土和泥膜等组成(假定①)。通过将提供总推力 $F_T$ 的推力系统简化为单根液压千斤顶, 将提供泥浆压 $p_m$ 的泥浆进、排浆管简化为具有压力水头的单管, 结合地层系统绘制泥水盾构工作示意图见图3。

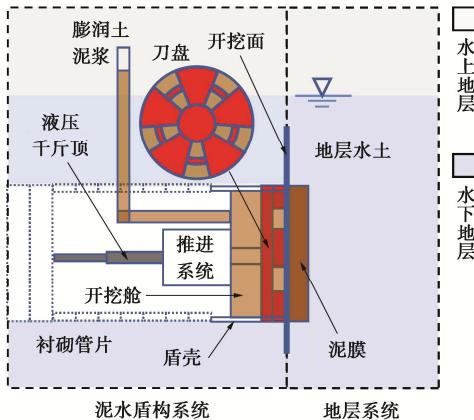


图3 泥水盾构工作示意图

Fig. 3 Schematic diagram of operation of slurry shield

根据图3, 对相接状态涉及的力系分析如下: ①泥浆推力, 由泥浆穿过刀盘作用于开挖面左侧形成呈梯形分布的泥浆压 $p_m$ 在开挖面上积分得到(假定②), 记为 $F_m$ 。②轴向地层力, 经泥膜传递的轴向地应力 $(p_w + p_{as})$ 产生, 记为 $(F_w + F_{as})$ 。③刀盘推力, 由于刀盘作为与盾构机组成的刚性结构与开挖面相接, 因此刀盘推力由部分总推力 $F_T$ 通过刀盘作用于开挖面左侧产生, 记为 $F_c$ 。

#### 3.3 开挖面和盾构机轴向平衡分析

根据3.2节分析知, 开挖面左侧受由泥浆推力 $F_m$ 和刀盘推力 $F_c$ 作用; 右侧受轴向地层力 $(F_m + F_{as})$ 作用。据此绘制开挖面轴向受力示意图见图4(a)。将泥浆推力 $F_m$ 和刀盘推力 $F_c$ 之和称为开挖面支护力

$F_s$ , 有

$$F_s = F_m + F_c \quad \text{。} \quad (4)$$

值得注意的是, 式(4)中泥浆推力 $F_m$ 具有可渗性, 需与一般力(如 $F_T$ )区别。对开挖面进行平衡分析有

$$F_m + F_c = F_w + F_{as} \quad \text{。} \quad (5)$$

式(5)即为本文揭示的考虑刀盘推力的开挖面平衡机理的核心式。将式(5)与式(1)进行对比, 可发现现有开挖面平衡机理(式(1))中缺少刀盘推力组成要素。当考虑该要素后, 式(5)与式(2)则不再存在矛盾, 可解决现有平衡机理与实践存在一定程度矛盾的问题。进一步对式(5)中各分量分析如下。

(1) 轴向地层力 $(F_w + F_{as})$ 取决于地层固有属性, 由轴向地应力 $(p_w + p_{as})$ 在开挖面上的积分进行估计。

(2) 泥浆推力 $F_m$ , 在开挖面积分得

$$F_m = \int p_m dS \quad \text{。} \quad (6)$$

式中:  $S$ 为开挖面面积;  $p_m$ 为泥浆压。

(3) 刀盘推力 $F_c$ , 作为总推力 $F_T$ 的一部分随之确定, 现推导具体表达式如下。

根据3.2节分析知, 盾构机左侧受总推力 $F_T$ 作用, 右侧受轴向地层力 $(F_w + F_{as})$ 作用; 根据式(3), 外侧受盾壳外侧摩阻力 $F_{fs}$ 作用。据此绘制泥水盾构机轴向受力示意图(图4(b))并进行平衡分析有

