文章编号:1005-0523(2016)04-0037-08

漂石地层土压平衡盾构掘进速度模型研究

黄建丹[1],宫全美[1],孟庆明[2],张润来[1]

(1.同济大学道路与交通工程教育部重点实验室,上海 201804;
2.中国水利水电第七工程局有限公司,四川 成都 610081)

摘要:目前针对漂石地层土压平衡盾构的掘进速度模型研究比较少。借助成都地铁某区间盾构隧道工程,根据现场施工实测数据,利用统计分析、模型回归等方法分析了参数间的相关性,并依据掘进速度与其他参数间的关系建立了成都漂石地层中的掘进速度模型。研究结果表明:在成都漂石地层中,影响掘进速度最大的因素依次是贯入度、刀盘转速;掘进速度和刀盘转速、贯入度、螺旋机转速成正比,与总推力、土仓压力正反比;掘进速度与扭矩不是简单的线性关系,扭矩在一定范围时,掘进速度缓慢增加,当扭矩大于一定值后,掘进速度随着扭矩的增大而减小。这些关系对漂石地层土压平衡盾构的参数选择和匹配有重要的指导意义,所建立的模型可为盾构掘进参数的优化、预测和控制提供依据。

关键词:漂石地层;土压平衡盾构;掘进速度;模型研究
中图分类号:TU443 文献标志码:A

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2016.04.006

随着经济快速发展,各城市地铁建设范围也不断扩大。我国幅员辽阔,各地地质情况差异大,因此在不同地层进行盾构施工时,如何选择合理的掘进参数、如何根据盾构机反馈回的施工数据对掘进速度进行预测、调整,是一个越来越值得关注的问题。国外有关硬岩掘进机(TBM)的性能预测模型开展较早,比较有名TBM的性能预测模型有CSM模型[1]、NTH模型等[2],NTH模型是一个主要基于大量现场掘进数据的经验统计模型,但是它仅局限于特定地层下的掘进速度预测,如果实际地层与以往条件不同,其预测结果不可靠[3]。在硬岩掘进机的掘进速度预测方面,国内也开展了一些针对不同地层下的研究。何於琏[4]根据西康线秦岭I线隧道施工现场,对TBM掘进速度与地质条件的关系作了初步研究,利用现已掌握的盾构掘进速度与围岩组合分类的关系,推断其它围岩类别下盾构机的掘进速度;刘明月[5]结合秦岭隧道施工的相关数据,对掘进速度、利用率、刀具磨损等表征掘进效率的指标与围岩等级、围岩类型等地质因素间的关系进行了分析,得到了它们之间的影响关系;张厚美[6]通过正交试验术,对盾构掘进参数进行组合试验,采用统计分析方法,分析了总推力、土仓压力、刀盘转速等主要参数对掘进速度的影响,得到了EPBS在软土中的掘进速度数学模型;江华等[7]以北京地铁9号线盾构工程为背景,在大粒径卵砾石地层开展土压平衡盾构现场掘进试验,得出推进速度与刀盘扭矩、螺旋输送机转速、总推力等施工参数间的关系。王洪新[8]在天津地铁盾构施工收集到的数据基础上,分析土仓压力、螺旋机转速及掘进速度之间关系。周斌[9]基于长沙地铁1号线盾构工程为背景,根据现象采集的盾构掘进参数建立复合地层下的预测模型。以上国内有关盾构机掘进速度数学模型方面的研究,主要是集中在几种地层(软土地层、复合地层等),这是因为土压平衡盾构掘进是软土地区地铁隧道施工的主要方法之一,相关工程项目较多。在漂石地层采用盾构工法修建地铁隧道,国内工程不多,因此相关的研究甚少。为了扩展土压平衡盾构的应用范围,满足日后工程建设需要,有必要开展盾构机工作参数针对漂石地层的适应性研究。

收稿日期:2015-04-08
作者简介:黄建丹(1991—),女,硕士研究生,主要从事城市轨道交通研究。
通讯作者:宫全美(1967—),女,教授,博导,主要从事轨道交通结构设计理论研究与施工、线路动力学。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

