

复合地层土压平衡盾构掘进参数模拟分析研究

李明阳¹, 杨海涛², 邹高明³

(1. 常州数尔精密机械有限公司, 江苏 常州 213135; 2. 广州市盾建地下工程有限公司, 广州 510030;
3. 中铁十一局集团城市轨道交通工程有限公司, 武汉 430074)

摘要: 复合地层特别是软硬交互地层的盾构掘进参数模拟与预测理论及方法研究, 目前还处于薄弱阶段。基于 Terzaghi 松动土压力模型与 CSM(科罗拉多矿业学院)模型, 对广州地铁3号线大石—汉溪区间不同风化程度混合岩地层的土压平衡盾构掘进表现分别进行模拟分析, 结果基本符合实际的掘进表现, 但在贯入度大于 20 mm/r 的硬岩掘进情况下推力及扭矩模拟值与实际值存在较大正负差异。针对这种正负差异情况, 分析可能产生的原因。通过对软硬交互复合地层的盾构受力分析, 模拟计算在软硬地层各占 50% 情况下的推力与扭矩值, 结果表明, 总推力和扭矩的模拟值均在实际值范围内, 验证了采用的综合考虑软土和硬岩模拟分析结果的复合地层掘进参数模拟分析方法的有效性。

关键词: 软弱地层; 硬岩地层; 软硬交互地层; 复合地层; 土压平衡模式; 敞开模式; 半敞开模式; 模拟分析

DOI: 10.3973/j.issn.1672-741X.2012.03.005

中图分类号: U 455

文献标志码: A

文章编号: 1672-741X(2012)03-0287-09

Simulation Analysis on Boring Parameters of EPB Shield in Complex Strata

LI Mingyang¹, YANG Haitao², ZOU Gaoming³

(1. Changzhou Shuer Precision Machinery Co., Ltd., Changzhou 213135, Jiangsu, China;

2. Guangzhou Municipal Dunjian Underground Construction Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510030, China;

3. Urban Mass Transit Engineering Co., Ltd. of China Railway 11th Construction Bureau Group, Wuhan 430074, China)

Abstract: The simulation and prediction of shield boring parameters in complex strata are still in weak positions. The boring performance of EPB shields in the complex strata in Dashi-Hanxi running tunnel on No. 3 line of Guangzhou Metro is simulated and analyzed by means of Terzaghi loose soil pressure model and CSM model. The simulation results coincide with the actual boring performance, except that there are great differences between the simulated thrust and torque values and the measured values when boring in hard rocks with 20 mm/r penetration rate. The causes for the differences are analyzed. The thrust and torque when boring in complex ground with soft and hard rocks are calculated. The simulation results show that the simulated total thrust and torque are within the range of the measured values. The effectiveness of the mentioned simulation and calculation method is verified.

Key words: soft ground; hard rock; complex ground; EPB shield; open mode; semi-open mode; simulation analysis

0 引言

随着 40 台次盾构在广州和深圳地区复合地层 100 km 的实践, 复合地层的概念逐步形成, 复合地层盾构施工技术有了突破性的进展^[1-2]。文献[3]针对广州地铁软硬不均地层的盾构施工, 提出了复合盾构的设计思想, 对复合盾构的功能及技术参数进行了研究, 分析了刀盘、刀具与地质的适应性; 文献[4]对孤石复合地层盾构施工技术进行了探索, 总结出盾构通过孤石存在的问题和难点, 并提出了针对性的解决方

法; 文献[5]对新加坡 Kranji 隧道不同风化程度的花岗岩软硬交互地层的盾构掘进过程中遇到的施工难点(如刀具与刀盘的过度磨损、开挖面失稳及地面塌陷、轴向推力控制困难等)进行了分析, 并根据分析结果对其中的北线盾构进行了地质适应性调整。

相对于复合地层盾构技术的发展, 复合地层特别是软硬交互地层的盾构掘进参数模拟与预测理论及方法研究, 目前还处于薄弱阶段。但是, 对于全断面岩石地层的 TBM 隧道掘进的施工预测模型的研究, 却一

收稿日期: 2012-02-16; 修回日期: 2012-02-29

作者简介: 李明阳(1970—), 男, 湖南永州人, 1995年毕业于南方冶金学院(现江西理工大学)矿山机械工程专业, 硕士, 工程师, 从事隧道盾构应用技术工作。

直是一个比较热门的研究课题^[6],其中最成功的预测模型是科罗拉多矿业学院提出的 CSM 模型和挪威科技大学提出的 NTH 模型^[7]。

对于软弱地层,其掘进参数的预测模型与方法,国内外已有一些相关研究^[8-13]。总结其思路,基本上是综合采用理论或经验公式、模型试验、现场试验、力学分析等方法,研究推力、扭矩、推进速度、刀盘转速、土仓(或切口)压力等掘进参数之间的相互关系,并取得了较好的实际应用效果。

本文基于 Terzaghi 松动土压力模型与 CSM 模型,以广州地铁 3 号线大石—汉溪区间不同风化程度混合岩地层的土压平衡盾构掘进为例,对该段复合地层中典型的软弱地层、硬岩地层及软硬交互地层的盾构掘进参数进行模拟计算。

1 工程概况

广州地铁 3 号线大石—汉溪盾构区间,地处广州市番禺区北 7 km,距广州市约 15 km,里程为 YDK15 + 855.5 ~ YDK19 + 830。隧道覆土厚度为 1.5 ~ 40 m,本区间大石至礼村为天河向斜的南翼,岩层倾北,为白鹤洞组猴岗段红层;汉溪站附近为顺德向斜的东北翼,倾向南西,为上元古界震旦系变质岩。本标段构造主要有礼村断裂带,走向为 NE65 ~ 75°,主断裂带宽 50 ~ 60 m,影响范围约 200 m(里程 YCK16 + 340 ~ + 540)。断裂带北侧为红层地层,南侧为震旦系变质岩。

