

大粒径卵砾石地层土压平衡 盾构关键参数相关性特征

江 华^{1,2} 张晋勋¹ 江玉生²

(1. 北京城建集团有限责任公司博士后工作站 北京 100085;

2. 中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院 北京 100083)

摘 要 以北京地铁9号线盾构工程为背景,分别选取辐条式和面板式两种刀盘,在大粒径卵砾石地层开展土压平衡盾构现场掘进试验;利用“北京地铁安全风险管理体系”及“盾构施工实时信息管理系统”,收集盾构关键施工参数,并将其实时传输至室内实验室;通过分析试验收集的数据,得出土压平衡盾构关键施工参数之间的相关性特征。研究结果对指导盾构隧道施工及反馈设计具有重要理论与实际意义,也为类似研究提供参考。

关键词 北京地铁;大粒径卵砾石地层;现场试验;关键参数;相关性特征

中图分类号 TU94+1 **文献标志码** A

文章编号 1672-6073(2013)02-0094-06

1 盾构关键参数研究概况

随着北京地铁建设范围的不断扩大,地铁隧道埋深不断加大、地铁线路的不断加密,穿越的地层条件越来越复杂。位于北京城区西部、西南部的9号线主要在卵石含量高、粒径大及力学性质极其不稳定的砂卵石地层中开挖盾构隧道。该类型砂卵石地层采用盾构工法修建地铁隧道在国内外并不多见,没有成功的工程经验可借鉴,复杂的地层条件给工程建设带来了较大的困难,不但盾构自身的优势无法有效地发挥,而且出现了一系列的施工技术问题,对该地层土压平衡盾构施工的可行性与适应性提出了很大的质疑,造成了

不良的社会影响,给建设单位、设计单位、设备制造商以及施工单位都带来了巨大压力。虽然盾构工法适用的地层较为广泛,但不同地层盾构的适应性特征是有明显差异的,因此采用有效的方法对盾构地层适应性进行评价是国内外专家一直广泛关注及深入研究的问题。

盾构施工参数产生于盾构掘进过程中,是设备地层适应性的有效表达手段之一,对于盾构这种综合性较强的设备,各关键参数的内在联系较大,一二个参数很难系统地表征其地层适应性。从国内外公开发表的相关研究来看,对土压平衡盾构关键参数如上土压力、推进速度、刀盘扭矩及盾构总推力等之间相关性特征的研究还不多,目前的研究主要基于模型试验,如李向红、傅德明^[1]尝试对盾构掘进过程中土舱内外土压力的相关关系、刀盘扭矩和推力的变化及其影响因素进行了试验研究,分析了不同刀盘开口率对盾构总推力和刀盘扭矩的影响规律。王洪新、傅德明^[2-5]根据模型试验结果建立了土压平衡盾构掘进的数理模型,在此基础上推导了总推力、土舱压力、螺旋输送机转速和掘进速度间的数学表达式,并用模型试验数据验证了数学表达式的正确性。朱合华、徐前卫等^[6-7]分别针对上海地区的软土地层和北京地区的砂土地层,采用室内模型试验的方法,开展不同埋深、不同刀盘开口率、不同推进速度以及不同螺旋输送机转速等情况下的盾构掘削模型试验,分析了土压力与排土效率、单位时间排土量与推进速度、推力与扭矩之间的内部联系。邢彤、龚国芳、杨华勇等^[8-9]通过模型试验分析了刀盘扭矩与刀盘开口率、土舱压力、推进力的关系。

然而,模型试验往往受到模型尺寸、流场扰动、人身安全和测量精度的限制,有时可能很难通过试验方

收稿日期: 2012-11-01 修回日期: 2013-01-11

作者简介: 江华,男,博士后,主要从事隧道及城市地下工程方面的研究工作,alandavidrain@163.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(50974126);北京市科技计划项目(D08050600390803,D08050600390804)