$$F_T = F_w + F_{as} + F_{fs} \quad \text{。} \quad (7)$$

根据物体间力作用的相互性, 将式(5)中的轴向地层力 $(F_w + F_{as})$ 代入式(7)有

$$F_T = F'_m + F_c + F_{fs} \quad \text{。} \quad (8)$$

值得注意的是, 式(8)中 $F'_m$ 在数值上与 $F_m$ 相等, 但作用于盾构机, 不具可渗性, 可视作一般力(如 $F_T$ )。

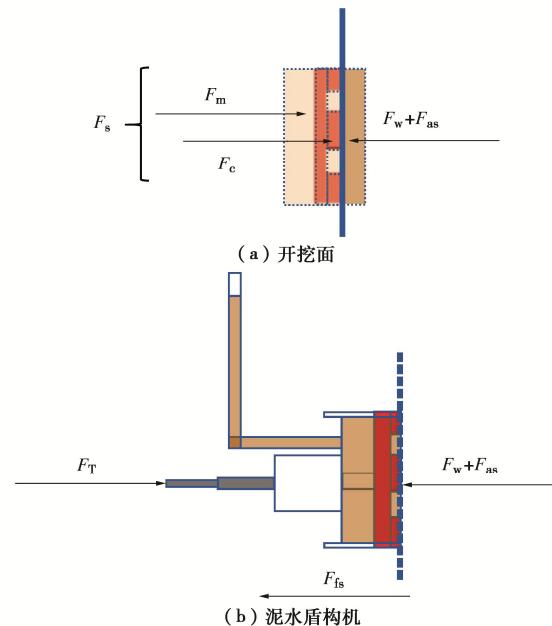


图4 开挖面与泥水盾构机轴向受力示意图

Fig. 4 Schematic diagram of axial force on excavation surface and slurry shield machine

进一步将式(8)改写为

$$F_c = F_T - F'_m - F_{fs} \quad (9)$$

式(9)即本文推导得到的刀盘推力  $F_c$  的具体表达式。该式说明刀盘推力  $F_c$  可通过将总推力  $F_T$  扣除泥浆推力  $F'_m$  和盾壳外侧摩阻力  $F_{fs}$  得到。

将泥浆推力  $F_m$  (式(6)) 和刀盘推力  $F_c$  (式(9)) 代入式(4)有

$$\begin{aligned} F_s &= \int p_m dS + (F_T - \int p'_m dS - F_{fs}) \\ &= F_T - F_{fs} + \int (p_m - p'_m) dS \quad (10) \end{aligned}$$

式(10)则为开挖面支护力  $F_s$  的具体表达式。

## 4 实例工程支护力计算及稳定分析

现将本文揭示的开挖面平衡机理应用于实例工程重点段的开挖面支护力计算及分析中。

计算开挖面支护力  $F_s$  需具有泥浆推力  $F_m$  与刀盘推力  $F_c$  (式(4))。由于实例工程未直接获取刀盘推力  $F_c$ ，也无用以计算  $F_c$  的盾壳外侧摩阻力  $F_{fs}$  数据(式(9))，因此提出一种盾壳外侧摩阻力  $F_{fs}$  的估计方法，并据之进行开挖面支护力计算及稳定分析。

### 4.1 一种盾壳外侧摩阻力估计方法

为估计盾壳外侧摩阻力  $F_{fs}$  数值，首先尝试通过盾壳外侧地层摩阻力的推理计算式(穿越一层土质)<sup>[1]</sup> 进行估算，经适当形式改写有

$$\begin{aligned} F_{fs} &= \pi c RL + \frac{1}{2} \pi RL \tan \varphi \sigma_{zzetop} (1 + K'_0) + \\ &W \tan \varphi + \frac{1}{2} K'_0 R^2 L \rho' g \tan \varphi \quad (11) \end{aligned}$$

式中： $c$  为穿越土层黏聚力； $R$  为开挖面半径； $L$  为盾构机长度； $\varphi$  为内摩擦角； $\sigma_{zzetop}$  为开挖面顶部竖向有效土压； $K'_0$  为轴向压力系数； $W$  为盾构机重量； $\rho'$  为穿越土层的有效密度。