本标段隧道范围内通过的主要地层有:红层的中、微风化泥质粉砂岩;细砂岩和混合岩区的残积土;强、中、微风化混合岩;礼村断裂带硅化角砾岩。大石—双溪盾构区间地质剖面图见图 1。

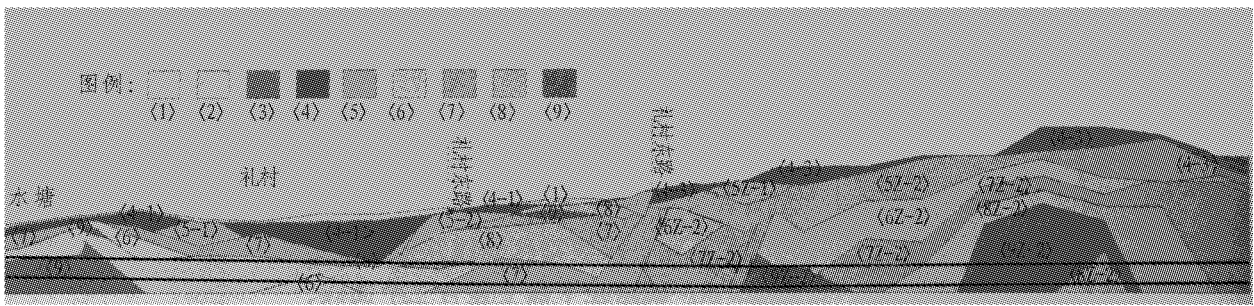


图 1 大石—汉溪站盾构区间地质剖面图

Fig. 1 Geological profile of Dashi-Hanxi shield-bored tunnel

礼村断裂带由构造角砾岩、硅化构造角砾岩和断层泥组成,岩石质量指标(RQD)为 98%,单轴抗压强度(f_c)为 67.4 ~ 156.5 MPa,富水性强。礼村断裂带地质剖面图见图 2,其中的混合岩地层岩性特征见表 1。

2 盾构机情况

本区间采用 2 台海瑞克 EPB 盾构机,盾构机自质量为 370 t。刀盘经重新设计制造,可以双向旋转,直径为 6 280 mm,总质量为 57 t,装硬岩刀具时开口率为 29%,装软岩齿刀时开口率为 31%(见图 3)。

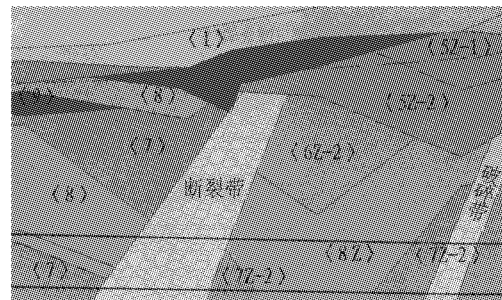


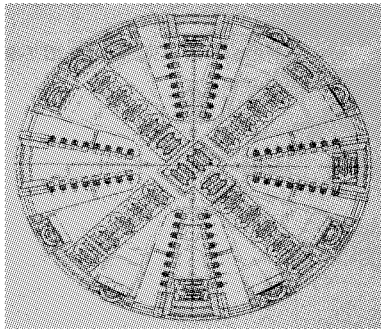
图 2 礼村断裂带地质剖面图

Fig. 2 Geological profile of Licun fracture zone

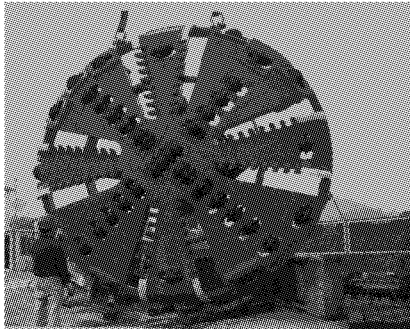
表 1 礼村断裂带以南的混合岩地层岩性特征

Table 1 Characteristics of mixed ground to south of Licun fracture zone

时代	地层编号	岩、土层名称	厚度/m	岩性特征
第四系 (Q)	<1>	人工填土	0.5 ~ 4.2	素填土
	<3-2>	冲洪积砂层	1.2 ~ 6.0	由细砂和中砂组成;稍-中密
	<4-1>	冲洪积土层	0.4 ~ 7.8	粉质黏土、粉土为主;可硬塑状
	<4-2>	河湖相淤泥质土层	0.4 ~ 5.4	分布于池塘底部;软、流塑状
	<4-3>	坡积土层	0.4 ~ 5.4	粉质黏土、砂质黏性土为主,分布于残丘坡地及坡脚;可硬塑状
白垩系 (K)	<5Z-2>	混合岩残积土	1.0 ~ 1.4	主要是砂质黏性土,遇水易软化;硬塑状,为Ⅲ级围岩
	<6Z-2>	混合岩全风化带	1.2 ~ 19.5	由混合岩风化而成,呈坚硬土状,遇水易软化崩解,为Ⅲ级围岩
	<7Z-2>	混合岩强风化带	0.2 ~ 45.6	呈半岩半土状,遇水易软化,为Ⅳ级围岩
	<8Z-2>	混合岩中风化带	1.0 ~ 27.8	岩质稍硬-较坚,岩石抗压强度为 7.0 ~ 70.6 MPa,为Ⅴ级围岩
	<9Z-2>	混合岩微风化带	1.0 ~ 24.1	岩质致密坚硬,岩石抗压强度为 6 ~ 106 MPa,为Ⅵ级围岩



(a)



(b)

