

罗宇勤, 赵焕, 郭丹烽, 等. 杭州典型黏土地层盾构掘进参数及地层变形分析[J]. 华南地震, 2022, 42(1): 133–139. [LUO Yuqin, ZHAO Huan, GUO Danfeng, et al. Analysis of Shield Tunneling Parameters and Ground Deformation in Typical Clay Strata in Hangzhou [J]. South China journal of seismology, 2022, 42(1): 133–139]

杭州典型黏土地层盾构掘进参数及地层变形分析

罗宇勤¹, 赵 焕², 郭丹烽³, 陈登月¹, 俞嘉彬¹, 蒋伟男¹

(1. 浙江华东测绘与工程安全技术有限公司, 杭州 311122; 2. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 杭州 311122; 3. 杭州地铁集团有限公司, 杭州 310003)

摘要: 以杭州地铁机场快线某区间盾构工程为背景, 选取了刀盘转速、刀盘扭矩、盾构机总推力、推进速度、平均土仓压力这5个盾构掘进参数。针对黏土地层, 采用数理统计方法, 分析了这5个盾构掘进参数之间的相关性, 并分析了埋深对其影响。结果表明: 盾构机总推力与刀盘扭矩、平均土仓压力与刀盘转速、平均土仓压力与总推力、盾构机总推力与刀盘转速之间具有一定的相关性; 盾构机总推力、平均土仓压力与隧道埋深成正相关。结合盾构掘进过程中轴线地表沉降数据, 从统计学角度确定盾构掘进参数的合理控制范围。

关键词: 土压平衡盾构; 盾构掘进参数; 相关性分析; 数理统计

中图分类号: U455.43

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2022)01-0133-07

DOI: 10.13512/j.hndz.2022.01.18

Analysis of Shield Tunneling Parameters and Ground Deformation in Typical Clay Strata in Hangzhou

LUO Yuqin¹, ZHAO Huan², GUO Danfeng³, CHEN Dengyue¹,
YU Jiabin¹, JIANG Weinan¹

(1. Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, China; 2. Power China Huadong Engineering Co., Ltd., Hangzhou 310058, China; 3. Hangzhou Metro Group Co., Ltd., Hangzhou 310003, China)

Abstract: Based on the subway shield project in a section of Hangzhou Airport Express, five shield parameters are selected: cutter head speed, cutter head torque, total thrust of shield machine, advancing speed and average chamber earth pressure. For clay stratum, the correlation between the five shield parameters is analyzed by mathematical statistics, and the influence of buried depth on it is analyzed. Combined with the axis surface settlement data during shield tunneling, the reasonable control range of shield parameters is determined from the perspective of statistics. The results show that there is a certain correlation between the total thrust of shield machine and cutter head torque, the average chamber earth pressure and cutter head speed, the average chamber earth pressure and total thrust, and the total thrust of shield machine and cutter head speed; the total thrust and average chamber earth pressure of shield machine are positively correlated with the buried depth of tunnel. Combined with the axial surface settlement data in the shield tunneling process, the reasonable control range of shield tunneling parameters is determined from statistics.

Keywords: Earth pressure balance shield; Shield tunneling parameters; Correlation analysis; Mathematical statistics

收稿日期: 2021-09-23

基金项目: 浙江省建设科技项目: 基于物联网杭州地铁建设风险分级管控与隐患排查治理平台研发及应用(2018K140)

作者简介: 罗宇勤(1987-), 男, 工程师, 从事城市地铁盾构施工相关研究及安全风险咨询。

E-mail: 527892487@qq.com

0 引言

随着城市建设的快速发展,为了缓解交通压力,越来越多的城市开始修建地铁。盾构法因机械化程度高、开挖速度快、对周边环境影响小等优点被广泛应用于城市地铁建设中。在盾构掘进过程中,对于特定地层,为了保证施工的安全性与高效性,需要设定合理的、匹配的盾构掘进参数(总推力、刀盘扭矩、刀盘转速等)。因此,如何确定这些盾构掘进参数之间的关系,并选择合适的参数范围,从而使地层受到的扰动最小,达到有效控制地表变形,减少对周围环境的影响是盾构施工中研究的热点。

