

复合地层盾构掘进刀盘扭矩波动分析与 贯入度预测方法*

文 佳¹ 李晓东² 李建强¹ 林 恩¹ 吴遥杰^{3,4}

(1. 中国水利水电第七工程局有限公司, 610213, 成都; 2. 南京地铁建设集团有限公司, 210018, 南京;

3. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 201804, 上海;

4. 上海市轨道交通结构耐久与系统安全重点实验室, 201804, 上海//第一作者, 工程师)

摘 要 目的:在复合地层中,盾构掘进时往往会产生较大的刀盘扭矩和扭矩波动,为降低扭矩波动和提高掘进效率,需研究贯入度的预测方法。方法:建立了刀盘滚刀与切刀开挖扭矩模型,并通过考虑复合地层与刀盘的摩擦,建立了复合地层盾构掘进总扭矩模型。在分析复合地层盾构开挖扭矩波动特征的基础上,建立了刀盘扭矩、复合地层组成、贯入度与岩石强度的简化关系,并提出了一种新的预测指标—— I_{MTP} (复合扭矩贯入指数)。该指标将扭矩与贯入度结合,可用于评价复合地层开挖面的可切削性。同时提出了一种基于机械性能的贯入度预测方法,其可用于预测不同地质条件和机械性能限制下的贯入度。结果及结论:复合地层盾构掘进总扭矩模型的预测能力可靠性已在南京至句容城际轨道交通工程麒麟镇站—东郊小镇站区间得到了验证。该方法可在复合地层中隧道盾构机械受限的情况下,将盾构掘进参数与地质条件参数进行匹配,能为隧道掘进施工的安全和效率提供指导与保障。

关键词 复合地层;盾构掘进;刀盘扭矩波动;贯入度预测
中图分类号 U445.43

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.12.005

Analysis of Cutterhead Torque Fluctuation and Penetration Depth Prediction Method in Composite Stratum Shield Tunneling

WEN Jia, LI Xiaodong, LI Jianqiang, LIN En, WU Yaojie

Abstract Objective: In composite stratum, shield tunneling often generates significant cutterhead torque and torque fluctuation. To reduce torque fluctuation and improve excavation efficiency, it is necessary to study methods for predicting penetration depth. Method: First, an excavation torque model for cutterhead hobs and cutter tools is established. By considering the friction between composite stratum and cutterhead, a total

torque model for shield tunneling in composite stratum is developed. Based on the analysis of torque fluctuation characteristics during shield tunneling in composite stratum, a simplified relationship is established among cutterhead torque, composite stratum composition, penetration depth, and rock strength. A new prediction index, the MTPI (multiple torque penetration index) is proposed. This index, combining torque and penetration depth, can be used to assess the cuttability of the excavation face in composite stratum. Additionally, a penetration depth prediction method based on mechanical performance is proposed, which can be applied to predict penetration depth under different geological conditions and mechanical performance limitations. Result & Conclusion: The reliability of the prediction capacity of the above model is validated in the Qilin Town Station to Dongjiao Town Station interval of Nanjing-Jurong Intercity Railway. This method can match shield tunneling parameters with geological condition parameters under the condition of limited mechanical performance in composite stratum, providing guidance and assurance for the safety and efficiency of tunneling excavation construction.

Key words composite stratum; shield tunneling; cutterhead torque fluctuation; penetration depth prediction

First-author's address Sinohydro Bureau No.7 Co., Ltd., 610213, Chengdu, China

在我国南京、广州、深圳一带,上软下硬复合地层是地铁盾构施工中经常遇到的一类特殊地质状况。土压平衡盾构在复合地层掘进施工容易出现掘进参数难以控制,造成掘进效率低下;刀盘扭矩波动过大;刀具异常磨损,导致盾构机卡死;地层超挖,致使地面过大沉降;开挖面失稳等事故。因此,寻找适用于复合地层的掘进参数的预测方法,对盾

* 中国水利水电第七工程局科技研发项目(201907001)

构掘进施工具有一定的理论指导意义。

目前,盾构掘进参数的预测主要采用理论计算、经验公式推算、回归分析和智能反演等方法。文献[1]建立了盾构掘进方程,获得了各掘进参数间的关系;文献[2-3]针对不同的复合地层盾构施工工况,将实测数据与理论公式结合,获得了相对可靠的掘进参数取值范围;文献[4-5]通过多元非线性回归分析建立了盾构掘进速度和刀盘转矩数学模型;文献[6]采用BP(反向传播)神经网络建立复合地层关键掘进参数预测模型,并对关键掘进参数进行预测、验证。

