

DOI: 10.11779/CJGE20240359

软硬不均地层盾构机姿态控制试验研究

黄大维^{1,2}, 陈凯^{1,2}, 徐长节^{*1,2}, 卢文剑^{1,2}, 曾小涛^{1,2}

(1. 华东交通大学轨道交通基础设施性能监测与保障国家重点实验室, 江西 南昌 330013; 2. 华东交通大学江西省防灾减灾及应急管理重点实验室, 江西 南昌 330013)

摘要: 软硬不均地层是盾构施工过程中常遇到的不良地质之一, 盾构机在掘进软硬不均地层时, 刀盘受力不均易导致盾构机姿态发生变化, 从而导致盾构隧道偏离设计轴线。为研究盾构机掘进软硬不均地层时, 刀盘受力和盾构机姿态变化之间的关系, 设计了1:10的模型盾构开挖施工模型试验, 对试验中软硬不均地层中盾构机受力状况进行了分析, 并对试验施工过程中盾构机的姿态进行了监测和分析。试验结果分析得出: ①盾构机在开挖软硬不均地层时, 刀盘掘进硬土层时开挖面土体反力大于刀盘掘进软土层时开挖面土体反力, 刀盘将受到额外的开挖面扭矩, 从而导致盾构机刀盘扭矩增大; ②盾构法施工上软下硬地层时, 盾构机刀盘逆时针转动, 刀盘右侧接触硬土面积分别大于、小于、等于左侧时, 盾构机刀盘受到开挖面反力整体合力分别向左下、左上、左; 盾构机刀盘顺时针转动时, 受力方向相反; ③盾构机在开挖软硬不均地层时, 刀盘转向应频繁规律的改变, 正反转交替掘进; ④盾构机在地层中的姿态变化受本身固有姿态和盾构机受力的综合影响。

关键词: 软硬不均; 盾构施工; 模型试验; 盾构机受荷; 盾构机姿态

中图分类号: TU411 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2025)10-2173-10

作者简介: 黄大维(1984—), 男, 湖南郴州人, 工学博士, 教授, 主要从事地下铁道与岩土工程方面的研究工作。E-mail: gddthdw@126.com。

Experimental study on attitude control of shield machine in soft and hard uneven strata

HUANG Dawei^{1,2}, CHEN Kai^{1,2}, XU Changjie^{1,2}, LU Wenjian^{1,2}, ZENG Xiaotao^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Performance Monitoring and Protecting of Rail Transit Infrastructure, East China Jiaotong University,

Nanchang 330013, China; 2. Jiangxi Key Laboratory of Disaster Prevention-mitigation and Emergency Management, East China Jiaotong

University, Nanchang 330013, China)

Abstract: A soft and hard uneven stratum is one of the wenk geological conditions which often encountered in the process of shield construction. When the shield machine excavate a soft and hard uneven stratum, the uneven force of the cutterhead can easily lead to the change of the attitude of the shield machine, which leads to a deviation of the shield tunnel from the design axis. In order to study the relationship between the force of the cutterhead and the attitude change of the shield machine when the shield machine is tunneling in soft and hard uneven strata, a 1:10 model shield excavation construction model test is designed. The force condition of the shield machine in soft and hard uneven strata is analyzed, and the attitude of the shield machine during the test construction is monitored and analyzed. The analysis of the test results shows that: (1) When the shield machine excavates the soft and hard uneven stratum, the soil reaction force of the excavation surface when the cutter head excavates the hard soil layer is greater than the soil reaction force of the excavation surface when the cutter head excavates the soft soil layer, and the cutter head will be subjected to additional excavation surface torque, which leads to an increase of the cutter head torque of the shield machine. (2) When the shield method is used to construct the upper soft and lower hard strata, the cutterhead of the shield machine rotates counterclockwise. When the contact hard soil area on the right side of the cutterhead is greater than, less than or equal to the left side, the cutterhead of the shield machine is subjected to the overall

基金项目: 国家自然科学基金项目(52378398); 江西省主要学科学术和技术带头人领军人才项目(20232BCJ22009); 江西省自然科学基金项目(20242BAB26077) This work was supported by National Natural Science Foundation of China (Grant No.52378398), Jiangxi Province Major Discipline Academic and Technical Leader Leading Talent Project (Grant No.20232BCJ22009), and Jiangxi Provincial Natural Science Foundation (Grant No.20242BAB26077).

收稿日期(Received): 2024-04-15 **修回日期(Revised):** 2024-07-16 **接受日期(Accepted):** 2024-09-29 **网络出版日期(Online):** 2024-09-30

*通信作者 (E-mail: xucj@zju.edu.cn)

resultant force of the excavation face reaction force to the lower left, upper left and left, respectively. When the cutterhead of the shield machine rotates clockwise, the force direction is opposite. (3) When the shield machine excavates soft and hard uneven strata, the cutterhead should be changed frequently, and the positive and negative rotations are alternately adopted. (4) The attitude change of the shield machine in the stratum is affected by its inherent attitude and the force of the shield machine.

Key words: soft and hard uneven; shield construction; model test; load on shield machine loaded; shield machine posture

0 引 言

软硬不均地层是盾构法施工过程中常遇到的不良地质条件之一, 盾构机在开挖软硬不均地层时, 刀盘开挖不同地层所受到的反力不同, 易导致盾构机姿态控制难、刀盘磨损异常等问题^[1-5]。尤其是盾构机前端因刀盘受力不均将导致盾构姿态发生变化, 从而造成盾构隧道的成型质量差, 使后期运营安全存在巨大隐患。因此, 揭示盾构机在软硬不均地层中刀盘的受力规律与刀盘受力不均导致的盾构机姿态变化规律对实际施工具有重大工程意义。