成都地区的漂石地层,漂石粒径大、含量高、广泛不均匀分布、单体强度高,隧道沿线分布强透水富水地层,部分区域地层自稳性差等,施工中盾构机姿态控制困难。因此在漂石地层如何选择合理的掘进参数,如何预测盾构掘进速度,是盾构施工过程中需要解决的一个问题。本文拟通过现场施工实测数据利用数理统计、模型回归等方法对漂石地层的盾构主要的施工参数进行研究,分析参数间的相关性,建立成都地区漂石地层的推进速度模型,以期为盾构掘进参数的优化、预测和控制提供依据。

1 工程概况

根据地质勘察报告,成都地铁某盾构区间隧道所穿越的地层以密实卵石土<2-9-3>和<3-8-3>为主。穿越区间地质纵断面见图1,各地层的主要物理力学参数见表1。地层中漂石含量为5~20%,粒径一般为20~40 cm,地质勘察所揭露漂石的最大长度为57 cm,最大抗压强度高达170 MPa,破碎困难[10]。漂石地层的内摩擦角系数较大,渣土的流动性比较差。在无水状态下,颗粒之间点对点传力,地层反应灵敏,刀盘旋转切削时,地层很易破坏原来的相对稳定或平衡状态而产生坍塌,引起较大的地层损失和围岩扰动[11]。

根据成都区域水文地质资料及本工程地下水的赋存条件,工程范围内地下水主要是第四系孔隙水。砂、卵石层含水丰富,含水层总厚度大于30 m,为孔隙潜水。根据成都地区工程经验,工点范围内卵石土层渗透系数 k 取18~35 m·d^{-1},为强透水层;砂层渗透系数 k 取值3.5~6 m·d^{-1},为中等透水层。

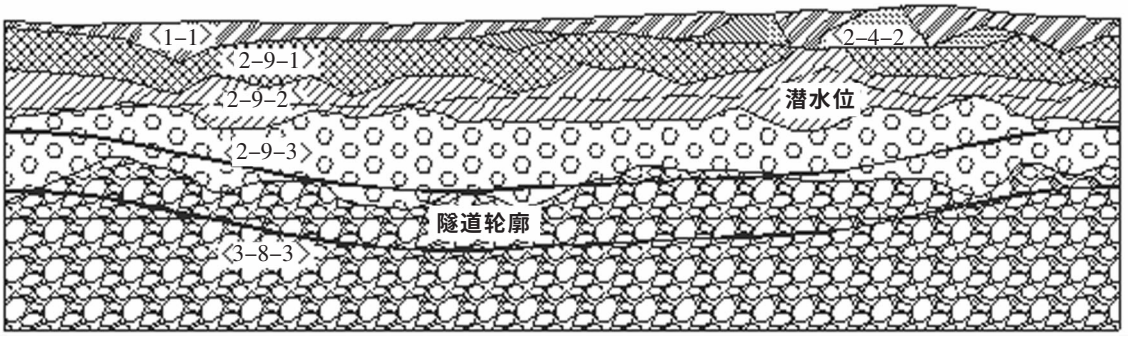


图1 地质纵断面图

Fig.1 Geological profile

该区间采用海瑞克盾构机,开挖直径6.3 m,面板式刀盘。面板上布置小刮刀、边缘、单刃滚刀或双刃滚刀,刀盘开口率约为36%,如图3。刀盘额定扭矩6 228 kN·m,最大脱困扭矩7 447 kN·m,最大推力是3 991 T,最大掘进速度是80 mm·min^{-1}。出渣采用直径850 mm的单级螺旋输送机,能通过的漂石最大粒径为310 mm。盾构管片衬砌环宽1 500 mm和1 200 mm,外径Φ6 000 mm、内径Φ5 400 mm、厚度300 mm,C50混凝土、6块/环分块形式,错缝拼装。