本文通过分析复合地层盾构掘进过程中刀盘与开挖面的荷载作用特征,建立扭矩计算模型,基于此提出了适用于复合地层的掘进参数预测指标,并基于机械性能提出了贯入度预测方法。依托南京轨道交通工程麒麟镇站—东郊小镇站(以下简称“麒东区间”)土压平衡盾构现场掘进试验,对模型进行了验证分析,以期复合地层盾构掘进施工提供指导。

1 复合地层盾构掘进刀盘扭矩计算模型

1.1 总扭矩

盾构开挖时,刀盘总扭矩 T_t 包括:① 滚刀和切刀切削岩土体的有效开挖扭矩 T_c ;② 刀盘前后以及侧面的岩土体对刀盘的摩擦扭矩 T_f ;③ 刀盘转动时,机械结构内部的摩擦扭矩 ΔT 。

$$T_t = T_c + T_f + \Delta T \quad (1)$$

其中,当 ΔT 缺少试验数据时,可引入考虑 ΔT 的扭矩修正系数 k_{EPB} (一般取 1.1),修正公式为:

$$T_t = k_{EPB} (T_c + T_f) \quad (2)$$

1.2 有效开挖扭矩

有效开挖扭矩 T_c 为每把滚刀和切刀切削岩土体受到的滚动力或切向力对刀盘中心的力矩和,即:

$$T_c = \sum_{i=1}^{n_r} F_{ri} r_i + \sum_{j=1}^{n_t} F_{tj} r_j \quad (3)$$

式中:

- F_{ri} ——第 i 把滚刀滚动力;
- F_{tj} ——第 j 把切刀切向力;
- r_i ——第 i 把滚刀滚动力力臂;
- r_j ——第 j 把切刀切向力力臂;
- n_r ——滚刀数量;
- n_t ——切刀数量。

下面分别计算刀盘滚动力和切向力。

1.2.1 (滚刀)滚动力

采用 CSM(科罗拉多矿业大学模型)进行滚刀荷载计算,如图 1 所示。作用在刀盘上的总力 F 可表示为:

$$F = C \sqrt[3]{\frac{S}{\phi} \frac{\sigma_c^2 \sigma_t}{RT} \frac{\phi RT}{1 + \psi}} \quad (4)$$

式中:

R ——滚刀切割半径;

ϕ ——圆弧接触面圆心角;

C ——常数, $C \approx 2.12$;

S ——滚刀间距;

T ——刀刃宽度;

σ_c ——岩石的单轴抗压强度;

σ_t ——岩石的抗拉强度;

ψ ——刀圈顶刀压力分布系数,通常取 0.1;假设一组滚刀每次切割岩石都使其厚度减小了 Δl ,则 $\phi = \arccos\left(\frac{R - \Delta l}{R}\right)$,用 Δl 替换 ϕ ,得到滚动力为:

$$F_r = 2^{-\frac{1}{6}} \frac{C \sigma_c (St)^{\frac{1}{3}}}{1 + \psi} T^{\frac{5}{6}} \Delta l^{\frac{5}{6}} \quad (5)$$

其中, $t = \sigma_t / \sigma_c$ 。

由贯入度 L 定义,有:

$$\Delta l = \frac{\beta}{2\pi} L \quad (6)$$

其中, β 为相邻两列径向布置的滚刀夹角。可得,滚刀滚动力 F_r 与贯入度 L 之间的关系:

$$F_r = \frac{1}{2} \pi^{\frac{5}{6}} \beta^{\frac{5}{6}} \frac{C \sigma_c (St)^{\frac{1}{3}}}{1 + \psi} T^{\frac{5}{6}} L^{\frac{5}{6}} \quad (7)$$

为简化计算,近似定义 F_r 与 L 近似成正比:

$$F_r = k_1 \sigma_c L \quad (8)$$

其中,常数 k_1 可通过回归分析得到。

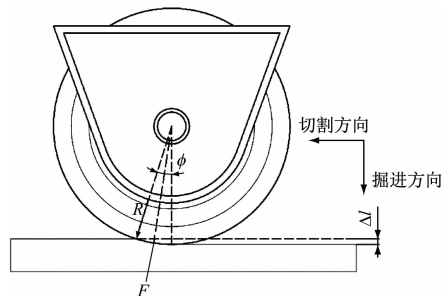


图1 滚刀切割受力图示

Fig. 1 Force diagram of hob cutting

1.2.2 (切刀)切向力

按照地基承载力模型分析计算切刀荷载,如图

2 所示。由刀盘切向受力分析可得:

$$F_t = R_1 \sin \theta + (Q_1 + C_1) \cos \theta + Q_2 + C_2 \quad (9)$$

式中:

Q_1 、 Q_2 —— CD 、 CB 边上的摩擦阻力;

c_1 、 c_2 —— CD 、 CB 边上的黏聚力。

其中, CD 、 BC 破坏面达到极限状态, σ_x 为 CD 边上的正应力。由摩尔-库伦准则可得:

$$\begin{cases} R_1 = \sigma_x r_2 = \sigma_x r_1 e^{\delta \tan \phi} \\ Q_1 = R_1 \tan \phi \\ c_1 = cr_2 = cr_1 e^{\delta \tan \phi} \\ Q_2 = K_0 \gamma H_0 y_{BC} \tan \phi \\ c_2 = cy_{BC} \\ y_{BC} = r_2 \cos \theta - r_1 \sin \alpha = \\ r_1 (e^{\delta \tan \phi} \cos \theta - \sin \theta) \end{cases} \quad (10)$$

式中:

γ ——土体重度;

r_1 、 r_2 ——原点到 B 、 C 的距离;

c ——土体黏聚力;

δ —— OB 与 OC 的边夹角;

y_{BC} ——为 B 点与 C 点的距离。

将上述各项力代入式(9),可得切向力为:

$$\begin{aligned} F_t = & \sigma_x r_1 e^{\delta \tan \phi} \sin \theta + (\sigma_x r_1 e^{\delta \tan \phi} \cdot \\ & \tan \phi + cr_1 e^{\delta \tan \phi}) \cos \theta + (K_0 \gamma H_0 \cdot \\ & \tan \phi + c) r_1 (e^{\delta \tan \phi} \cos \theta - \sin \theta) \end{aligned} \quad (11)$$

由式(11)可知, $F_t \propto r_1$,而 $r_1 = \Delta l \sec \alpha$,因此可得切刀切向力 F_t 同样近似与 L 成正比:

$$F_t = k_2 L + b_2 \quad (12)$$

其中, k_2 、 b_2 为常数,可通过回归分析得到。

1.3 复合地层摩擦扭矩

复合地层盾构掘进过程中刀盘与地层之间的摩擦对扭矩产生贡献很大。在复合地层中,作用在盾构刀盘上的摩擦扭矩包括软岩(土)层和硬岩地

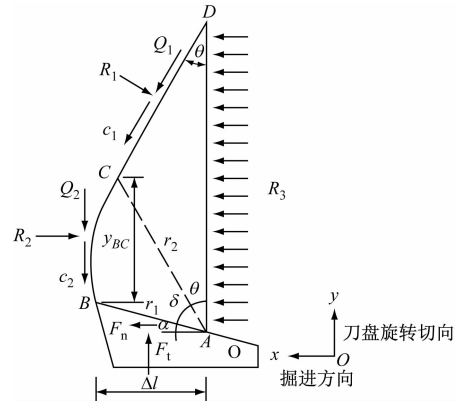


图2 切刀切割受力图示

Fig. 2 Force diagram of scraper cutting

层中的摩擦,两者均可分为:①刀盘正面地层摩擦扭矩 T_{f1} ;②刀盘侧面地层摩擦扭矩 T_{f2} ;③刀盘背面摩擦扭矩 T_{f3} 。刀盘与复合地层相对位置示意如图3所示。

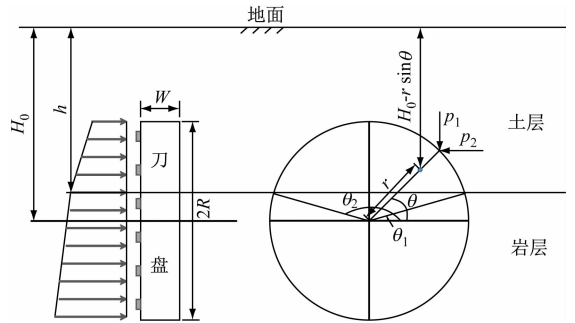


图3 开挖面地层组成和刀具分布简化示意图

Fig. 3 Simplified schematic diagram of excavation surface strata composition and cutting tool distribution