法得到理想的结果。盾构不同于其他工程机械,地层适用性具有很强的针对性,要使得盾构充分发挥其掘进性能,必须将盾构设备置于与其性能相匹配的地层。想要充分掌握盾构设备的地层适应性问题,最好的办法就是进行现场掘进试验^[10-11]。笔者以北京地铁9号线在建工程项目为背景,利用盾构施工实时管理信息系统,选取两个地层条件类似的标段进行盾构现场掘进试验研究,以大粒径卵砾石地层面板式和辐条式两种刀盘结构形式土压平衡盾构推进速度及上土压力为主线,着重研究自身及其分别与设备参数(总推力、刀盘扭矩、螺旋输送机转速)、地层识别参数(场切深指数和扭矩切深指数)之间的相关性特征,为将来类似工程刀盘的设计、选型以及施工中关键参数的设定与调整提供参考,具有非常重要工程实际意义。

2 盾构关键参数简介

本节着重介绍上土压力、贯入度、场切深指数、扭矩切深指数等参数的定义和物理意义。推进速度、刀盘扭矩、盾构总推力、螺旋输送机转速等属于盾构常规性参数,将不再详细赘述。

2.1 上土压力

上土压力属于土压力的一种,指的是土舱最高位置土压力传感器记录的土压力值,由于其对地层变形最敏感,因此常被用于分析。

2.2 贯入度

贯入度是表征盾构设备掘进性能的一个重要指标,在进行盾构设计时,通常将盾构推进速度 v 与刀盘转速 n 之比定义为刀具贯入度,用 P_{rev} 表示,其物理意义就是刀盘每旋转一圈后刀具开挖深度,即

$$P_{rev} = v/n \quad (1)$$

由刀具贯入度的定义可知,当贯入度小于刀具长度时,刀盘面板部分没有完全接触到掌子面前方土体,此时,刀盘扭矩未能充分发挥,扭矩相对较小;当贯入度大于刀具长度时(即刀盘紧压掌子面前方土体),此时刀盘需要克服更大的阻力才能转动,刀盘扭矩随之增大,从而增大盾构设备负荷。

2.3 场切深指数 FPI

根据参数“归一化”处理方法,定义土压平衡盾构场切深指数 FPI (Field Penetration Index) 为

$$FPI = \frac{F}{P_{rev}} \quad (2)$$

式中: F ——盾构推力,kN;

P_{rev} ——刀具贯入度,mm/r。

场切深指数 FPI 表征单位贯入度所需的盾构总推力,反映了地层抵抗刀具贯入地层的能力。同时,场切深指数表明在同样的推力作用下产生的贯入度越小,即 FPI 越大,则刀盘前方的地层密实度或硬度越大;反之,在同样推力作用下产生的贯入度越大,即 FPI 越小,刀盘前方的地层越松软,越有利于盾构开挖。

2.4 扭矩切深指数 TPI

同理,扭矩切深指数 TPI (Torque Penetration Index) 为

$$TPI = \frac{T}{P_{rev}} \quad (3)$$

式中, T 为刀盘扭矩,kN·m。

扭矩切深指数,TPI 表征单位贯入度所需的刀盘扭矩,反映了盾构开挖地层抵抗刀盘贯入地层的能力。扭矩切深指数 TPI 越大,表明相同扭矩作用下产生的贯入度越小,刀盘前方地层密实度或者硬度越大,不利于盾构开挖;反之,扭矩切深指数 TPI 越小,表明相同扭矩作用下产生的贯入度越大,刀盘前方地层密实度或者硬度越小,有利于盾构开挖。

3 现场试验的基本概况

选取科怡路站—丰台南路站(以下简称“科—南”)与丰台东大街—丰台北路站(以下简称“丰东—丰北”)两个地层条件类似的盾构区间进行掘进试验,其中“科—南”区间隧道长为746 m,现场试验采用德国海瑞克土压平衡盾构(S488, $\phi 6.26$ m),设备总长80 m,盾体长7.9 m,刀盘采用面板式结构,开口率约为42%。“丰东—丰北”区间隧道长1 030 m,现场试验采用由日本石川岛生产的土压平衡盾构,设备总长80 m,盾体长9.2 m,刀盘采用辐条式结构,刀盘开口率约为60%。