针对盾构掘进参数间的关系与其合理控制范围,众多学者从理论和实测角度展开了研究。在理论研究方面,王洪新等^[1-4]建立了土压平衡盾构掘进的数理模型,并在这一基础上推导了总推力、土仓压力、螺旋机转速、掘进速度之间关系的数学表达式;Do等^[5]基于软件模拟了盾构机刀盘切削土体的过程,并根据经验公式得出了盾构机的推力及扭矩大小;金大龙等^[6]通过模型试验,研究了盾构刀盘开口率引起的土仓内外压力变化规律,并基于试验研究内容,进一步利用粘性流体力学理论建立了相关公式。在实测分析方面,魏新江等^[7]结合杭州地铁1号线盾构隧道现场监测数据,研究了盾构了参数间的关系及其对地层位移的影响;尹苏江等^[8]结合实测数据,总结了在大连岩层地质中,土压平衡盾构掘进中各个盾构掘进参数间的关系,并分析了其机理;李锐等^[9]以深圳地铁16号线为背景,依靠数理统计对刀盘扭矩、总推力等6给盾构掘进参数的相关性进行了定量分析,并建立了预测模型;此外,文献[10-13]也是通过数理统计分析盾构掘进实测数据,得到了盾构掘进参数控制范围和各掘进参数间关系的规律。然而,目前对于盾构掘进参数的实测研究大多仅考

虑了在某一地层下的合理取值范围,没有将隧道埋深考虑进去,且在分析过程中并未涉及地表沉降等监测情况。

本文以杭州地铁机场快线某区间盾构施工为工程背景,分别研究了在黏土地层中刀盘转速、刀盘扭矩、盾构机总推力、推进速度、平均土仓压力之间的相关性,并研究了隧道埋深对盾构掘进参数的影响。最后,结合轴线地表沉降分析,基于数理统计得到了在黏土地层中盾构掘进参数的推荐控制范围,以期以后类似工程施工提供一定的指导。

1 工程概况

该区间隧道设计起止里程为右(左)K29+809.331~右(左)K31+703.672,右线长度约为1894.341 m,左线长度约为1910.794 m(含长链16.453 m)。线路平面曲线最小半径 $R=360$ m,竖曲线最大坡度为:28.2‰下坡和22.2‰上坡。隧道顶埋深:20.6~43.7 m。设3座联络通道,其中1座兼泵房设置。于K30+228.556处设置1#联络通道,线间距为12 m;于K30+803.846设置2#联络通道兼泵房,线间距为11.5 m;于K31+328.566设置3#联络通道,线间距12 m。盾构管片内径6.1 m,外径6.9 m,厚度400 mm。

本区间盾构主要穿越的地层为:5-1粘土、5-2粉质粘土夹粉土、6-2淤泥质粉质粘土、7-1粉质粘土、7-2粉质粘土夹粉土、8-1粉质粘土、9-1粉质粘土、11-1粉质粘土、20-1d全风化凝灰岩、20-2d强风化凝灰岩。具体地质情况如图1所示。拟分析段地层主要为7-1黏土,动力触探锥尖阻力 $q_c=2.4\sim 3.4$ MPa,平均值2.86 MPa,侧壁摩阻力 $f_s=56.5\sim 178.1$ kPa,平均值106.56 kPa。实测标准贯入试验锤击数 $N=14.0\sim 22.0$ 击,平均值为16.8 击,属中等压缩性土层,工程性能较好。