针对上述问题, 国内外学者通过不同方法对软硬不均地层中盾构机的刀盘受力和盾构机姿态变化进行了一系列研究。盾构机开挖软硬不均地层时, 刀盘切割不同土体时受到的土体反力不同, 导致刀盘的受力不均匀。许多专家根据不同岩土层破裂强度准则提出了不同的破岩机理, 如剪切破岩理论、挤压破岩理论、岩石破碎理论等^[6-8]。不同的破岩理论均为理想环境下的刀盘受力情况, 然而, 在实际施工中, 盾构机以及盾构机刀盘的受力情况更加复杂, 一些专家对不同状况下的软硬不均地层盾构机受力情况进行了研究分析。杨振兴等^[9]提出了一种盾构掘进软硬不均地层的刀盘受力计算方法, 并利用该方法在实际工程中应用, 结合数值仿真得出了软硬不均地层刀盘总推力的合理值。何祥凡等^[10]结合工程实例, 采用数值模拟计算方法, 对盾构机穿越上软下硬地层掌子面各分区顶推力优化分析, 得出穿越上软下硬地层时适当减小上部的顶推力增大下半部的顶推力。张涛^[11]对软硬不均地层盾构隧道荷载的作用模式进行了研究, 基于极限状态下竖向松动土压力表达式与力学平衡方程推导出侧土压力计算式, 并考虑软硬不均地层盾构机受荷的突变型对太沙基理论竖向滑移面松动宽度合理修正。吴起星等^[12]基于盘形滚刀破岩受力计算 Rostami 公式, 建立了盾构机刀盘受力的计算方法。软硬不均地层盾构机受荷复杂, 所以精准的盾构施工控制至关重要^[13-14]。

部分专家对盾构机在软硬不均地层中的姿态控制问题进行了研究。谭忠盛等^[15]分析了软硬不均地层盾构掘进方向发生偏差的原因, 对现场数据分析得出了偏差的原因和规律, 提出了盾构掘进姿态的控制方法。霍建勋等^[16]通过起伏基岩地层的工程实例, 对现场油

缸顶推力关系进行分析得到了合理的软硬不均地层的油缸推力比, 并提出了合理的刀具改良配置建议。简鹏等^[17]基于纠偏理论设计了盾构最佳纠偏曲线模型, 提出了盾构姿态自动控制方法, 设计了盾构掘进姿态自动控制系统, 并在地铁施工现场进行使用测试。吴秉键等^[18]、李惠平等^[19]提出一种综合人工智能和传统控制理论思想的盾构姿态自主控制体系, 该控制体系的预测准确率、控制精度和稳定性均显著高于人工控制水平, 并在盾构施工现场得到应用。Yang 等^[20]设计了采用压力流量复合控制方案的原型盾构机推进液压系统, 该系统能够满足盾构机在运动和姿态控制方面的掘进要求。田瑞忠等^[21]以工程实例为背景, 提出了盾构机在软硬不均地层掘进时的姿态控制监测手段, 提出了复杂环境下盾构机姿态的纠偏控制方法。金慧^[22]通过研制的模型盾构机, 开展了超软土地层盾构动、静态调姿模型试验, 探究了静态和动态调姿过程中盾周荷载的分布和演化模式, 揭示了不同调姿路径下的地表位移变化规律。

然而, 上述研究仅对软硬不均地层中的盾构机受荷和盾构机姿态控制分别进行了讨论。缺少盾构机在掘进软硬不均地层时, 因受荷突变引起姿态变化的原因以及姿态变化之后纠偏控制的相关研究。因此, 本文通过自主研发的模型盾构机, 模拟盾构机在软硬不均地层中掘进施工。阐明了盾构机掘进软硬不均地层的受力平衡机理, 监测并分析了盾构机姿态变化的规律和原因。

1 模型试验介绍

1.1 模型盾构机

为了研究盾构开挖过程中各参数控制对施工质量的影响, 自主研发了盾构施工模拟系统, 如图 1 所示。实际单洞单线盾构隧道的直径一般为 6~6.8 m, 盾构机的盾壳外径一般为 6.4~7.3 m; 综合各因素考虑, 按照 1:10 的相似比设计了盾壳外径为 0.7 m、刀盘外径为 0.71 m、长度为 1.2 m 的模型盾构机, 模型盾构机的重量为 480 kg, 其平均密度为 1.04 g/cm³, 模型盾构机如图 1 (a) 所示。通过在刀盘开口位置设置可转动的闸板, 实现了刀盘开口率可调的目的, 盾构机刀盘如图 1 (b) 所示。为了使盾构机能够顺利顶推

掘进, 设计了用于盾构机始发的钢架, 钢架上设计有始发架、反力架和用于顶推的顶推千斤顶; 盾构机的后端与始发架连接, 反力架两侧各安装一个顶推千斤顶, 千斤顶一端顶在始发架上, 千斤顶和始发架接触处安装用于测量顶推力的轴力计。始发架和反力架均可在钢架上移动, 通过在反力架的后端设置插销为其提供反力, 始发架四周安装有减摩滑轮, 以减小始发架与钢架之间的摩擦力, 达到轴力计读数近似顶推力的目的, 盾构机始发架如图1(c)所示。钢架整体通过插销与土箱连接, 并为始发架提供拉力, 防止始发架发生位移; 试验过程中使用螺旋输送机输出掘进过程中的渣土, 并实时对渣土输土量进行称量。盾构机刀盘、螺旋输送机、顶推千斤顶的动力均由液压动力站提供。



(a) 模型盾构机图



(b) 盾构机刀盘



(c) 始发架

图1 模型盾构机

Fig. 1 Shield machine model

1.2 软硬不均地层布置

试验所用土箱的长、宽、高分别为4, 3, 3 m, 土箱主体结构用方钢焊接加工而成, 四周镶嵌木板与有机玻璃板。填土材料为河砂, 在土箱内填筑2.9 m高的砂土, 每填筑0.2 m进行充分压实, 填筑密度为 1.825 g/cm^3 。试验中在盾构机开挖范围内设置软硬不均地层, 软地层即为试验所用填土材料砂土, 其土层承载力约为20 kPa, 硬地层使用素混凝土浇筑而成, 其土层承载力约为80 kPa, 素混凝土块的尺寸为长1.2 m, 宽0.5 m, 高0.28 m, 密度为 2.421 g/cm^3 。上软下硬地层布置在距离始发位置50 cm处, 上硬下软地层布置在距离始发位置200 cm处, 混凝土块中心与盾构机开挖中心一致, 开挖范围内的混凝土高度为20 cm, 其余8 cm埋置在砂土中, 软硬不均地层布置情况如图2, 3所示。试验中盾构隧道设计轴线位于距离土箱底部20 cm处, 隧道设计长度为3 m。