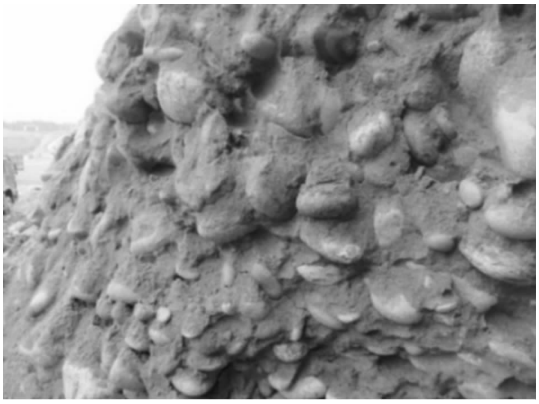


图2 地质情况

Fig.2 Geologic situation



图3 刀盘示意图

Fig.3 Cutter head of shield machine

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1　土层主要物理力学参数

Tab.1　Main physical–mechanical parameters of soil

地层代号	岩土名称	密实程度	重度 γ/(kN·m^{-3})	干密度 ρ_d/(g·cm^{-3})	内摩擦角 φ/(°)	变形模量 E_0/MPa	静止侧压力系数/k_0	渗透系数 k/(m·d^{-1})	承载力标准值 f_k/kPa
<2–9–1>	卵石土	稍密	20.0	1.90	30	26	0.33	35	300
<2–9–2>	卵石土	中密	21.0	2.00	34	35	0.31	30	500
<2–9–3>	卵石土	密实	22.0	2.10	40	52	0.28	25	700
<3–8–3>	卵石土	密实	23.0	2.20	46	55	0.27	23	700

3　各参数间关系及掘进速度研究

3.1　各施工参数间的相关性

为了分析参数之间的相关程度，借助参数间的相关系数来评判。相关系数又称皮氏积矩相关系数，是说明两个现象之间相关关系密切程度的统计分析指标[12]。相关系数计算公式如下：

$$r=\frac{\sum (x_t-\overline{x})(y_t-\overline{y})}{\sqrt{\sum (x_t-\overline{x})^2\cdot \sum (y_t-\overline{y})}} \quad (t=1,2,\cdots,m)$$

x，y 分别取两个变量的平均值。

r 值在−1 和+1 之间变化。如果 $r>0$ 时，表示两者为正相关；如果 $r<0$ 时，表示两者为负相关；如果 $r=0$ 表示不相关；当 r 值的绝对值越大时，两者的相关程度就越高。

根据所采集的参数数据，计算盾构机各施工参数间的相关系数，如表 2。

表 2　各参数间相关系数

Tab.2　Correlation coefficient of parameters

r	刀盘转速	刀盘扭矩	推力	贯入度	掘进速度	螺旋转速	螺旋扭矩	螺旋工作面压力	土仓压力
刀盘转速	1	—	—	—	—	—	—	—	—
刀盘扭矩	0.337	1	—	—	—	—	—	—	—
推力	0.119	0.726	1	—	—	—	—	—	—
贯入度	−0.198	−0.484	−0.725	1	—	—	—	—	—
掘进速度	0.073	−0.372	−0.680	0.956	1	—	—	—	—
螺旋机转速	0.255	−0.026	−0.473	0.716	0.829	1	—	—	—
螺旋机扭矩	−0.006	−0.394	−0.393	0.117	0.109	0.127	1	—	—
螺旋机工作面压力	−0.143	−0.473	−0.465	0.264	0.233	0.201	0.946	1	—
土仓压力	−0.312	−0.620	−0.312	0.158	0.051	−0.330	0.221	0.295	1

由表 2 可知：① 刀盘扭矩和推力、掘进速度和贯入度、掘进速度和螺旋输送机转速、螺旋输送机扭矩和螺旋输送机工作面压力的 r 值分别在 0.7~1 之间，两者呈现良好的线性正相关。② 掘进速度与推力、推力和