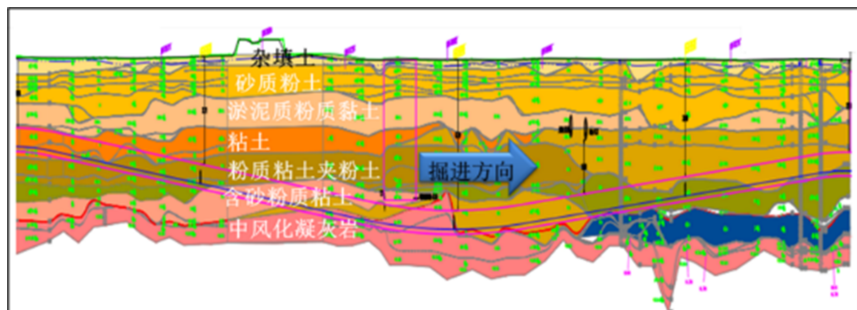


图1 地质纵断面图

Fig.1 Geologic longitudinal section

2 盾构施工参数分析

2.1 盾构掘进参数间相关性分析

为了研究在黏土地层盾构掘进参数之间的关系,选取了该盾构区间先行线110环至290环共计181环数据。由于盾构掘进参数有上百个,因此,要对所有盾构掘进参数进行整理分析是不必要且不现实的,为了保证盾构掘进参数的代表性,以及选取的参数尽可能全面、直观地反映盾构掘进控制和掘进状态,现场采集盾构主要掘进参数包括刀盘转速、刀盘扭矩、推进速度、总推力和平均土仓压力,对上述参数进行皮尔逊相关性分析,结果如图2所示。

	刀盘转速	刀盘扭矩	推进速度	总推力	平均土仓压力
刀盘转速		基本不相关	基本不相关	低度相关	低度相关
刀盘扭矩	0.279		基本不相关	低度相关	基本不相关
推进速度	0.161	0.237		基本不相关	基本不相关
总推力	0.329	0.306	0.125		低度相关
平均土仓压力	0.395	0.260	0.160	0.359	

图2 盾构掘进参数相关性统计图
Fig.2 Correlation statistics of shield tunneling parameters

由图可知,包括刀盘转速、刀盘扭矩、推进速度在内的5个盾构施工参数之间存在一定的相关性。其中,盾构机总推力与刀盘扭矩之间、平均土仓压力与刀盘转速之间、平均土仓压力与总推力之间、盾构机总推力与刀盘转速之间具有低度相关性。

盾构机总推力与刀盘扭矩的关系如图3所示。从图中可以看出,刀盘扭矩与盾构机总推力成正相关,即随着刀盘扭矩的增加,往往也伴随着总推力的增大。笔者认为,这是因为盾构机在黏土地层中掘进时,刀盘中心处易出现结泥饼现象,而为了应对这一情况,通常采用降低推进速度,同时增加刀盘扭矩和增大盾构总推力的措施,从而导致在一定程度上刀盘扭矩与盾构总推力变化趋势的同步性^[14]。

盾构机总推力与平均土仓压力的关系如图4所示。从图中可以看出,盾构机总推力与平均土仓压力成正相关。结合王洪新等的理论研究成果,

盾构机总推力近似等于盾构机与前方土体的接触压力与推进时总阻力之和,而盾构机与前方土体的接触压力与土仓压力成正相关,因此,随着平均土仓压力的增大,盾构机总推力会逐渐增大。