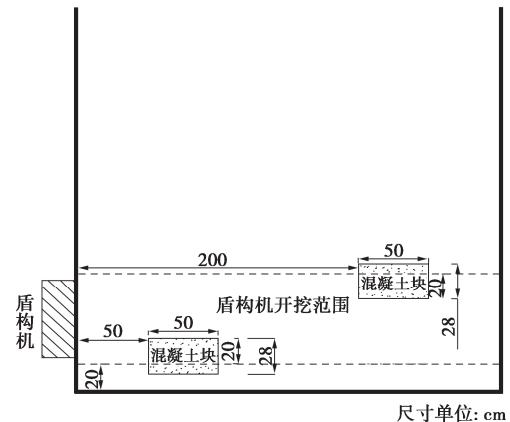


图2 软硬不均地层布设示意图

Fig. 2 Schematic diagram layout of soft and hard uneven strata



(a) 浇筑前



(b) 浇筑中



(c) 浇筑后

图 3 上软下硬地层布置

Fig. 3 Layout of upper soft and lower hard strata

1.3 测量元件布设

为了测量模型盾构机的姿态变化,在盾构机前端内壁布设读数尺用来读取盾构机前端偏移量(如图 4(a)所示),在盾构机靠近尾部的侧壁上布设读数尺用来读取盾构机尾端的偏移量(如图 4(b)所示),前端和尾端读数尺相距 85 cm。读数尺由两段互相垂直的钢尺组成,分别用来读取水平偏移量和竖向偏移量。为了确定基准面,在盾构机外部架设一台激光水平仪(如图 5 所示),模型盾构机掘进前需将激光与激光尺调至同一平面内,选定平面后在激光水平仪前后两端分别标出定位标。当激光水平仪开启后,前后激光分别对齐定位标(定位标用以确定激光水平仪的位置);模型盾构机掘进过程中,激光水平仪的位置固定。以掘进前的激光尺读数为初始值,算出每次掘进后盾构机前后水平和竖向的姿态偏移变化量。为避免激光打在前端和尾端的读数尺上时,激光阴影造成的相互干扰,把前端和尾端的读数尺布设成互成斜对称,在布设好读数尺后,通过高清摄像头实时监测读数尺的变化(图 6)。



(a) 外尺布设

(b) 内尺布设

图 4 盾构机姿态读数尺布设

Fig. 4 Layout of shield machine attitude reading ruler

为实现对盾构机姿态的调整,在盾构机和钢套筒端口内壁处焊接 6 个接口,模型盾构机和钢套筒在接口处使用可伸缩的螺栓进行连接,伸缩螺栓可通过转动中间的螺杆来达到伸长的效果,通过测试得到伸缩螺栓每转动 20 圈伸长 9.8 cm,即每转动一圈螺栓伸长

0.49 cm。在盾构机尾部的上方和下方分别布设两个伸缩螺栓,左侧和右侧各布设一个伸缩螺栓(如图 7 所示)。



图 5 激光水平仪

Fig. 5 Laser level meter



图 6 读数尺监测

Fig. 6 Reading ruler monitoring



(a) 螺栓连接位置

(b) 伸缩螺栓

图 7 姿态调整螺栓

Fig. 7 Attitude adjustment bolts

为保证盾构机顺利出洞,在出洞口位置四周各预留了 1 cm 的空隙。在土箱中开挖掘进 3 m 后,盾构机顺利出洞。盾构机在开挖方向的左侧部位刚好与预留的空间边缘对齐,刀盘上部距预留的空间边缘 0.5 mm,说明此次试验的盾构机姿态控制效果较好。盾构机出洞状况如图 8 所示。

2 盾构机在软硬不均地层中受力分析

盾构机在开挖掘进软硬不均地层时受力情况复杂,受力主要由开挖面土体荷载、盾构机自身重力、



图 8 盾构机出洞

Fig. 8 Shield machine exiting the tunnel

千斤顶顶推力、土体摩擦力等组成。开挖面纵向反力、土体摩擦力、千斤顶顶推力为盾构机纵向受力的主要组成, 可认为千斤顶顶推力等于开挖面纵向反力和土体摩擦力之和。盾构机自身重力主要由地层土体支撑, 且盾构机的重量主要集中在盾构机前端, 盾构机的重力分布不均, 导致地层在支撑盾构机时受力不均, 支撑盾构机前端的土体较支撑盾构机后端的土体受盾构机重力更大, 导致支撑盾构机前端的土体沉降更大。随着盾构机向前开挖掘进, 盾构机将逐渐形成向下裁头的趋势, 盾构机裁头如图 9 所示。

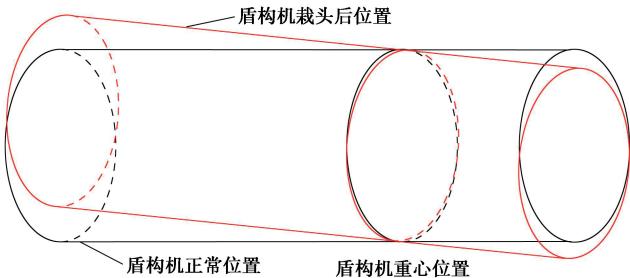


图 9 盾构机裁头示意图

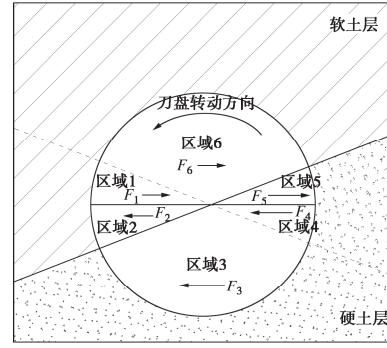
Fig. 9 Schematic diagram of shield airborne head