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

贯入度、刀盘扭矩和土仓压力的 r 值分别在–0.6~–0.7，两者呈良好的线性负相关。③ 刀盘扭矩随着总推力的增大而增大。从两者的物理关系角度出发，当总推力增大时，必然使得刀盘面受到的摩擦力增大，则刀盘的扭矩也相应增大。实测得到的数据也验证了这一关系。④ 掘进速度=刀盘转速×贯入度，故在刀盘转速一定的情况下，贯入度越大，掘进速度越大。⑤ 土压平衡盾构掘进速度是一个多因素共同作用下、反映盾构机在各地层下效能的指标，它的大小不但受到盾构设备的性能影响，而且与螺旋机的出土效率有很大关系，从实测数据看出，土压平衡盾构的掘进速度与螺旋机转速的相关性较好。⑥ 从物理关系来说，当土仓压力增大时，刀盘背面与土仓内的土体的摩擦力也增大，那么刀盘扭矩也相应增大。但通过上述数据发现，但是图中显示两者不是简单的正比关系，两者呈现一定的负相关。这是因为在大漂石地层盾构掘进时，土仓压力升高时，掘进速度就会降下来，很容易造成刀盘扭矩不足而产生卡死。因此在实际施工过程中，可通过保持适当欠压，做好渣土改良等控制推力和扭矩在合理范围内，避免扭矩过大造成刀盘卡死。

3.2 掘进速度与其他施工参数相关性

盾构推进速度的大小，是多个参数共同作用产生的，是被动反馈的重要参数[13]。左线掘进过程中 450 环实际掘进速度如图 4 所示。

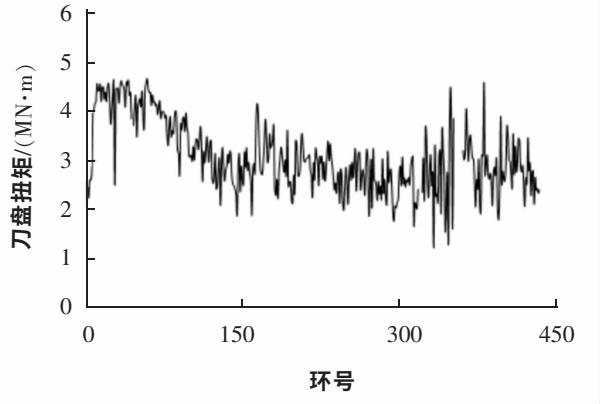


图 4 掘进速度直方图

Fig.4 Curve of advance speed

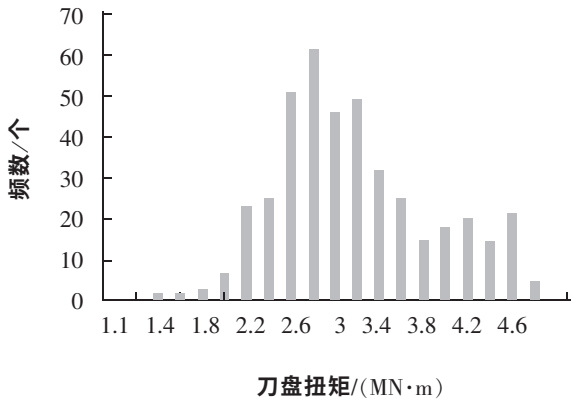


图5 掘进速度直方图

Fig.5 Histogram of advance speed

综合漂石地层下盾构掘进的掘进速度统计情况发现，整个区段内掘进速度数值变化范围在 10 mm·min^{-1} 至 68 mm·min^{-1} 之间，平均值为 38.3 mm·min^{-1}，掘进速度的分布整体呈近似正态分布，统计得到的掘进速度主要落于 30~60 mm·min^{-1} 之间。1 至 450 环盾构的掘进速度变化从 10~67 mm·min^{-1} 不等，波动范围大，前 120 环属于试掘进过程，故掘进速度波动较大，120 环以后掘进速度波动趋于平缓。

将掘进速度、总推力的数据点进行整理，如图 6 所示。

由图中看出，掘进速度与总推力散点图基本呈无规则分布，两者之间的关系很弱。这是由于现场操作中存在较多的随机性因素的影响，如人为操作、地质因素等。而将上述这些冗繁的数据点进行分段整理，将总推力分为 8~9×10^3 kN，9~10×10^3 kN 等依次类推，并将各区段中的掘进速度取平均值，以表征该区段中总推力的大小。则两者之间的关系如图 7 所示。

