

土压平衡模型盾构掘进试验研究

李向红, 傅德明

(上海隧道工程股份有限公司, 上海 200233)

摘要: 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, 然而, 它在不同的土层中的适应性是不一样的。为研究土压平衡盾构机的盾构施工参数以及刀盘开口率对土层的适应性, 在新建立的大型盾构模拟试验平台上, 利用直径为 1.8 m 的土压平衡模型盾构机在软土、砂土、砂砾土层中进行了盾构掘进模拟试验。试验平台的监测系统实时采集了盾构推进过程中的各种工作参数, 通过分析试验数据, 本文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, 还研究了不同刀盘开口率对盾构总推力和刀盘扭矩的影响规律, 研究结果对土压平衡盾构机的设计和施工具有参考意义。

关键词: 土压平衡模型盾构; 刀盘扭矩; 土舱土压力; 总推力; 刀盘开口率

中图分类号: TU443

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2006)09-1101-05

作者简介: 李向红(1967-), 男, 博士, 副教授, 主要从事隧道工程和地下工程方面的理论研究和施工技术研究。

Experimental study on excavation behaviour using model EPB shield with a diameter of 1.8 m

LI Xiang-hong, FU De-ming

(Shanghai Tunnel Engineering Company, Shanghai 200233, China)

Abstract: Earth pressure balanced (EPB) shield is one of the most important methods in tunneling. However, EPB shield has been adopted to different soils. In order to study the adoption of EPB shield with different ratios of opening on cutterdisc and different working parameters, on a large scale test platform built recently, using a model EPB shield with a diameter of 1.8 m, an excavation test was carried out in clay, sand and gravel. The working parameters of the model EPB shield were collected during the process of test. The correlation between earth pressures inside and outside the chamber, variation of torque of cutterdisc and their influencing factors had been studied. The influence of ratio of opening and total shield thrust, as well as torque of cutterdisc were also studied. The obtained results could be a useful reference for the design of an EPB shield and its tunnelling.

Key words: EPB shield; torque of cutterdisc; earth pressure of chamber; total thrust; rate of opening on cutterdisc

0 前言

土压平衡盾构是软土地区地铁隧道施工的主要方法之一, 早在1963年上海就开始了软土地层盾构隧道工程试验研究和施工技术研究^[1]。现在, 盾构法已越来越多地应用于我国的城市地铁隧道、市政公用隧道、水电隧道、铁路隧道和公路隧道的施工建设^[2]。盾构法适用的地层包括软土地层、砂土地层以及砂砾土层等。然而, 在不同的地层中盾构的适应性是有明显差异的, 所以, 针对实际工程进行盾构选型时必须慎重考虑盾构对不同地层的适应性。盾构的地层适应性研究包括多方面的内容, 就国内外公开发表的相关研究成果来看, 对土压平衡盾构的工作参数如刀盘扭矩、盾构总推力、刀盘开口率等与不同地层适应性之间的关系和规律的研究还不多。文献[3]通过掘进试验研究

了DPLEX盾构在各种模拟土层中的适应性。为检验DPLEX盾构开挖机构的性能和切削面支撑等, 组装了一台矩形断面(1.03 m×35 m)的试验盾构机开挖四种模拟地层——细砂、压实砂、砾石及夹有大卵石的砾石层。试验研究了盾构在4种模拟地层中的适应性以及所需扭矩的大小。文献[4]试验研究了盾构穿越砂性土层时为改善其地层适应性采用合适的添加剂的施工工艺, 在试验数据分析的基础上, 对添加剂增加砂性土的塑流性、保水性以及工作面动态土压平衡机理作了较深入的探讨。文献[5]就盾构机扭矩、刀具形状与布置及作用等关键技术方面根据北京地区的工程地质

基金项目: 国家 863 计划资助项目 (2003AA420110)