需验证式(11)的适用性。以第 446 环掘进时盾壳外侧摩阻力计算为例， $c=0$ ， $R=3.44$  m， $L=9$  m， $\varphi=27^\circ$ ， $\sigma_{zzetop}=410.3$  kPa， $K'_0=0.28$ ， $W=3000$  kN， $\rho'=1700$  kg/m<sup>3</sup>， $g=9.81$  m/s<sup>2</sup>。代入式(11)得  $F_{fs}=14669$  kN，但将该值同 446 环总推力  $F_T=17282$  kN、泥浆推力  $F_m=9976$  kN 代入式(9)得刀盘推力  $F_c=-7363$  kN。由于处于掘进模式的刀盘推力  $F_c$  不可能小于 0，式(11)不适用于实例工程。于是本文考虑直接依据摩擦力定义式提出一种盾壳外侧摩阻力  $F_{fs}$  的估计方法。

首先，根据摩擦力定义有

$$F_{fs} = \mu F_r \quad (12)$$

式中： $\mu$  为摩擦系数； $F_r$  为垂直于盾构机壳外力总和。

其次，计算盾构机外壳径向力总和(简称径向力总和)  $F_r$ 。组成径向力总和  $F_r$  的力包括径向有效土压

总和  $F_{rs}$ 、水压总和  $F_{rw}$  和盾构机重  $F_{rw}$ ，有

$$F_r = F_{rs} + F_{rw} + F_{rw} \quad (13)$$

式(13)的径向有效土压总和  $F_{rs}$  可参考图 5 所示的计算简图，由开挖面顶部竖向有效土压  $\sigma_{zzetop}$  结合轴向压力系数  $K'_0$ ，及隧道半径  $R$  估计，有

$$\begin{aligned} F_{rs} &= 4L \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sigma_{rs} R d\theta + 2LK'_0 \int_0^{\frac{\pi}{2}} (\Delta \sigma_{rs})_{\sigma_{hh}} R d\alpha \\ &= 4L \int_0^{\frac{\pi}{2}} \{[\sigma_{zzetop} + \rho' g R (1 - \sin \theta)] \cdot (\sin \theta + K'_0 \cos \theta)\} \cdot \\ &\quad R d\alpha + 2LK'_0 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \rho' g R \sin \theta \cos \theta R d\alpha \quad (14) \end{aligned}$$

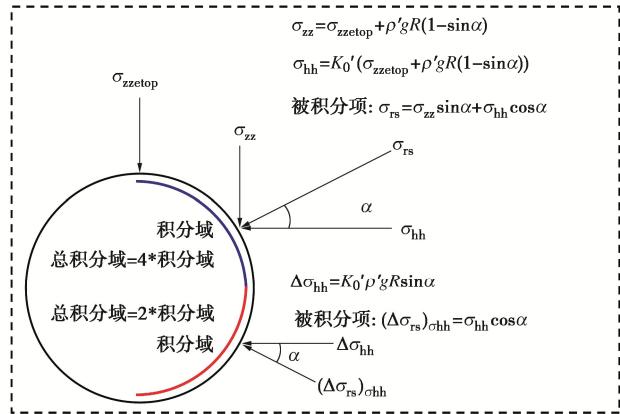


图 5 径向有效土压总和计算简图

Fig. 5 Simplified diagram for calculating total radial effective earth pressure

式(13)的径向水压总和  $F_{rw}$  由轴处水压  $p_w$  乘盾构外侧面面积有

$$F_{rw} = 2\pi RL p_w \quad (15)$$

式(13)的径向盾构机重  $F_{rw}$  由盾构机重  $G_w$  构成：

$$F_{rw} = G_w \quad (16)$$

最后，确定式(12)中的摩擦系数  $\mu$ 。由于处于掘进模式的刀盘推力  $F_c$  不可能小于 0，本文考虑确定  $\mu$  的方式为，指定一个令所有掘进环的刀盘推力  $F_c$  不存在小于 0 情况的  $\mu$  值。由于考虑了包括水压力等在内所有垂直盾构机外表面的力，该  $\mu$  值通常较小。