通过上述数据发现，不同的总推力区段，与掘进速度均值存在很好的线性关系，且两者线性负相关，相关系数为 0.886。当盾构掘进过程中所

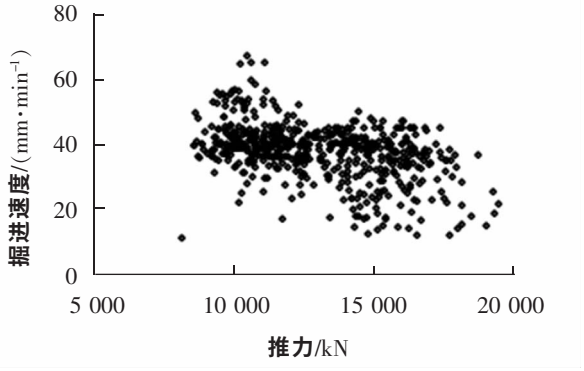


图 6 掘进速度与总推力的散点图

Fig.6 Scatter diagram of advance speed and thrust force

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

受到的前方压力、摩擦力等阻力增大时，盾构机掘进所需要的推力也相应增大，而盾构推进的速度则因阻力的增大而减小。因此，掘进速度不可简单认为会随推力增大而增长，在实际操作过程中受较多的随机因素影响。

掘进参数与其他施工参数相关性的处理，按照图 7 掘进速度与总推力类似进行处理：各类参数进行分段整理，将各区段中的掘进速度取平均值[14]，以表征该区段中掘进速度的大小。两者之间的关系如图 8~图 13 所示。