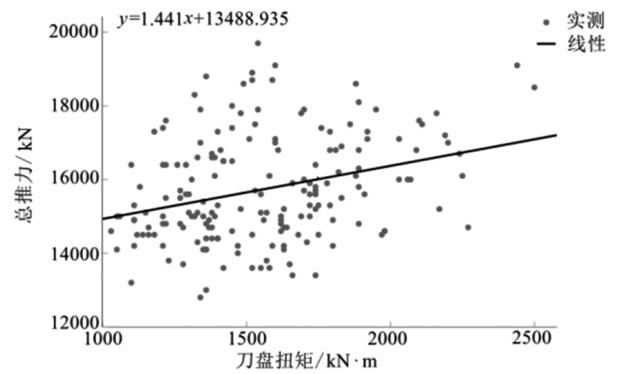


图3 刀盘扭矩与总推力关系图
Fig.3 Relationship between cutter head torque and total thrust

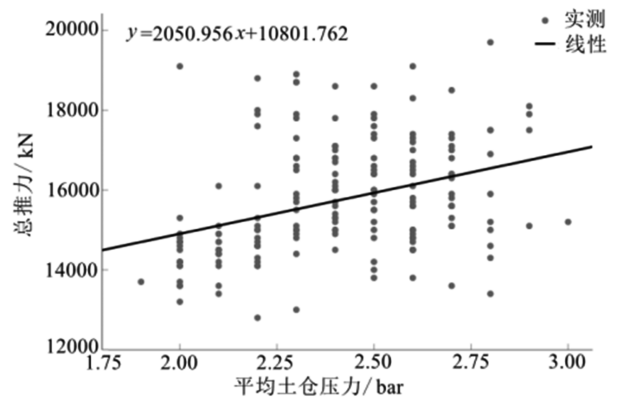


图4 平均土仓压力与总推力关系图
Fig.4 Relationship between average chamber earth pressure and total thrust

值得注意的是,根据相关性分析,可以发现盾构机总推力与推进速度之间几乎没有相关性,如图5所示。这与常识并不相符,根据牛顿第二定律可知:

$$F-f=ma \tag{1}$$

式(1)中, F 为盾构机总推力,单位为N, f 为盾构过程中所受阻力,单位为N, m 为盾构机质量,单位为kg, a 为盾构机掘进加速度,单位为 m/s^2 。

则在某时刻 t 盾构机推进速度为:

$$v=v_0+a(t-t_0) \tag{2}$$

式中, v_0 为 t_0 时刻对应的盾构机推进速度, v 与 v_0 的单位为 m/s , a 的单位为 m/s^2 , t 与 t_0 的单位为s。参考工程实际记录情况,图5中盾构掘进参数进行过量纲转化。

由上述可得,在理论情况下,盾构机推进速度应与总推力成正比。但在实际情况下,盾构机推进速度受到多个因素的影响。在包括刀盘转速、扭矩在内的多个因素影响叠加下,弱化了总推力对推进速度的直接影响,从而在实测数据上,反映出盾构机推进速度受总推力影响不大的结果。

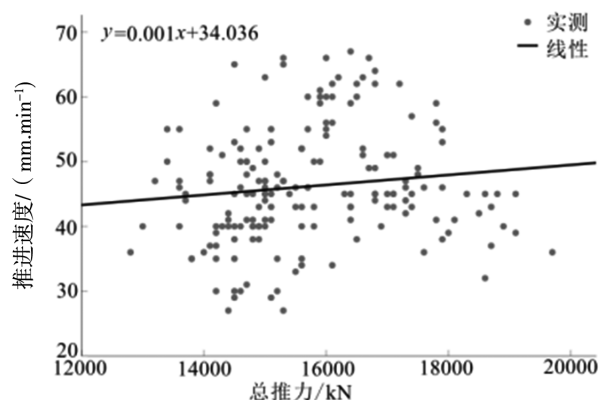


图5 总推力与推进速度关系图

Fig.5 Relationship between total thrust and advancing speed

2.2 盾构掘进参数与隧道埋深

在研究盾构掘进参数与隧道埋深的关系中,笔者发现盾构机总推力与平均土仓压力与隧道埋深均有较为显著的正相关关系,即随着隧道埋深的增加,盾构机总推力与平均土仓压力显著增加,如图6、7所示。这是因为在盾构掘进过程中,土仓压力近似等于静止土压力,虽然在实际过程中,考虑到盾构掘进对地层的扰动、注浆以及盾构通过后管片受力收缩等作用,往往会适当增加土仓压力,以达到减小地表沉降的目的,但土仓压力随着静止土压力增大而逐渐增大的趋势是不变的。结合上述土仓压力与总推力之间的关系,可以进一步解释隧道埋深的增加导致总推力增大的现象。总而言之,在黏土地层中,隧道埋深对盾构机总推力与平均土仓压力的影响归根结底是土压力的变化对两者的影响。