图3 刀盘结构图及安装滚刀刀盘照片

Fig. 3 Structure of cutter head and picture of cutter head with disc cutters

刀具配置情况为:按地层情况选择使用17"单(双)刃滚刀、正面刮刀、边缘刮刀和正面齿刀。滚刀刀刃距刀盘面板的高度为175 mm,齿刀和刮刀的刀刃距刀盘面板的高度为140 mm,滚刀刀刃高出齿刀和刮刀35 mm。在软弱地层,中心滚刀及部分正面滚刀更换为齿刀。滚刀数量与刀间距为:中心刀8把,间距为90 mm;正面滚刀20把,间距为100 mm;边缘滚刀11把,间距为26~52 mm。刀具见图4—7。

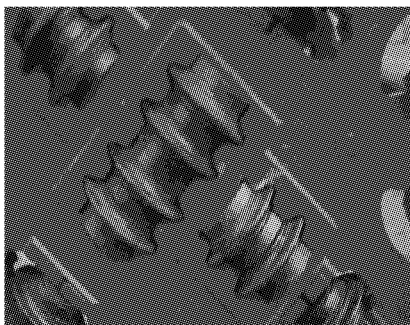


图4 中心滚刀

Fig. 4 Center disc cutters



图5 正面单刃滚刀

Fig. 5 Single disc cutters



图6 正面刮刀

Fig. 6 Face scrapers

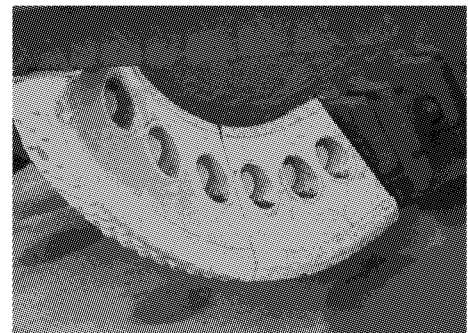


图7 边缘刮刀

Fig. 7 Contour scrapers

3 软弱地层的盾构掘进表现与分析——土压平衡模式

3.1 基础数据

在软弱地层,中心滚刀及部分正面滚刀更换为齿刀。

本区间的软弱地层大部分为全-强风化混合岩<6Z-2>和<7Z-2>地层。该地层的主要物理指标见表2。部分软弱地层实际掘进参数见表3。

表2 软弱地层物理指标

Table 2 Physical parameters of soft ground

地层	基本物理指标		剪切试验		允许承载力/kPa	标贯击数
	含水量/%	湿密度/(g/cm ³)	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)		
<5Z-2>	11.5~41.6	1.63~2.08	10~50.6	6.4~32.9	350~400	16~38
<6Z-2>	14.7~38.5	1.73~2.058	4.9~64	10.0~34.1	350~400	25~55
<7Z-2>	9.50~33.3	1.72~1.98	3.0~82	10.8~52.8	500	55~95

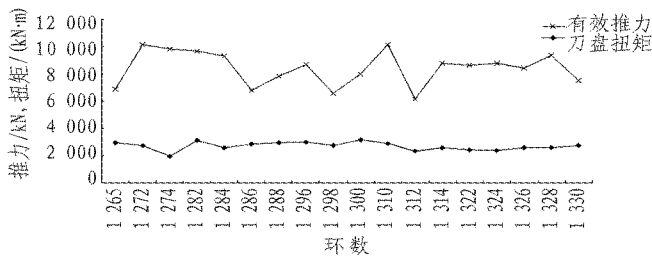
表 3 软弱地层掘进参数
Table 3 Shield boring parameters in soft ground

环号	速度/(mm/min)	转速/(r/min)	刀盘扭矩/(kN·m)	总推力/kN	贯入度/(mm/r)	土压力/MPa
1 265	59	1.81	2 945	9 359	32.60	0.080
1 272	49	1.76	2 736	12 740	27.84	0.084
1 274	34	1.80	1 957	11 574	18.89	0.056
1 282	70	1.78	3 116	12 172	39.33	0.080
1 284	25	1.72	2 584	11 956	14.53	0.085
1 286	28	1.75	2 831	9 241	16.00	0.079
1 288	47	1.70	2 969	10 182	27.65	0.075
1 296	61	1.81	3 002	11 731	33.70	0.098
1 298	78	1.77	2 755	10 231	44.07	0.117
1 300	71	1.76	3 135	11 103	40.34	0.100
1 310	84	1.74	2 869	12 995	48.28	0.091
1 312	74	1.74	2 299	9 467	42.53	0.106
1 314	77	1.74	2 584	11 633	44.25	0.092
1 322	74	1.77	2 432	11 368	41.81	0.088
1 324	32	1.79	2 375	11 878	17.88	0.100
1 326	62	1.75	2 603	11 280	35.43	0.093
1 328	55	1.67	2 565	12 377	32.93	0.097
1 330	73	1.80	2 755	10 564	40.56	0.098
平均值	59	1.76	2 695	11 214	33.26	0.090

3.2 数据分析

3.2.1 计算有效推力

将土压反力剥离,计算出包含盾体摩擦阻力、盾尾拉力及刀具切削阻力的有效推力。软弱地层的有效推力与刀盘扭矩见图 8。



刀盘扭矩为盾构实际记录的扭矩。

图 8 软弱地层的有效推力与刀盘扭矩

Fig. 8 Effective thrust force and cutter head torque in soft ground

3.2.2 分析贯入度与有效推力和刀盘扭矩的关系

根据每环推进速度及刀盘转速计算贯入度。经一阶线性拟合,得到贯入度与有效推力和刀盘扭矩的一阶线性关系(见图 9 和图 10)。

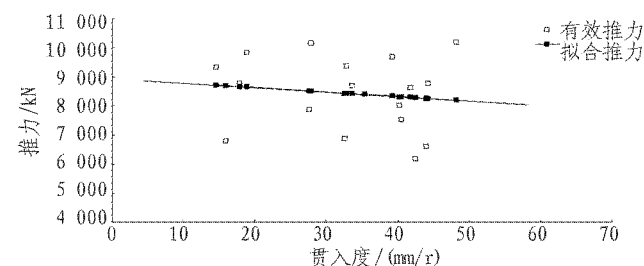


图 9 软弱地层有效推力与贯入度的关系

Fig. 9 Correlation between effective thrust force and penetration rate when boring in soft ground