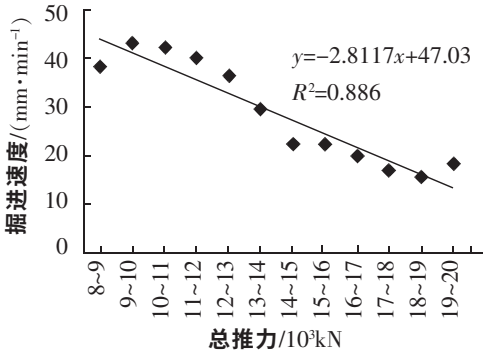


图 7　分区段整理后的总推力与掘进速度

Fig.7　Reduced advance speed and thrust force

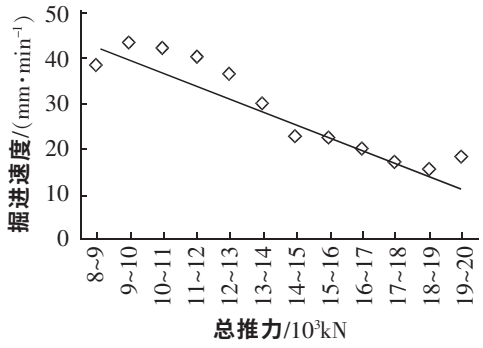


图 8　掘进速度与总推力

Fig.8　Advance speed and thrust force

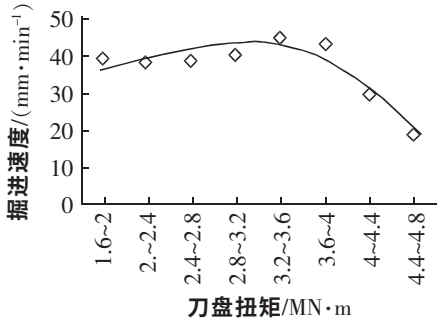


图 9　掘进速度与刀盘扭矩

Fig.9　Advance speed and torque of cutter head

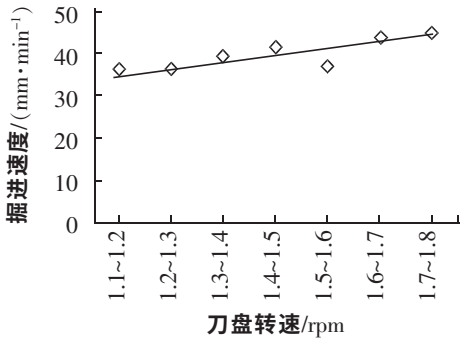


图 10　掘进速度与刀盘转速

Fig.10　Advance speed and cutting wheel rotation

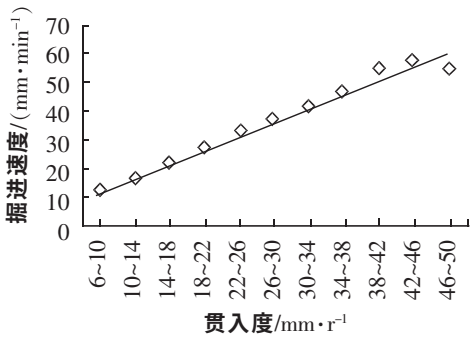


图 11　掘进速度与贯入度

Fig.11　Advance speed and penetration

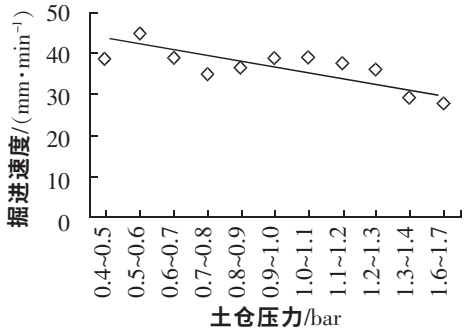


图 12　掘进速度与土仓压力

Fig.12　Advance speed and chamber earth pressure

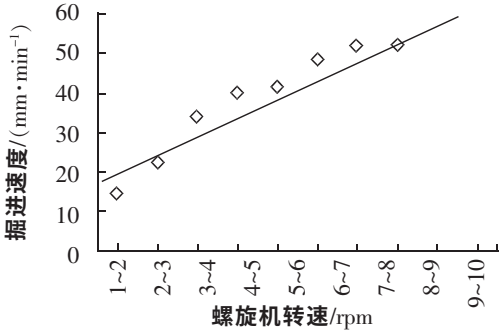


图 13　掘进速度与螺旋机转速

Fig.13　Advance speed and rotation speed of screw conveyor

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

从图8~图13可以看出，掘进速度和刀盘转速、贯入度、螺旋机转速有良好的正相关性，与总推力、土仓压力有较好的负相关性。① 当盾构掘进过程中所受到的前方压力、摩擦力等阻力增大时，盾构机掘进所需要的推力也相应增大，而盾构推进的速度则因阻力的增大而减小。因此，推进速度不可简单认为会随推力增大而增长，在实际操作过程中受较多的随机因素影响。在软土地层中常通过增大总推力的方法来增加掘进速度，但在漂石地层中不宜采取此类似措施。② 掘进速度与扭矩不是简单的线性关系，扭矩在一定范围时，掘进速度缓慢增加，当扭矩大于一定值后，掘进速度随着扭矩的增大而减小。③ 理论上存在这样的关系：推进速度=刀盘转速×贯入度。实测出的掘进速度和刀盘转速、贯入度的正相关关系也验证这一关系。④ 在维持开挖面稳定的情况下，土仓压力越小，掘进速度越大。⑤ 螺旋机转速越大，掘进速度就越大。螺旋机转速与出土量有直接关系，故土仓压力与螺旋机转速有关，其他条件不变的情况下转速大土仓压力小，转速小土仓压力大。土仓压力的变化又会引起掘进速度的变化，故在漂石地层要做好渣土改良，保证螺旋输送机出渣顺利。

3.3 推进速度模型研究

在软土地区施工中，张厚美[6]建立了推进速度的计算模型，得到对掘进速度影响最大的3个操作参数依次为：千斤顶推力、土舱压力和刀盘转速。类似的，本节借鉴张厚美建立掘进速度模型的方法来研究成都漂石地层中盾构推进速度的计算模型。

盾构机主要靠主千斤顶对盾体施加向前的推力而向前推进的，因此千斤顶推力对盾构推进起主要影响作用；由于掘进速度=刀盘转速×刀盘贯入度，所以刀盘转速及贯入度也直接影响了掘进速度；螺旋输送机参数决定了渣土输出的速度、出土量，间接影响了盾构的推进速度；本计算模型中取所测各土仓压力的平均值作为分析对象。