3 地表沉降分析

盾构掘进参数的控制对地表沉降的影响是不能忽视的。CHEN等^[15]指出土仓压力影响着开挖面的稳定性,当土仓压力小于开挖面前方水土压力时,开挖面会失稳,导致前方地表产生沉降。盾构机总推力与土仓压力对地表沉降的影响有着相似的原理。刀盘扭矩与盾构机穿越时的地表瞬

沉降也有较高的正相关度^[16]。而白廷辉等^[17]通过试验验证了盾构推进速度会对地表沉降产生显著影响。刀盘扭矩、盾构机总推力等盾构掘进参数虽然不是影响盾构掘进过程中地表沉降大小的全部因素,但地表沉降量的大小在一定程度上可以很好的反映盾构掘进参数的控制水平。

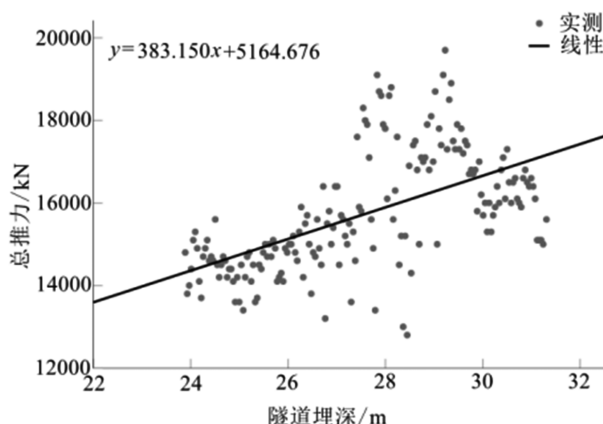


图6 总推力与隧道埋深关系图

Fig.6 Relationship between total thrust and tunnel buried depth

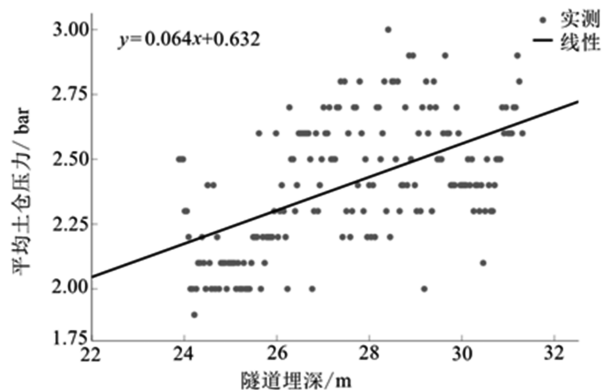


图7 平均土仓压力与隧道埋深关系图

Fig.7 Relationship between average chamber earth pressure and tunnel buried depth

图8为该盾构段轴线地表沉降图,从图中可以看出,盾尾通过三天后的地表沉降量基本控制在10 mm以内,根据魏纲等^[18]的研究,该地表沉降量可以假定为是由地层损失造成的,土体不产生压缩变形,能较好的反映盾构掘进对地层的影响。考虑到盾构施工速度较快,而黏土渗透性较差,土体的排水固结过程往往较长,因此,最大地表沉降量往往出现在盾尾通过几周后,其值也远大于盾尾通过三天后的地表沉降量。该区段最大地表沉降量基本控制在16 mm以内。根据《城市轨道交通工程监测技术规范》GB50911-2013相关规定,