总摩擦扭矩 T_f 可表示为刀盘前后以及侧面的岩土体对刀盘的摩擦扭矩之和:

$$T_f = T_{f1} + T_{f2} + T_{f3} \quad (13)$$

T_{f1} 包括土层中的扭矩 T_{f11} 和岩层中的扭矩 T_{f12} , 积分可得:

$$\begin{cases} T_{f11} = (1 - \eta) \int_{\theta_1}^{\theta_2} \int_{\frac{H_0-h}{\sin \theta}}^{\frac{D}{2}} (H_0 - r \sin \theta) K_0 \gamma_1 f_1 r^2 dr d\theta \\ T_{f12} = (1 - \eta) \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{D}{2}} \gamma_1 h + \gamma_2 (H_0 - r \sin \theta - h) \lambda f_2 r^2 dr d\theta - \\ (1 - \eta) \int_{\theta_1}^{\theta_2} \int_{\frac{H_0-h}{\sin \theta}}^{\frac{D}{2}} \gamma_1 h + \gamma_2 (H_0 - r \sin \theta - h) \lambda f_2 r^2 dr d\theta \end{cases} \quad (14)$$

式中:

η ——刀盘开口率;

K_0 ——土层的静止土压力系数;

λ ——岩层的侧压力系数;

γ_1 ——土层的重度;

γ_2 ——岩层的重度;

θ_1 、 θ_2 ——土岩交界面对应的夹角；
 θ ——某一位置与水平面的夹角；
 D ——刀盘直径；
 h ——土、岩分界面埋深；
 f_1 ——土层与刀盘的摩擦力系数；
 f_2 ——岩层与刀盘的摩擦力系数；
 H_0 ——开挖面中心埋深； r 和 θ 如图 3 所示。

刀盘侧面地层摩擦扭矩 T_{f_2} 包括土层中的扭矩 $T_{f_{21}}$ 和岩层中的扭矩 $T_{f_{22}}$ ，积分可得：

$$\begin{cases} T_{f_{21}} = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{D^2}{4} f_1 W_{p_{11}} \sin^2 \theta d\theta + \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{D^2}{4} f_1 W_{p_{12}} \cos^2 \theta d\theta \\ T_{f_{22}} = \int_0^{\theta_1} \frac{D^2}{4} f_2 W_{p_{21}} \sin^2 \theta d\theta + \int_0^{\theta_1} \frac{D^2}{4} f_2 W_{p_{22}} \cos^2 \theta d\theta + \\ \int_{\theta_2}^{2\pi} \frac{D^2}{4} f_2 W_{p_{21}} \sin^2 \theta d\theta + \int_{\theta_2}^{2\pi} \frac{D^2}{4} f_2 W_{p_{22}} \cos^2 \theta d\theta \end{cases} \quad (15)$$

式中：
 W ——刀盘的厚度；
 p_{11} ——土层边缘横向力；
 p_{12} ——竖向土压力；
 p_{21} ——岩层边缘横向力；
 p_{22} ——竖向土压力。

$$\begin{cases} p_{11} = \gamma_1 \left(H_0 - \frac{D}{2} \sin \theta \right) \\ p_{12} = \gamma_1 K_0 \left(H_0 - \frac{D}{2} \sin \theta \right) \\ p_{21} = \gamma_1 h + \gamma_2 (H_0 - r \sin \theta - h) \\ p_{22} = \gamma_2 \lambda [\gamma_1 h + \gamma_2 (H_0 - r \sin \theta - h)] \end{cases} \quad (16)$$

刀盘背面摩擦扭矩 T_{f_3} 可按照单一土仓压力 p_0 积分计算，有：

$$\begin{aligned} T_{f_3} &= (1 - \eta) \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{D}{2}} p_0 f_s r^2 dr d\theta = \\ &(1 - \eta) \frac{\pi D^3}{12} p_0 f_s \end{aligned} \quad (17)$$

式中：
 f_s ——土仓内土与刀盘之间的摩擦因数。

2 复合地层盾构刀盘扭矩波动分析

复合地层盾构掘进过程刀盘扭矩呈现较大的波动。为研究复合地层盾构掘进过程刀盘扭矩波动特征，分别分析硬岩复合比 V_c 、岩石单轴抗压强度 σ_c 和刀盘贯入度 L 对刀盘扭矩波动的影响。