由第3.2节分析可知，推进速度与各变量之间存在一定的相关性。其中盾构机螺旋输送机扭矩、螺旋输送机工作面压力和推进速度的相关系数较小，说明螺旋输送机扭矩和螺旋输送机工作面压力对推进速度的影响不大，因此舍去这两个变量。故本计算模型中参数变量的选取为刀盘转速、刀盘扭矩、推进力、贯入度、螺旋输送机转速、平均土仓压力。如表3所示。

表3 掘进速度模型参数选取

Tab.3 Choice of model regression parameters

变量	ω_1	T	F	r	ω_2	p
名称	刀盘转速	刀盘扭矩	推进力	贯入度	螺旋输送机转速	平均土仓压力
单位	$r\cdot min^{-1}$	kN·m	kN	$mm\cdot r^{-1}$	$r\cdot min^{-1}$	bar

利用上述模型参数进行模型建立：

令：

$$v=a_1\omega_1+a_2T+a_3F+a_4r+a_5\omega_2+a_6p+a_7$$

模型回归参数结果如表4所示。

表4 模型回归参数结果

Tab.4 Result of model regression parameters

变量	回归系数	标准误差	t 值	P–value	检验结果
常数项	–33.09	1.33	–24.94	0.001	高度显著
刀盘转速	21.229	0.68	31.11	0.001	高度显著
刀盘扭矩	–0.329	0.16	–1.98	0.05	显著
推力	0.000 268	0.000 05	4.75	0.001	高度显著
贯入度	1.239	0.018	68.22	0.001	高度显著
螺旋转速	0.939	0.083	11.22	0.001	高度显著
土仓压力	1.009	0.30	3.34	0.001	高度显著

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

根据回归统计结果，可知回归相关系数 R=0.99，说明 自变量与回归统计结果有很高的相关性。根据方差分析结果，可知 F 值=5 000.495 9，Significance$F$=0<0.01，表明所建立的回归方程非常显著。根据模型回归参数结果表，根据 t 值的大小可知因素的主次顺序是：贯入度>刀盘转速>螺旋转速>推力>土仓压力>刀盘扭矩；根据“P-value”可知上述变量对试验结果影响高度显著。

由上述分析可得到推进速度的计算模型为：

$$v=21.229\ \omega_1-0.329\ T+0.000\ 27\ F+1.239\ r+0.939\ \omega_2+1.009\ p-33.1$$

采用上述的掘进速度模型，利用右线的 200 环的施工参数进行验证。

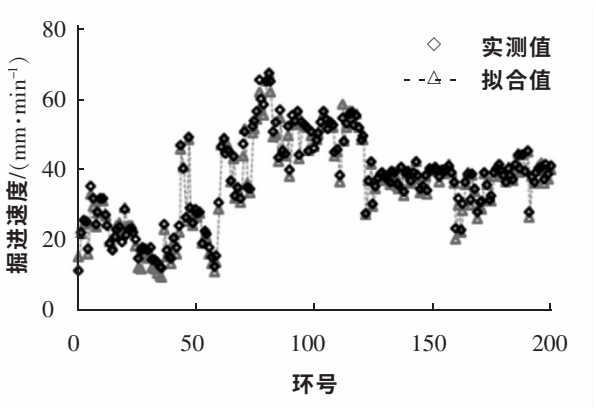


图 14　模型计算与实测数据对比

Fig.14　Comparison between model calculation and measured data

对比计算结果表明：上述推进速度计算模型得到的数据与实测得到的数据之间的相关系数为 0.86，该模型能较好地拟合大漂石地层条件下的盾构推进速度，所建立的模型可应用为盾构掘进参数的优化、预测和控制提供依据。模型中贯入度、刀盘转速、螺旋输送机转速对推进速度的影响相对较大。

4　总结

本文根据现场施工实测数据，对漂石地层的盾构掘进参数进行研究，分析各施工参数间的相关性，建立了漂石地层中的掘进速度模型，模型与实测数据相关性良好，可为盾构掘进参数的预测、优化和控制提供参考。得到以下结论：