综合隧道工程安全等级、周边环境风险等级和地质条件复杂程度,判定该区间工程监测等级为二级,结合监测方案中的变形控制指标:地表沉降控制值为 $\pm 30\text{ mm}$ 。综合分析,该盾构段地表沉降大小在安全范围内,即盾构掘进参数的控制较为合理。

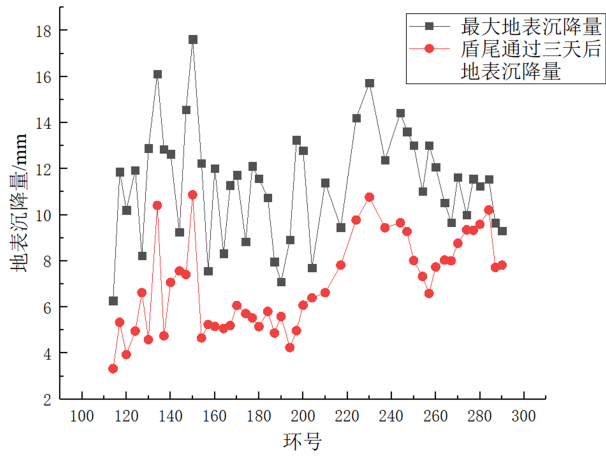


图8 轴线地表沉降图

Fig.8 Axis surface settlement

4 盾构掘进参数控制范围

提取该盾构段181环盾构掘进参数,绘制了盾构机总推力、刀盘转速、刀盘扭矩、推进速度、平均土仓压力这5个盾构掘进参数的频数分布图,并进行了正态分布的拟合。如图9所示,由图可知,在该盾构段,盾构机总推力集中分布在14 000~18 000 kN之间,平均值为15 734.25 kN;刀盘转速集中分布在1.4~1.7 rpm之间,平均值为1.54 rpm;刀盘扭矩集中分布在1000~2000 kN·m之间,平均值为1557.85 kN·m,推进速度集中分布在30~65 mm/min之间,平均值为46.19 mm/min;平均土仓压力集中分布在1.9~2.9 bar之间,平均值为2.4 bar。