2.1 切削基本假设

当刀盘在复合地层中旋转时，刀盘一部分位于软层，另一部分位于硬层，如图 3 所示。将本项目复

合地层中的复合比定义为硬岩占开挖面的面积比，计算公式如下：

$$F_c = \frac{S_{\text{硬岩}}}{S_{\text{开挖面}}} = \frac{\pi - 2\theta_1 - \sin 2\theta_1}{2\pi} \quad (18)$$

$$\theta_1 = \arcsin \frac{H_0 - h}{R} \quad (19)$$

式中：
 $S_{\text{硬岩}}$ ——硬岩面积；
 $S_{\text{开挖面}}$ ——开挖面面积；
 $(\pi - 2\theta_1)$ ——硬岩层对应的圆心角；
 R ——开挖面半径，本项目取 6.41 m。

现以铁建重工 DZ423 土压平衡盾构机为研究对象。上部为软岩或土层，下部为硬岩，岩土强度范围为 30 ~ 110 MPa。盾构机刀盘参数如表 1 所述。将参数代入式(3)中可计算有效开挖扭矩。

表 1 刀具配置、土工条件和施工参数
Tab.1 Cutting tool configuration, geotechnical conditions and construction parameters

类别	参数	取值
刀具配置	刀盘直径/mm	6 440
	切刀数量/个	52
	切刀顶角/(°)	60
	切刀齿宽/mm	160
	切刀齿长/mm	100
	滚刀数量/个	40
	滚刀半径/mm	216
	滚刀刃刀宽度/mm	20
	刀盘开口率/%	60
	复合比	0 ~ 1
地质条件	岩石单轴抗压强度/MPa	30 ~ 110
	岩石抗拉强度/MPa	1.2 ~ 4.4
	岩石抗拉抗压强度比值	0.04
	土体黏聚力/kPa	20
	土体内摩擦角/(°)	25
	剪切破坏面与刀盘夹角/(°)	32.5
施工参数	刀盘与土体摩擦因数	0.2
	剪切破坏面的摩擦因数	0.1
	贯入度/(mm/r)	1 ~ 20
	土仓压力/kPa	100

2.2 复合比的影响

图 4 为不同复合比刀盘旋转一周扭矩的波动，其中岩石单轴抗压强度 σ_c 为 70 MPa，贯入度 L 为 10 mm/r。图 4 的结果表明，除复合比为 0 或 1(开

挖面为均质地层)外,开挖扭矩随刀盘旋转而波动,且全断面硬岩地层扭矩明显大于全断面土(软岩)层。图5给出了不同复合比下平均刀盘扭矩及其波动。由图5可知:贯入度不变时,平均扭矩随复合比的增加近似线性增加,最大和最小扭矩值在平均值附近波动。

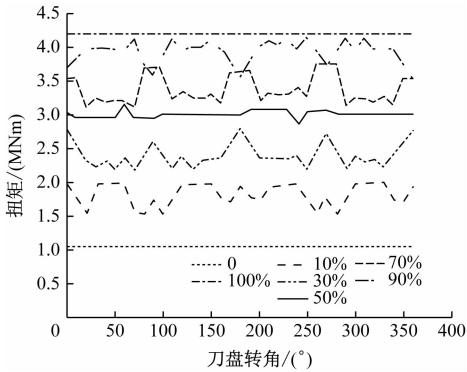


图4 不同复合比(0~100%)刀盘旋转一周扭矩波动 ($\sigma_c = 70 \text{ MPa}$, $L = 10 \text{ mm/r}$)

Fig. 4 Torque fluctuation during one cycle of rotation of cutter head different composite ratios (0 - 100%) ($\sigma_c = 70 \text{ MPa}$, $L = 10 \text{ mm/r}$)

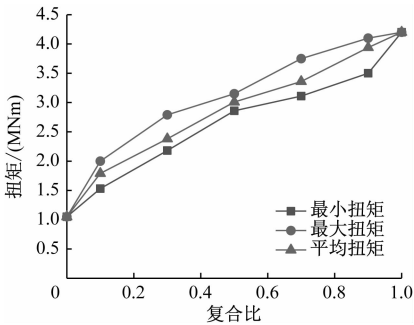


图5 扭矩与复合比的关系($\sigma_c = 70 \text{ MPa}$, $L = 10 \text{ mm/r}$)

Fig. 5 Relationship between torque and composite ratio($\sigma_c = 70 \text{ MPa}$, $L = 10 \text{ mm/r}$)