收稿日期: 2005-07-05

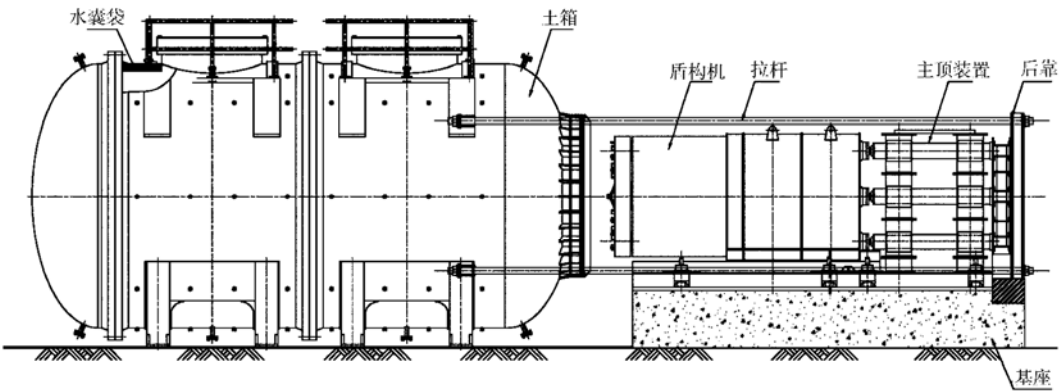


图 1 盾构掘进试验平台

Fig. 1 Test platform

和水文条件研究了北京地区地铁隧道盾构的地层适应性,并提出了该地区的盾构机型和盾构机基本配置的技术要求。文献[6]结合广州地铁二号线某区间隧道盾构施工实际情况,分析了盾构适应性的因素,提出了盾构选型的流程并阐述了刀盘刀具对不同地层的切削机理。文献[7]通过模型试验,对泥浆盾构施工中泥浆维持开挖面稳定的力学机理,开挖面前缘土体的应力变化规律,泥浆压力作用机理及泥皮形态进行了研究,提出了中粗砂地基中临界泥浆压力公式。为适应我国地铁隧道蓬勃发展的需要,研究土压平衡盾构在典型土层中的适应性,本文尝试在我国新建立的大型多功能盾构掘进模拟试验平台上(见图1)^[8],对土压平衡盾构的地层适应性进行了初步的试验研究,试验中选定了上海软土,北京和沈阳的砂性土和砂砾土作为3种典型地层并在大型土箱中模拟这3种土层,通过盾构在粘土、砂土、砂砾地层的模拟掘进试验,研究了刀盘开口率、盾构总推力、刀盘扭矩、土舱内外土压力等主要盾构施工参数的相互关系以及盾构推力和刀盘扭矩的影响因素和变化规律,研究结果可为我国的土压平衡盾构的设计和土压平衡盾构的隧道掘进施工提供参考。

1 模型盾构掘进试验过程

1.1 试验土的布置和模拟

在新建立的盾构试验平台上一共进行两次盾构掘进试验,每次掘进试验盾构先后穿越3种典型土层,在盾构掘进模拟试验平台的大型土箱(φ4000 mm×8600 mm)中,参照选定的典型土的土性进行配置和模拟。其中,模拟的软土采用上海轨道交通 M8 线某区间隧道盾构掘进过程中掘出的土重塑而成;砂土和砂砾土系参考北京砂性土和沈阳砂砾土的土性和颗粒级配曲线配置模拟而成的。在土箱内,沿盾构掘进预

定轴线分别布置了粘土、砂土和砂砾土,见图 2。填土完毕后,关闭土箱开口,通过布置在土箱内壁上的水袋给土箱内的土体加压,使土箱内的土层密实。土箱中3种土的土性见表1所示。第一次掘进试验时,刀盘的开口率为30%,盾构在3种典型土层中的推进距离分别是2250 mm(粘土)、2000 mm(砂土)和2000 mm以上(砂砾土);第二次盾构掘进试验时,刀盘的开口率为70%,总推进距离约为5700 mm,盾构在3种典型土层中的推进距离分别是2400 mm(粘土)、2000 mm(砂土)和2000 mm以上(砂砾土)。

