

DOI: 10.11779/CJGE2021S2056

# 土压平衡盾构推力简化估算方法与实测分析

杨松松<sup>1,2</sup>, 朱湘旭<sup>3</sup>, 章定文<sup>1,2</sup>, 李顺<sup>3</sup>, 禹鹏飞<sup>3</sup>

(1. 东南大学交通学院, 江苏 南京 211189; 2. 道路交通工程国家级实验教学示范中心(东南大学), 江苏 南京 211189;

3. 中建八局轨道交通建设有限公司, 江苏 南京 210046)

**摘要:** 盾构隧道掘进过程中推力是盾构施工安全的重要因素。为了能够准确地估算水位线以下盾构掘进过程中所需的推力, 分析水浮力对盾构机的受力影响。推导水浮力影响下的盾构推力计算公式, 基于现场实测数据分析盾构推力与扭矩之间的关系。研究结果表明推导的盾构推力计算公式可以与现场盾构推力吻合良好, 推导的推力计算公式可以用于水位线以下盾构的推力计算; 扭矩与盾构推力具有良好的线性关系, 因此可以通过推力计算盾构扭矩。

**关键词:** 盾构; 推力; 浮力; 扭矩

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2021)S2-0237-04

作者简介: 杨松松(1994—), 男, 博士研究生, 主要从地下工程施工与地基处理方面研究。E-mail: 18435167584@163.com。

## Simplified estimation method and on-site analysis of thrust of EPB shield

YANG Song-song<sup>1,2</sup>, ZHU Xiang-xu<sup>3</sup>, ZHANG Ding-wen<sup>1,2</sup>, LI Shun<sup>3</sup>, YU Peng-fei<sup>3</sup>

(1. School of Transportation, Southeast University Nanjing 211189, China; 2. National Demonstration Center for Experimental Road and

Traffic Engineering Education (Southeast University), Nanjing 211189, China; 3. China Construction Eighth Bureau Rail Transit

Construction Co., Ltd., Nanjing 240046, China)

**Abstract:** Thrust is an important factor in shield construction safety during shield tunneling. In order to accurately estimate the thrust required during shield tunneling below the water level, the influences of water buoyancy on the force of shield tunneling are analyzed. The formula for calculating the shield thrust under the influences of water buoyancy is derived, and the relationship between the shield thrust and the torque is analyzed based on field measured data. The research results show that the deduced formula for the shield thrust can be in good agreement with the on-site shield thrust, and it can be used to calculate the thrust of the shield below the water level. The torque has a good linear relationship with the shield thrust, so the shield torque can be calculated through the thrust.

**Key words:** shield; thrust; buoyancy; torque

## 0 引言

盾构施工参数是影响地铁隧道施工环境安全的重要因素<sup>[1]</sup>, 其中盾构推力是重要安全指标之一。盾构推力过小会导致盾构机难以正常推进, 盾构推力过大则会引起盾构掌子面前方土体发生过大挤压变形, 甚至导致盾构偏离推进轴线<sup>[2]</sup>。

目前盾构推力通常通过经验公式估算, 但是由于地质条件和建筑环境的复杂性, 经验公式很难准确估算实际所需的盾构推力<sup>[3]</sup>。徐前卫等<sup>[4]</sup>分析了盾构土仓压力的分布规律, 研究了掌子面阻力对盾构推力和刀盘扭矩的影响。陈仁朋等<sup>[5]</sup>提出了考虑刀盘挤土效应的盾构推力修正公式。朱合华等<sup>[6]</sup>通过模型试验研究了砂土地层中不同埋深下盾构推力与扭矩之间的关系。Deng等<sup>[7]</sup>基于驱动系统变形模型研究了盾构机姿

态和推力系统配置所产生的影响。王洪新等<sup>[8]</sup>采用多元统计分析方法, 建立了盾构总推力、刀盘扭矩和掘进速度之间的关系。

现有的盾构推力估算中忽略了水浮力对盾构推力的影响, 为此, 本研究依托句容城际轨道盾构隧道工程, 考虑浮力作用下盾构机受力特点, 推导考虑水浮力作用下的盾构推力计算公式; 并分析刀盘扭矩与盾构推力间的关系, 获得了盾构刀盘扭矩的简易算法。