### 4.2 开挖面支护力计算及稳定分析

根据实例资料知，当  $\mu=0.017$  时，1379 环刀盘推力  $F_c$  为 71 kN，为实例工程所有穿越同一地层掘进环中最小正值，因此可取摩擦系数  $\mu=0.017$ ，结合式(12)~(16)，可算出每环盾壳外摩阻力  $F_{fs}$ 。根据得到的盾壳外摩阻力  $F_{fs}$ 、由式(6)得到的泥浆推力  $F_m$  数据及已知的总推力  $F_T$  数据，结合式(9)可计算刀盘推力  $F_c$ 。

根据计算得到的刀盘推力  $F_c$  和泥浆推力  $F_m$  数据，结合式(4)可计算开挖面支护力  $F_s$ ，由此绘制了隧道穿越重点段支护力与轴向地层力曲线见图 6。同时，统计了重点穿越段刀盘推力在开挖面支护力中

的平均占比(表3)、支护力均值及其在轴向地层力区间占比(表4)和隧洞轴线处地表沉降均值与测点数(表5)。

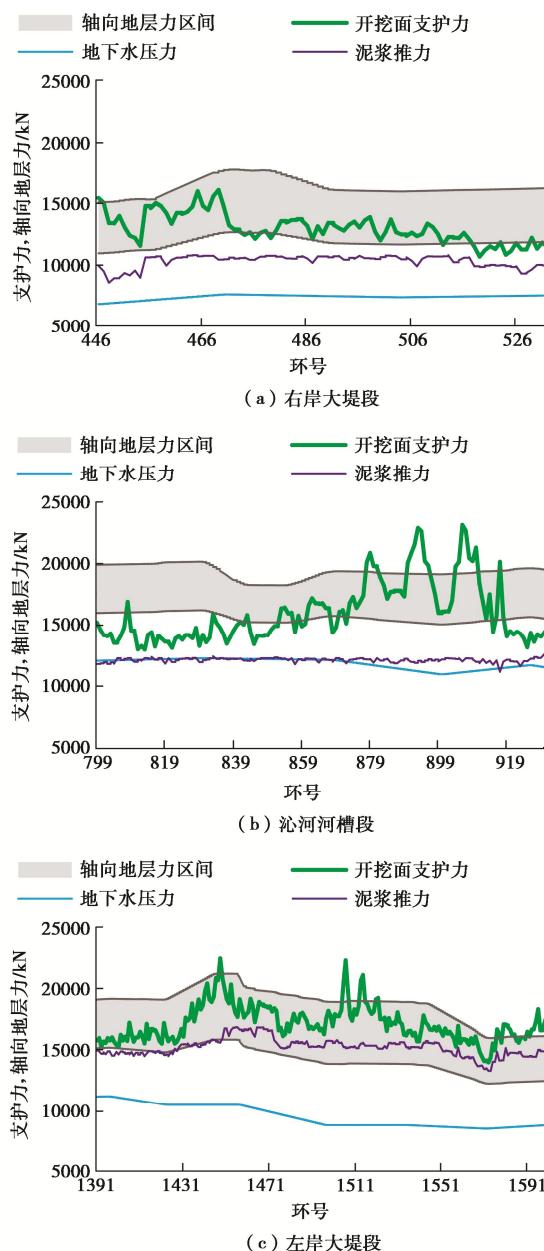


图6 隧洞穿越重点段支护力与轴向地层力曲线

Fig. 6 Curves of mud pressure and axial geostress for key crossing sections of tunnel

由图6及表3~5知: ①隧洞穿越右岸大堤段时, 刀盘推力在开挖面支护力中的占比为21%, 开挖面支护力与轴向地层力有一定程度的变化一致性; 支护力均值在轴向地层力区间以内占比最大(78%), 表明开挖面支护力可与轴向地层力保持一定程度平衡, 地表平均沉降为2.58 mm, 沉降较小。②隧洞穿越沁河河槽段时, 刀盘推力在开挖面支护力中的占比为24%, 开挖面支护力与轴向地层力的变化规律一致性较小, 穿越河槽后支护力受总推力影响, 有较大幅度的波动;