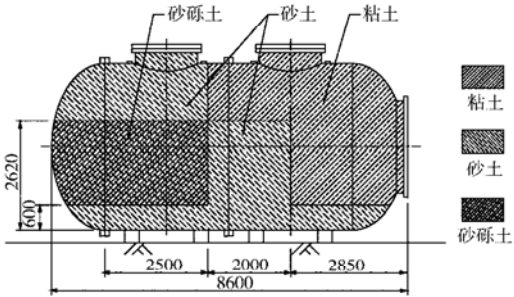


图 2 土箱内部模拟土层的布置

Fig. 2 Layout of three typical soils in earth box

表 1 土箱中 3 种典型土的参数

Table 1 Parameters of three kinds of soils					
土类	含水率 /%	容重 /(kN·m ⁻³)	摩擦角 /(°)	粘聚力 /kPa	孔隙比
粘土	47.2	17.0	10.0	10.0	1.26
砂土	18.4	20.2	34.0	0	0.634
砂砾	18.0	20.2	37.8	0.1	0.559

1.2 试验数据的采集

试验需要采集的数据有:模型盾构机的推力和推进速度、刀盘扭矩、刀盘转速、螺旋机转速、土舱土压力、土箱内土体土压力等,这些数据采用各种传感器通过 PLC 采集,可以实时地显示所需要的数据和曲

线, 并能自动存储下来, 以供分析。

2 掘进试验及其试验数据的分析

2.1 土舱内外土压的相关关系分析

土舱土压力是土压平衡盾构掘进过程中一个重要的监测数据, 因为土舱土压力的变化反映了盾构推进过程是否平稳, 直接影响到开挖面的稳定。图 3 (a)、

(b) 为盾构掘进试验过程中土舱外土压力与土舱内土压力的差值随推进距离的变化曲线, 可以看出, 盾构掘进过程中土舱内外存在一定的土压力差, 刀盘开口率为 30% 时在粘性土层中平均为 0.04~0.05 MPa, 刀盘开口率为 70% 时在粘性土层中土压力差的平均值为 0.03~0.04 MPa, 这表明在其它条件一定的情况下, 该压力差的大小与刀盘开口率大小有关, 刀盘开口率大则土舱内外土压力差值小, 显然开挖面前方的土压力大于土舱内的土压力, 并且砂性土层中土舱内外土压力差值更明显。

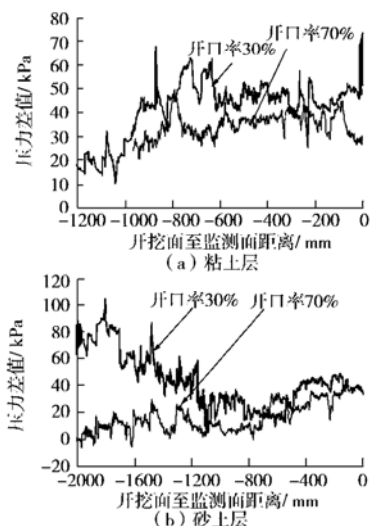


图 3 盾构土舱内外压力差值变化曲线

Fig. 3 Comparisons of earth pressure difference between shields with open ratio of 30% and 70%

通过工程实测数据反映的规律与试验反映出的规律是一致的。图 4^[9]表示上海地铁一号线某区间隧道 (刀盘开口率为 30%) 和上海双圆隧道某区间 (双圆盾构刀盘开口率为 85%) 实测的土压力数据, 土压力计的埋深约为 10 m。在切口到达处, 对于刀盘开口率为 30% 的盾构来说, 土舱内外土压力差值达到近 0.08 MPa, 而开口率较大的双圆盾构的土舱内外土压力差值仅为 0.03 MPa, 这说明开口率较大的土压平衡盾构在推进过程中土层中产生相对较小的附加土压力。