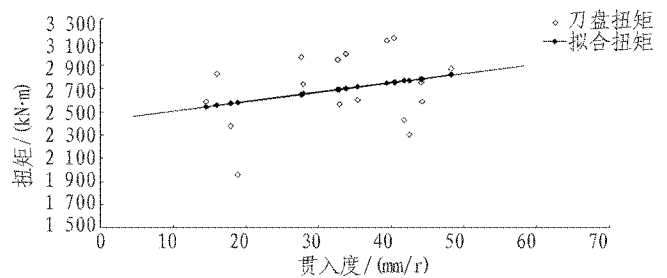


图 10 软弱地层刀盘扭矩与贯入度的关系

Fig. 10 Correlation between cutter head torque and penetration rate when boring in soft ground

由图 9 和图 10 可初步得出以下结论:

1) 在软弱地层,贯入度与有效推力的相关系数为 -0.13,呈低度负相关;贯入度与刀盘扭矩的相关系数为 0.28,接近中度正相关。贯入度对推力及刀盘扭矩有一定的正负影响。

2) 贯入度与有效推力的线性关系为 $F = a_1 - 15.61P$ (a_1 为克服盾体摩擦阻力和盾尾拉力的初始启动推力,取值 8 945 kN; P 为刀具贯入度,mm/r)。

3) 贯入度与刀盘扭矩的线性关系为 $T = a_2 + 8.09P$ (a_2 为在土仓充满渣土但刀盘没有切削的情况下克服刀盘内外各种阻力矩的初始启动扭矩(即非破岩(土)阻力矩),取值 2 426 kN·m; P 为刀具贯入度,mm/r)。

4) 在低贯入度情况下($P < 25$ mm/r),随着贯入度的增大,有效推力变化不明显,扭矩有明显变小的趋势;但随着贯入度的增大(28 mm/r $< P < 44$ mm/r),正面刮刀逐渐参与切削,有效推力有变小趋势,扭矩有明显增大的趋势。

3.2.3 初始启动推力及初始启动扭矩的模拟计算

软弱地层物理指标及土层厚度值见表4。考虑隧道埋深及盾构经过的岩土特征情况,按 Terzaghi 松

动土压力模型计算盾构的垂直土压力是合理的^[14]。水平土压力根据垂直土压力与静止侧压力系数来计算。

表4 计算用软弱地层物理指标及土层厚度值

Table 4 Physical parameters and thickness of soft soil used for calculation

地层代号	岩土名称	天然密度/(g/cm ³)	土黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	土层厚度/m	静止侧压力系数
<5Z-2>	砂质黏性土	1.90	28.00	24.00	8.00	0.59
<6Z-2>	粉质黏土	1.95	28.00	24.00	24.00	0.59

注:静止侧压力系数 $k = 1 - \sin \theta$ 。

模拟计算得到盾体摩擦阻力(包括前盾和中盾)为5 483 kN,加上刀盘平均土压阻力2 790 kN(见表3,取平均土压值0.09 MPa,刀盘面积按31 m²计算)及盾尾平均拉力1 285 kN(见表5 盾尾拉力,取平均值),得到初始启动推力的模拟值(9 558 kN)。与一阶线性拟合值 a_1 比较,其差值为613 kN,误差为6.9%。

模拟计算得到的刀盘扭矩值(不含切削土体的阻力矩)为2 683 kN·m(包括刀盘前后盘面所受的摩擦阻力矩1 220 kN·m,刀盘开口处切削渣土所需的阻力矩843 kN·m,刀盘其他部分(土仓内搅拌棒、刀盘上转臂、刀盘周向外侧)所受的阻力矩之和620 kN·m,分别占45%、31%、24%)。与一阶线性拟合值 a_2 比较,其差值为257 kN·m,误差为10.6%。

由上述分析可以得出:1)基于 Terzaghi 松动土压力模型计算的初始启动推力和启动扭矩模拟值与现场实际值的一阶线性拟合计算值相比,其误差均小于

11%,满足工程需要;2)模拟计算值或一阶线性拟合计算值(a_1 及 a_2)可以作为该刀盘在类似软弱地层中初始启动推力和启动扭矩的参考值,也可用于复合地层软土部分的推力和扭矩的模拟计算分析。

4 硬岩地层的盾构掘进表现与分析——半敞开或敞开掘进模式

4.1 基础数据

本区间盾构隧道除礼村断裂带局部有高强度硅化角砾岩外,有6段穿越单轴抗压强度 ≥ 80 MPa的中风化-微风化的混合岩岩层,围岩分别为V~VI级,稳定性好,岩土质量指标为27%~85%,最大单轴抗压强度为113 MPa,总长185 m。盾构在此地段基本上采用半敞开或敞开模式掘进。

取左线ZDK16+614~+660为例,其实际掘进参数见表5。

表5 硬岩地层掘进参数

Table 5 Boring parameters in hard rock strata

环号	速度/(mm/min)	转速/(r/min)	刀盘扭矩/(kN·m)	总推力/kN	贯入度/(mm/r)	盾尾拉力/kN
483	23	1.70	2 570	11 466	13.53	1 245
486	53	1.70	2 950	11 760	31.18	1 254
489	50	1.70	2 850	12 250	29.41	784
492	10	1.70	1 330	8 330	5.88	2 009
495	13	1.71	1 560	10 388	7.60	1 568
498	15	1.65	1 560	11 564	9.09	1 450
501	38	1.70	2 030	11 858	22.35	1 000
504	17	1.67	1 630	11 642	10.18	1 401
507	26	1.71	2 320	11 642	15.20	1 000
510	42	1.61	2 380	11 956	26.09	1 137