两个区间盾构隧道底板以上无地下水,隧道断面范围内主要穿越卵石⑤层,最大粒径约380 mm,一般粒径20~80 mm,粒径大于20 mm的颗粒含量为总质量80%~90%,局部大于200 mm的漂石含量为15%~45%。

4 推进速度与关键参数的相关性

4.1 推进速度与总推力的关系

假设盾构总推力为 F ,所受的全部阻力为 f ,盾构设备质量为 m ,在某一时刻 t_0 时的速度为 V_0 ,则根据牛顿第二定律可知

$$F - f = ma \quad (4)$$

则任意时刻 t 的盾构推进速度为

$$v = v_0 + a(t - t_0) \quad (5)$$

式中, a 为任意时刻 t 的盾构瞬时加速度。

由式(1)~式(2)可知,盾构推进速度理论上应与盾构推力成正比关系。但是,盾构推进速度是一个综合性的参数,其不仅受盾构推力的影响,还受刀盘转速、贯入度、螺旋输送机转速等关键参数的影响。现场掘进试验数据表明,虽然面板式刀盘和辐条式刀盘盾构推进速度与总推力的相关性特征相近,线性相关性参数 R^2 分别为0.394和0.328,但是两种变化特征却存在明显差异,面板式刀盘盾构推进速度与总推力成正比,而辐条式刀盘盾构推进速度却与总推力成反比,如图1(a)和图2(a)所示。

4.2 推进速度与刀盘扭矩的关系

如图1(b)和图2(b)所示,推进速度与刀盘扭矩之间的相关性较强,呈指数关系,但两种刀盘存在差异,面板式刀盘推进速度平均值较小,随着刀盘扭矩的增加而增加,参数检验 $R^2=0.594$;辐条式刀盘平均推进速度较大,推进速度达到一定值后,随着刀盘扭矩的增大而减小,参数检验 $R^2=0.552$ 。

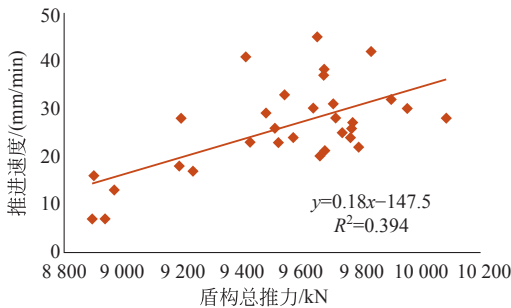
4.3 推进速度与螺旋输送机转速的关系

土压平衡盾构推进速度是一个综合效能指标,不仅与盾构设备本身的开挖性能有关,还与螺旋输送机的出土效率有关,因此分析推进速度与螺旋输送机转速的对应关系非常有必要。然而从砂卵石地层现场掘进试验收集的数据分析可知,土压平衡盾构推进速度与螺旋输送机转速的相关性较差,采用面板式刀盘的“科一南”盾构区间参数检验 $R^2=0.057$,采用辐条式刀盘的“丰东—丰北”区间 $R^2=0.041$,如图1(c)和2(c)所示。

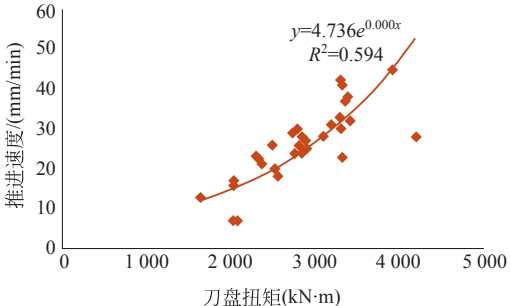
4.4 推进速度与场切深指数、扭矩切深指数的关系

如图1(d)、(e)和2(d)、(e)所示,面板式与辐条式刀盘盾构推进速度与场切深指数FPI和扭矩切深指数TPI均成二次抛物线关系,推进速度随着场切深指数FPI和扭矩切深指数TPI的增加而减小。面板式土压平衡盾构推进速度与场切深指数FPI、扭矩切深指数之间的 R^2 值分别为0.887和0.587,而辐条式土压平衡盾构推进速度与场切深指数FPI、扭矩切深指数之间的 R^2 值分别为0.577和0.667。试验结果表明,推进速度与地层适应识别参数存在较大的相关性,地层条件越好,推进速度越快。

