

【工程应用】

# 富水砂黏地层盾构掘进参数与地层相关性研究

曹云飞, 王旭春\*, 韩旭, 吴文瑞, 洪勇  
(青岛理工大学 土木工程学院, 山东 青岛 266033)

**摘要:** 为了探究土压平衡盾构在富水砂黏复合地层中掘进参数与地层的相关性, 依托青岛地铁4号线沙子口站至崂山六中站区间, 对盾构原始掘进参数进行二次转化, 并利用陆域段与河域段的比推力、比扭矩与复合比进行分析。研究表明, 利用沿隧道纵向每一环开挖面积中黏土所占的比例来计算复合比是合理的; 利用复合比的变化趋势来调整比推力、比扭矩是合理的; 陆域段的地层复合比范围在33.2%~78.6%时, 比推力控制在129.6~411.6 kN/mm之间, 比扭矩控制在12.5~51.9 kN·m/mm之间; 河域段地层复合比范围在25.4%~97.3%时, 比推力控制在109.6~380.1 kN/mm之间, 比扭矩控制在14.0~40.8 kN·m/mm之间。

**关键词:** 土压盾构; 复合地层; 掘进参数; 复合比; 相关性

中图分类号: U455.43

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2021)05-0433-07

## Research on correlation between shield tunneling parameters and stratum in water-rich sandy-clay stratum

CAO Yun-fei, WANG Xu-chun\*, HAN Xu, WU Wen-rui, HONG Yong  
(School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, Shandong, China)

**Abstract:** In order to explore the correlation between the strata and tunneling parameters of the earth pressure balance shield in the water-rich sand-clay composite stratum, the original tunneling parameters of the shield are transformed consecutively. Based on the section from Shazikou Station to Laoshan No.6 Middle Station of Qingdao metro line 4, the specific thrust, specific torque, the compound ratio of the land section, and the river section are used for analysis. The measured results show that: it is reasonable to use the proportion of clay in the excavated area of each ring along the longitudinal direction of the tunnel to calculate the composite ratio; it is reasonable to use the change trend of the compound ratio to adjust the specific thrust and specific torque; when the stratum composite ratio of the land section is in the range of 33.2%~78.6%, the specific thrust is controlled between 129.6~411.6 kN/mm, and the specific torque is controlled between 12.5~51.9 kN·m/mm; when the stratum composite ratio of the river section is in the range of 25.4%~97.3%, the specific thrust is controlled between 109.6~380.1 kN/mm, and the specific torque is controlled between 14.0~40.8kN·m/mm.

**Key words:** earth pressure shield; composite strata; tunneling parameters; composite ratio; correlation

## 0 引言

随着我国经济的蓬勃发展, 居民出行频率大幅增涨, 为了应对日益增长的交通量和人流密度对地面交通所造成的压力, 国内较多城市开始兴建地铁, 例如: 西安、长沙、济南、青岛等。盾构法由

于施工作业面小, 且对地面交通影响较小, 因而被广泛应用于城市地铁隧道施工。但盾构机在施工过程中, 掘进参数会受到城市地质、水文等条件的限制, 因此通过设置与地层相对应的掘进参数很有必要。

收稿日期: 2021-07-28

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1505302)。

作者简介: 曹云飞(1997—), 男, 山西运城人, 硕士研究生, 主要从事隧道工程的研究工作。E-mail: 841475756@qq.com。

\*通信作者: 王旭春(1963—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程、矿业工程方面研究。E-mail: xcwang2008@qq.com。

目前国内外关于掘进参数与地层的相关性研究已经取得了一些进展。张细宝等<sup>[1]</sup>利用现场掘进参数与理论公式分析相结合的方法,研究了盾构穿河前后掘进参数的主要影响因素。张莹等<sup>[2]</sup>基于现场盾构实际采样数据,对盾构工作参数进行了“归一化”处理,提出了利用掘进参数识别地质特性的方法。杨旻等<sup>[3]</sup>通过对富水圆砾地层与圆砾泥岩复合地层掘进参数对比分析,得出了与地层相应的掘进参数变化规律。李明阳等<sup>[4]</sup>基于 Terzaghi 松动土压力与 CSM 模型,对软硬交互地层盾构掘进参数进行了模拟与预测。赵博剑等<sup>[5]</sup>采用数理统计的方法分析了 5 种掘进参数与 6 种主要地层的相关性。杨怀远<sup>[6]</sup>利用地质特征组段划分的方法,分析了不同组段下掘进参数与地层的相关性。张志强等<sup>[7]</sup>基于 TBM 掘进参数的二次转换,对破碎带围岩稳定性进行了分析。于云龙等<sup>[8]</sup>通过对盾构掘进参数的二次转换,分析了砂黏复合地层掘进参数的变化规律。总之,目前研究多偏向于原始掘进参数与地层之间的相关性,且对于掘进参数的二次转换与地层的相关性研究,考虑地下水影响的较少。