## 1 盾构推力组成与估算

### 1.1 盾构推力的估算

确定盾构推力需考虑的因素众多, 如土层条件、

基金项目: 国家重点研发计划课题(2016YFC0800201)

收稿日期: 2021-08-19

刀盘开口、盾构机与土层之间的摩擦力、盾构机的掘进速度和姿态等，因此，日本隧道标准规范<sup>[9]</sup>根据盾构外径估算盾构推力 $F_c$ ：

$$F_c = 0.25\pi D^2 P \quad (1)$$

式中， $P$  为开挖面单位面积经验推力。人工或半机械化开挖施工时， $P$  取值为 700~1100 kN/m<sup>2</sup>；闭胸式、土压、泥水平衡式盾构施工时， $P$  取值 1000~1300 kN/m<sup>2</sup>。

### 1.2 考虑浮力的盾构推力计算方法

盾构推力  $F$  主要有以下 6 个部分组成<sup>[10]</sup>：

$$F = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5 + F_6 \quad (2)$$

式中， $F_1$  为盾构外壳与周围地层间的摩擦阻力； $F_2$  为盾构机正面阻力； $F_3$  为管片与盾尾间的摩擦力； $F_4$  为盾构机切口环的切入阻力； $F_5$  为变向阻力； $F_6$  为后接台车的牵引阻力。

基于文献[11]顶管顶力推导方法，并考虑地下水浮力对盾壳受力的影响，对盾构机盾壳进行受力分析。盾壳的受力如图 1 所示。

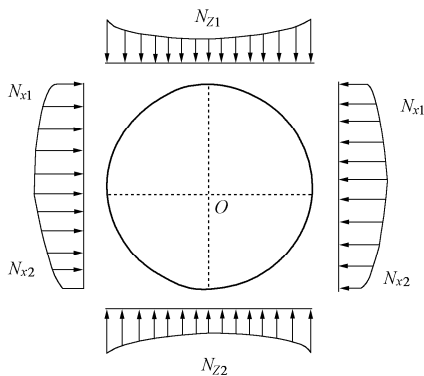


图 1 盾壳受力分析

Fig. 1 Force analysis of shield shell

盾构机受力左右对称，因此在计算时仅对盾壳右侧受力进行计算，在角度为 $\theta$ 的圆周上取微面 $ds$ ，对应 $ds$ 的圆心角为 $d\theta$ ，设作用 $ds$ 上的垂直土压力 $dN_{z1}$ ：

$$N_{z1} = \gamma' \left( H + \frac{D}{2} - \frac{D}{2} \sin \theta \right) \quad \left( 0 \sim \frac{\pi}{2} \right),$$

$$N_{z2} = \gamma' \left( H + \frac{D}{2} - \frac{D}{2} \sin \theta \right) - \rho g D \sin(\theta - \pi) \quad \left( \frac{3\pi}{2} \sim 2\pi \right).$$

积分可得上部垂直土压力和水平土压力产生的正压力：

$$N_{z1} = \frac{\pi}{8} \gamma' D \left( H + \frac{D}{2} \right) - \frac{1}{6} \gamma' D^2,$$

$$N_{x1} = \frac{\pi}{8} \gamma' K D \left( H + \frac{D}{2} \right) - \frac{1}{12} \gamma' D^2.$$

下部垂直土压力和水平土压力产生的正压力为

$$\left. \begin{aligned} N_{z2} &= \frac{\pi}{8} \gamma' D \left( H + \frac{D}{2} \right) - \frac{1}{6} \gamma' D^2 - \frac{1}{3} \gamma' D^2 K \rho, \\ N_{x2} &= \frac{\pi}{8} \gamma' K D \left( H + \frac{D}{2} \right) - \frac{1}{12} \gamma' D^2 - \frac{1}{6} \gamma' D^2 K \rho, \\ F_1 &= \gamma' D f \frac{\pi}{2} \left[ (1+K) \left( H + \frac{D}{2} \right) - \frac{D}{3} (2+K) - \frac{1}{3} D \rho g (2+K) \right] + f \left( m - \frac{\pi}{4} D^2 L \right). \end{aligned} \right\} (3)$$