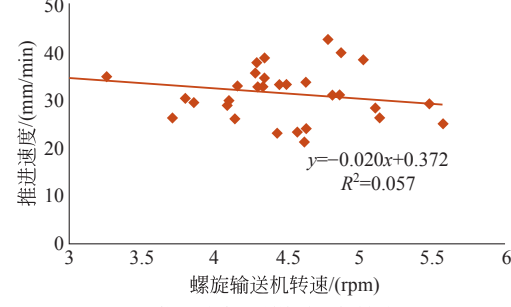
综合推进速度与刀盘扭矩、盾构推力及地层识别参数(场切深指数与扭矩切深指数)的关系可知,两种刀盘结构形式推进速度与刀盘扭矩、盾构总推力的关系相反,主要由于推进速度是一个综合性的参数,除了受设备参数



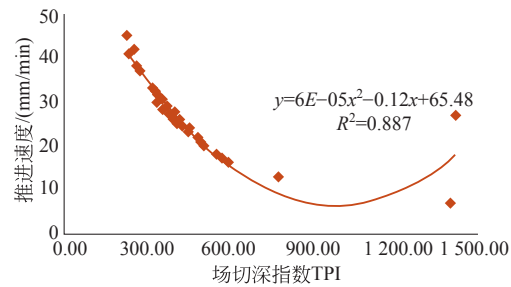
(a) 推进速度与盾构总推力



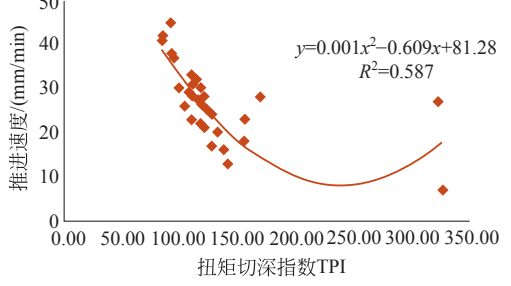
(b) 推进速度与刀盘扭矩



(c) 推进速度与螺旋输送机转速



(d) 推进速度与场切深指数



(e) 推进速度与扭矩切深指数

图1 “科一南”土压平衡盾构推进速度与关键参数的关系曲线

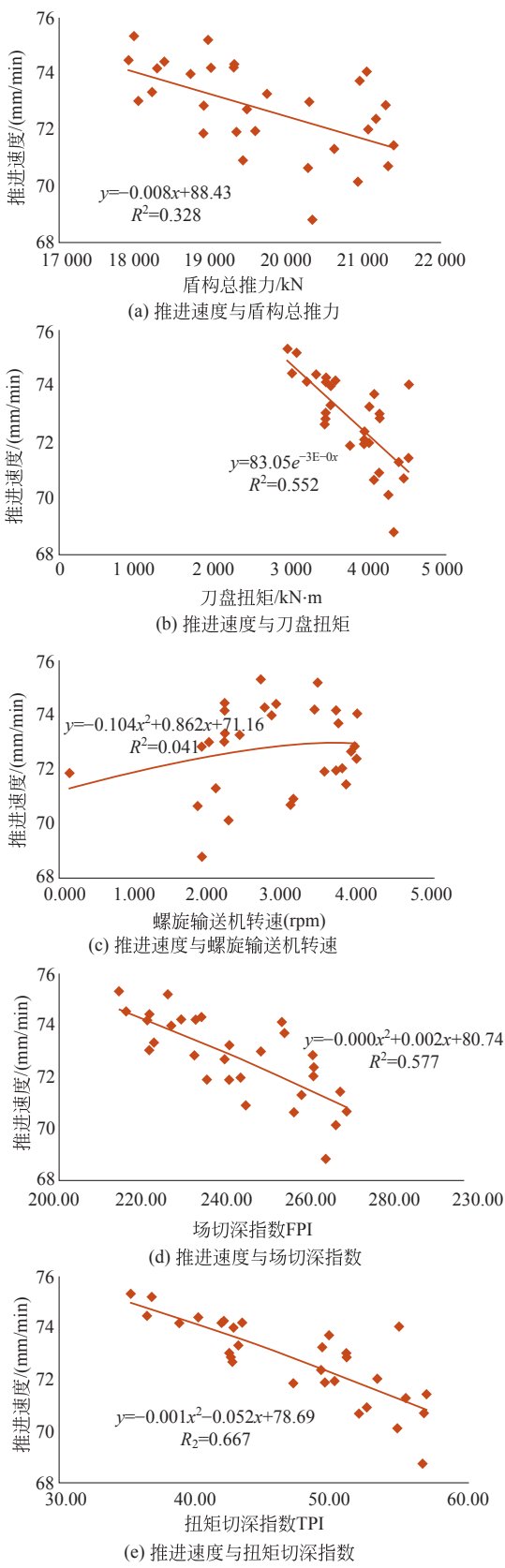


图2 “丰东—丰北”区间盾构推进速度与关键参数的关系曲线

的影响外,还受地层识别参数的影响,综合两者的影响后可知,辐条式刀盘的掘进效率要大大高于面板式刀盘,正是由于其掘进效率较高,接近于极限值,才会出现与盾构推力、刀盘扭矩成反比的现象。结果表明:辐条式刀盘用在大粒径砂卵石地层中掘进效率更高,地层适应性更好。

5 上土压力与关键参数的相关性

5.1 上土压力与刀盘扭矩、盾构总推力的关系

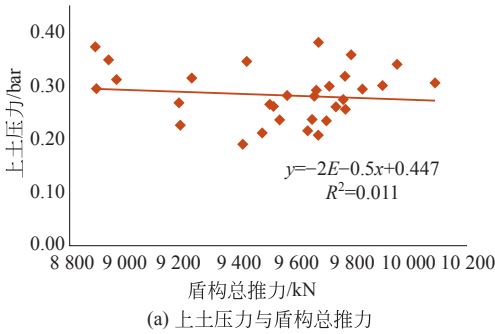