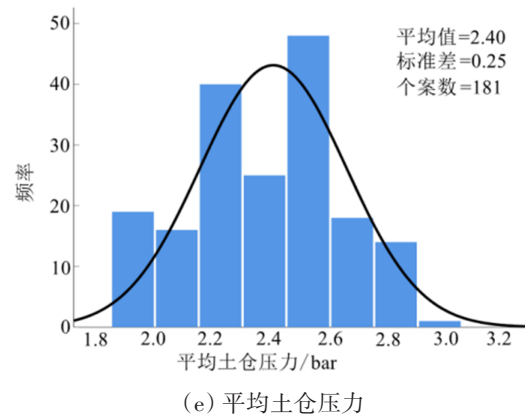
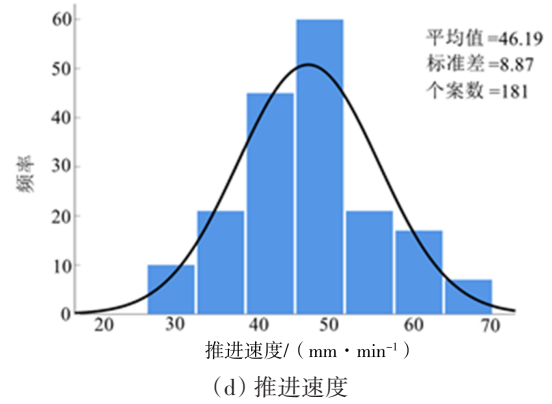
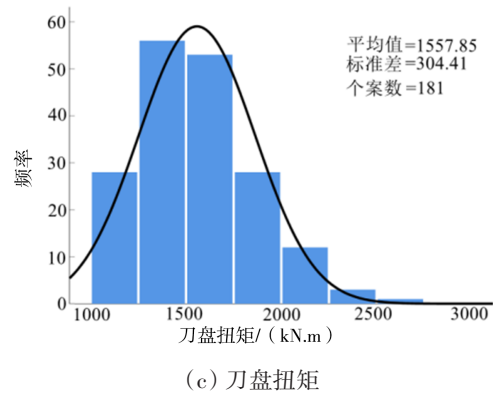
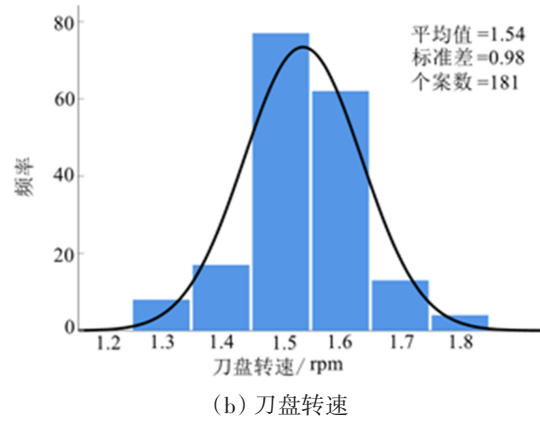
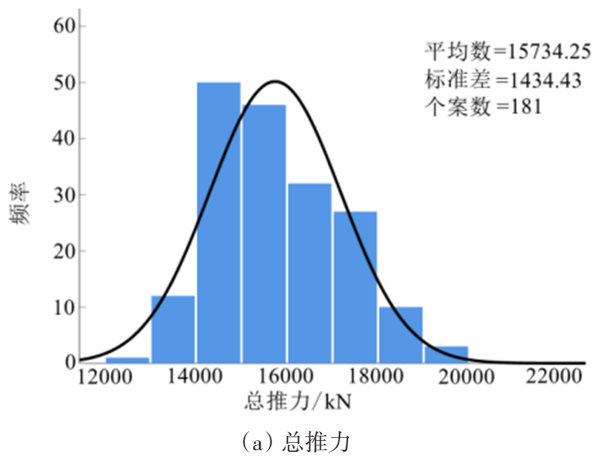


图9 盾构掘进参数频数分布图

Fig.9 Frequency distribution of shield tunneling parameters

为了更合理的确定盾构掘进参数的控制范围，基于数理统计相关知识，绘制了各盾构掘进参数的统计学指标实测数据表，如表1所示。

通过对表1进行分析：

(1)盾构机总推力的优化控制区间为14 200~17 500 kN，该区间囊括了约75%实测数据，其最优控制区间为15 524~15 945 kN。但考虑到在该地层下总推力与埋深之间近似成正比的关系，该控制区间仅适用于隧道埋深24~32 m的情况下。结合上述分析，隧道埋深每增减1 m，对应的总推力也应

相应增减380 kN左右。

(2)刀盘转速的优化控制区间为1.40~1.60 rpm，该区间囊括了约90%实测数据，其最优控制区间为1.52~1.55 rpm。

(3)刀盘扭矩的优化控制区间为1200~1900 kN·m，该区间囊括了约75%实测数据，其最优控制区间为1513~1602 kN·m。

(4)推进速度的优化控制区间为35~60 mm/min，该区间囊括了约75%实测数据，其最优控制区间为44.9~47.5 mm/min。

表1 盾构掘进参数统计表
Table1 Statistical table of shield tunneling parameters

项目	百分位数				平均值95%置信区间	
	5%	12.5%	87.5%	95%	下限	上限
总推力/kN	13 610	14 200	17 525	18 590	15 524	15 945
刀盘转速/rpm	1.40	1.40	1.60	1.70	1.52	1.55
刀盘扭矩/kN·m	1110	1210	1912	2155	1513	1602
推进速度/mm/min	31.1	36.0	59.0	63.0	44.9	47.5
平均土仓压力/bar	2.00	2.10	2.70	2.80	2.37	2.44