因此,本文依托青岛地铁 4 号线沙子口站至崂山六中站区间,通过对复合比计算公式的改进以及掘进参数的二次转换,得到了陆域段与河域段掘进参数与复合比的关系。

## 1 工程概况

青岛地铁 4 号线沙子口站至崂山六中站区间,采用土压平衡盾构机施工,左线隧道长 1 112.485 m,右线隧道长 1 114.920 m,左、右线隧道线间距为 12~14 m,隧道最小平面曲线半径为 450 m,最大纵坡 18.485‰,拱顶埋深约 7.0~17.2 m。盾构机的开挖直径为 6 250 mm,管片外径 6 000 mm,内径

5 400 mm,环宽 1 500 mm。本文以沙岭区间右线盾构隧道为工程依托,通过青岛地铁盾构施工管理信息系统获取 0~160 环的掘进参数,由于右线掘进至 160 环时,左线还未始发,因此不考虑左线盾构掘进对右线地层的扰动。右线隧道在 0~160 环洞身范围内主要为中粗砂与粉质黏土的复合地层,并在 70~160 环侧穿南九水河,因此该复合地层含水量丰富,0~160 环隧道纵断面图如图 1 所示。

本区段地层中,中粗砂与粉质黏土的物理、力学性质差异较大,因此盾构机在本区段掘进时,所对应的掘进参数会存在明显差别。穿越地层的物理、力学性质指标如表 1 所示。

表 1 穿越地层的物理、力学性质指标  
Table 1 Physical and mechanical property indices of traversing strata

名称	重度/ (kN·m <sup>-3</sup> )	黏聚力/ kPa	内摩擦/ (°)	侧压力系数
中粗砂	20.5	0	30.0	0.43
粉质黏土	19.7	23.0	11.3	0.74

当复合地层在开挖面范围内沿地层分界线均匀分布时,复合比通常采用某一层占开挖面的面积比或高度比进行计算<sup>[8-10]</sup>。而对于本区间来说,沿隧道纵向砂层与粉质黏土层所占的比例在持续变化,若复合比采用上述方法,则计算结果会与实际地层产生较大偏差。

因此为了更好的反应本区间复合地层沿隧道纵向的变化规律,本文将复合比定义为沿隧道纵向每一环开挖面积中黏土所占的比例。计算公式如下:

$$f = \frac{S_1}{S} = \frac{S_1}{6.25 \times 1.5} \quad (1)$$

式中:  $f$  为复合比;  $S_1$  为黏土所占的面积;  $S$  为纵断面图中每一环所对应的开挖面积。

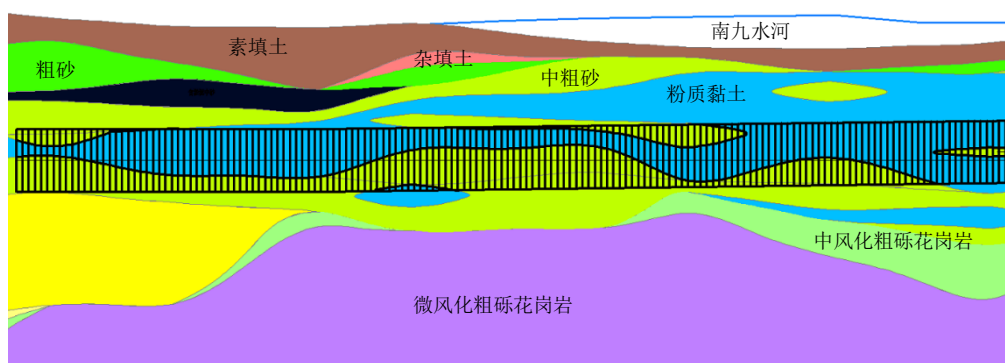


图 1 0~160 环隧道纵断面图

Fig. 1 Diagram of longitudinal section of 0-160 ring tunnel

## 2 掘进参数的选取与二次转化

### 2.1 掘进参数的选取

盾构机在正常掘进阶段,掘进参数会受到地层变化的影响,且各掘进参数之间还存在着复杂的关系。因此为了研究方便,本文选取正常状态下每一环掘进参数的平均值作为该环的代表值<sup>[11]</sup>。由于沙滂区间始发段采用高压液喷加固地层的方法,加固长度为沿线路纵向12 m,为了消除加固区对掘进参数的影响,舍弃前16环的掘进数据。最终本文采用两个掘进段进行分析,即16~70环所对应的陆域段以及71~160环所对应的河域段。

### 2.2 掘进参数的二次转换

盾构机在砂黏复合地层掘进时,受地质条件不断变化的影响,推力、扭矩与单一地层相比波动较大<sup>[12]</sup>。且推力、扭矩、贯入度(即掘进速度/刀盘转速)是地层与盾构机联系的重要参数,而推力、扭矩又与掘进速度和刀盘转速有关,因此为了更好的研究推力、扭矩与地层复合比之间的关系,需要将推力、扭矩进行二次转换,即引入比推力与比扭矩,以此来消除掘进速度与刀盘转速对推力与扭矩的影响<sup>[2,8,13]</sup>,计算公式如下:

$$\bar{F} = \frac{F}{\lambda} \quad (2)$$

$$\bar{T} = \frac{T}{\lambda} \quad (3)$$

式中: $\bar{F}$ 为比推力; $\bar{T}$ 为比扭矩; $F$ 为盾构机推力; $T$ 为盾构机扭矩; $\lambda$ 为贯入度。

## 3 掘进参数分析

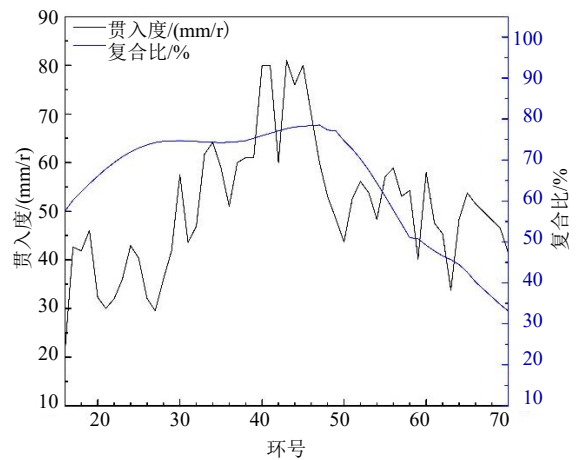
### 3.1 贯入度

贯入度作为研究比推力、比扭矩的重要参数,因此需要首先分析,贯入度与复合比的关系曲线如图2所示。

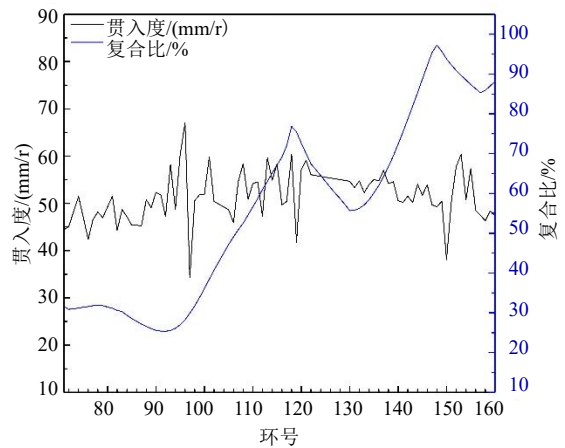
由图2(a)可得,陆域段贯入度与复合比曲线的变化趋势相同,如16~47环复合比变化曲线呈上升趋势,变化范围为57.5%~78.6%,贯入度变化曲线也为上升趋势,变化范围为21.1~81.0 mm/r;48~70环复合比变化曲线呈下降趋势,变化范围为77.3%~33.2%,贯入度变化曲线也为下降趋势,变化范围为58.9~33.8 mm/r。可能造成的原因为:由于粉质黏土较中粗砂层来说较软,因此当复合比较高时,即粉质黏土所占的比例较高时,盾构掘进速