4.2 CSM 模型模拟计算与分析

4.2.1 输入参数

运用 CSM 模型计算刀盘破岩阻力及阻力矩,需要输入刀具参数、刀具在刀盘上的位置参数(半径及与隧道轴线的夹角)和岩石参数。

1)刀具参数。滚刀半径为216 mm,刀尖宽度为20 mm,刀尖压力分布系数为0.1。

2)岩石参数。低强度条件,岩石单轴抗压强度为80 MPa;高强度条件,岩石单轴抗压强度为110 MPa;岩

石抗拉强度分别取单轴抗压强度值的1/10计算。

3)刀具位置参数。本文不作阐述。

4.2.2 模拟值与有效值对比分析

在相同的掘进环数上,取相同的贯入度,先分别计算低强度和高强度条件下的阻力和阻力矩,再与有效推力和有效扭矩进行比较(有效推力为扣除盾尾拉力后的实际推力,包括克服滚刀破岩阻力和盾体摩擦阻力的作用推力;有效扭矩为实际扭矩),结果如图11和图12所示。

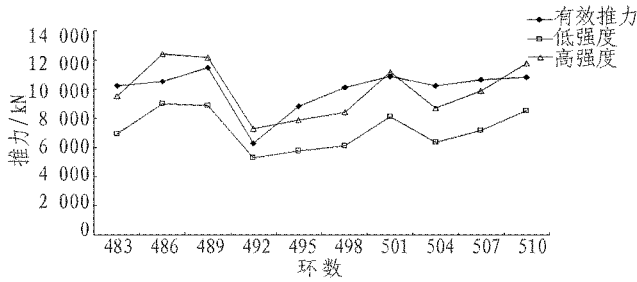


图 11 硬岩地层破岩阻力模拟值与有效推力对比 (按环数)

Fig. 11 Correlation between simulated rock breaking resistance and effective thrust force when boring in hard rock strata (according to ring number)

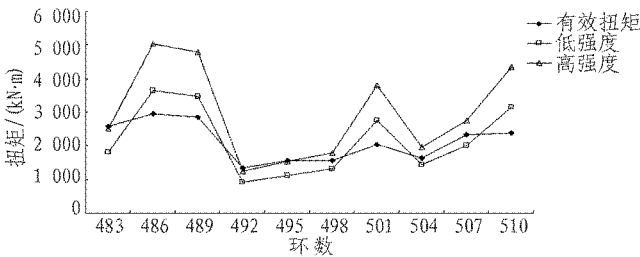


图 12 硬岩地层破岩阻力矩模拟值与有效扭矩对比 (按环数)

Fig. 12 Correlation between simulated rock breaking resistance and effective torque when boring in hard rock strata (according to ring number)

按不同的掘进贯入度排序,分别对推力和扭矩的模拟值与有效值进行对数拟合分析,结果如图 13 和 14 所示。

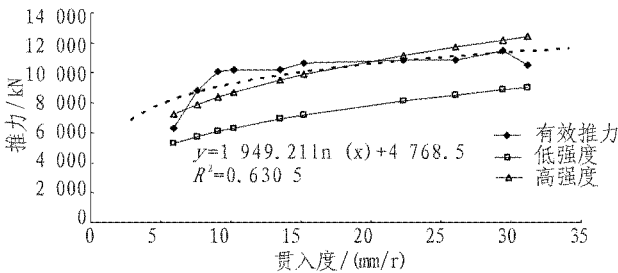


图 13 硬岩地层破岩阻力模拟值与有效推力对比 (按贯入度)

Fig. 13 Correlation between simulated rock breaking resistance and effective thrust when boring in hard rock strata (according to penetration rate)

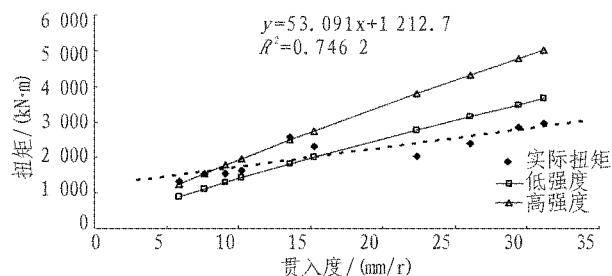


图 14 硬岩地层破岩阻力矩模拟值与有效扭矩对比 (按贯入度)

Fig. 14 Correlation between simulated rock breaking resistance and effective torque when boring in hard rock strata (according to penetration rate)

综合分析模拟计算结果,可得出以下结论:

1)在低贯入度范围($P < 15 \text{ mm/r}$),考虑盾体摩擦阻力的影响,有效推力和扭矩与高强度岩石条件模拟值基本吻合;在高贯入度范围($P > 20 \text{ mm/r}$),相对而言,有效推力和扭矩与低强度岩石模拟条件更吻合。这与实际盾构操作模式是相吻合的。

2)在低贯入度范围($P < 15 \text{ mm/r}$),有效推力和扭矩与 CSM 模型高强度条件下的模拟值的差值见表 6。

表 6 低贯入度情况下的推力差与扭矩差

Table 6 Thrust differences and torque differences under low penetration rates

贯入度/(mm/r)	推力差/kN	扭矩差/(kN·m)
5.88	-949	86
7.60	912	18
9.09	1 731	-230
10.18	1 544	-337
13.53	685	74
15.20	743	-432

考虑地质条件的突变性,剔除表 6 第 1 项数据,计算其余 5 项数据的平均值,推力差平均值为 1 123 kN,扭矩差呈正负波动,其平均值为 -181 kN·m。推力差与测算硬岩掘进盾体摩擦阻力(1 062 kN)比较接近。

3)在高贯入度范围($P > 20 \text{ mm/r}$),有效推力和扭矩与 CSM 模型低强度条件下的模拟值的差值见表 7。

表 7 高贯入度情况下的推力差与扭矩差

Table 7 Thrust differences and torque differences under high penetration rates

贯入度/(mm/r)	推力差/kN	扭矩差/(kN·m)
22.35	2 720	-734
26.09	2 279	-769
29.41	2 603	-630
31.18	1 483	-705
平均值	2 271	-709