式中， $\gamma'$  为土体浮重度； $N_{z1}$  为盾壳上部土压； $N_{z2}$  为盾壳下部土压； $m$  为盾构机自重； $L$  为盾壳长度； $f$  为盾壳与土体的摩擦系数，取值 0.15。

盾构机推进过程中的正面阻力，水浮力仅仅影响土体重度，因此 $F_2$ 的表达式为<sup>[10]</sup>

$$F_2 = \frac{1}{4} \pi D^2 \gamma' (1 - \alpha_0) K H_C \quad (4)$$

式中  $K$  为静止土压力系数； $H_C$  为地面到盾构机轴线距离； $\gamma'$  为土体浮重度； $\alpha_0$  为刀盘开口率。

盾构推力 $F$ 中， $F_1$ 与 $F_2$ 占总推力的90%以上<sup>[10]</sup>，为简化起见，盾构总推力的简化计算公式为

$$F = \frac{F_1 + F_2}{0.9} \quad (5)$$

## 2 盾构推力实测与验证

### 2.1 工程实例与实测数据

东大街站—句容河区间段下穿句容河，双线侧穿绕避句容河南门桥，桥桩直径为 1.5 m，桩长 34 m，桩体埋深为 27 m。盾构隧道左、右线均位于#2 桥墩桥桩外侧，且盾构外边缘与桩基的最短距离分别为 4.04，4.31 m。图 2 为句容河南门桥现场桩基位置图，每排桩基共有 8 根桩体。

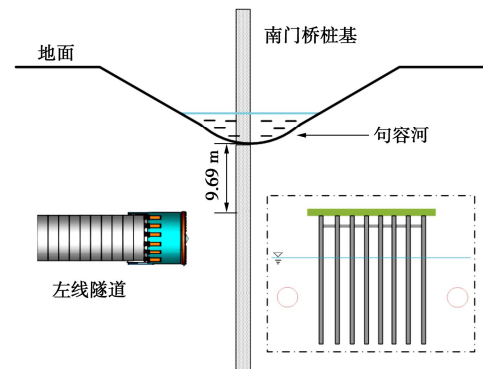


图 2 盾构隧道侧穿桥桩位置图

Fig. 2 Position of shield tunneling crossing a bridge

盾构隧道断面位于中等风化粉砂质泥岩中，上部为强风化粉砂质泥岩、含碎石粉质黏土及淤泥质填土等，属弱—微透水层，地表水对工程影响较小。本区间段采用土压平衡盾构，刀盘开口率为 40%，盾构刀盘切削直径为 6.48 m，盾构管片外径为 6.2 m，隧道

埋深在 9.62~22.2 m。左线下穿句容河段为 760 环~845 环, 右线下穿句容河段为 770 环~867 环。

### 2.2 实测盾构推力与计算结果比较

为了控制盾构近接线施工对临近桥梁桩基的影响, 应该严格控制盾构在下穿段的总推力。盾构机质量为 350 t, 盾壳长度为 9.3 m, 土层平均重度为 18.2 kN/m<sup>3</sup>, 下穿区域稳定水位埋深约 2.1~2.9 m。

图 3 为经验推力公式 (1)、考虑水浮力影响的盾构推力公式 (5) 和现场实测推力的对比曲线。从图中可以看出经验公式计算的推力是一成不变的, 下穿河道段的推力与现场实测推力相差较大。式 (5) 除盾构停机因素导致的推力显著增大外, 其余区间段与实测数据吻合良好。因此, 计算水位线以下的盾构推力可以采用式 (5)。