度相对较快,导致盾构刀盘贯入度较高,即陆域段刀盘贯入度与地层复合比呈正相关。

由图2(b)可得,河域段的刀盘贯入度变化幅度较小,没有明显的变化趋势,且大部分控制在40~60 mm/r之间。可能造成的原因为,由于南九水河与海水相连,河道底标高约0.3~0.6 m,满潮时水位标高为2.2 m,河道为自然河床,隧道拱顶距离河底的垂直距离约为7.5 m,因此施工难度较大。为了保证盾构机的正常掘进,现场对盾构机的掘进速度进行了控制,导致刀盘贯入度稳定在一定范围。



(a) 陆域段贯入度与复合比的关系曲线



(b) 河域段贯入度与复合比的关系曲线

图2 贯入度与复合比的关系曲线

Fig. 2 Relationship curves between penetration degree and compound ratio

### 3.2 推力

盾构机总推力主要由盾尾与管片衬砌间的摩擦力 $F_1$ 、正面阻力 $F_2$ 、盾壳侧面与地层间的摩擦力 $F_3$ 、转向阻力 $F_4$ 、贯入阻力 $F_5$ 、后配套牵引力 $F_6$ 组成,且主要受到掘进时正面阻力 $F_2$ 的影响,导致推力产生一定的变化。盾构机掘进时的正面阻力 $F_2$

由切削岩土体的阻力  $F_{21}$  与仓压阻力  $F_{22}$  组成, 计算公式如下<sup>[1]</sup>:

$$F_{21} = \frac{4}{3} n K_d q_u \sqrt{\frac{3r_i}{2}} \left(\frac{\theta_i}{35}\right)^{1.4} \lambda \sqrt{2r\lambda - \lambda^2} \operatorname{tg}\left(\frac{\varphi}{2}\right) \quad (4)$$

$$F_{22} = \frac{1}{4} \pi D^2 p_s \quad (5)$$

式中:  $n$  为滚刀安装的数量;  $K_d$  为岩石的滚压系数;  $q_u$  为岩土体的抗压强度;  $r_i$  为滚刀的刃角半径;  $\theta_i$  为滚刀半刃角;  $\varphi$  为岩石自然破碎角;  $r$  为滚刀半径;  $\lambda$  为贯入度;  $D$  为盾构机外径;  $p_s$  为土仓压力。

由于岩土体的抗压强度  $q_u$  是影响切削岩土体阻力  $F_{21}$  的主要因素<sup>[4]</sup>, 土仓压力  $p_s$  是影响仓压阻力  $F_{22}$  的主要因素, 因此地层类型与隧道埋深是影响正面阻力  $F_2$  的主要因素。

### 3.3 扭矩

盾构机的刀盘扭矩主要由 5 部分组成, 分别为刀盘正面与地层间的摩擦力  $T_1$ 、土仓内土体与刀盘背面间的摩擦力  $T_2$ 、刀盘侧面与地层间的摩擦力  $T_3$ 、刀具切削土体时地层产生的抗力  $T_4$ 、搅拌棒阻力  $T_5$ , 且引起扭矩发生变化的主要因素为  $T_1$  与  $T_4$ , 两者的计算公式如下:

$$T_1 = \frac{\pi D^3}{12} K f \gamma H (1 - \eta) \quad (6)$$

$$T_4 = \frac{1}{8} D^2 \lambda q_u \quad (7)$$

式中:  $K$  为侧向土压力系数;  $f$  为刀盘与地层之间的摩擦系数;  $\gamma$  为重度;  $H$  为盾构机轴线至地面的垂直距离;  $\eta$  为刀盘的开口率;  $D$  为盾构机外径;  $\lambda$  为贯入度;  $q_u$  为岩土体抗压强度。