支护力均值在轴向地层力区间以下占比最大(54%), 表明开挖面支护力总体偏低, 地表平均沉降为2.70 mm, 沉降略大。③隧洞穿越左岸大堤段时, 刀盘推力在开挖面支护力中的占比为11%, 开挖面支护力与轴向地层力的变化规律一致性较大; 支护力均值在轴向地层力区间以内占比最大(88%), 表明开挖面支护力可与轴向地层力保持一定程度平衡, 地表平均沉降为1.31 mm, 沉降较小。

表3 隧洞穿越重点段刀盘推力在开挖面支护力中的平均占比

Table 3 Average proportions of cutterhead thrust in excavation

face support force in key crossing sections of tunnel

单位: %

右岸大堤段	沁河河槽段	左岸大堤段
21	24	11

表4 隧洞穿越重点段支护力均值及在轴向地层力区间的占比

Table 4 Mean values of support force and their proportions in axial

formation force range in key crossing sections of tunnel

编号	名称	支护力/kN	限内占比/%	限上占比/%	限下占比/%
1	右岸大堤段	13034	78	1	21
2	沁河河槽段	15980	32	14	54
3	左岸大堤段	17142	88	12	0

表5 隧洞穿越重点段地表沉降均值与测点数

Table 5 Mean surface settlements and measuring points at tunnel

axis in key crossing sections of tunnel

项目	沉降/mm	测点数
右岸大堤段	2.58	6
沁河河槽段	2.70	13
左岸大堤段	1.31	18

同时考虑泥浆压力和刀盘推力的开挖面支护力, 与仅考虑泥浆压力相比(1.2节), 在开挖面前方的轴向地层力区间内占比分别由0, 0, 78%分别提高至78%, 32%, 88%, 表明刀盘推力在开挖面支护中发挥了重要作用。

## 5 结 论

本文依据实例工程中存在的开挖面支护问题, 结合开挖面支护主控参数分析, 揭示了考虑刀盘推力的泥水盾构隧道开挖面平衡机理, 得到以下4点结论。

(1)发现实例工程重点穿越段存在仅以泥浆压力作为开挖面支护压力而无法平衡轴向地应力的问题, 推断除泥浆压力, 开挖面支护力仍包含其他组成要素。

(2)推得开挖面支护主控参数为总推力和泥浆推力, 通过对支护主控参数分析, 明确了其在开挖面支护中所起具体作用。

(3)引入支护主控参数, 基于开挖面相接状态分析和轴向平衡分析, 推理得到了考虑刀盘推力的开挖

面平衡系列式。该机理可解决现有平衡机理与实践存在一定程度矛盾的问题。

(4) 运用平衡机理, 结合提出的一种盾壳外侧摩阻力估计方法, 进行了实例工程开挖面支护力计算及稳定分析。结果表明, 3 个重点穿越段的掘进中, 刀盘推力分别占开挖面支护力的 21%, 24%, 11%; 同时考虑泥浆压力和刀盘推力的开挖面支护力, 与仅考虑泥浆压力相比, 在开挖面前方的轴向地层力区间内占比分别由 0, 0, 78% 分别提高至 76%, 32%, 88%, 表明刀盘推力在开挖面支护中发挥了重要作用。

## 6 局限性及展望

(1) 由于本文用以验证所揭示平衡机理的实例工程基于的地层条件是几无塑性的砂土地层, 该机理是否适用所有地层类型或需改进, 仍待未来验证。

(2) 本文所依托实例工程未直接获取刀盘推力, 也无用以计算刀盘推力的盾壳外侧摩阻力数据。据笔者了解, 大多数泥水盾构工程均为此状态。为此, 本文提出了一种盾壳外侧摩阻力估计方法。实际上, 若能够发展出直接、便捷地测出刀盘推力的方法, 则所揭示机理的正确性与否将更为直观。