2.3 岩石单轴抗压强度的影响

图6为刀盘扭矩随单轴抗压强度变化规律。由图6可知,平均扭矩、最大扭矩和最小扭矩随单轴抗压强度的增加呈线性增加,且最大扭矩与最小扭矩的差值也随单轴抗压强度增大而增大,说明刀盘扭矩波动随之变大更加剧烈。

2.4 贯入度的影响

图7为刀盘扭矩随贯入度的变化规律。由图7可知,平均扭矩、最大扭矩和最小扭矩均随贯入度增大近似呈线性增大。且最大扭矩与最小扭矩的

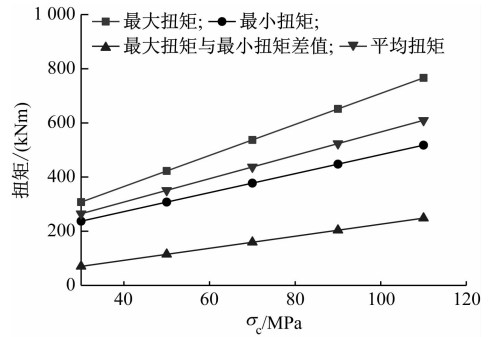


图6 刀盘扭矩与岩石单轴抗压强度的关系($F_c = 50\%$, $L = 10 \text{ mm/r}$)

Fig. 6 Relationship between torque and uniaxial compressive strength($F_c = 50\%$, $L = 10 \text{ mm/r}$)

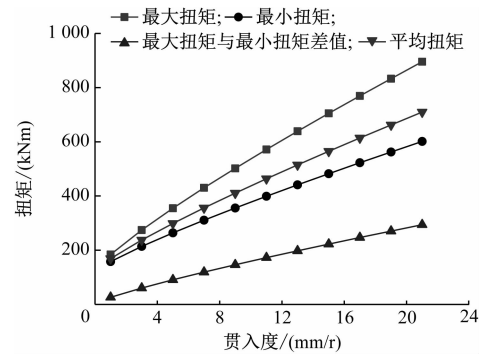


图7 刀盘扭矩与贯入度的关系($F_c = 50\%$, $\sigma_c = 70 \text{ MPa}$)

Fig. 7 Relationship between torque and penetration ($F_c = 50\%$, $\sigma_c = 70 \text{ MPa}$)

差值也随贯入度的增大而增大,这说明在地质条件一定时,扭矩波动随贯入度的增加而增大。适当减小刀盘的贯入度可以减小扭矩波动。然而盾构贯入度大小直接影响掘进速度,因此需要选择合理的贯入度,在保证掘进速度的同时应控制扭矩波动在可接受的范围内。

3 基于机械性能的贯入度预测方法

基于上述分析,提出一种考虑盾构机机械性能的贯入度预测方法,以期复合地层掘进施工提供贯入度控制建议值,进而在保证掘进速度的情况下控制刀盘扭矩波动,以保证掘进施工的安全和效率。

3.1 基本假定及约束条件

由上述扭矩波动影响分析可知,平均刀盘扭矩几乎随着复合比的增加而线性增加。因此,刀盘有效开挖扭矩可简化为:

$$T_c = k_3 V_c + b_3 \quad (20)$$

$$\begin{cases} V_c = 0, & T_c = \sum_{j=1}^{n_l} F_{vj} r_j \\ V_c = 1, & T_c = \sum_{i=1}^{n_r} F_{vi} r_i \end{cases} \quad (21)$$

其中, k_3 , b_3 为常数, 可以通过式(21)的边界条件计算。该式假设当复合比为 0 时, 全断面土、软岩主要受刮刀开挖作用。当复合比为 1 时, 全断面硬岩主要受滚刀开挖作用。此时, 式(21)可以改写为:

$$T_c = V_c \sum_{i=1}^{n_r} F_{vi} r_i - V_c \sum_{j=1}^{n_l} F_{vj} r_j + \sum_{j=1}^{n_l} F_{vj} r_j \quad (22)$$

将上文得到的简化刀具载荷方程式(8)、(12)代入式(22), 则式(20)有效开挖扭矩可表示为:

$$T_c = k_1 R \sigma_c V_c L \sum_{i=1}^{n_r} r_i - k_2 V_c L \sum_{j=1}^{n_l} r_j + k_2 L \sum_{j=1}^{n_l} r_j + (1 - V_c) b_2 \sum_{j=1}^{n_l} r_j \quad (23)$$