1）掘进速度与贯入度、刀盘转速、螺旋机输送机转速呈正相关，与总推力、土仓压力呈负相关；

2）掘进速度与扭矩不是简单的线性关系，扭矩在一定范围时，掘进速度缓慢增加，当扭矩大于一定值后，掘进速度随着扭矩的增大而减小；

3）对于掘进速度影响最大的因素依次是贯入度、刀盘转速、螺旋转速、推力、土仓压力、刀盘扭矩；

4）盾构在漂石地层施工过程中，可通过保持适当欠压，做好渣土改良等控制推力和扭矩在合理范围内，避免扭矩过大造成刀盘卡死。

参考文献：

[1] ROSTAMI R，OZDEMIR L，NILSONB. Comparisonbetween CSM and NTH Hard Rock TBM Performance PredictionModels[M]. LasVegas，NV：Isdt，1996.

[2] BORLAND A，DAHLO T S，NILSEN，B. Tunneling Perforniance Estimation Based on Drillability Testing[C]//Proceedings 8th International Congress on Rock Mechanics，2013：25-30.

[3] TARKOY P J，HENDRON A J. Rock Hardness Index Properties and Geotechnical Parameters for Predicting Tunnel Boring Machine Performance[J]. Tetrahedron Letters，1957，16(3)：211-212.

[4] 何於琏. TBM 施工进度的科学预测方法[J]. 铁道工程学报，1999，(2)：94-98.

[5] 刘明月，杜彦良，麻士琦. 地质因素对 TBM 掘进效率的影响[J]. 石家庄铁道学院学报，2002，15(4)：40-43.

[6] 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(S2)：5762-5766.

[7] 江华，张晋勋，江玉生. 大粒径卵砾石地层土压平衡盾构关键参数相关性特征[J]. 都市快轨交通，2013(2)：94-99+107.

[8] 王洪新，傅德明，李向红. 土压平衡盾构各主要参数的统计分析[C]//. 2005 上海国际隧道工程研讨会论文集，上海，2005：

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

248–255.
[9] 周斌,张怀亮,程永亮. 复合地层盾构机推进速度SVM预测模型研究[J]. 铁道建筑技术,2014(10):48–51.
[10] 王柳善,杨龙才,孟庆明. 富水卵漂石地层土压平衡盾构施工参数研究[J]. 华东交通大学学,2015(6):14–19.
[11] 段浩,郑丽,李博. 富水砂卵石地层盾构刀具配置探讨[J]. 铁路技术创新. 2009(1):32–33.
[12] 朱宏伟. 泥水盾构掘进速度影响参数分析及数学解析[D]. 中国铁道科学研究院,2008:40–43.
[13] 施虎,盾构掘进系统电液控制技术及其模拟试验研究[D]. 杭州:浙江大学,2012:56–59.
[14] 褚东升. 长沙地铁下穿湘江土压平衡盾构隧道掘进参数研究[D]. 湖南:中南大学,2012:34–36.

Research on Mathematical Model of Advance Speed for EPBS in Boulder Stratum

Huang Jiandan, Gong Quanmei, Meng Qingming, Zhang Runlai

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804; 2.Sinohydro Engineering Bureau No.7 CO., LTD., Chengdu 610081)

Abstract: At present, there are seldom researches on mathematical model of advance speed for earth pressure balanced shield (EPBS) in boulder stratum. In one shield tunnel section of Chengdu Metro, according to field construction data, correlation between parameters was discussed by statistical analysis and model regression, and mathematical models of advanced speed of EPBS in boulder stratum were obtained in this study.The results show that, in the boulder stratum of Chengdu, the construction parameters which affect advance speed most are penetration and cutting wheel rotation; advance speed is in proportion to cutter speed, penetration and screw machine speed; advance speed is in proportion to total thrust force and earth pressure inversely; advance speed and torque of cutter head is no simple linearity (within a range of torque, advance speed will slowly increase, while torque keeps increasing and beyond the range, advance speed will decrease). These correlations have important guiding significance in choosing and matching EPBS' parameters in boulder stratum, and the mathematical models can be references for optimization, prediction and control of parameters of advance speed of EPBS.

Key words: boulder stratum; EPBS; advance speed; model research

(责任编辑 王建华)

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net