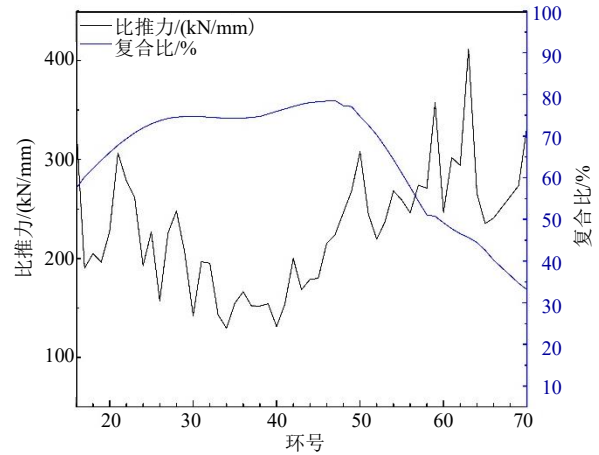
由于  $H$  为  $T_1$  产生变化的主要影响因素,  $\lambda$  与  $q_u$  是  $T_4$  产生变化的主要影响因素, 因此地层类型与隧道埋深也是刀盘扭矩产生变化的主要影响因素。

### 3.4 陆域段比推力、比扭矩

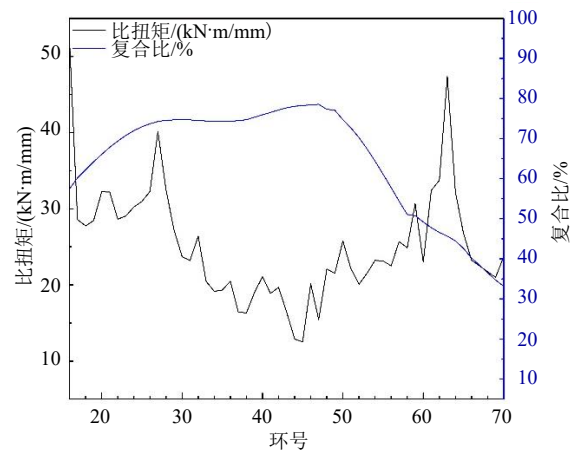
在不考虑地下水影响的条件下, 对于砂黏复合地层来说, 复合比与比推力、比扭矩之间的关系为反相关, 即复合比越小则地层越硬, 比推力与比扭矩越大<sup>[8]</sup>。对于本区段所研究的富水砂黏复合地层来说, 复合比变化曲线与比推力、比扭矩的关系也为反相关。陆域段所对应的比推力、比扭矩与复合比的关系曲线如图 3 所示。

由图 3 (a)、3 (b) 可得, 16~47 环复合比变化曲线呈上升趋势, 变化范围为 57.5%~78.6%, 而比推力与比矩具有明显的下降趋势, 变化范围分别为 333.1~129.6 kN/mm 与 51.9~12.5 kN·m/mm;

48~70 环复合比变化曲线呈下降趋势, 变化范围为 77.3%~33.2%, 但比推力与比扭矩具有明显的上升趋势, 变化范围分别为 219.6~411.6 kN/mm 与 20.1~47.3 kN·m/mm。



(a) 比推力与复合比的关系曲线



(b) 比扭矩与复合比的关系曲线

图 3 陆域段掘进参数与复合比的关系曲线

Fig. 3 Relationship curves between tunneling parameters and compound ratio in land section

根据式 (4) ~ (5) 可得, 陆域段隧道埋深变化较小 (约为 0.6 m), 因此可以忽略  $F_{22}$ , 即造成推力产生变化的主要原因为切削岩土体的阻力  $F_{21}$ , 且  $F_{21}$  与岩土体抗压强度  $q_u$  呈正相关。受本区段地层富含地下水的影响, 中粗砂相对于粉质黏土来说, 强度较大且硬度较高, 即中粗砂的  $q_u$  比粉质黏土层高, 因此当地层的复合比较高时, 中粗砂层所占的比例越小, 导致开挖面整体的  $q_u$  较小, 即  $q_u$  与复合比呈反相关, 因此  $F_{21}$  与复合比也呈反相关。但由于陆域段刀盘贯入度与地层复合比呈正相关, 因此陆域段比推力与地层复合比呈反相关关系。