盾构机横向与竖向受力主要由盾壳与地层土体相互作用力和刀盘受开挖面土体反力组成。盾构机在软硬不均地层中掘进时, 假设刀盘掘进软硬不均地层时, 土体受力均达到承载力基本容许值而破坏^[11]。盾构机在掘进上软下硬地层时, 刀盘与软硬不均土体接触主要有刀盘右侧接触硬土面积大于、小于、等于左侧 3 种情况。基于上述假设, 盾构机刀盘受开挖面土体反力分为如下几种情况:

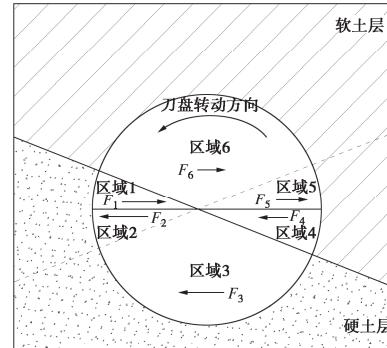
(1) 刀盘横向受力分析: 刀盘逆时针转动, 刀盘上半部受土体反力向左, 下半部受土体反力向右。根据受力方向和大小的不同, 按照横向轴对称划分成 6 个或 4 个区域, 如图 10 所示。

a) 刀盘右侧接触硬土面积大于左侧时, 如图 10 (a) 所示。其中, F_1 , F_6 , F_2 为软土的承载力容许值, F_4 , F_3 , F_5 为硬土的承载力容许值。可以得出 F_5 和

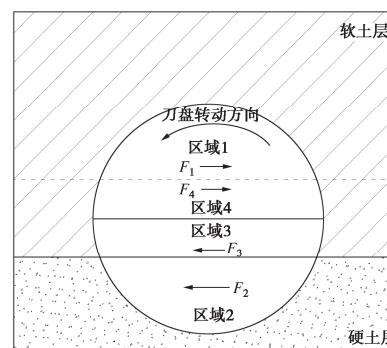
F_4 , F_1 和 F_2 的大小和区域分别相等, 但方向相反, F_3 大于 F_6 , 所以刀盘受到开挖面反力的合力向左。



(a) 右侧大于左侧



(b) 右侧小于左侧



(c) 右侧等于左侧

图 10 上软下硬地层刀盘横向受力状况

Fig. 10 Lateral force condition of cutterhead in upper soft and lower hard stratum

b) 刀盘右侧接触硬土面积小于左侧时, 如图 10 (b) 所示。其中 F_6 , F_5 , F_4 为软土的承载力容许值, F_1 , F_2 , F_3 为硬土的承载力容许值, 可以得出 F_1 和 F_2 , F_4 和 F_5 的大小和区域分别相等, 但方向相反, F_3 大于 F_6 , 所以刀盘受到开挖面反力的合力向左。

c) 刀盘右侧接触硬土面积等于左侧时, 如图 10 (c) 所示。上半部区域 1 和区域 4 受到开挖软土时的反力 F_1 和 F_4 ; 下半部区域 3 受到开挖软土时的反力 F_3 , 区域 2 受到开挖硬土时的反力 F_2 , 其中 F_1 , F_4 , F_3 为软土的承载力容许值, F_2 为硬土的承载力容许值, 且 $F_2 > F_1 = F_4 = F_3$ 。可以得出 F_4 和 F_3 的大小和区域

分别相等, 但方向相反, F_2 大于 F_1 , 所以刀盘受到开挖面反力的合力向左。

综上 3 种刀盘与软硬不均开挖面接触状况, 可得知盾构机开挖上软下硬地层时, 刀盘逆时针转动时, 刀盘受到开挖面反力的横向合力向左。刀盘顺时针转动时, 情况正好相反, 刀盘受到开挖面反力的横向合力向右。

(2) 刀盘竖向受力分析: 刀盘逆时针转动, 刀盘左半部受土体反力向上, 右半部受土体反力向下。根据受力方向和大小的不同, 按照竖向轴对称划分成 6 个或 4 个区域, 如图 11 所示。

a) 刀盘右侧接触硬土面积大于左侧时, 如图 11 (a) 所示。其中 F_1 , F_5 , F_6 为软土的承载力容许值, F_2 , F_3 , F_4 为硬土的承载力容许值。可以得出 F_6 和 F_5 , F_2 和 F_3 的大小和区域分别相等, 但方向相反, F_4 大于 F_1 , 所以刀盘受到开挖面反力的合力向下。

b) 刀盘右侧接触硬土面积小于左侧时, 如图 11 (b) 所示。其中 F_1 , F_2 , F_3 为硬土的承载力容许值, F_4 , F_5 , F_6 为软土的承载力容许值。可得出 F_6 和 F_5 , F_2 和 F_3 的大小和区域分别相等, 但方向相反, F_1 大于 F_4 , 所以刀盘受到开挖面反力的合力向上。

c) 刀盘右侧接触硬土面积等于左侧时, 如图 11 (c) 所示。左半部区域 1 受到开挖软土时的反力 F_1 , 区域 2 受到开挖硬土时的反力 F_2 ; 右半部区域 3 受到开挖硬土时的反力 F_3 , 区域 4 受到开挖软土时的反力 F_4 , 其中 F_1 , F_4 为硬土的承载力容许值, F_2 , F_3 为软土的承载力容许值, 且 $F_1=F_4$, $F_2=F_3$ 。可得出 F_1 和 F_4 , F_2 和 F_3 的大小和区域分别相等, 但方向相反, 所以刀盘受到开挖面反力的合力为零。