式(23)建立了扭矩与硬岩复合比、岩石强度、土体参数之间的约束关系。其结果表明: 复合地层特性与刀盘贯入度之间存在显著的相关性。在此基础上, 将提出一个新的预测参数。

3.2 预测指标

现有盾构掘进参数预测指标包括掘进速度、贯入度和(FPI)总推力与贯入度比值^[7-8]。然而掘进速度和贯入度往往是通过回归分析得到的, 不适用于不同隧道直径和机械配置的施工工况。在复合地层的 FPI 无法较好地反映推力 F 与贯入度的关系, 且在复合地层施工中推力一般不受约束, 而是受扭矩或功率限制。因此, 本文选择复合扭矩贯入指数(I_{MTP})作为复合地层掘进参数预测指标, 定义为有效开挖扭矩与贯入度的比值, 即:

$$I_{MTP} = \frac{T_c}{p} = V_c \left(k_1 R \sigma_c \sum_{i=1}^{n_r} r_i - k_2 \sum_{j=1}^{n_l} r_j \right) + k_2 \sum_{j=1}^{n_l} r_j \quad (24)$$

对于实测数据, 实测复合扭矩贯入指数 I_{MTP} 可如下计算:

$$I_{MTP} = \frac{T_c}{L_o} = \frac{T_{to}/k_{EPB} - T_f}{L_o} \quad (25)$$

式中:

T_{to} ——实测盾构刀盘扭矩;

T_f ——计算所得的摩擦扭矩;

k_{EPB} ——常数, 取 1.1;

L_o ——实测贯入度。

3.3 贯入度预测方法

复合地层贯入度预测方法可分为以下操作步骤:

首先根据勘测的地质参数和盾构机机械配置计算开挖面组成; 通过式(13)和(24)计算摩擦扭矩 T_f 和理论 I_{MTP} ; 然后根据复合地层刀盘扭矩波动特征与盾构机额定扭矩 T_n 限制有:

$$\eta_d T_{to} \leq \xi T_n \quad (26)$$

式中:

η_d ——扭矩放大系数;

ξ ——安全折减系数。

此外, 在盾构机额定功率 P_n 限制下应有:

$$\frac{\eta_d T_{to} v}{9\,550} \leq P_n \quad (27)$$

式中:

v ——刀盘转速。

然后, 结合式(25)可得目标贯入度 L_R 的计算公式为:

$$L_R = \frac{T_c}{I_{MTP}} = \frac{\bar{T}_t/k_{EPB} - T_f}{I_{MTP}} \quad (28)$$

4 实例验证与模型分析

4.1 工程概况

南京轨道交通 DS6 宁句线麒麟镇站—东郊小镇站区间(以下简称“麒东区间”)工程隧道掘进过程穿越由下部坚硬的中风化花岗岩与上部强风化花岗岩、粉质黏土等软岩(土)组成的复合地层。开挖面可分为 3 种类型: 全断面硬岩(占 43%)、全断面软岩、土层(占 27%)和复合地层(占 30%), 区间硬岩复合比如图 8 所示。区间隧道长 1 257 m, 隧道直径为 6.2 m, 最大埋深为 19.97 m。采用铁建重工 DZ4423 土压平衡盾构机进行掘进。

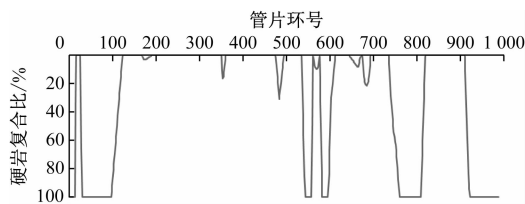


图 8 麒东区间右线硬岩复合比

Fig. 8 Hard rock composite ratio on the right line of Qidong interval

查阅《工程地质手册》, 定义岩石饱和单轴抗压强度在 30 MPa 以上为硬岩, 在 30 MPa 以下为软

岩,本文将中风化花岗岩视为硬岩,将强风化、全风化花岗岩、粉质黏土、残积土视为软岩(土)。岩土参数见表1。

4.2 现场实测刀盘扭矩

本区间复合地层刀盘扭矩波动情况如图9所示,结果表明本区间扭矩放大系数 η_d (最大扭矩与平均扭矩的比值)主要分布在1.10~1.80之间,平均为1.43。此外,为防止过大的扭矩波动导致刀盘停转等危险,应将扭矩控制在额定扭矩的50%以下,即安全折减系数取50%。