由表 6 和表 7 可以看出:①在高贯入度情况下,推力差与测算硬岩掘进盾体摩擦阻力(1 062 kN)相差较大,两者的差值为 $2 271 - 1 062 = 1 209 \text{ kN}$ 。分析其原因为:在敞开模式下,可能是由于开挖速度的增大而导致土仓渣土堆积压力增加形成的;在半敞开模式下,暂时性的螺旋机出土停止,使土仓下部充土,以及向开挖面和土仓内注入渣土改良材料和加压缩空气,都可导致推力的增加(由于缺乏实际掘进的模式选择数据和半敞开模式下的土仓压力数据,故不能进行定量分析);在高贯入度情况下,边缘滚刀磨损量加大,开挖面径向超挖量缩小,盾体摩擦阻力增大导致推力

增加。②在高贯入度情况下,刀盘扭矩差值均呈现负值,对其合理的解释是在此掘进环数上,实际的岩石强度要低于低强度条件下的单轴抗压强度(80 MPa)。如果这个推论成立的话,则按CSM模型计算的推力差将更大。按上述分析可知,土仓中渣土沉积状况或改良效果对中低强度硬岩地层的高贯入度掘进效果会产生重要影响。

4)运用CSM模型计算滚刀平均推力模拟值,结果如表8所示。

表8 滚刀平均推力模拟值

Table 8 Simulated average thrust forces of disc cutters

模拟条件	贯入度/(mm/r)	平均推力/kN
低贯入度、高强度	5.88	186
	7.60	203
	9.09	215
	10.18	223
	13.53	245
高贯入度、低强度	15.20	254
	22.35	209
	26.09	219
	29.34	227
	31.18	231

由表8可以得出:①在高、低强度条件下,滚刀平均推力模拟值基本上都小于滚刀的额定承载力(250 kN),这与该标段滚刀消耗分析的主要磨损方式(即正常磨损)相吻合;②由于该值非常接近滚刀的承载力,导致滚刀的刀圈磨损加大,轴承寿命降低,刀具的消耗加大;③建议按滚刀承载力(250 kN)的75%取值。此时,高强度岩石的合适贯入度为6 mm/r,低强度岩石的合适贯入度为18 mm/r。

4.2.3 有关CSM模型计算的其他影响因素

1)在以上硬岩掘进贯入度与推力和扭矩关系的分析过程中,基本假定岩石强度参数没有变化。实际影响因素有:本案例中的岩石单轴抗压强度为80~113 MPa;缺乏岩石抗拉强度数据,在计算时做了技术简化;除了强度对岩石开挖有重大影响外,岩石质量指标也对滚刀贯入度有较大影响(本案例中的岩石质量指标为27%~85%)。针对岩石质量指标对刀具贯入度的影响,CSM模型中推荐采用修正系数对贯入度进行修正:

$$f = 1.0 + (100 - RQD) / 150 (f_c < 110 \text{ MPa});$$

$$f = 1.0 + (100 - RQD) / 75 (f_c \geq 110 \text{ MPa}).$$

式中: f 为贯入度修正系数; RQD 为岩石质量指标; f_c 为单轴抗压强度。

2)刀圈磨损导致的刀刃宽度和刀圈半径的变化,直接影响滚刀破岩的推力模拟计算。

5 软硬交互地层掘进——土压平衡模式

5.1 基础数据

礼村断裂带之后(里程YDK16+640~+710),隧道洞身下部为中风化混合岩,上部为全-强风化混合岩,岩层节理发育,结构破碎,地下富水性强。实际掘进参数为:推力13 720~17 642 kN,推进速度10~20 mm/min,刀盘转速1.7~1.8 r/min,刀盘扭矩1 330~2 280 kN·m;土仓上部土压0.1~0.14 MPa。

文献[15]给出了在该段的具体掘进参数折线图。依据该图取近似值,软硬交互地层掘进参数见表9,总推力与贯入度的变化情况见图15。

表9 软硬交互地层掘进参数

Table 9 Boring parameters in complex ground with soft and hard rock

环号	速度/(mm/min)	转速/(r/min)	总推力/kN	贯入度/(mm/r)
489	17	1.75	19 600	9.71
490	16	1.75	19 600	9.14
491	13	1.75	13 720	7.43
492	13	1.75	13 720	7.43
493	8	1.75	13 720	4.57
494	8	1.75	14 700	4.57
495	8	1.75	13 720	4.57
496	8	1.75	13 720	4.57
497	12	1.75	13 720	6.86
498	17	1.75	13 720	9.71

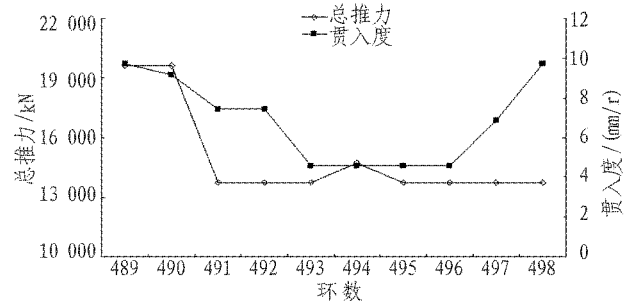


图15 软硬交互地层的总推力与贯入度(按环数)

Fig. 15 Correlation between total thrust force and penetration rate when boring in complex ground with soft and hard rock (according to ring number)

由图15可以看出:该段软硬交互地层493至496环的贯入度最小(4.57 mm/r),总推力从491环开始由19 600 kN急剧下降到13 720 kN,并保持到498环。这在很大程度上降低了刀具所受的冲击荷载,避免了滚刀刀圈的非正常损害,为顺利掘进创造了条件。