通过 3 种刀盘与软硬不均开挖面接触状况分析, 可得知盾构机开挖上软下硬地层且刀盘逆时针转动的时, 当刀盘右侧接触硬土面积大于左侧接触硬土面积, 刀盘受到开挖面反力的竖向合力向下; 刀盘右侧接触硬土面积小于左侧接触硬土面积, 刀盘受到开挖面反力的竖向合力向上; 刀盘右侧接触硬土面积等于左侧接触硬土面积, 刀盘受到开挖面反力的竖向合力为零。刀盘顺时针转动时, 情况正好与刀盘逆时针转动时相反。

综上分析可知, 刀盘逆时针转动时, 刀盘右侧接触硬土面积大于左侧接触硬土面积, 盾构机刀盘受到开挖面反力整体合力向左下; 刀盘右侧接触硬土面积小于左侧接触硬土面积时, 盾构机刀盘受到开挖面反力整体合力向左上; 刀盘右侧接触硬土面积等于左侧接触硬土面积时, 盾构机刀盘受到开挖面反力整体合力向左。刀盘顺时针转动时, 刀盘右侧接触硬土面积大于左侧接触硬土面积时, 盾构机刀盘受到开挖面

反力整体合力向右上; 刀盘右侧接触硬土面积小于左侧时, 盾构机刀盘受到开挖面反力整体合力向右下; 刀盘右侧接触硬土面积等于左侧时, 盾构机刀盘受到开挖面反力整体合力向右。因此, 为防止盾构机因刀盘受力不均导致盾构机出现姿态变化, 刀盘在开挖过程中应频繁规律的改变转动方向。

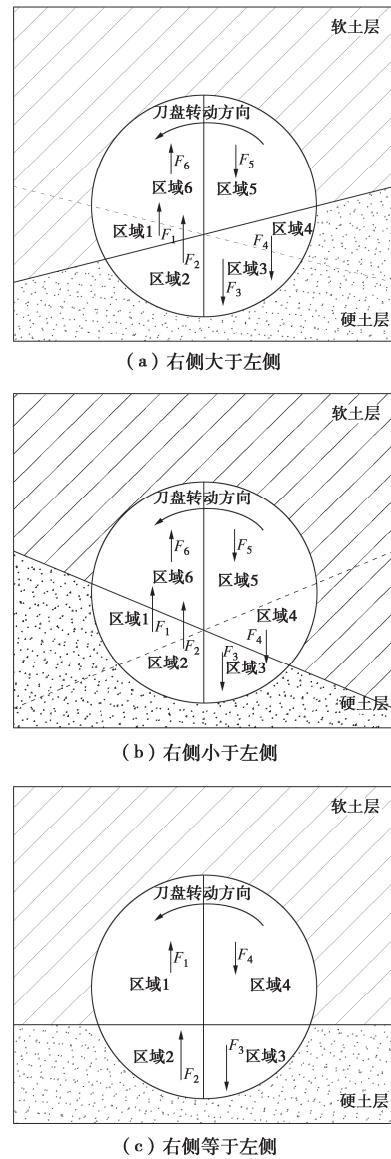


图 11 上软下硬地层刀盘竖向受力状况

Fig. 11 Vertical stress conditions of cutterhead in upper soft and lower hard stratum

(3) 盾构机刀盘所受扭矩分析: 盾构机在均匀地层中掘进时刀盘仅存在一个和刀盘转向相反的扭矩, 此扭矩由刀盘扭矩抵消, 刀盘达到受力平衡状态。而在软硬不均地层中时, 盾构机刀盘不仅受到横向与竖向受力的影响而发生偏移, 并且由于刀盘掘进硬土层时所受开挖面土体反力大于刀盘掘进软土层时所受开挖面土体反力, 刀盘将受到比掘进均匀地层时更大的扭矩, 从而导致盾构机刀盘扭矩在掘进到软硬不均地

层突然变大。

3 盾构机姿态变化分析

3.1 盾构机姿态分析

图12为盾构机开挖过程中, 盾构机尾端横向与竖向偏移量在不同开挖位置时的数据。偏移量为0的位置为盾构隧道的设计轴线, 图中横向偏移以掘进方向的左侧为正, 竖向偏移以向上为正。从图12中可看出盾构机在未开挖至上软下硬地层位置时, 盾构机尾端总体向开挖方向的右侧和上方偏移, 但偏移量与变化量均较小; 当盾构机掘进至软硬不均地层位置时, 盾构机尾端出现向左偏移的趋势, 但趋势较不明显; 当盾构机开挖至上软下硬地层中段时, 盾构机尾端姿态发生突变, 横向出现向左侧明显的偏移趋势, 竖向发生向下方偏移的趋势; 在掘进过软硬不均地层之后, 盾构机尾端横向继续向左侧偏移, 竖向在掘进过软硬不均地层后出现掘进20 cm偏移量不变的情况, 之后向上发生偏移直至掘进完成。

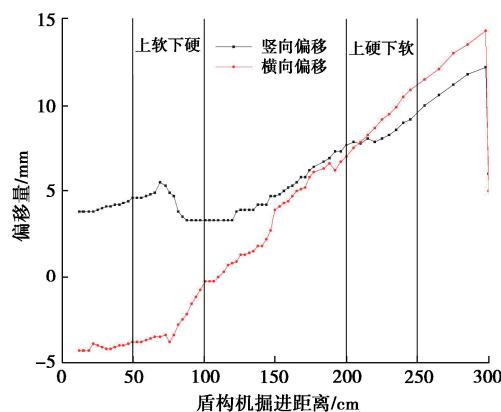


图12 盾构机尾端偏移

Fig. 12 Tail end offsets of shield machine

图13为盾构机开挖过程中, 盾构机前端横向与竖向偏移量在不同开挖位置时的数据。和图12相同, 向左和向上偏移时为正。盾构机在始发后至软硬不均地层前掘进时, 盾构前端整体向开挖方向的右侧和上方偏移, 横向偏移不规律、较平稳, 竖向出现向下方偏移的趋势。在开挖软硬不均地层时, 横向姿态发生突变, 出现向左侧偏移的趋势, 并一直向左偏移至盾构机掘进上硬下软地层位置后, 横向偏移量变化趋于平稳, 变化量在8 mm左右波动; 同时前端竖向偏移量在掘进至软硬不均地层时偏移量在0.5 mm左右波动, 直到盾构机掘进到150 cm位置时, 竖向发生向上偏移的趋势, 200 cm之后竖向偏移量在4.7 mm左右波动直至掘进完成。