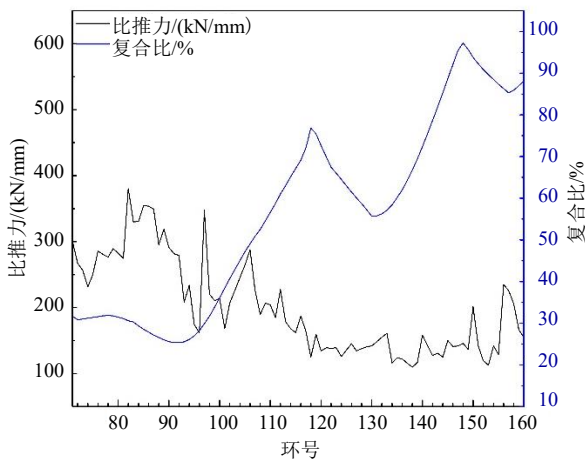
根据式 (6) ~ (7) 可得, 由于陆域段隧道埋



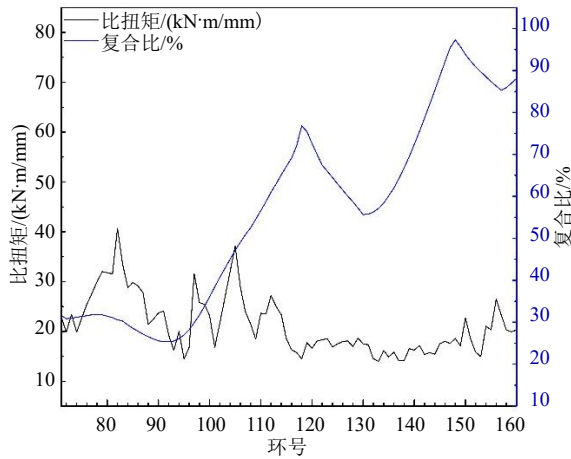
深变化较小,因此可忽略 $T_1$ 的影响,且根据比扭矩的定义可得, $T_4$ 中的贯入度可与比扭矩定义中的贯入度相互抵消,因此只考虑 $q_u$ 对刀盘扭矩的影响,且 $q_u$ 与刀盘扭矩呈正相关。又由上文可得, $q_u$ 与复合比呈反相关,因此比扭矩与复合比之间也为反相关。

### 3.5 河域段比推力、比扭矩

河域段所对应的掘进环号范围为71~160环,并位于南九水河道下方,因此地层含水量更丰富,导致掘进参数与地层复合比变化曲线关系与陆域段相比有所不同。河域段掘进参数与复合比的关系曲线如图4所示。



(a) 比推力与复合比的关系曲线



(b) 比扭矩与复合比的关系曲线

图4 河域段掘进参数与复合比的关系曲线

Fig. 4 Relationship curves between tunneling parameters and compound ratio in river section

由图4(a)、4(b)可知,河域段的比推力、比扭矩的变化趋势与陆域段相比,较不明显,因此河域段采用平均值作为参考对象。如71~92环复合比变化曲线呈下降趋势,变化范围为31.9%~

25.4%,比推力平均值为298.9 kN/mm,比扭矩平均值为26.5 kN·m/mm;93~118环复合比变化曲线呈上升趋势,变化范围为25.5%~76.9%,比推力平均值为205.1 kN/mm,比扭矩平均值为22.1 kN·m/mm;因此可以得出,93~118环的掘进参数均小于71~92环,且比推力、比扭矩与复合比变化曲线大致呈反相关。119~160环,复合比变化趋势为先降低后升高再降低,复合比变化范围为55.7%~97.3%,比推力、比扭矩没有明显的变化趋势,而是稳定在一定范围,比推力控制在109.6~234.9 kN/mm之间,比扭矩控制在14.0~26.5 kN·m/mm之间。

可能造成71~118环掘进参数与复合比关系的原因:由于河域段的贯入度控制在一定范围,因此比推力与比扭矩的变化幅度与贯入度的关系较弱,可以忽略。71~118环受隧道埋深下降较大的影响(约为2.3 m), $p_s$ 不断减小,导致 $F_{22}$ 不断减小。而根据陆域段的经验可得, $F_{21}$ 与复合比呈反相关,因此当复合比呈上升趋势时, $F_{21}$ 与 $F_{22}$ 均减小,当复合比呈下降趋势时, $F_{21}$ 增加, $F_{22}$ 减小,由此就导致河域段的比推力随复合比的变化趋势不太明显,但大致复合比关系曲线呈反相关关系。对于比扭矩来说,由式(6)~(7)可得, $T_1$ 与 $H$ 呈正相关, $T_4$ 与 $\lambda$ 、 $q_u$ 呈正相关,但由于忽略了贯入度的影响,因此只考虑 $H$ 对 $T_1$ 、 $q_u$ 对 $T_4$ 的影响,即复合比增大时, $T_1$ 与 $T_4$ 均减小;复合比减小时, $T_1$ 减小, $T_4$ 增大。因此刀盘扭矩的变化趋势也不太明显,但大致复合比关系曲线呈反相关关系。