5.2 模拟计算与分析

为模拟分析计算软硬交互地层,假设硬岩区占隧道全断面面积比为50%。

5.2.1 推力分析

在上软下硬复合地层,盾构总推力包括破岩(土)阻力、土压反力、盾体摩擦阻力和盾尾(平均)拉力。

由于贯入度较小,盾构实际作用刀具为滚刀。滚刀刀刃切削土体的阻力较小,而滚压破岩的阻力大,实际计算可以忽略滚刀切削土体阻力,按硬岩破岩阻力计算。根据假设,取全断面总破岩阻力的 1/2 计算。

由于土压的存在以及掘进速度较慢等原因,盾体外围的空隙被软土充实,盾体所受摩擦阻力与全断面硬岩区的情况完全不一样,其值应小于全断面软土条件的摩擦阻力。计算时可以按全断面软弱地层条件,取上述的模拟计算值(初始启动推力值 a_1)使用。需要说明的是,该初始启动推力已包含克服盾体摩擦阻力、盾尾平均拉力的所有推力。土压反力的计算相同于全断面软土条件。

5.2.2 扭矩分析

5.2.2.1 上软下硬复合地层扭矩分析

在上软下硬复合地层,盾构刀盘扭矩包括破岩(土)阻力矩及非破岩(土)阻力矩。

由于贯入度较小,盾构实际作用刀具为滚刀,滚刀所受的破岩阻力矩应计入刀盘扭矩中。对于软土刀具,其破岩(土)阻力矩相对为零。根据假设,滚刀所受的破岩阻力矩取全断面总破岩阻力矩的 1/2 计算。

非破岩(土)阻力矩主要包括刀盘前后盘面所受的摩擦阻力矩、刀盘开口处切削渣土所需的阻力矩及其他刀盘部位的阻力矩(土仓内搅拌棒、刀盘上转臂和刀盘周向外侧)。根据上述软弱地层的模拟计算分析,三者在全断面软弱地层中所占非破岩(土)阻力矩的比例为 45%、31%、24%。

5.2.2.2 软硬断面面积比对阻力矩的影响分析

在软硬交互地层中,刀盘前后盘面所受的摩擦阻力矩直接受软硬断面面积比的影响。在开挖速度慢、平稳掘进和渣土流动性良好的状态下,土仓中的土压反力更多地作用在上部软弱土层,导致刀盘上部的前后面承受主要的摩擦阻力矩,其值可以按上述的全断面软弱地层条件下的非破岩(土)阻力矩模拟计算值(即初始启动扭矩值 a_2)的 45% 的 1/2 来计算。刀盘开口处切削渣土所需的阻力矩及其他刀盘部位的阻力矩受软硬断面面积比影响不大,可以直接按上述所占比例计算。

5.2.3 推力及扭矩模拟计算

1) 软土。全-强风化混合岩(6Z-2)和(7Z-2)地层,物理参数同软土地层。

2) 硬岩。中风化混合岩,单轴抗压强度为 50 MPa,岩石抗拉强度取单轴抗压强度值的 1/10 计算。

3) 贯入度。4.57 mm,取最小值。

4) 全断面硬岩。按 CSM 模型计算出全断面硬岩破岩阻力为 3 091 kN,破岩阻力矩为 477 kN·m。

5) 全断面软弱地层。初始启动推力 a_1 为 8 945

kN,初始启动阻力矩 a_2 为 2 426 kN·m。

6) 软硬交互地层。总推力及刀盘扭矩的模拟计算见表 10 和表 11。

表 10 软硬交互地层总推力模拟计算

Table 10 Simulated total thrust when boring in complex ground with soft and hard rocks

项目	取值	备注
破岩阻力	1 545	按全断面硬岩的 1/2 计算
初始启动推力	8 945	
土压反力	3 720	
合计	14 210	13 720 ~ 17 642(实际值)

表 11 软硬交互地层总扭矩模拟计算

Table 11 Simulated total torque when boring in complex ground with soft and hard

项目	取值	备注
破岩阻力矩	239	按全断面硬岩的 1/2 计算
非破岩阻力矩	1 880	其中刀盘前后面所受的摩擦阻力矩按全断面软土初始启动扭矩值的 45% 的 1/2 计算
合计	2 119	1 330 ~ 2 280(实际值)

由表 10 和表 11 可知,总推力和总扭矩的模拟值均在实际值范围内,验证了本文采用的综合考虑软土和硬岩模拟分析结果的复合地层掘进参数模拟分析方法的有效性。

6 结论与讨论

1) 在软弱地层,依据实际掘进参数,拟合得出该盾构在类似软弱地层中初始启动推力和初始启动扭矩参考值,其值可以用于复合地层软土部分的推力与扭矩的模拟计算。与按 Terzaghi 松动土压力模型计算的模拟值比较,其误差分别为 6.9% 和 10.6%,满足工程实际需要。

2) 在软弱地层,在低贯入度情况下($P < 25 \text{ mm/r}$),随着贯入度的增大,有效推力变化不明显,扭矩有明显变小的趋势;但随着贯入度的增大($28 \text{ mm/r} < P < 44 \text{ mm/r}$),正面刮刀逐渐参与切削,有效推力有变小的趋势,扭矩有明显增大的趋势。刀具的高差设计直接影响推力与扭矩值。

3) 在硬岩地层低贯入度、高强度岩石条件下,CSM 分析模型模拟结果与实际表现比较吻合。

4) 在硬岩地层高贯入度、低强度岩石条件下,CSM 模型计算的模拟值与实际值的差值较大。分析推力差值可能的原因有:在敞开模式下,由于开挖速度增大,土仓渣土堆积,造成推力增大;在半敞开模式下,暂时性的螺旋机出土停止,使土仓下部充土,以及向开挖面和土仓内注入土壤改良材料和加压缩空气,都可导致推力的增加。刀盘扭矩差值均呈现负值,表明模拟分析结果大于实际值,其合理解释是该掘进环数的实际