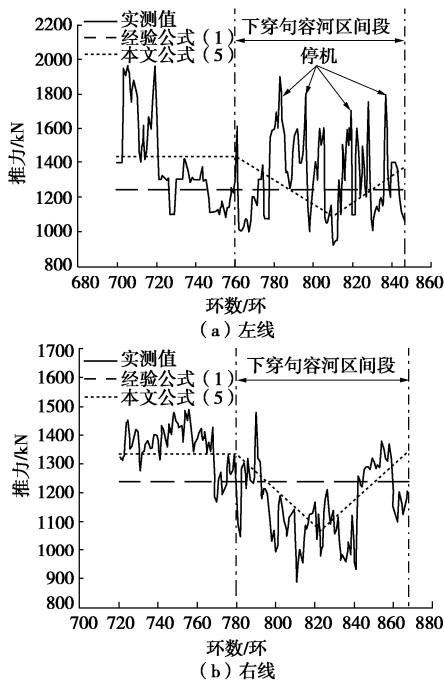


图 3 盾构推力曲线

Fig. 3 Curves of shield thrust

### 2.3 盾构推力与扭矩的关系

盾构机刀盘扭矩与地层条件(土质和埋深)、刀盘切削方式、和掘进速度等因素有关。土压平衡盾构机刀盘的滚刀主要用于硬岩的切削, 切刀主要用于软土地层的切削, 因此复合地层刀盘切削地层的抗力主要有以下两个主要部分组成<sup>[5]</sup>, 即

$$T = T_{11} + T_{12} \quad (6)$$

式中,  $T_{11}$  为盘形滚刀的切削扭矩,  $T_{12}$  为切刀的切削扭矩。

图 4 为东句区间盾构推力与刀盘扭矩的关系曲线, 从图 4 中可以看出, 盾构扭矩的变化规律与盾构推力的变化规律相同, 推力与扭矩之间存在显著的相关性。为了消除偶然因素的影响, 参数分析时同一盾

构推力对应 5 个及以上刀盘扭矩的点为满足取点要求, 且盾构推力对应多个扭矩时取扭矩的平均值。从图 5 中可以看出, 盾构扭矩与盾构推力存在显著的线性关系。对盾构推力与扭矩进行线性拟合, 盾构扭矩的计算可以采用式 (6) 进行计算, 拟合曲线的可靠度为 0.91, 说明盾构推力与扭矩之间存在显著的相关性。土压平衡盾构在切削土体过程中的刀盘扭矩与盾构推力密切相关, 可以采用盾构推力对扭矩进行较为精准的计算。

$$T = 275.9 + 1.36F \quad (7)$$

式中,  $F$  为盾构推力,  $T$  为盾构扭矩,  $R^2 = 0.91$ 。

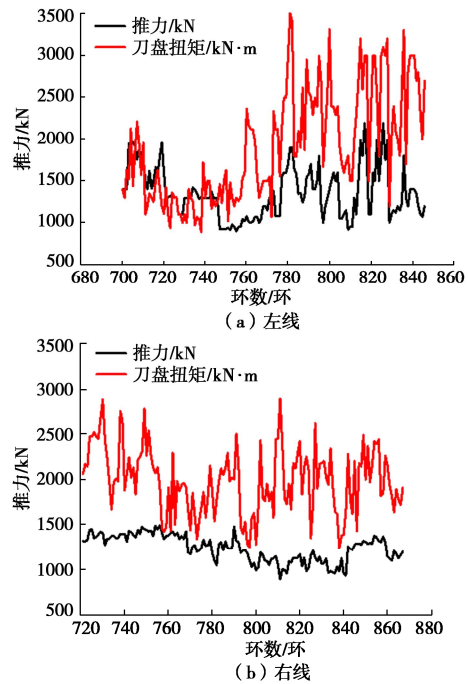


图 4 盾构推力与刀盘扭矩

Fig. 4 Shield thrust and cutter head torque

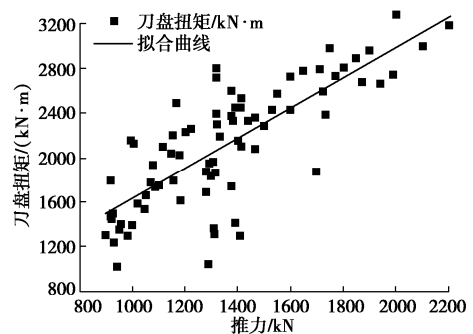


图 5 盾构推力与刀盘扭矩关系曲线

Fig. 5 Relationship between shield thrust and torque of cutter head

## 3 结 论

采用理论分析和现场实测相结合的方法, 获得了考虑地下水浮力影响的盾构隧道掘进过程中推力简化计算公式, 并结合现场实测数据分析了盾构推力与扭

矩之间的关系。

(1) 盾构推力计算中水的浮力通常被忽略, 导致计算的盾构推与实际值不符。因此推导考虑水浮力影响下的盾构推力计算公式, 通过与施工现场盾构推力对比可知, 考虑水浮力的计算公式与现场监测数据吻合良好。