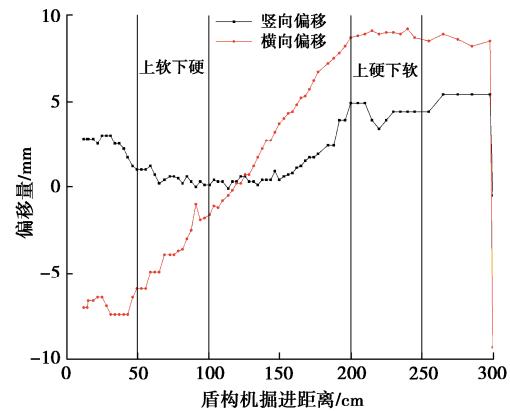


图13 盾构机前端偏移

Fig. 13 Front-end offsets of shield machine

试验过程中, 在开挖上软下硬地层时, 刀盘开挖软土为砂土, 开挖硬土为混凝土。根据上述分析可知本试验布设的上软下硬土层为刀盘右侧接触硬土面积等于左侧的状况, 且试验过程中盾构机刀盘均逆时针旋转。所以根据刀盘受力有如下盾构机姿态分析。

由于盾构机刀盘横向下半部所受开挖面土体反力大于刀盘上半部所受开挖面土体反力, 盾构机前端整体向开挖方向的左侧移动, 即图13中在掘进至上软下硬地层时, 盾构机前端横向向左侧发生突变的原因; 然而此时, 盾构机尾端还未进入土体内, 所以尾端横向变形没有发生突变。随着开掘继续进行, 盾构机整体向左侧进行偏向, 前端由于开挖上软下硬地层向左发生偏移, 然而盾构机在地层中受土体的约束, 不能进行平移, 所以此时盾构机将以自身某一位置处为中心发生转动, 又因为盾构机整体向右发生了偏移, 当前端向左偏移时, 尾端将继续向右偏移, 直到盾构机姿态变为整体向左时, 盾构机尾端开始向左偏移, 即盾构机尾端在盾构机掘进至75 cm处才发生突变的原因。

盾构机刀盘竖向受土体反力的合力为零, 所以盾构机前端竖向姿态不受软硬不均土体的影响, 即在盾构机掘进的前150 cm内的竖向姿态变化不明显的原因。但在掘进过程中盾构机受顶推力、盾壳和土体接触的摩擦力以及自身重力等影响将产生姿态上下变化。尤其是盾构机自身重力主要集中在盾构机前端, 掘进过程中盾构机将出现栽头现象, 导致盾构机前端出现向下偏移的趋势, 即图13中盾构机前端竖向在掘进至软硬不均地层之前出现向下偏移趋势的原因。当掘进至软硬不均地层时, 盾构机下部由砂土支撑变为混凝土支撑导致支撑强度更高, 盾构机栽头现象得到抑制, 所以图13中盾构机前端竖向在掘进至软硬不均地层时几乎不发生偏移。

为了防止盾构隧道偏离设计轴线导致盾构机不能

顺利出洞, 在盾构机掘进至 150 cm 时, 调整盾构机与第一个钢套筒连接的伸缩螺栓。根据前期盾构机姿态的数据分析可知, 盾构机横向整体向左偏移, 且向左偏移的趋势较大, 故调整伸缩螺栓使左侧伸缩螺栓相对右侧伸缩螺栓更长, 减缓盾构机向左偏移的趋势; 但由于盾构机前端受限于硬土地层而不能轻易左右移动, 所以左右偏移的调整幅度较小, 故盾构机在掘进 150 cm 后横向偏移继续按照原有趋势发展。同时由于盾构机竖向出现栽头现象, 故调整伸缩螺栓使下部伸缩螺栓相对上部伸缩螺栓更长, 抑制盾构机栽头现象。调整螺栓后, 使得盾构机整体呈现向上抬头的前进趋势, 故盾构机在掘进 150 cm 后竖向偏移出现向上偏移的趋势。

盾构机在上硬下软地层中掘进时, 由于刀盘的转向一致, 地层布设相反, 所以刀盘横向受力与上软下硬地层中的受力情况相反。盾构机刀盘横向在开挖面处下半部受到的反力小于上半部受到的反力, 所以盾构机前端整体向掘进方向的右侧移动, 同时由于盾构整体已有向左侧偏移的趋势, 故在掘进上硬下软地层时, 盾构机前端向左偏移的趋势得到抑制, 并最终保持平稳的趋势前进。然而盾构机尾端横向由于未受到其他外力限制, 继续保持原有的变化趋势继续向左偏移。

在上硬下软地层中, 盾构机竖向受土体反力与上软下硬地层中的受力情况相反, 所以在掘进上硬下软地层时刀盘竖向受土体反力的合力为零, 同时由于开挖上硬下软地层时, 盾构机前端上部受混凝土的限制, 所以向上偏移的趋势得到抑制, 不再继续向上发生偏移。盾构机尾端竖向同样由于未受到其他外力限制, 继续保持原有的变化趋势继续向上偏移。在掘进到 300 cm 处, 盾构机已经接近出洞, 虽然隧道盾构机前端的偏移量符合前期预留的出洞间隙, 但由于盾构机的姿态仍未达到预设的平行隧道设计轴线的方向, 所以为了防止盾构机尾部到达出洞口时不能顺利出洞, 在盾构机刚出洞时, 人工调整了盾构的姿态, 导致监测到的盾构机姿态出现反方向的大偏移。

综上所述, 盾构机在开挖掘进过程中的姿态变化受顶推力、开挖面荷载、地层荷载等因素的综合影响, 而且在姿态调整的过程中, 盾构机受地层限制难以快速地完成预期的调姿效果。所以, 在实际施工过程中根据盾构机在不同地层中的受力情况, 需要提前做好盾构机姿态的调控, 防止盾构机因姿态变化过大且难以调整导致工程事故。