可能造成119~160环掘进参数与复合比关系的原因:(1)该区段的隧道埋深很小且变化较小,导致比推力与比扭矩数值较小,因此变化趋势不明显;(2)由于已到达河床最低处,因此地层的含水量更加丰富,导致土体的性质变差,对掘进参数的影响程度减弱。

## 4 掘进效率评价

通过对本区间陆域段与河域段所对应的贯入度与掘进速度进行统计,可以得到盾构机在本区间的掘进效率,具体数据如表2所示。

由表2可得,盾构机在陆域段的贯入度均值与掘进速度均值较高,分别为51.0 mm/r和58.9 mm/min,在71~118环所对应的河域段,贯入度均值与掘进速度均值也较高,分别为50.7 mm/r和57.6 mm/min,且在119~160环所对应的河域段,贯入度均值与掘

进速度均值最高,分别为 52.6 mm/r 和 59.2 mm/min。因此,通过复合比的变化趋势来调整比推力、比扭矩,可以使盾构机保持较高的掘进效率。

表 2 盾构掘进效率表

Table 2 Shield tunneling efficiency table

掘进区段	掘进环号	贯入度平均值/ (mm/r)	掘进速度平均值/ (mm/min)
陆域段	16~70	51.0	58.9
	71~118	50.7	57.6
河域段	119~160	52.6	59.2

## 5 结 论

(1) 对于沿隧道纵向砂层与粉质黏土层所占的比例在持续变化的复合地层来说,采用沿隧道纵向每一环开挖面积中黏土所占的比例来计算复合比是合理的。

(2) 对于富水砂黏复合地层来说,可利用复合比的变化趋势来调整比推力、比扭矩。

(3) 对于陆域段的富水砂黏地层来说,比推力、比扭矩与地层复合比变化曲线之间关系为反相关,且复合比范围在 33.2%~78.6%时,比推力控制在 129.6~411.6 kN/mm 之间,比扭矩控制在 12.5~51.9 kN·m/mm 之间。

(4) 对于未穿越至河床最低点的河域段富水砂黏地层来说,比推力、比扭矩与地层复合比变化曲线之间关系大致呈反相关,且当复合比范围在 25.4%~76.9%时,比推力控制在 125.0~380.1 kN/mm 之间,比扭矩控制在 14.5~40.8 kN·m/mm 之间;当开始穿越河床最低区段,且复合比范围在 55.7%~97.3%时,比推力控制在 109.6~234.9 kN/mm 之间,比扭矩控制在 14.0~26.5 kN·m/mm 之间。

## 参考文献

[1] 张细宝,翟圣智,胥明,等.南昌地铁土压平衡盾构穿越抚河掘进参数控制[J].中外公路,2014,34(3):209-212.  
ZHANG Xi-bao, ZHAI Sheng-zhi, XU Ming, et al. Control of tunneling parameters of Nanchang metro's earth pressure balance shield crossing Fuhe River[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2014, 34(3): 209-212.

[2] 张莹,蔡宗熙,冷永刚,等.盾构机掘进参数的关联分

析与地质特征识别[J].哈尔滨工程大学学报,2011,32(4):476-480.

ZHANG Ying, CAI Zong-xi, LENG Yong-gang, et al. Correlative analysis of shield tunneling data and recognition of geologic features[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2011, 32(4): 476-480.

[3] 杨旸,谭忠盛,彭斌,等.富水圆砾地层土压平衡盾构掘进参数优化研究[J].土木工程学报,2017,50(S1):94-98.

YANG Yang, TAN Zhong-sheng, PENG Bin, et al. Study on optimization boring parameters of earth pressure balance shield in water-soaked round gravel strata[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(S1): 94-98.