2.2 掘进过程中刀盘扭矩的变化规律

图 5 (a), (b) 反映了在不同的土层中掘进时盾构刀盘扭矩的变化情况以及刀盘开口率的大小对扭矩

的影响。刀盘开口率的大小对扭矩有明显影响, 显然, 在粘性土层中和在砂砾土层中掘进时, 盾构刀盘开口率为 30% 时的刀盘扭矩大于刀盘开口率为 70% 时的刀盘扭矩。另外, 还可以发现, 刀盘扭矩的变化与土舱土压力的变化趋势基本一致, 见图 6。这说明刀盘切口处土体的应力水平 (与土舱土压力仅有一差值) 对刀盘的扭矩有明显影响, 而切口处土体的应力水平与盾构的埋深有关。比较图 5 (a) 和图 5 (b) 还显示, 在粘性土和砂砾土层中刀盘的扭矩有很大区别, 可见, 土性对刀盘扭矩的大小有明显影响。

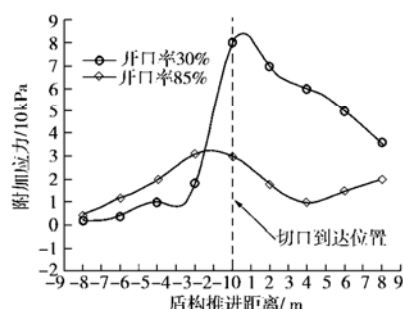


图 4 土压力增量变化曲线

Fig. 4 Comparisons of earth pressure difference between shields with open ratio of 30% and 85% for sandy soil

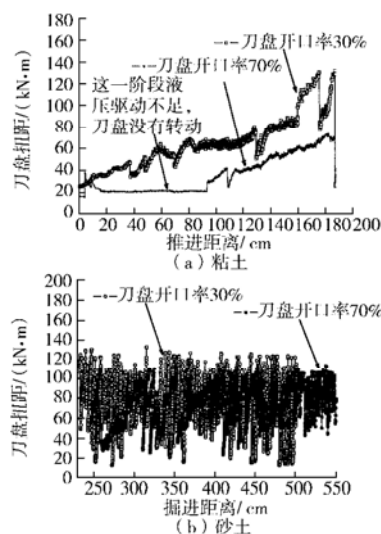


图 5 不同开口率刀盘扭矩的比较

Fig. 5 Comparisons of torque for cutterdisc with different open ratio

2.3 掘进过程中盾构总推力的变化规律

图 7 和图 8 是掘进试验过程中总推力的变化曲线, 在粘性土层中总推力随推进距离的增大而增大, 这是因为在试验平台上随着推进距离的增大盾构机本身和与之连接的钢管节与土体接触面积在增大, 因而侧摩阻力在增大, 所以总推力随着推进距离的增大而增大。实际上, 在土压平衡的情况下盾构在同一均匀土层中匀速推进时盾构机本身的侧摩阻力是不变的, 因此总

推力不会随着推进距离的增大而增大。可以看到在不同的土层中(粘性土、砂性土、砂砾土),总推力有较大差别,这说明土性对总推力有明显的影响。盾构掘进机在推进过程中,总推力主要用于克服土体作用于盾构掘进机刀盘上的正面阻力和土体作用于盾构掘进机壳体表面上的摩阻力,因此,除了土体本身的性质影响着盾构掘进机总推力之外,土舱内土压力的大小影响了刀盘上的正面阻力的大小,因而也影响总推力的大小。