3.2 盾构机刀盘扭矩分析

图 14 为试验过程盾构机在过软硬不均地层前后

的刀盘扭矩变化情况, 图中负数表示刀盘的转向为逆时针。从图中数据可以看出盾构机掘进软硬不均地层前刀盘扭矩大小为 1000 N·m 左右; 掘进软硬不均时的 50~65 cm 时刀盘扭矩大小为 1100 N·m 左右, 65~85 cm 时刀盘扭矩大小在 1200~1300 N·m, 85~100 cm 时刀盘扭矩大小回到 1100 N·m 左右; 在掘进过软硬不均地层后, 刀盘扭矩大小为 1000 N·m 左右。

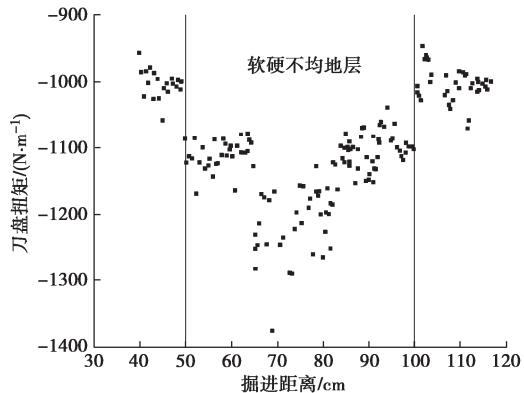


图 14 盾构机刀盘扭矩

Fig. 14 Cutterhead torques of shield machine

在试验过程中, 为避免掘进软硬不均地层时, 上部软土更容易损失导致上部土层沉降过大的问题, 在掘进 65~85 cm 增大了顶推速度和顶推力以减小出土率。由于扭矩与正面推力、顶推速度成线性关系^[23], 所以在掘进 65~85 cm 时的刀盘扭矩较 50~65, 85~100 cm 时的刀盘扭矩更大。

对比盾构机在过软硬不均地层前后的刀盘扭矩, 盾构机在掘进均匀地层时的刀盘扭矩明显较软硬不均地层时的刀盘扭矩更小。可验证前文分析的盾构机在掘进软硬不均地层时, 刀盘将受到与刀盘转向相反的更大弯矩, 导致盾构机扭矩在过软硬不均地层时比均匀地层时更大。

4 结 论

(1) 盾构机在开挖软硬不均地层时, 刀盘掘进硬土层所受开挖面土体反力大于刀盘掘进软土层所受开挖面土体反力, 刀盘将受到额外的开挖面扭矩, 从而导致盾构机刀盘扭矩增大。

(2) 盾构法施工上软下硬地层, 盾构机刀盘逆时针转动时, 刀盘右侧接触硬土面积分别大于、小于、等于左侧时, 盾构机刀盘受到开挖面反力整体合力分别向左下、左上、左; 盾构机刀盘顺时针转动时, 受力方向相反。

(3) 盾构机在开挖软硬不均地层时, 盾构机刀盘受到开挖面土体的不均匀反力, 将导致盾构机姿态发生改变。故在开挖软硬不均地层时, 应频繁规律地改

变刀盘转向。

(4) 盾构机在地层中的姿态变化受本身固有姿态和盾构机受力的综合影响, 盾构机在软硬不均地层中的刀盘受力更加复杂, 导致姿态调整比在均匀地层中更加难实现。

利益冲突声明/Conflict of Interests: 所有作者声明不存在利益冲突。All authors disclose no relevant conflict of interest.

作者贡献/Authors' Contributions: 黄大维、陈凯和徐长节参与试验设计; 陈凯和卢文剑完成试验操作; 黄大维、卢文剑、陈凯和曾小涛参与论文的写作和修改。所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。HUANG Dawei, CHEN Kai, and XU Changjie participated in the experimental design; CHEN Kai and LU Wenjian completed the experimental operations; HUANG Dawei, LU Wenjian, CHEN Kai, and ZENG Xiaotao were involved in the writing and revision of this paper. All the authors have read the last version of manuscript and consented for submission.

参考文献:

- [1] 杨 钊, 唐冬云, 刘朋飞, 等. 城市湖底超大直径盾构隧道施工重难点及关键技术探究: 以武汉两湖隧道(南湖段)工程为例[J]. 隧道建设(中英文), 2023, 43(2): 296-304. (YANG Zhao, TANG Dongyun, LIU Pengfei, et al. Key construction technologies and difficulties of super-large-diameter shield tunnel under urban lake: a case study of Nanhu section of lianghu tunnel in Wuhan, China[J]. Tunnel Construction, 2023, 43(2): 296-304. (in Chinese))
- [2] 钱七虎, 陈 健. 大直径盾构掘进风险分析及对特大直径盾构挑战的思考[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(2): 157-164. (QIAN Qihu, CHEN Jian. Analysis of tunneling risks of large-diameter shield and thoughts on its challenges[J]. Tunnel Construction, 2021, 41(2): 157-164. (in Chinese))
- [3] 刘 畅. 软硬不均地层盾构掘进技术[J]. 中国建筑装饰装修, 2022(6): 159-161. (LIU Chang. Shield tunneling technology in soft and hard uneven stratum[J]. Interior Architecture of China, 2022(6): 159-161. (in Chinese))
- [4] 雍 毅, 张 斌, 罗求林, 等. 富水灰岩复合地层盾构施工安全风险分析及应对措施[J]. 建筑机械, 2023(6): 54-58, 65. (YONG Yi, ZHANG Bin, LUO Qiulin, et al. Risk analysis and countermeasures of shield tunnel passing through water-rich limestone composite stratum[J]. Construction Machinery, 2023(6): 54-58, 65. (in Chinese))
- [5] 曹利强, 张顶立, 房 倩, 等. 软硬不均地层中盾构施工引起的地层隆沉预测[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(3): 634-648. (CAO Liqiang, ZHANG Dingli, FANG Qian, et al. Ground vertical displacements due to shield tunnelling in double-layer soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(3): 634-648. (in Chinese))
- [6] 郭卫社. 软硬不均地层盾构技术的思考[J]. 隧道建设, 2016, 36(10): 1196-1201. (GUO Weishe. Reflecting on technologies for shield tunneling in heterogeneous ground[J]. Tunnel Construction, 2016, 36(10): 1196-1201. (in Chinese))
- [7] 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(增刊2): 3945-3952. (TAN Zhongsheng, HONG Kairong, WAN Jianglin, et al. Study on composite shield and construction technique in complex uneven strata[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(S2): 3945-3952. (in Chinese))
- [8] DUTTA P K. A theory of percussive drill bit penetration[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1972, 9(4): 543-544.
- [9] 杨振兴, 曾垂刚, 张 凯, 等. 软硬不均地层对盾构刀盘受力计算方法与分析[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(25): 11163-11169. (YANG Zhenxing, ZENG Chuigang, ZHANG Kai, et al. Calculation method and analysis of the force of soft and hard inhomogeneous stratum on the shield blade[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(25): 11163-11169. (in Chinese))
- [10] 何祥凡, 高 锋, 申兴柱, 等. 盾构隧道穿上软下硬地层掌子面顶推力优化研究[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(6): 1603-1610. (HE Xiangfan, GAO Feng, SHEN Xingzhu, et al. Optimization study on jacking force of the tunnel face when shield tunnel crossing the upper-soft and lower-hard stratum[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(6): 1603-1610. (in Chinese))
- [11] 张 涛. 软硬不均地层地铁盾构隧道荷载作用模式研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2023. (ZHANG Tao. Study on Load Action Mode of Shield Tunnel in Hard-Soft Heterogeneous Ground[D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2023. (in Chinese))
- [12] 吴起星, 安关峰, 周小文, 等. 软硬复合地层中盾构掘进刀盘受力分析与计算[J]. 土木工程学报, 2015, 48(增刊2): 321-326. (WU Qixing, AN Guanfeng, ZHOU Xiaowen, et al. Cutterhead mechanics analysis of shield tunneling in soft and hard complex stratum[J]. China Civil Engineering Journal,

- 2015, **48**(S2): 321-326. (in Chinese))
- [13] SIKARSKIE D L, ALTIERO N J. The formation of chips in the penetration of elastic-brittle materials (rock)[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1973, **40**(3): 791.
- [14] OZDEMIR L, WANG F D. Mechanical tunnel boring prediction and machine design: annual report[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1978, **15**(5): A105.
- [15] 谭忠盛, 洪开荣, 万姜林, 等. 软硬不均地层盾构姿态控制及管片防裂损技术[J]. *中国工程科学*, 2006, **8**(12): 92-96. (TAN Zhongsheng, HONG Kairong, WAN Jianglin, et al. Shield driven tunneling in the complex layer: direction control of shield and preventing segment crack[J]. *Engineering Science*, 2006, **8**(12): 92-96. (in Chinese))
- [16] 霍建勋, 王明年, 晁 峰. 起伏基岩地层盾构姿态控制及刀具配置分析[J]. *隧道建设*, 2017, **37**(增刊 1): 219-223. (HUO Jianxun, WANG Mingnian, CHAO Feng. Analysis of attitude control and cutting tool configuration of shield tunneling in fluctuated rock[J]. *Tunnel Construction*, 2017, **37**(S1): 219-223. (in Chinese))
- [17] 简 鹏, 杨 晨, 游宇嵩, 等. 盾构掘进姿态自动控制技术研究与应用 [J]. *隧道建设(中英文)*, 2023, **43**(10): 1795-1800. (JIAN Peng, YANG Chen, YOU Yusong, et al. Research and application of automatic control technology for shield tunneling attitude[J]. *Tunnel Construction*, 2023, **43**(10): 1795-1800. (in Chinese))
- [18] 吴秉键, 吴惠明, 胡 琛, 等. 基于数据驱动的盾构自主姿态控制体系设计和应用[J]. *隧道建设(中英文)*, 2023, **43**(3): 478-485. (WU Bingjian, WU Huiming, HU Min, et al. Design and application of a data-driven shield autonomous attitude control system[J]. *Tunnel Construction*, 2023, **43**(3): 478-485. (in Chinese))
- [19] 李惠平, 夏明耀. 盾构姿态自动控制技术的应用与发展[J]. *地下空间*, 2003(1): 75-78, 109. (LI Huiping, XIA Mingyao. Application and development of automatic direction control of the shield machine[J]. *Underground Space*, 2003(1): 75-78, 109. (in Chinese))
- [20] YANG H Y, SHI H, GONG G F. Motion control of thrust system for shield tunneling machine[J]. *Journal of Central South University of Technology*, 2010, **17**(3): 537-543.
- [21] 田瑞忠, 宋曙光, 张延欢. 软硬不均地层地铁盾构姿态超限剖析及控制方法研究[J]. *中国高新科技*, 2019(18): 102-104. (TIAN Ruizhong, SONG Shuguang, ZHANG Yanhuan. Analysis and control method of metro shield posture overrun in soft and hard uneven stratum[J]. *China High-Tech*, 2019(18): 102-104. (in Chinese))
- [22] 金 慧. 超软土地层盾构掘进姿态及其对地层变形的影响 [D]. 北京: 北京交通大学, 2022. (JIN Hui. *Shield Tunneling Attitude and Its Influence on Ground Deformation in Ultra-Soft Soil*[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2022. (in Chinese))
- [23] 朱合华, 徐前卫, 郑七振, 等. 软土地层土压平衡盾构施工参数的模型试验研究[J]. *土木工程学报*, 2007, **40**(9): 87-94. (ZHU Hehua, XU Qianwei, ZHENG Qizhen, et al. Experimental study on the working parameters of EPB shield tunneling in soft ground[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2007, **40**(9): 87-94. (in Chinese))