(5)平均土仓压力的优化控制区间为2.10~2.70 bar，该区间囊括了约75%实测数据，其最优控制区间为2.37~2.44 kN。但考虑到在该地层下平均土仓压力与埋深之间近似成正比的关系，该控制区间仅适用于隧道埋深24~32 m的情况下。结合上述分析，隧道埋深每增减1 m，对应的平均土仓压力也应相应增减0.06 bar左右。

5 结论

基于杭州机场快线某区间盾构工程，分析了位于黏土地层的部分盾构数据，得出了以下结论：

(1)在黏土地层中，盾构机总推力与刀盘扭矩之间、平均土仓压力与刀盘转速之间、平均土仓压力与总推力之间、盾构机总推力与刀盘转速之间具有一定的相关性。

(2)在一定埋深范围内，盾构机总推力、平均土仓压力与隧道埋深之间成正相关关系。

(3)结合轴线地表沉降数据，基于数理统计确定了杭州黏土地层中隧道一定埋深范围内的盾构掘进参数控制指标。

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):86-90.

[2] 王洪新. 土压平衡盾构刀盘挤土效应及刀盘开口率对盾构正面接触压力影响[J]. 土木工程学报,2009,42(7): 113-118.

[3] 王洪新. 土压平衡盾构刀盘开口率选型及其对地层适应性研究[J]. 土木工程学报,2010,43(3):88-92.

[4] 王洪新. 土压平衡盾构刀盘开口率对土舱压力的影响[J]. 地下空间与工程学报,2012,8(1): 89-93+104.

[5] DO N A, DIAS D, ORESTE P, et al. Three-dimensional numerical simulation of a mechanized twin tunnels in soft ground[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2014(42):40-51.

[6] 金大龙,袁大军,李兴高. 盾构刀盘开口率对掘进参数影响的模型试验研究[J]. 现代隧道技术,2017,54(2):156-162.

[7] 魏新江,周洋,魏纲. 土压平衡盾构掘进参数关系及其对地层位移影响的试验研究[J]. 岩土力学,2013,34(1):73-79.

[8] 尹苏江,严仕舜,裴柏铮,等. 岩质地层盾构掘进施工控制参数分析[J]. 现代隧道技术,2021,58(4):218-223+236.

[9] 李锟,田管凤,马宏伟,等. 土压平衡盾构掘进参数相关性分析及预测模型[J]. 科学技术与工程,2021,21(9):3814-3821.

- [10] 李俊逸. 复合地层土压平衡盾构隧道掘进参数与安全控制技术[D]. 成都:西南交通大学, 2015.
- [11] 王为乐. 长沙地铁复合地层盾构选型与掘进参数研究[D]. 长沙:中南大学, 2012.
- [12] 史金洪, 杨小龙, 吕志洲. 昆明软土盾构隧道掘进参数分析[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(S2): 386–392.
- [13] 郑鹏飞, 郭治岳, 陈文字, 等. 泥岩和砂卵石交互地层盾构施工参数优化研究[J]. 四川建筑, 2021, 41(1): 119–122.
- [14] 邓如勇. 盾构刀盘结泥饼的机理及处置措施研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- [15] Chen RP, Yin XS, Tang LJ, et al. Centrifugal model tests on face failure of earth pressure balance shield induced by steady state seepage in saturated sandy silt ground[J]. Tunnelling and Underground Space Technology. 2018 (81): 315–325.
- [16] 魏新江, 王凡勇, 丁智, 等. 软土区盾构刀盘扭矩分析及对地表变形影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(6): 1491–1497.
- [17] 白廷辉, 刘树佳, 廖少明. 软土地区盾构掘进速度对地层扰动现场试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(7): 2040–2046.
- [18] 魏纲. 盾构隧道施工引起的土体损失率取值及分布研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(9): 1354–1361.