(3) 本文所依托实例工程的开挖面前方的轴向地应力根据各土层的物理力学参数及地层深度估算而得, 且总推力组成中暂未考虑盾尾刷摩阻力等力, 若能直接、准确得测出这些数据, 则也可在更精细尺度上验证所揭示机理的正确性。

## 参考文献:

- [1] 张凤祥. 盾构隧道[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004. (ZHANG Fengxiang. Shield Tunnelling Method[M]. Beijing: China Communications Press, 2004. (in Chinese))
- [2] 韦良文, 张庆贺, 邓忠义. 大型泥水盾构隧道开挖面稳定机理与应用研究[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(1): 87-91. (WEI Liangwen, ZHANG Qinghe, DENG Zhongyi. Research on mechanism and application of face stability in large slurry shield tunneling[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(1): 87-91. (in Chinese))
- [3] 袁大军, 尹凡, 王华伟, 等. 超大直径泥水盾构掘进对土体的扰动研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(10): 2074-2080. (YUAN Dajun, YIN Fan, WANG Huawei, et al. Study of soil disturbance caused by super-large diameter slurry shield tunnelling[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(10): 2074-2080. (in Chinese))
- [4] 邓宗伟, 伍振志, 曹浩, 等. 基于流固耦合的泥水盾构隧道施工引发地表变形[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(2): 785-791. (DENG Zongwei, WU Zhenzhi, CAO Hao, et al. Surface deformation of slurry shield tunneling using fluid-solid coupling theory[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(2): 785-791. (in Chinese))
- [5] 闵凡路, 朱伟, 魏代伟, 等. 泥水盾构泥膜形成时开挖面地层孔压变化规律研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(4): 722-727. (MIN Fanlu, ZHU Wei, WEI Daiwei, et al. Change of pore water pressure in soil as filter cakes formed on excavation face in slurry shield[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(4): 722-727. (in Chinese))
- [6] 刘新荣, 刘东双, 陈强, 等. 泥水盾构开挖面稳定影响因素及参数优化研究[J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18(6): 1954-1961. (LIU Xinrong, LIU Dongshuang, CHEN Qiang, et al. Research on the sensitivity of factors affecting the stability of slurry shield excavation face and control parameter optimization[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2022, 18(6): 1954-1961. (in Chinese))
- [7] 刘学彦, 王复明, 袁大军, 等. 泥水盾构支护压力设定范围及其影响因素分析[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(5): 908-917. (LIU Xueyan, WANG Fuming, YUAN Dajun, et al. Range of support pressures for slurry shield and analysis of its influence factors[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(5): 908-917. (in Chinese))
- [8] 袁大军, 沈翔, 刘学彦, 等. 泥水盾构开挖面稳定性研究[J]. 中国公路学报, 2017, 30(8): 24-37. (YUAN Dajun, SHEN Xiang, LIU Xueyan, et al. Research on excavation face stability of slurry shield tunneling[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(8): 24-37. (in Chinese))
- [9] 牛永前, 杨立林, 申鲁. 基于 Peck 公式的富水砂质地层盾构隧洞施工沉降分析[J]. 人民黄河, 2023, 45(4): 130-135, 142. (NIU Yongqian, YANG Lilin, SHEN Lu. Sedimentation analysis of shield tunnel construction on water-rich sandy stratum based on peck formula[J]. Yellow River, 2023, 45(4): 130-135, 142. (in Chinese))
- [10] 孙飞祥, 孙振川, 张兵, 等.  $\phi 15.80$  m 泥水平衡盾构主要推进阻力特征分析[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(增刊 1): 235 - 240, 246. (SUN Feixiang, SUN Zhenchuan, ZHANG Bing, et al. Characteristics analysis of main resistance force for  $\phi 15.80$  m slurry balance shield[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(S1): 235 - 240, 246. (in Chinese))