辐条式土压平衡盾构上土压力与刀盘扭矩、盾构总推力的线性关系较好,且在一定范围内,上土压均随着刀盘扭矩与盾构总推力的增加而增加,拟合两参数之间的关系发现,上土压力与刀盘扭矩之间的 R^2 值为 0.76,上土压力与盾构总推力之间的 R^2 值为 0.884,如图 4(b) 及图 4(a) 所示。然而,面板式土压平衡盾构上述两组参数的线性关系远比辐条式盾构差,上土压力分别与刀盘扭矩和盾构总推力之间的 R^2 值仅为 0.201 和 0.011,如图 3(b) 及图 3(a) 所示。

5.2 上土压力与螺旋输送机转速的关系

由图 3(c) 及图 4(c) 可知,面板式刀盘和辐条式刀盘盾构上土压力与螺旋输送机转速之间的相关性均较差,采用面板式刀盘的“科—南”区间两参数之间的 R^2 值仅为 0.057,采用辐条式刀盘的“丰东—丰北”区间两参数之间的 R^2 值为 0.035。

5.3 上土压力与推进速度的关系

现场试验表明:上土压力与推进速度有较强的线性关系,两种刀盘形式的盾构,其上土压力均随着推进速度的增加而降低,其中采用面板式土压平衡盾构施工的“科—南”区间上土压力与推进速度之间的 R^2 值为 0.289,采用辐条式土压平衡盾构施工的“丰东—丰北”区间上土压力与推进速度之间的 R^2 值为 0.401,详细的相关情况如图 3(d) 和 4(d) 所示。