[4] 李明阳,杨海涛,邹高明.复合地层土压平衡盾构掘进参数模拟分析研究[J].隧道建设,2012,32(3):287-295.

LI Ming-yang, YANG Hai-tao, ZOU Gao-ming. Simulation analysis on boring parameters of EPB shield in complex strata[J]. Tunnel Construction, 2012, 32(3): 287-295.

[5] 赵博剑,周建军,谭忠盛,等.复合地层盾构掘进参数及其与地层相关性分析[J].土木工程学报,2017,50(S1):140-144.

ZHAO Bo-jian, ZHOU Jian-jun, TAN Zhong-sheng, et al. Variation of shield boring parameters and correlation analysis in mixed ground[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(S1): 140-144.

[6] 杨怀远.青岛地铁土压平衡盾构掘进参数与地质特征相关性研究[D].山东青岛:青岛理工大学,2020.

YANG Huai-yuan. Study on the correlation between the parameters of EPB shield tunneling and geological characteristics of Qingdao metro[D]. Qingdao, Shandong: Qingdao University of Technology, 2020.

[7] 张志强,王旭春,卢泽霖,等.基于掘进参数的TBM破碎带施工围岩稳定性分析[J].青岛理工大学学报,2020,41(5):30-36.

ZHANG Zhi-qiang, WANG Xu-chun, LU Ze-lin, et al. Stability analysis of surrounding rock in TBM fracture zone construction based on tunneling parameters[J]. Journal of Qingdao University of Technology, 2020, 41(5): 30-36.

[8] 于云龙,管晓明,王旭春,等.砂黏复合地层盾构掘进参数变化规律及掘进速率预测研究[J].隧道建设,2019,39(7):1125-1131.

- YU Yun-long, GUAN Xiao-ming, WANG Xu-chun, et al. Tunneling parameters variation laws and velocity prediction of shield tunneling in sandy-clay composite strata[J]. Tunnel Construction, 2019, 39(7): 1125-1131.
- [9] 周力军, 张孟喜, 王维, 等. 广州上软下硬复合地层中盾构隧道施工影响分析[J]. 铁道标准设计, 2018, 62(10): 113-117.
- ZHOU Li-jun, ZHANG Meng-xi, WANG Wei, et al. Analysis of the influence of mixed stratum of up soft and down hard on shield tunnel construction in Guangzhou[J]. Railway Standard Design, 2018, 62(10): 113-117.
- [10] 潘建阁. 深圳复合地层对盾构隧道衬砌管片结构受力和变形的影响分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
- PAN Jian-ge. Analysis of composite strata on force and deformation of shield tunneling segment structure in Shenzhen [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.
- [11] 杨果林, 张沛然, 陈亚军, 等. 长沙典型地层土压平衡盾构掘进参数及表现预测[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2020, 51(8): 2069-2080.
- YANG Guo-lin, ZHANG Pei-ran, CHEN Ya-jun, et al. Excavation parameters and performance prediction of earth pressure balance shield in typical strata of Changsha[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2020, 51(8): 2069-2080.
- [12] 关辉辉, 王军, 刘中心. 石家庄地铁1号线土压平衡盾构施工掘进参数研究[J]. 铁道建筑, 2015, 502(12): 39-42, 99.
- GUAN Hui-hui, WANG Jun, LIU Zhong-xin. Research on tunneling parameters of Earth Pressure Balance Shield construction of Shijiazhuang metro line 1[J]. Railway Engineering, 2015, 502(12): 39-42, 99.
- [13] 宋克志, 袁大军, 王梦恕. 基于盾构掘进参数分析的隧道围岩模糊判别[J]. 土木工程学报, 2009, 42(1): 107-113.
- SONG Ke-zhi, YUAN Da-jun, WANG Meng-shu. Fuzzy identification of surrounding rock conditions based on analysis of shield tunneling data[J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(1): 107-113.
- [14] 肖超, 阳军生, 李科. 穿越湘江地层裂隙密集区域大直径泥水平衡盾构掘进参数控制[J]. 铁道科学与工程学报, 2013, 10(5): 40-46.
- XIAO Chao, YANG Jun-sheng, LI Ke. Parametric control of large-diameter slurry shield tunneling parameter crossing dense cracks of stratum[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2013, 10(5): 40-46.