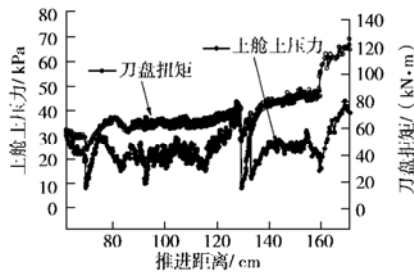


图 6 刀盘扭矩与土舱土压力的相关关系曲线

Fig. 6 Relationship between torque on cutterdisc and earth pressure on chamber

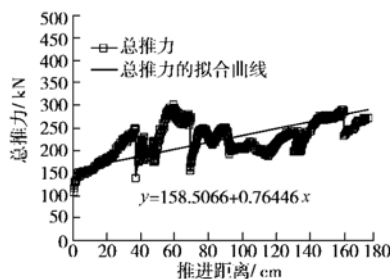


图 7 粘性土层中总推力的变化曲线

Fig. 7 Total thrust force for excavation in clayey soils

图 9 反映了总推力与土舱土压力的相关关系,可以看出,土舱土压力和总推力两者几乎在“同步”变化,这说明两者之间有较强的相关性。

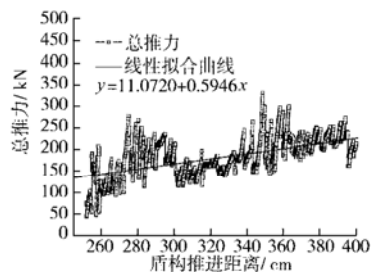


图 8 砂砾土层中总推力的变化曲线

Fig. 8 Total thrust force for excavation in sandy and gravelly soils

2.4 盾构总推力和扭矩的关系

图 10 反映了试验中盾构刀盘扭矩与盾构总推力的相关关系曲线。根据图 10 可以看到,盾构在粘性土层掘进过程中,刀盘扭矩和盾构总推力也具有相当好的相关性,两者的变化基本上是“同步”的。而图 10

(b) 是大阪大川盾构隧道的实测数据,也表明刀盘扭矩与盾构推力之间有良好的相关关系。

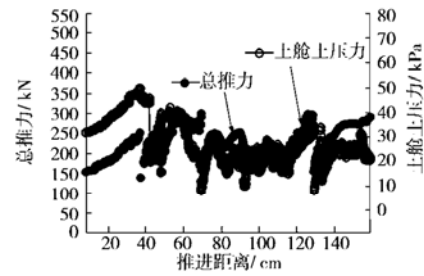


图 9 粘性土中总推力与土舱土压力的相关关系曲线

Fig. 9 Relationship between total thrust force and earth pressure on chamber

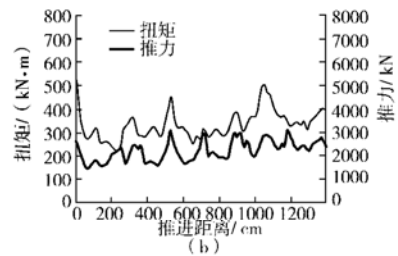
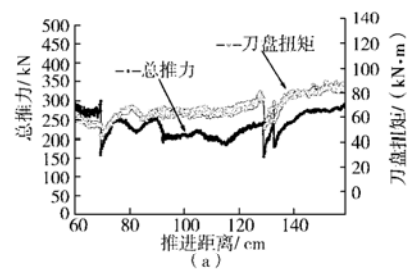


图 10 刀盘扭矩与总推力的相关关系曲线

Fig. 10 Relationship between total thrust force and torque of cutterdisc

实际上,由图 6 可以看到,土舱土压力与刀盘扭矩之间存在着的很好的相关关系,根据前面的分析可知,影响扭矩的主要因素包括土性、刀盘前方土体的应力水平等,而土舱土压力的大小间接反映了刀盘前方土体的应力水平,所以总推力与刀盘扭矩的关系,只是土舱压力与刀盘扭矩关系的反映。试验得出的盾构总推力和扭矩的关系与工程实测中得出的规律也是一致的。

3 结 论

通过在新建立的盾构掘进模拟试验平台上先后掘进粘土、砂土和砂砾土 3 种典型地层的两次盾构掘进试验研究,本文尝试分析了土压平衡模型盾构的刀盘扭矩、刀盘开口率、推力以及土舱内外土压力的变化规律,可得到以下结论:

(1) 在盾构掘进过程中土舱土压力与开挖面前方土体中(或刀盘面板上)土压力存在一定的土压力差,

开挖面前方的土压力大于土舱内的土压。土舱内外这个土压力差值的大小与刀盘开口率大小有关。刀盘开口率较大,则对应的土舱内外土压力差值较小;反之亦然。

(2) 刀盘切口处土体的应力水平对刀盘的扭矩有明显影响,而切口处土体的应力水平与盾构的埋深有关。另外,在粘性土和砂砾土层中刀盘的扭矩的大小有明显区别,因此埋深、土性等是影响刀盘扭矩的重要因素。

(3) 盾构掘进试验表明刀盘扭矩的大小与刀盘开口率相关,刀盘开口率较小时刀盘扭矩较大,刀盘开口率较大时刀盘扭矩较小。因此,开口率较大的刀盘对土层的适应性较好。

(4) 土性对总推力有明显的影响,盾构总推力也与土舱土压力的大小相关,而土舱土压力大小的设定与主要决定于隧道的埋深和土性等因素,所以,盾构选型或进行盾构总推力的设计计算时要考虑隧道的埋深和土性等因素。

参考文献:

- [1] 刘建航,侯学渊.盾构法隧道[M].北京:中国铁道出版社,1991.(LIU Jian-hang, HOU Xue-yuan. The shield driven tunnel[M]. Beijing: China Railraod Press, 1991.)
- [2] 施仲衡.盾构机在中国地铁建设中的应用[J].建筑机械,2002(50):20.(SHI Zhong-heng. shield machine in the application of metro construction in China[J]. Construction Machinery. 2002(50):20.)
- [3] KASHIMA Y, KONDO N, INOUE M. Development and application of the DPLEX shield method: Results of experiment using shield and segment models and application of the method in tunnel construction[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1996,11(10):45 - 50.
- [4] 唐益群 宋永辉,周念清,等.土压平衡盾构在砂性土中施工问题的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(1):52 - 56.(TAND Yi-qun, SONG Yong-hui, ZHOU Nian-qing, et al. experimental research on troubles of EPB shield construction in sandy soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005,24(1):52 - 56.)
- [5] 乐贵平.浅谈北京地区地铁隧道施工用盾构机选型[J].现代隧道技术,2003,40(3):14 - 30.(YUE Gui-ping. Selection of shield machine for Beijing metro construction[J]. Modern Tunnelling Technology, 2003,40(3):14-30.)
- [6] 丁志诚,张志勇,白云.广州地铁隧道施工中的盾构选型及盾构改进应用[J].岩石力学与工程学报,2002,21(12):1820 - 1823. (DING Zhi-cheng, ZHANG Zhi-yong, BAI Yun. Application of shield selection and shield improvement in Guangzhou metro shield tunnel construction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002,21(12):1820 - 1823.)
- [7] 程展林,吴忠明,徐言勇.砂基中泥浆盾构法隧道施工开挖面稳定性试验研究[J].长江科学院院报,2001,18(5):53 - 64.(CHEN Zhan-lin, WU Zhong-ming, XU Yan-yong. Experimental study on stability of tunnel excavation surface in sand foundation by slurry shield method[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2001,18(5): 53 - 64.)
- [8] 傅德明,李向红,等.大型盾构掘进模拟试验平台:中国,CN 200410089260.7 [P].2004. (FU De-ming, LI Xiang-hong et al. Large-scale test platform for model shield driving. China: CN200410089260.7 [P]. 2004.)
- [9] 上海隧道工程股份有限公司.国家“863 计划”项目—盾构地层适应性设计理论、方法和模拟试验平台鉴定资料[R].上海:上海隧道工程股份有限公司,2004.(Shanghai Tunnel Engineering Company. The finding documentation of State's Programme of 863 Plan: Shield's design theory, method adaptable to the ground and simulation testing platform[R]. Shanghai: Shanghai Tunnel Engineering Company, 2004.)