(2) 盾构推力与刀盘扭矩之间存在显著的线性关系, 同一区间段盾构扭矩可以根据与推力的拟合公式进行计算。

#### 参考文献:

- [1] 王 强, 谢雄耀, 黄钟晖, 等. 四线并行盾构隧道下穿火车站股道沉降特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, **36**(增刊 2): 4235 - 4243. (WANG Qiang, XIE Xiong-yao, HUANG Zhong-hui, et al. Study of settlement troughs over quadruple-tube parallel shield tunnels crossing railway tracks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, **36**(S2): 4235 - 4243. (in Chinese))
- [2] DENG K, TANG X, WANG L, et al. On the Analysis of Force Transmission Performance for the Thrust Systems of Shield Tunneling Machines[C]// International Conference on Intelligent Robotics and Applications. Springer-Verlag, 2009.
- [3] 徐 冲. 砂卵石地层泥水平衡盾构隧道掘进参数控制[J]. 铁道建筑, 2019, **59**(2): 94 - 97. (XU Chong. Control of tunnel driving parameters of slurry balance shield in sandy gravel stratum[J]. Railway Engineering, 2019, **59**(2): 94 - 97. (in Chinese))
- [4] 徐前卫. 盾构施工参数的地层适应性模型试验及其理论研究[D]. 上海: 同济大学, 2006. (XU Qian-wei. Study on the Simulated Model Test of Shield Machine's Working Parameters Applicable to Different Stratum and Its Theoretical Investigation[D]. Shanghai: Tongji University, 2006. (in Chinese))
- [5] 陈仁朋, 刘 源, 汤旅军, 等. 复杂地层土压平衡盾构推力和刀盘扭矩计算研究[J]. 地下空间与工程学报, 2012, **8**(1): 26 - 32. (CHEN Ren-peng, LIU Yuan, TANG Lv-jun, et al. Research on calculation of thrust and cutter head torque on shield in complex strata[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, **8**(1): 26 - 32. (in Chinese))
- [6] 朱合华, 徐前卫, 廖少明, 等. 土压平衡盾构施工的顶进推力模型试验研究[J]. 岩土力学, 2007, **28**(8): 1587 - 1594. (ZHU He-hua, XU Qian-wei, LIAO Shao-ming, et al. Experimental study on thrust force during tunnel excavation with earth pressure balance shield machine[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(8): 1587 - 1594. (in Chinese))
- [7] DENG K S, TANG X Q, WANG L P, et al. Research on characteristics of deformation in thrust system for EPB shield machines[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2011, **26**(1): 15 - 21.
- [8] 王洪新. 土压平衡盾构刀盘扭矩计算及其与盾构施工参数关系研究[J]. 土木工程学报, 2009, **42**(9): 109 - 113. (WANG Hong-xin. Calculation of cutterhead torque for EPB shield and the relationship between cutterhead torque and shield driving parameters[J]. China Civil Engineering Journal, 2009, **42**(9): 109 - 113. (in Chinese))
- [9] 刘铁雄. 日本隧道标准规范(盾构篇)及解释[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1988. (LIU Tie-xiong. Japanese Tunnel Standard Specification (Shield Tunneling) and Interpretation[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 1988. (in Chinese))
- [10] 王明年, 张晓军, 苟明中, 等. 盾构隧道掘进全过程三维模拟方法及重叠段近接分区研究[J]. 岩土力学, 2012, **33**(1): 273 - 279. (WANG Ming-nian, ZHANG Xiao-jun, GOU Ming-zhong, et al. Method of three-dimensional simulation for shield tunneling process and study of adjacent partition of overlapped segment[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(1): 273 - 279. (in Chinese))
- [11] 王承德. 顶管施工中管壁摩阻力理论公式的商榷[J]. 特种结构, 1999, **16**(3): 22 - 25. (WANG Cheng-de. For pipe jacking construction pipe surface frictional resistance formula under discussion[J]. Special Structures, 1999, **16**(3): 22 - 25. (in Chinese))

(编校: 孙振远)