岩石强度低于低强度条件下的实际强度(80 MPa),这在一定程度上反映了岩石质量指标对掘进速度的影响,也表明了土仓中渣土沉积状况或改良效果对破碎中低强度硬岩地层的高贯入度掘进效果有重要影响。

5)依据CSM模型计算滚刀平均推力的模拟值分析,为降低滚刀的消耗量,建议高强度岩石的合适贯入度为6 mm/r,低强度岩石的合适贯入度为18 mm/r。

6)通过对软硬交互复合地层的盾构力学分析,模拟计算了在软硬地层各占50%的情况下的推力与扭矩。结果表明,总推力和扭矩的模拟值均在实际值范围内,验证了本文中采用的综合考虑软土和硬岩模拟分析结果的复合地层掘进参数模拟分析方法的有效性。

由于地质条件本身的复杂性,现场地质勘察试验数据和盾构实际操作数据的不完整性,本文采用的分析方法不可避免地采取了某种程度的简化。但从分析结果来看,本文的研究方法与相关结论,对于复合地层掘进参数模拟分析的理论研究与盾构实践,都具有一定的参考价值;同时对复合型盾构的刀盘设计、刀具选型、推力及扭矩等参数的设计,也有一定的指导意义。“地质是基础,盾构是关键,人是根本”,如能将地质条件与盾构相互作用的一些关键因素,如岩土特性与盾构刀具的作用机制,围岩环境与盾构本身的作用机制,渣土改良系统、刀盘及土仓结构、螺旋输送机结构与操作模式对掘进参数与效果的影响等,逐步纳入到盾构与岩(土)层相互作用的大系统中综合考虑,将会极大地提升复合地层盾构掘进参数模拟与预测的有效性,对盾构工程实践中的“人是根本”的指导意义则更为显著,这也是笔者进一步研究的方向。此外,鉴于盾构地质环境的动态性,在研究中增加地质变动动态分析,也许更能满足盾构工程实践者的实际需要。

参考文献(References):

- [1] 竺维彬,鞠世健.广州复合地层与盾构施工技术[C]//大直径隧道与城市轨道交通工程技术——2005上海国际隧道工程研讨会文集.上海:上海隧道工程股份有限公司,2005:165-173.
- [2] 袁敏正,竺维斌.盾构技术在广州地铁的应用及发展[J].广东土木与建筑,2004(8):5-7,9.
- [3] 谭忠盛,洪开荣,万姜林,等.软硬不均地层复合盾构的研究及掘进技术[J].岩石力学与工程学报,2006,25(S2):617-624.(TAN Zhongsheng,HONG Kairong,WAN Jianglin, et al. Study on composite shield and construction technique in complex uneven strata. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2006,25(S2):617-624.(in Chinese))
- [4] 米晋生,鞠世健.盾构掘进处理孤石施工技术[C]//大直径隧道与城市轨道交通工程技术——2005上海国际隧道工程研讨会文集.上海:上海隧道工程股份有限公司,2005:262-267.
- [5] J Zhao, Q M Gong, Z Eisensten. Tunnelling through a frequently changing and mixed ground; A case history in Singapore[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2007(22):388-400.
- [6] 龚秋明,赵坚,张喜虎.岩石隧道掘进机的施工预测模型[J].岩石力学与工程学报,2004,23(S2):47-52.(GONG Qiuming,ZHAO Jian,ZHANG Xihu. Performance prediction of hard rock TBM tunneling[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2004,23(S2):47-52.(in Chinese))
- [7] Jamal Rostami, Levent Ozdemir, Bjorn Nilson. Comparison between CSM and NTH hard rock TBM performance prediction models[M]. Las Vegas, ISDT,1996.
- [8] 张厚美,吴秀国,曾伟华.土压平衡式盾构掘进试验及掘进数学模型研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(S2):490-494.(ZHANG Houmei,WU Xiuguo,ZENG Weihua. Study on tunneling experiment and mathematical model of EPB shield[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2005,24(S2):490-494.(in Chinese))
- [9] 吕建中,王守慧,李毕华,等.不同土层下南京长江隧道盾构施工参数研究[J].城市道桥与防洪,2008(7):14,185-188.(LV Jianzhong,WANG Shouhui,LI Bihua, et al. Study of shield construction parameters of Nanjing Changjiang river tunnel under different soil stratum. Urban Roads Bridges & Flood Control,2008(7):14,185-188.(in Chinese))
- [10] 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(9):90-94.(WANG Hongxin,FU Deming. A mathematical model and the related parameters for EPB shield tunneling[J]. China Civil Engineering Journal,2006(9):90-94.(in Chinese))
- [11] 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(8):66-73.(ZHU Hehua,XU Qianwei,LIAO Shaoming, et al. Experimental study on thrust force during tunnel excavation with earth pressure balance shield machine[J]. Rock and Soil Mechanics,2007(8):66-73.(in Chinese))
- [12] 胡国良,何贤剑.土压平衡式盾构机刀盘扭矩的计算及试验研究[J].桥隧机械与施工机械化,2009,26(11):122-124,127.(HU Guoliang,HE Xianjian. Calculation and test research on torque of cutter head for earth pressure balance shield tunneling machine[J]. Road Machinery & Construction Mechanization,2009,26(11):122-124,127.(in Chinese))
- [13] Pellet Beaucour A L, Kastner R. Experimental and analytical study of friction forces during micro-tunneling operations[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2002,17:83-97.
- [14] 管会生.土压平衡盾构机关键参数与力学行为的计算模型研究[D].成都:西南交通大学桥梁与隧道工程专业,2007.
- [15] 竺维彬,鞠世健,史海欧.广州地铁三号线盾构隧道工程施工技术研究[M].广州:暨南大学出版社,2007:248.