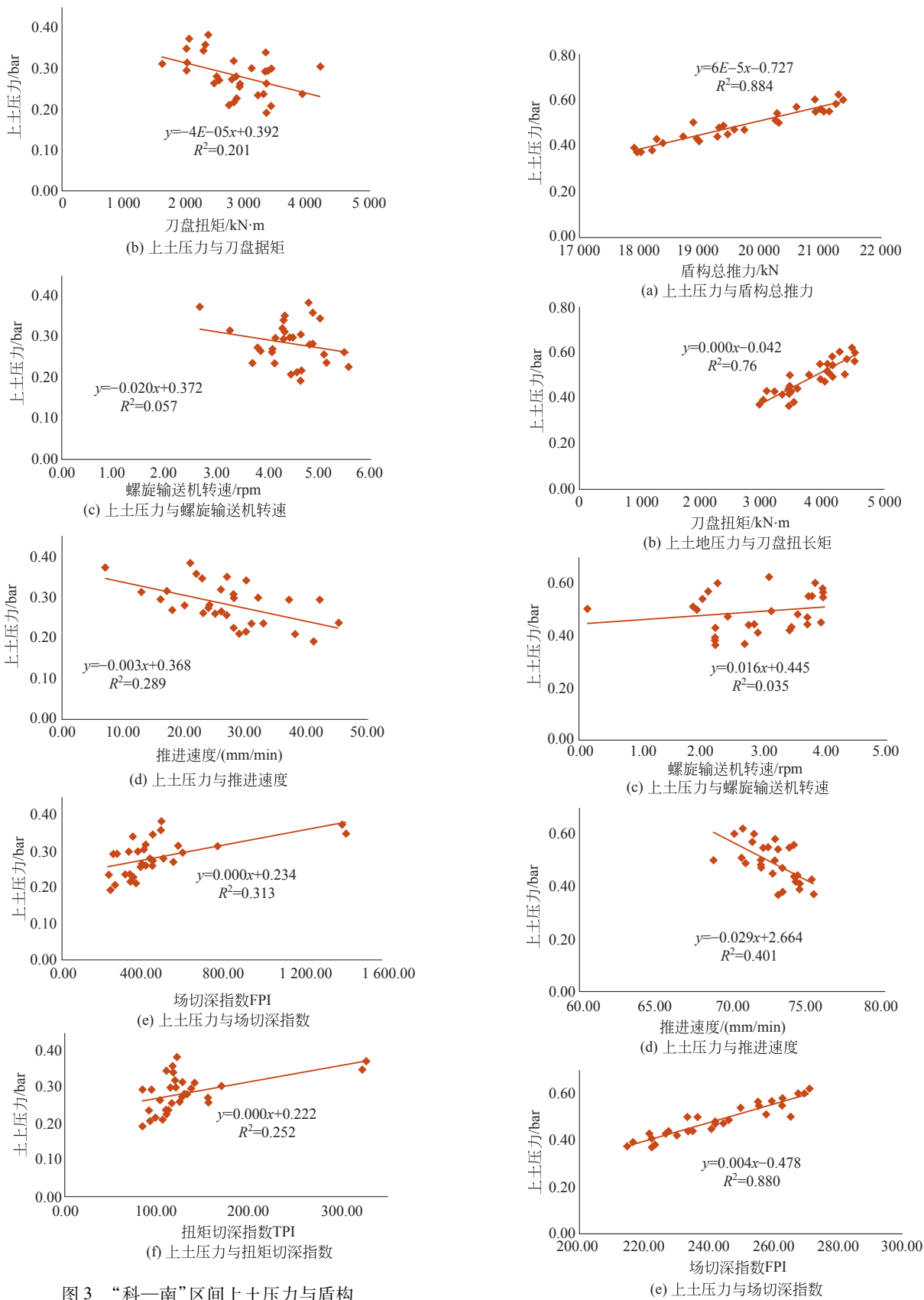


图3 “科一南”区间上土压力与盾构关键参数的关系曲线

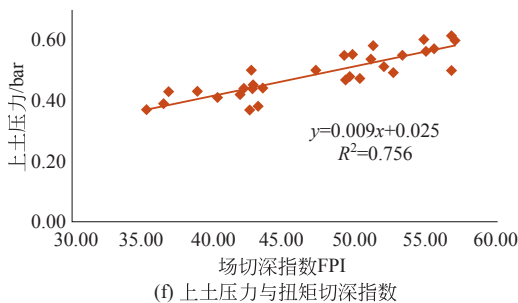


图4 “丰东—丰北”区间上土压力与盾构关键参数的关系曲线

5.4 上土压力与场切深指数、扭矩切深指数的关系

面板式和辐条式土压平衡盾构上土压力均与场切深指数 FPI、扭矩切深指数 TPI 成正比关系,上土压随着 FPI 与 TPI 的增加而增加。辐条式刀盘盾构上土压力与 FPI、TPI 的线性关系要好于面板式刀盘,其中面板式刀盘上土压力与场切深指数之间的 R^2 值为 0.313,如图 3(e)所示,上土压力与扭矩切深指数 TPI 之间的 R^2 值为 0.252,如图 3(f)所示;然而,辐条式土压平衡盾构上土压力与场切深指数和扭矩切深指数之间的 R^2 值分别为 0.880 和 0.756,见图 4(e)与图 4(f)所示。

综合分析上土压力与关键参数的相关性特征可知:由于大粒径砂卵石地层盾构掘进连续性特征较差,使得上土压力与螺旋输送机的相关性较差;上土压力与推进速度具有较强的线性相关性,上土压力随着推进速度的增加而降低;刀盘扭矩、盾构总推力、地层识别参数与上土压力的相关性特征和刀盘结构形式(刀盘开口率)有较大关系,辐条式刀盘相关性要好于面板式刀盘。

6 结论

分别选用辐条式及面板式土压平衡盾构在北京地铁 9 号线地层条件相近的两个盾构区间进行现场掘进试验,根据试验结果的分析和整理,得出如下结论:

1) 对于面板式与辐条式两种土压平衡盾构,上土压力均与推进速度有较强的线性关系,上土压力随着推进速度的增加而降低。

2) 由于大粒径卵砾石地层盾构施工连续性较差,致使上土压力、推进速度与螺旋输送机转速的相关性较差,螺旋输送机转速的变化对盾构推进速度和上土压力的影响较小。

3) 推进速度与总推力、刀盘扭矩及地层识别参数(场切深指数和扭矩切深指数)均有较好的相关性,综

合分析各关系可知:单位贯入度辐条式刀盘的掘进效率要比面板式更高,更适用于大粒径卵砾石地层开挖。