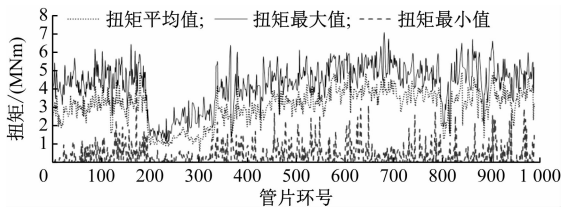


图9 麒东区间右线扭矩波动特征

Fig. 9 Characteristics of torque fluctuation on the right line of Qidong interval

4.3 模型验证

分析了麒东区间复合地层区段第560环—第730环掘进数据,根据式(24)和式(25)计算得到复合扭矩贯入指数(I_{MTP})的理论值与实测值,并将两者进行对比,如图10所示。

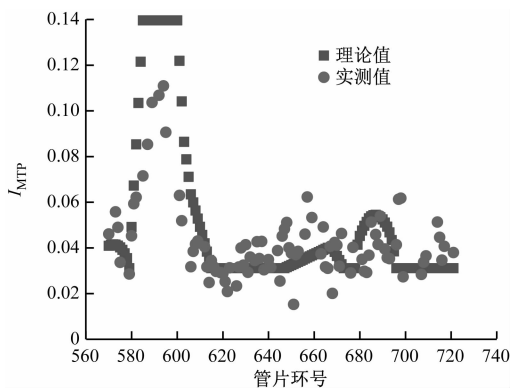


图10 I_{MTP} 模型预测结果与实测结果对比验证

Fig. 10 Comparison and verification between model prediction results and actual measurement results of I_{MTP}

图10的结果表明,预测值与实测值较为接近,能满足工程需求,预测值与实测值的偏差可能是未考虑岩体节理等特征的缘故。

5 结语

1) 与硬岩地层推力限制不同,在复合地层中刀

盘扭矩是主要的限制因素,建立了一种半理论复合地层盾构刀盘总扭矩计算模型。

2) 分析了刀盘扭矩波动影响特性,发现在贯入度相同的情况下,平均扭矩随着复合比的增加几乎呈线性增加;随着岩石单轴抗压强度和贯入度的增大,扭矩波动更加剧烈;适当减小刀盘贯入度可以减小扭矩波动。

3) 提出了一种复合地层掘进参数预测指标—— I_{MTP} ,并构建了一种基于机械性能的贯入度预测方法,通过麒东区间进行了模型验证,预测结果与实测数据较为接近,验证了该方法的预测能力。

参考文献

- [1] 王洪新,傅德明.土压平衡盾构掘进的数学物理模型及各参数间关系研究[J].土木工程学报,2006,39(9):86.
WANG Hongxin, FU Deming. A mathematical model and the related parameters for EPB shield tunneling[J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(9): 86.
- [2] 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(增刊1):94.
YANG Yang, TAN Zhongsheng, 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.
- [3] 范文超,孙振川,李凤远,等.汕头海湾隧道复合地层超大直径泥水盾构掘进参数预测研究[J].隧道建设(中英文),2020,40(8):1160.
FAN Wenchao, SUN Zhenchuan, LI Fengyuan, et al. Research on prediction of tunneling parameters of super-large diameter slurry shield in composite strata of shantou bay tunnel[J]. Tunnel Construction, 2020, 40(8): 1160.
- [4] 李杰,张斌,付柯,等.基于现场掘进数据的复合地层盾构掘进性能预测方法研究[J].现代隧道技术,2019,56(4):97.
LI Jie, ZHANG Bin, FU Ke, et al. Site data based prediction of shield driving performance in compound strata[J]. Modern Tunneling Technology, 2019, 56(4): 97.
- [5] 张志奇,李彤,韩爱民,等.复杂地层盾构掘进速率和刀盘扭矩预测模型及其地层适应性研究[J].隧道建设,2016,36(12):1449.
ZHANG Zhiqi, LI Tong, HAN Aimin, et al. Prediction models of advancing speed and cutterhead torque of shield tunneling in complex strata and its adaptability to strata[J]. Tunnel Construction, 2016, 36(12): 1449.
- [6] 李超,李涛,李正,等.基于BP神经网络的复合地层盾构掘进参数预测与分析[J].土木工程学报,2017,50(增刊1):145.
LI Chao, LI Tao, LI Zheng, et al. Prediction and analysis of shield boring parameters in a mixed ground based on BP neural network[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(S1): 145.

(收稿日期:2021-06-03)