4) 采用辐条式刀盘的盾构上土压力与总推力、刀盘扭矩具有较好的相关性,上土压力与推力和刀盘扭矩成正比;相反,对于面板式刀盘,盾构上土压力与总推力和刀盘扭矩的相关性较差。

5) 上土压力及地层识别参数与刀盘结构形式(刀盘开口率)的关系密切,辐条式刀盘的两者相关性要好于面板式刀盘。

参考文献

- [1] 李向红,傅德明.土压平衡模型盾构掘进试验研究[J].岩土工程学报,2006,28(9):1101-1105.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 王洪新.土压平衡盾构刀盘扭矩计算及其与盾构施工参数关系研究[J].土木工程学报,2009,42(9):109-113.
- [6] 徐前卫,朱合华,廖少明,等.砂土地层盾构法施工的地层适应性模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2006,25(增):2902-2909.
- [7] Zhu Hehua, Liao Shaoming, Xu Qianwei, et al. Experimental study on working parameters of earth pressure balance shield machine tunneling in soft ground [J]. Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China, 2008, 2(4): 350-358.
- [8] 邢彤,龚国芳,杨华勇.盾构刀盘驱动扭矩计算模型及实验条件[J].浙江大学学报:工学版,2009,43(10):1794-1800.
- [9] 胡国良,胡爱闽,龚国芳,等.土压平衡盾构地层适应性设计理论和方法研究[J].中国机械工程,2008,19(16):1916-1919.
- [10] 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(2):5762-5766.
- [11] 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.

(编辑:郝京红)

(下转第 107 页)